

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Eng.

PAR
Viorel PANTELIMON NEGRUT

LA CONCEPTION ET LA GESTION DES BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS DURABLES

MONTREAL, LE 15 JUIN 2011

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Edmond T. Miresco, professeur, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Paul Gervais, professeur, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Gabriel Lefebvre, membre du jury, professeur,
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

LE 28 AVRIL 2011

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

D'abord, j'évoquerai quelques éléments définitoires qui m'ont conduit à choisir le thème de recherche de la forme bâtie de la construction comme modèle d'analyse d'un bâtiment durable.

Ayant une formation universitaire acquise en Europe (un baccalauréat de six ans en architecture, une maîtrise en restauration des monuments, ensembles et sites historiques, en collaboration avec l'École française de la conservation et de la restauration architecturale, urbaine et paysagère, « Centre des Hautes Études de Chaillot » de Paris), et un doctorat dans le domaine de l'histoire de l'architecture et de la planification urbaine de l'Université « LB » de Hermannstadt, je pourrais affirmer que j'ai commencé à comprendre, au fil du temps, les grands enjeux du « vieux continent », y compris les civilisations dont nous avons hérité ce que nous sommes aujourd'hui.

Une fois que je me suis rendu sur le « nouveau continent », afin de bien comprendre l'organisation du système nord-américain, j'ai considéré qu'il était nécessaire de suivre le cours de maîtrise en urbanisme de l'Université de Montréal et, de plus, de perfectionner mes connaissances en développement durable et gestion de projet en terminant le programme de maîtrise en ingénierie à la prestigieuse École de technologie supérieure de Montréal.

Ensuite, le fait d'avoir travaillé pendant plusieurs années comme architecte, urbaniste, designer principal et chargé de projets pour différentes entreprises et divers paliers gouvernementaux m'a permis de mieux saisir les enjeux à considérer dans la réussite d'un projet, qu'il soit architectural, d'ingénierie ou de planification urbaine.

Étant titulaire de trois cours dans les domaines du design paysager, aménagement du territoire et développement régional, à la Faculté d'horticulture de l'Université des sciences agricoles du Banat de Timisoara et à l'Université Polytechnique, Faculté d'architecture et de génie civil de Timisoara, et une étroite collaboration avec l'Institut des études

socio-humaines de l'Europe de l'Est, cela m'a permis de connaître la problématique actuelle des grands dossiers dans le processus complexe de l'aménagement d'une communauté métropolitaine, urbaine ou rurale.

Enfin, architecte en France et au Royaume-Uni, urbaniste au Canada, j'ai pu comprendre les enjeux de la profession dans le contexte de la mondialisation, de l'épuisement des ressources naturelles et du changement climatique.

Aujourd'hui, nous entendons de plus en plus parler de développement durable.

La nouvelle conception de la nécessité de bâtir durable est devenue mon credo depuis plus de quinze ans, en réaction au développement forcé et incontrôlable. J'ai compris que l'initiation à cette vision doit commencer à une petite échelle dans la société : l'individu qui construit et exploite le bâtiment. Ainsi, l'individu arrivera à comprendre de quoi il s'agit quand il transformera son environnement. Il bâtira durable.

Dans ce contexte, le défi consiste à explorer les possibilités de concevoir un bâtiment qui aidera à satisfaire les besoins de la société à long terme. La technologie de la construction durable traite de l'énergie solaire, géothermale, de l'éclairage, de l'orientation du bâtiment, de toitures vertes, de murs, de matériaux de construction et d'émissions de gaz à effet de serre. Elle parle de la forme bâtie de la construction et de l'implication directe de son empreinte dans le sol par rapport à la consommation d'énergie et à l'émission de CO₂ d'un bâtiment.

Les pages suivantes illustrent la démarche de prise de décision dans le cas d'un nouveau projet ou dans l'étude de la forme bâtie d'une construction, qui a un rôle déterminant pour le choix du design. Cette illustration ne constitue pas vraiment un modèle. Toutefois, elle a pour but de mettre à la portée des professionnels une telle démarche lorsqu'ils doivent prendre une décision en matière de design écologique et durable.

REMERCIEMENTS

À tout prendre, je ne peux oublier d'attirer l'attention sur quelques personnes : mon premier maître, monsieur le professeur émérite et architecte, restaurateur de monuments et historien de l'architecture Gheorghe-Vorona Curinski, Ph. D., à mon directeur de projet final dans le cadre de mon baccalauréat en architecture, monsieur le professeur architecte Radu Tanasoiu, à mon directeur de recherche dans le cadre du programme de maîtrise en restauration et conservation de monuments, ensemble et sites historiques et un de mes correcteurs officiels pour ma thèse de doctorat, monsieur le vice-recteur de l'Université d'architecture et d'urbanisme Ion Mincu de Bucarest, le professeur architecte Nicolae Lascu, Ph. D., à l'architecte et mon directeur de recherche pour ma thèse de doctorat, monsieur le professeur académicien Paul Niedermaier, Ph. D., à mes partenaires de discussions philosophiques, messieurs Alexandru Roz, Ph. D., professeur et historien, doyen de la Faculté des sciences humaines, politiques et administratives de l'UVVG d'Arad et à Sever Trifu, Ph. D., professeur des études américaines, britanniques et canadiennes à l'ULBS, à mes anciens collègues à l'Université Polytechnique, Faculté d'architecture et génie civil de Timisoara, madame la professeure architecte Smaranda Bica, Ph. D., et à monsieur le professeur architecte Teodor-Octavian Gheorghiu, Ph. D., à mes anciens collègues à la Faculté d'horticulture de l'Université des sciences agricoles du Banat de Timisoara, madame la professeure Maria Bala, Ph. D., monsieur le professeur Emil Draganescu, Ph. D., et monsieur le professeur Aurel Lazureanu, Ph. D. et à monsieur l'académicien, le Secrétaire Générale de l'Académie Roumaine, l'ingénieur et l'économiste, professeur, Ioan-Paun Otiman, Ph. D., tous mes supporters tout au long de mon évolution professionnelle et académique, qui, en fait, ont eu le don de me faire comprendre que l'architecture, le cadre bâti, l'aménagement du territoire sont les catalyseurs entre la technologie disponible à un moment donné et les besoins de la société et qu'ils sont le fruit d'une civilisation et l'héritage pour les générations futures.

Je ne peux oublier de mentionner l'expérience enrichissante que j'ai vécu vécue à Montréal avec d'excellents professeurs dans le cadre du programme de maîtrise en urbanisme où j'ai

commencé à être sensibilisé à l'impact de la qualité de l'environnement bâti ainsi que des politiques d'aménagement du territoire au Canada, à savoir madame Marie Lessard, madame Marie-Odile Trépanier, madame Béatrice Sokoloff, monsieur Gérard Beaudet, monsieur Daniel Gill et monsieur Roger Bruno Richard. Tout spécialement, un grand merci à monsieur le professeur honoraire Michel-Alain Barcelo, mon directeur de recherche, qui m'a apporté son aide tout au long du programme de maîtrise en urbanisme à l'Université de Montréal, qui a été pour moi la continuité de la culture européenne et qui m'a encouragé dans les moments difficiles d'adaptation sur le continent nord-américain.

De plus, les professeurs, Hugues Rivard, Paul Gervais, Daniel Forgues, de l'École de technologie supérieure de Montréal, ont contribué à ma formation comme gestionnaire de projet dans le programme de maîtrise en génie. Par son horizon ouvert et sa ténacité, pour la nouvelle technologie appliquée, je suis fier d'avoir été supervisé, pendant la rédaction de mon mémoire, par monsieur le professeur, Edmond T. Miresco, Ph. D., ingénieur, pour obtenir le diplôme de maîtrise en génie.

... à Monseigneur Sorin Seviciu pour le passé, le présent et l'avenir...

Mes parents, Elvira-Lucia et Dumitru Pantelimon ainsi que ma chère épouse Olympia, je tiens à les remercier de tout cœur pour leur amour et leur soutien qui m'ont accompagné chaque jour dans mon métier d'architecte.

LA CONCEPTION ET LA GESTION DES BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS DURABLES

Viorel PANTELIMON NEGRUT

RÉSUMÉ

L'homme interagit sur son environnement depuis toujours. Ce n'est, toutefois, que très récemment dans l'histoire post industrielle mondialisée, que des considérations environnementales sont mises en avant dans les activités humaines. Parmi les différents facteurs responsables du réchauffement climatique, les bâtiments contribuent grandement à l'émission de gaz à effet de serre.

Jusqu'à maintenant, l'analyse des bâtiments a été effectuée par rapport aux matériaux de construction, à l'enveloppe du bâtiment ou à la relation entre les différentes sources d'énergie et la construction.

L'approche préconisée afin de diminuer l'impact des bâtiments résidentiels sur l'environnement est d'améliorer leur consommation énergétique et leurs émissions de dioxyde de carbone (CO₂), l'intégration des différents intervenants du milieu, l'équipe intégrée, et de positionner le gérant de projet dans le cycle de vie d'une construction.

L'objectif principal est de démontrer comment la forme bâtie d'une construction peut être analysée en utilisant des outils informatiques et d'amener la personne qui conçoit ce bâtiment et le gestionnaire de projet à prendre de bonnes décisions, au point de vue opérationnel, environnemental, de la durée de réalisation, du cycle de vie et de coût associés au développement de la construction. Il est à considérer que la forme bâtie en plan d'une construction crée un volume d'édifice qui perd ou qui gagne plus d'énergie et assure une émission différente de CO₂ durant sa durée de vie.

En bref, la thématique des bâtiments résidentiels durables dégage plusieurs problématiques de recherches intéressantes sur les certifications, la conception, les technologies et la gestion.

Mot-clés: Forme bâtie, consommation d'énergie, control d'émission de CO₂, gestion de bâtiment

DESIGN AND MANAGEMENT OF SUSTAINABLE RESIDENTIAL BUILDINGS

Viorel PANTELIMON NEGRUT

ABSTRACT

Mankind is bond to its environment and interacts with it endlessness. Environmental impacts of human activities commenced to gain interest and were given consideration only recently within the global post-industrial era. Amongst various elements responsible for global warming, buildings contribute significantly to the emission of greenhouse gases.

Until now, studies on buildings' environmental footprint were focused on retrofitting construction materials, building envelope or the relationship between buildings and energy use.

The solution to reducing the environmental impacts of residential buildings is to improve their energy consumption and emissions of carbon dioxide (CO₂) and envision a new type of stakeholders' framework integration, the "Integrated Team", and a new profile for the manager, the "Environmental Project Manager".

Climate change mitigation for residential development means the introduction in the equation of a new type of analysis: the "Built Form". The main objective is to demonstrate the choice of the built form supported by technical analysis and computer modeling. The approach allows for assessing operational solutions, environmental impacts, project implementation, life-cycle, construction development and reclamation costs, in an integrated manner. Given the volume typology of the built form, buildings preserve or lose more energy and generate various levels of carbon dioxide (CO₂) emissions during their lifespan.

The thesis overviews a series of sustainable development concepts, planning and design, technologies, residential building certification, management, with the aim of shifting from traditional residential development to environmental responsible development.

Keywords: building form, energy consumption, CO₂ emissions control, building management

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	18
CHAPITRE 1 MÉTHODOLOGIE.....	22
1.1 La problématique générale.....	23
1.2 Historique, situer le sujet, la problématique dans un contexte scientifique et social (observer la pertinence)	25
CHAPITRE 2 LE BÂTIMENT RÉSIDENTIEL DURABLE	28
2.1 La réglementation et les bâtiments résidentiels durables.....	28
2.1.1 La certification R2000 au fédéral	29
2.1.2 La certification Novoclimat au Québec	30
2.1.3 La certification LEED for homes.....	31
2.1.4 La certification versus la conception	32
2.2 Le processus de conception des bâtiments durables	33
2.2.1 Description de la problématique	33
2.2.2 Description du processus de conception conventionnelle	34
2.2.3 Description du concept de design écologique.....	35
2.2.4 Description du processus de conception intégrée	38
2.3 La technologie et la construction durables.....	41
2.3.1 L'énergie solaire et l'éclairage.....	42
2.3.2 L'orientation du bâtiment	43
2.3.3 Les toitures.....	44
2.3.4 Les murs.....	44
2.3.5 Les matériaux de construction	45
2.4 L'exploitation des bâtiments durables.....	46
2.4.1 Le court terme	47
2.4.2 Le long terme	48
CHAPITRE 3 LA VOLUMÉTRIE ET LA FORME DU BÂTIMENT, L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET L'ÉMISSION DE CO ₂	53
CHAPITRE 4 LA MODÉLISATION VIRTUELLE ET LES CRITÈRES DE BASE DU BÂTIMENT.....	53
4.1 Vers la modélisation et l'analyse virtuelle du bâtiment.....	71
4.2 Critères de base des bâtiments	79
4.2.1 Critères de base d'activité.....	79
4.2.2 Critères de base de construction	83
4.2.3 Critères de base de vitrage et critères de base de façade	84
4.2.4 Critères de base d'éclairage	88

4.2.5	Critères de base de CVC	92
4.2.6	Normes énergétiques.....	96
4.3	Le calcul de la conception de chauffage et de la climatisation.....	96
4.3.1	Conception de chauffage.....	97
4.3.1.1	Résultats de la répartition des pertes thermiques	99
4.3.1.2	Récapitulatif – conception de chauffage	102
4.3.2	Conception de la climatisation.....	103
4.3.2.1	Résultats de la conception de climatisation	104
4.3.2.2	Récapitulatif – conception de climatisation	110
CHAPITRE 5 L'ANALYSE ET LA COMPARAISON DES BÂTIMENTS		53
5.1	La forme bâtie en plan et la volumétrie d'une construction résidentielle sur plusieurs étages	113
5.2	L'analyse d'efficacité énergétique des bâtiments	117
5.3	La simulation et l'analyse des émissions de CO ₂ des bâtiments.....	128
5.4	Analyse de coûts en fonction des superficies des murs extérieurs versus la consommation d'énergie électrique annuelle.....	134
5.5	Analyse de coûts en fonction des superficies des murs extérieurs versus les émissions de CO ₂ des bâtiments.....	137
CONCLUSION.....		142
RECOMMANDATIONS		149
ANNEXE I	LES COÛTS DES MURS EXTERIEURS AYANT UNE SURFACE DE VITRAGE DE 15% ET DE 40%	153
ANNEXE II	LA CONSOMMATION TOTALE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DU BÂTIMENT	166
ANNEXE III	L'ÉMISSION CO ₂ DU BÂTIMENT.....	179
BIBLIOGRAPHIE.....		192

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 4.1	Critères de base d'activités81
Figure 4.2	Critères de base de construction83
Figure 4.3	Critères de base de vitrage et critères de base de façade86
Figure 4.4	Critères de base de la fenestration87
Figure 4.5	Critères de base de portes et aérations88
Figure 4.6	Le contrôle d'éclairage de type Continu et Gradation continue/Extinction89
Figure 4.7	Critères de base d'éclairage91
Figure 4.8	Critères de base de systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air (CVC)94
Figure 4.9	Conception de chauffage – la température et la perte de chaleur101
Figure 4.10	Récapitulatif – conception de chauffage102
Figure 4.11	Conception de climatisation – la température et le gain de chaleur105
Figure 4.12	Récapitulatif – conception de climatisation111
Figure 5.1	Six bâtiments ayant une forme bâtie en plan différente, d'un volume approximativement égal à 19 600 m ³114
Figure 5.2	Six bâtiments ayant une forme bâtie en plan différente et les surfaces bâties approximativement égales à 700 m ² écapitulatif – conception de climatisation115
Figure 5.3	Coupe verticale de mur116
Figure 5.4	Le dimensionnement du Bâtiment – 1 en Forme 'Carré'119
Figure 5.5	Le dimensionnement du Bâtiment – 2 en Forme de 'L'120
Figure 5.6	Le dimensionnement du Bâtiment – 3 en Forme 'Carré avec Atrium'120
Figure 5.7	Le dimensionnement du Bâtiment – 4 en Forme de 'U'121

Figure 5.8	Le dimensionnement du Bâtiment – 5 en Forme de ‘H’	121
Figure 5.9	Le dimensionnement du Bâtiment – 5 en Forme de ‘T’	122
Figure 5.10	La consommation mensuelle d’énergie électrique pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 15% de la surface générale des murs extérieures	123
Figure 5.11	La consommation totale annuelle d’énergie électrique pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 15% de la surface générale des murs extérieures	124
Figure 5.12	La consommation mensuelle d’énergie électrique pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 40% de la surface générale des murs extérieures	125
Figure 5.12’	La consommation totale annuelle d’énergie électrique pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 40% de la surface générale des murs extérieures	126
Figure 5.14	Comparaison de la consommation d’énergie électrique entre les bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15% et 40%	127
Figure 5.15	L’émission mensuelle de CO ₂ pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 15% de la surface générale des murs extérieures	129
Figure 5.16	L’émission totale annuelle de CO ₂ pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 15% de la surface générale des murs extérieures’émission totale annuelle de CO ₂	130
Figure 5.17	L’émission mensuelle de CO ₂ des bâtiments ayant la surface de vitrage de 40% de la surface générale des murs extérieures	131
Figure 5.18	L L’émission totale annuelle de CO ₂ des bâtiments ayant la surface de vitrage de 40% de la surface générale des murs extérieures	132
Figure 5.19	Comparaison des émissions de CO ₂ entre les bâtiments ayant une surface de vitrage des murs extérieurs de 15% et de 40%	133
Figure 5.20	Comparaison du ratio coût /consommation d’énergie électrique annuelle entre les bâtiments ayant une surface de vitrage des murs extérieurs de 15% et de 40%	136

Figure 5.21	Comparaison du ratio coût / Émission annuelle de CO ₂ entre les bâtiments ayant une surface de vitrage des murs extérieurs de 15% et de 40%	140
-------------	--	-----

LISTE DES TABLEAU

	Page
Tableau 5.1	Ratio coût des superficies des murs extérieurs <i>versus</i> la consommation d'énergie électrique d'après une surface de vitrage de 15 %.....134
Tableau 5.2	Ratio coût des superficies des murs extérieurs <i>versus</i> la consommation d'énergie électrique ayant une surface de vitrage de 40 %.....135
Tableau 5.3	Ratio coût des superficies des murs extérieurs <i>versus</i> les émissions de CO ₂ annuelles des bâtiments ayant une surface de vitrage de 15 %tockage solaire138
Tableau 5.4	Ratio coût des superficies des murs extérieurs <i>versus</i> les émissions de CO ₂ annuelles des bâtiments ayant une surface de vitrage de 40 %139

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

3D	La synthèse tridimensionnelle d'image
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - États-Unis
AutoCAD	Logiciel de DAO (dessin assisté par ordinateur)
Bildtrad	Logiciel d'analyse de l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers – Grande-Bretagne
CMEH	Code modèle national de l'énergie pour les habitations – Canada
CNB95	Code national du bâtiment 1995
CNUED	Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement
CNRC	Conseil national de recherches Canada
CNRC-IRC	Conseil national de recherches Canada - Institut de recherche en construction
CO ₂	Dioxyde de carbone
CoP	Coefficient de performance
CPM	Critical Path Method
CTA	Centrale de traitement d'air
CVC	Système de chauffage, de ventilation et climatisation
DD	Développement durable
DesignBuilder	Simulation thermique dynamique du bâtiment
Ecotect	Logiciel de gestion efficace de l'énergie du bâtiment
EE4	Logiciel de simulation pour l'analyse énergétique du bâtiment
EnergyPlus	Energy Simulation Software
EUROPAN	Concours des appels d'idées anonymes, ouverts, publics et européens
GANTT	Diagramme à barre
IES	Integrated Environmental Solutions
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LEED-H	LEED for homes
MAP	Mémoire d'avant projet

MEDD	Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement – France
MIP	Mémoire d'identification de projet
PDD	Plan de développement durable
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PVC	Polyvinyl chloride
R-2000	A voluntary energy efficiency standard for new house
RETScreen	Logiciel d'analyse de projets d'énergies propres
SketchUp	Logiciel de modélisation 3D
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature
USGBC	United States Green Building Council
VAV	Volume d'Air Variable

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Éclairement lumineux - correspond à un flux lumineux reçu par unité de surface. L'unité SI d'éclairement lumineux, le lux (lx), correspond à un flux lumineux de 1 lumen (lm) couvrant uniformément une surface de 1 mètre carré (m²)

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$$

Indice u - coefficient de transmission de chaleur - indique la quantité de chaleur qui traverse un mètre carré de surface en une seconde, quand la différence de la température de l'air aux deux côtés de la surface est d'un kelvin.

INTRODUCTION

Lorsque nous nous penchons sur l'histoire de l'humanité, nous nous rendons compte que les formes d'énergies, de sociétés et de bâtiments sont intimement liées. On entend de plus en plus parler de développement durable, de nouvelles technologies, de maison saine, écologique, verte, durable, éco-énergétique et soutenable. Ce sont autant de termes utilisés pour montrer que ce concept gagne en popularité et qu'il s'impose par la logique des idées qu'il véhicule et préconise, soit celui des bâtiments durables. Ces termes sont de plus en plus utilisés dans les milieux sociaux et professionnels.

Depuis le début de l'ère industrielle, l'humanité a progressé grâce à l'utilisation des énergies fossiles. Les combustibles fossiles contribuent aux émissions de CO₂ et également à la déforestation ; ils servent à la fabrication du ciment. La hausse des émissions par personne a accompagné le développement industriel, qui a lui-même apporté la croissance. En revanche, les seules occasions de diminution des émissions de CO₂ ont été fournies par des événements catastrophiques (guerres, crises, etc.).

Récemment, suite à des recherches approfondies, plusieurs scientifiques et différents organismes gouvernementaux ont découvert que l'emploi de l'énergie non renouvelable, du pétrole et du gaz naturel modifie l'atmosphère à cause d'une trop forte concentration en CO₂, entraînant de ce fait le réchauffement climatique. D'autres gaz cependant ont des répercussions sur l'effet de serre (méthane, protoxyde d'azote, etc.), mais on peut dire que le CO₂ représente environ 60 % du problème, ce qui est très inquiétant.

Le niveau des émissions des gaz à effet de serre est très variable d'un pays à l'autre, selon la richesse globale, le mode de production d'électricité, le régime alimentaire et le stade de son industrialisation. Certains pays à la population importante fournissent, malgré leur faible industrialisation, une grande partie des émissions mondiales. Il apparaît que les émissions par personne dues à la déforestation sont plutôt à la baisse ainsi que celles causées par

l'exploitation du pétrole, alors que les émissions dues au charbon et au gaz sont en hausse ininterrompue.

Le CO₂, non seulement augmente, mais il augmente de plus en plus rapidement. Puisque l'effet de serre génère une chaleur beaucoup trop intense, il met la planète en péril de connaître des changements climatiques majeurs.

Étant donné la complexité du problème et l'imprévisibilité de la situation, certains pays développés ou en transition ont pris, dans le cadre du Protocole de Kyoto de 1997, l'engagement de réduire au plus vite les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle du globe. Dans le cadre du Protocole auquel adhèrent 141 pays, les nations s'efforcent de satisfaire les exigences du protocole.

D'après les statistiques, il est à remarquer que la première source mondiale d'émission de CO₂ est la production d'électricité. L'énergie nécessaire au développement et à la survie de notre civilisation joue un rôle primordial dans notre existence. Les analyses scientifiques font ressortir que les bâtiments sont de plus grands émetteurs de CO₂ que les transports, donc que le secteur du bâtiment (les logements) constitue un enjeu majeur dans la lutte contre les changements climatiques. Les bâtiments, qu'ils soient résidentiels ou tertiaires, sont à l'origine d'un large pourcentage des émissions de gaz à effet de serre, c'est pourquoi tous les acteurs de ce secteur doivent être mobilisés dans la lutte pour la réduction de ces gaz.

Le secteur du bâtiment est l'une des activités visées par les obligations contractées par les pays adhérents dans le cadre du Protocole de Kyoto imposant une réduction des émissions de CO₂. Le bâtiment est le premier consommateur d'énergie et il compte parmi les émetteurs les plus importants de gaz à effet de serre. Mais dans le même temps, c'est aussi un secteur à forts potentiels d'économies d'énergie.

Aujourd'hui, les plus gros émetteurs de CO₂ sont les États-Unis et la Chine. Il est intéressant de noter que les pays dont les émissions ont baissé ont été victimes de récession économique

et que, durant la même période, la forte croissance de certains pays (Chine, Mexique, Inde, etc.) a engendré une forte croissance des émissions.

Malheureusement, avancement industriel et émissions sont fortement liés. C'est pourquoi si l'on veut se préoccuper sérieusement du problème, on ne doit pas refuser d'utiliser des énergies renouvelables et autres moyens de contrôle et de design des bâtiments résidentiels durables.

Comme l'énergie est directement liée aux émissions de CO₂, il est nécessaire de savoir comment un nouveau type de bâtiment peut être envisagé. Cette étude démontrera qu'il est urgent de mettre en place un programme volontaire de décroissance des émissions de CO₂. La préoccupation de concevoir un bâtiment d'habitation en utilisant sa forme planimétrique et volumétrique commence à être digne d'intérêt. La nécessité d'occuper moins d'espace a été concrétisée par la construction des bâtiments en hauteur, sur plusieurs étages. Les occupants pourront également avoir davantage recours au transport en commun, qui est moins consommateur d'énergie que le transport individuel en automobile, etc.

Il y a quelques questions primordiales : La croissance économique, la construction de nouveaux bâtiments résidentiels et la lutte contre le changement climatique sont-elles compatibles ? Comment peut-on concevoir un bâtiment dans une perspective de développement durable ? Et comment pourrait-on accomplir la mise en œuvre de cet objectif par une bonne gestion de projet, tout en respectant des coûts minima ?

Trois principes motivent l'initiation de ce sujet et tentent de répondre aux questions posées ci-dessus :

- En premier lieu, la conception écologique ou le développement durable est, à son niveau le plus fondamental, une approche cherchant à assurer que les générations à venir apprécieront l'accès continu aux ressources naturelles;
- En second lieu, les concepteurs de constructions peuvent faire une différence significative et ils peuvent contribuer à permettre la venue d'un avenir durable;
- Enfin, l'habitat humain mérite une plus grande attention en termes de conception durable.

Devant tous ces faits, il est impérieux de faire baisser les émissions de gaz carbonique, par conséquent les gaz à effet de serre et ainsi diminuer le réchauffement de la planète. L'humanité n'est pas encore, comme certains l'ont prétendu, rendue à la vingt-cinquième heure. Pourtant, chaque journée compte. Comme nous le savons, le CO₂ est produit par de l'énergie non renouvelable. Pour éviter de perdre les bénéfices du niveau de vie atteint par la civilisation, il est impérieux de trouver rapidement des solutions de remplacement. Les émanations de CO₂ constituent ce qu'il y a de plus dangereux pour une planète déjà terriblement menacée. Il faut s'attaquer à ce problème immédiatement, en trouvant des solutions de remplacement aux énergies polluantes. Or, plusieurs de ces solutions existent actuellement, il suffit de les utiliser d'une manière convenable. Qu'il s'agisse d'éco villages ou d'agglomérations modernes utilisant au maximum le transport en commun, du chauffage de quartier ou de l'énergie solaire, le temps presse. C'est pour cette raison que cette étude se penche sur les émissions de CO₂ et tentera d'apporter des solutions énergétiques alternatives efficaces.

CHAPITRE 1

MÉTHODOLOGIE

Afin de monter notre dossier, nous essayons de faire une image globale de la problématique générale du sujet. Ensuite, nous situerons le sujet, la problématique dans un contexte scientifique et social, afin de démontrer la pertinence de notre recherche.

Pour arriver à la démonstration de notre théorie sur le bâtiment résidentiel durable, nous utiliserons une approche mixte, se traduisant par l'utilisation d'un exercice inductif et déductif.

L'exercice inductif se veut une revue bibliographique de l'information disponible sur la conception, la construction et la gestion des bâtiments résidentielles durables. Nous ferons en premier lieu un historique du développement durable et des aspects touchant les bâtiments durables. Nous dégagerons ensuite quatre problématiques différentes se rapportant à la conception et à la construction des bâtiments durables, avant d'utiliser l'exercice déductif de notre démonstration.

Le but de l'exercice déductif est de produire une analyse au niveau de la modélisation spatiale du bâtiment, sur la maîtrise de la simulation d'efficacité énergétique de la construction et des émissions de CO₂, tout en tenant compte de la forme en plan bâtie d'une construction résidentielle.

Enfin, les idées principales de la recherche seront résumées.

1.1 La problématique générale

Au cours des dernières années, dans une société en profond changement, nous observons une segmentation du marché, phénomène qui conduit les architectes à une réflexion sur le modèle de l'habitat répondant aux attentes d'une nouvelle clientèle. En raison de ce qui précède, les architectes et les ingénieurs ont porté leur attention sur la recherche des nouveaux besoins d'organisation spatiale, notamment sur l'évolution et sur le développement de l'habitat individuel. La demande est en cristallisation, car des groupes¹ et des sous-groupes sociaux susceptibles d'adhérer à de nouvelles offres adaptées apparaissent. De multiples ouvertures sont à développer quant à la conception de nouveaux types de bâtiments résidentiels, si on prend en considération la diversité, la dimension collective, les besoins d'organisation spatiale et l'impact environnemental.

Le concept d'un habitat qui soit aisément adaptable aux changements de la vie des humains qu'il héberge est naturellement très ancien. À vrai dire, l'évolution de la technique de construction tout au long du XIX^e siècle avait entraîné la consolidation du bâti, puis la naissance de l'idée de l'habitat évolutif.

Prenant des exemples européens, plusieurs préoccupations à l'échelle nationale (PAN en France)², ensuite continentale (EUROPAN)³, nous montrent les efforts de la recherche sur le développement du logement, sur le rapport cellule-logement et sur le mode de vie familial. Notre volonté de recherche sur le bâtiment résidentiel est issue de la problématique actuelle de l'innovation de l'architecture et de l'ingénierie qui portent à la qualité du logement une

¹ L'identification nous semble importante pour déterminer de nouveaux produits conformes aux nouveaux modes de vie, car nous constatons une complexité des regroupements familiaux : familles recomposées, accueil de parents âgés, allongement du temps de cohabitation parents-enfants.

² Programme Architecture Nouvelle est, en réalité, un concours d'idées destinées à faire connaître de jeunes architectes. Il a été lancé en France il y a vingt ans.

³ La formule du Programme Architecture Nouvelle reprise au niveau européen : EUROPAN.

attention nouvelle qui dépasse le premier souci, celui quantitatif de la reconstruction d'après la Deuxième Guerre mondiale.

La démarche, en fait, pourrait se présenter comme une extrapolation de l'architecture à la société : une composition socio-architecturale considérant réintégrer le résident, comme intervenant primordial du déroulement de la conception, puis la mise en œuvre de son logement, sur la base d'un consensus culturel et de longue durée. La problématique ne peut donc être ici purement architecturale ou d'ingénierie, elle sera aussi bien sociologique que psychologique, afin de définir le modèle de la nouvelle résidence durable. Dans l'ensemble, le bâtiment durable se situe au carrefour de plusieurs champs connexes et interdépendants les uns par rapport aux autres. En raison de ce qui précède, les enjeux suivants ont été identifiés :

- La préfabrication de composantes de la construction, la technologie ainsi que la planification, la conception et la gestion d'un bâtiment.
- La personnalisation des logements, recherche visant aussi bien la sociologie de l'habitat écologique.
- Le consensus des professionnels, à savoir les architectes, les urbanistes, les planificateurs et les ingénieurs qui auront le devoir de se mettre d'accord sur l'avenir du bâtiment résidentiel durable, écologique, en dépassant le fonctionnalisme, en retrouvant la place de l'individu dans la société présente et dans celle de l'avenir.

Dans l'intégration urbaine, sur un foncier plus réduit, la recherche vise à trouver la formule optimale de conception et de gestion de la construction dans la typologie spécifique de la résidence écologique de la ville, qui est dotée du pouvoir de répondre aux demandes des gens, aux exigences rencontrées le plus souvent dans plusieurs villes nord-américaines, désormais dans la maison banlieusarde.

1.2 Historique, situer le sujet, la problématique dans un contexte scientifique et social (observer la pertinence)

« Une grande époque a commencé, animée d'un esprit nouveau, un esprit de construction et de synthèse conduit par une conception claire. » (Le Corbusier, 1920)

Par l'ampleur de cette vision, Le Corbusier a influencé la dynamique du développement résidentiel, et à cet égard, plusieurs ouvrages témoignent de ce spectacle, à savoir la « Ville contemporaine »⁴, le projet pour Alger⁵ et les « Cités radieuses de Marseille »⁶.

Les inquiétudes d'aujourd'hui concernant le modèle d'habitat et particulièrement le bâtiment résidentiel durable constituent une préoccupation majeure qu'on rencontre chez les architectes et les ingénieurs.

Mais d'où le terme « développement durable » vient-il ? Quelle est la place des bâtiments dans ce type de développement ?

La documentation portant sur ce sujet est sporadique entre les années 1900 et 1940.

En 1951, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) a publié un premier rapport traitant de l'interaction dont nous devons tenir compte entre notre économie et l'écologie. Ce constat agissait alors comme une première alerte officielle sur l'état de notre environnement et le rapport des activités humaines. Il s'intitulait « Rapport sur l'État de l'Environnement dans le Monde » (Carter, 2002). Le constat se confirme de plus belle dans les années 1960 avec les atteintes répétées à l'environnement (MEDD, 2005).

⁴ Projet présenté lors du Salon de 1922.

⁵ Projet présenté en 1929. Il s'agit d'une bande d'habitations continue et ondulante.

⁶ Projet représentatif de l'œuvre urbaine en France de Le Corbusier, présenté en 1947.

En ce qui a trait aux technologies et à l'industrialisation du bâtiment, les publications spécifiques comptent de nombreux titres.

Le rapport *The Boudaries of growth*, publié en 1972, « fut le premier à établir que la production industrielle, l'accroissement de la consommation des matières premières et la pollution de l'environnement menacent le futur de l'humanité » (Széll, 2003). Toujours en 1972, le concept d'*écodéveloppement* prend forme lors d'une conférence onusienne à Stockholm sur l'environnement humain. Ce concept cherche à créer un parallèle entre les objectifs économiques, sociaux et environnementaux. Il se définit comme un « modèle de développement économique compatible avec l'équité sociale et la prudence écologique, qui serait basé sur la satisfaction des besoins plutôt que sur une augmentation incontrôlée de l'offre ». Après la crise énergétique de 1973-1974, les spécialistes analysent les composantes des bâtiments et réalisent qu'il y a des échanges constants avec l'environnement (Széll, 2003).

Dans les années 1980, au moyen d'une participation active des résidents à la conception et à la réalisation du cadre bâti, la tendance de la vision des architectes vient répondre aux besoins des gens, notamment à la reconquête de la complexité perdue de la ville traditionnelle.

En 1980, l'UICN publie un autre rapport intitulé *Stratégie Mondiale de la Conservation*, qui propose le terme « sustainable development ». Les années 1980 permettent aussi aux gens de saisir la portée de la pollution de leur environnement : « existence de pollutions dépassant les frontières, dérèglements globaux, “trou” dans la couche d'ozone, pluies acides, désertification, effet de serre, déforestation » (MEDD, 2005). En 1987, la *Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (WCED)*, aussi appelée la *Commission Brundtland*, publie le rapport *Notre Avenir à Tous*. Cette conférence consacrera le concept de développement durable proposé en 1980 et qui a été défini comme « un développement qui

répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (Carter, 2002).

En 1992 a eu lieu le *Sommet de Rio de Janeiro*, une Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED), aussi appelée *Sommet de la Planète Terre*. Lors de cette conférence historique le secteur de la construction a été mis à l'avant scène et il a été établi qu'étant l'un des secteurs créant le plus de dommages à l'environnement, il devait subir certains changements. On a alors déterminé qu'il était primordial d'harmoniser la construction durable et l'environnement construit, et que ces concepts devaient être instaurés à l'échelle planétaire (Carter, 2002), (MEDD, 2005). C'est seulement cinq ans plus tard, en 1997, que les parties prenantes, au *Sommet de Rio*, plus cinq autres parties, se sont rencontrées pour se mettre d'accord sur une nouvelle cible concernant le développement international et qu'il a été décidé que chaque pays devrait instaurer une stratégie de développement durable pour l'an 2002 (Carter, 2002). Les communautés écologiques (ecological housing) ont été identifiées comme formant le secteur le plus prometteur et le plus enclin à démontrer une amélioration (Carter, 2002).

Enfin, le développement durable se veut :

« ...un processus de développement économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement soutenable. Il est respectueux des ressources naturelles et des écosystèmes, support de vie sur Terre, qui garantit l'efficacité économique, sans perdre de vue les finalités sociales du développement que sont la lutte contre la pauvreté, contre les inégalités, contre l'exclusion et la recherche de l'équité » (MEDD, 2005).

Dans les pages suivantes, nous tenterons de déterminer le caractère durable du développement des bâtiments résidentiels qui, à notre avis, constitue une des nombreuses stratégies gagnantes de développement durable d'un triple point de vue : économique, social et écologique.

CHAPITRE 2

LE BÂTIMENT RÉSIDENTIEL DURABLE

L'homme interagit depuis toujours avec son environnement. Le passage de l'ère industrielle à l'ère informationnelle a entraîné des changements au niveau de l'aménagement du territoire portant sur la dynamique socioéconomique urbaine et périurbaine, et des changements au point de vue de la mobilité humaine, avec des conséquences sur les besoins des gens en termes d'habitat. Ce n'est toutefois que très récemment dans l'histoire de l'humanité que des considérations environnementales ont été mises de l'avant dans les activités.

L'ancrage théorique qui suit nous permettra de mieux nous familiariser avec le concept de bâtiment résidentiel durable. Cela conduira à connaître les atouts et les contraintes rencontrés dans le domaine de l'ingénierie et de l'architecture dans une perspective de développement durable.

Le présent chapitre se divise en quatre thèmes touchant la conception et la construction des bâtiments résidentiels durables. Nous y discuterons d'abord du cadre de réglementation des bâtiments résidentiels durables, nous aborderons ensuite le processus de conception des bâtiments résidentiels durables, nous traiterons des technologies de la construction des bâtiments durables et nous terminerons avec l'exploitation de ces bâtiments.

2.1 La réglementation et les bâtiments résidentiels durables

Le cadre des bâtiments résidentiels durables est encore mal défini et il est souvent établi sur une base volontaire. Les certifications obtenues représentent donc un premier pas dans le développement durable, mais l'application des concepts qui y sont préconisés est établie au gré des différents intervenants. Toutefois, certains propriétaires, comme le gouvernement

canadien, exigent maintenant dans leurs projets des seuils à respecter en termes d'efficacité énergétique et de développement durable. En effet, les certifications qui existent actuellement dans le domaine se concentrent surtout sur l'efficacité énergétique, qui est le critère d'actualité à l'échelle mondiale, surtout après les crises énergétiques que le monde a connues au début des années 1970, 1980 et les autres qui semblent vouloir émerger. Il serait inconcevable de penser continuer à consommer l'énergie dans les bâtiments industriels, commerciaux et résidentiels comme nous l'avons fait au XX^e siècle. Nous devons adapter la conception et la construction à de nouvelles normes qui tendront vers le développement durable. Ainsi, les prochaines pages seront-elles consacrées à la description de certaines certifications qui sont en vigueur au Canada, aux États-Unis et ailleurs dans le monde.

2.1.1 La certification R2000 au fédéral

Un projet de recherche sur des maisons confortables et efficaces au point de vue énergétique a d'abord été lancé par le gouvernement fédéral canadien en 1970. Ce projet, réalisé dans les Prairies canadiennes, est à l'origine du programme R-2000. C'est en 1981 que le programme a été lancé officiellement à l'échelle nationale en tant que partenariat entre la Canadian Home Builders Association et Ressources naturelles Canada (Ressources Naturelles Canada, 2004). Depuis lors, le programme a enregistré des succès de reconnaissance internationale au Japon et aux États-Unis, où la méthode a été exportée et a contribué à l'amélioration des techniques de construction.

De plus, des milliers de maisons R-2000 ont été construites au Canada et ailleurs dans le monde : Pologne, Allemagne, Russie, Angleterre (Ressources Naturelles Canada 2004). Indirectement, ce programme a contribué à transformer les habitudes de construction en informant et en formant toute une nouvelle génération de constructeurs sensibilisés. La norme R-2000 est établie sur une base nationale volontaire et a pour objectif : « d'accroître l'efficacité énergétique des maisons neuves sans provoquer d'incidence négative sur les environnements intérieur et extérieur ». Toujours selon Ressources Naturelles Canada, la norme comporte des exigences concernant l'enveloppe du bâtiment, les systèmes

mécaniques, les objectifs de rendement énergétique, la qualité de l'air ambiant et la conservation de l'eau et des éléments environnementaux. Le champ d'application de la norme est le suivant : « maisons de faible hauteur, isolées, jumelées et en rangée... les immeubles résidentiels à logements multiples... ».

En gros, pour être admissible à la certification R-2000, l'habitation doit répondre aux exigences minimales de chacun des volets de la norme et améliorer l'efficacité énergétique globale de ses maisons d'au moins 25 % par rapport à des maisons conventionnelles. La norme a déjà subi des modifications et des adaptations depuis sa création, et il y va de la responsabilité de chacun des entrepreneurs de se conformer aux nouvelles modifications. Cette norme permet une certaine latitude quant aux techniques de construction et aux matériaux utilisés, ce qui facilite son acceptation dans le secteur de la construction au Canada.

2.1.2 La certification Novoclimat au Québec

Le concept d'habitation efficace Novoclimat est une initiative de l'Agence de l'Efficacité Énergétique (AEE) du Québec qui a été instaurée en 2000. Il s'agit d'une norme qui s'applique à l'échelle provinciale sur une base volontaire. Son champ d'application est : « ...habitations unifamiliales (maximum de quatre paliers incluant le sous-sol), neuves, chauffées principalement à l'électricité, au mazout, au gaz naturel ou au propane, de type détaché, jumelé ou en rangée et qui sont conçues pour être habitables en hiver » (AEE, 2005). Les exigences techniques du programme visent principalement l'amélioration de la consommation d'énergie et du confort des habitants ainsi que la bonne qualité de l'air dans les bâtiments, selon des critères minimaux tels qu'un niveau d'isolation de la toiture de R-41,2 et de R-24,7 pour les murs extérieurs. Les principaux éléments de ces exigences sont inspirés du *Code modèle national de l'énergie pour les habitations - Canada 1997* (CMEH), publié par le Conseil national de recherches Canada (CNRC), du *Code national du bâtiment 1995* (CNB95) et de certains aspects des exigences du « Programme de la maison R-2000 ». Tout comme pour la norme R-2000, les exigences prescrites s'ajoutent aux codes en vigueur.

Une maison certifiée Novoclimat procurera des économies d'énergie de 25 % au moins par rapport à une maison conventionnelle.

Pour répondre à la norme et être certifiée, une habitation neuve doit correspondre au champ d'application et aux exigences techniques prescrites. Les entrepreneurs peuvent en faire davantage en adhérant au *Groupe Sélect Novoclimat*, dans lequel ils consentent à ne construire que des habitations certifiées et à se soumettre à divers processus de vérification. L'engouement pour la certification Novoclimat des entrepreneurs s'est surtout fait sentir en 2005 : « Les entrepreneurs ont été également nombreux à suivre la formation et à obtenir leur accréditation Novoclimat, leur nombre ayant plus que doublé en quelques mois. On compte à l'heure actuelle beaucoup des constructeurs Novoclimat et la demande pour des formations est encore très forte ».

2.1.3 La certification LEED for homes

Le programme *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) est une initiative du *United States Green Building Council* (USGBC) et est connu depuis quelques années au Canada. Le projet pilote d'une nouvelle certification LEED for homes (LEED-H), lancé en septembre 2005, viendra encadrer la construction des bâtiments résidentiels d'abord aux États-unis et ensuite au Canada, par l'entremise de LEED Canada. Cette certification sera appliquée sur une base volontaire, tout comme les certifications R-2000 et Novoclimat, et elle sera présentée en collaboration avec tous les secteurs de l'industrie de la construction.

Le processus de certification et les relations entre les autorités compétentes, les professionnels et les utilisateurs de maisons, montrent le changement majeur envisagé pour répondre à la demande de développement qui correspond aux critères durables.

Les différents crédits qui englobent les exigences requises pour les niveaux de rendement sont : « Location and Linkages (LL), Sustainable Sites (SS), Water Efficiency (WE), Indoor

Environmental Quality (IEQ), Materials and Resources (MR), Energy and Atmosphere (EA), Home Owner Awareness (HOA), Innovation and Design Process (IDP) ». (USGBC 2005) Évidemment, tous ces crédits sont subdivisés et ils représentent chacun un nombre déterminé d'exigences résultant en un niveau de certification donné. Ce programme de normes est beaucoup plus exigeant que les programme R-2000 et Novoclimat.

2.1.4 La certification versus la conception

On constate rapidement, à la lecture des descriptions des certifications Novoclimat, R-2000 et LEED-H, que ces normes diffèrent les unes des autres par leur contenu et leur application. Le concept Novoclimat est le plus souple des trois, car son approche est presque entièrement énergétique, englobant à la fois le volet du confort des habitants et de la qualité de l'air. Le concept R-2000 est un peu plus complet, puisqu'il englobe aussi la notion de responsabilité environnementale, qui est absente du concept précédent. Pour sa part, le concept LEED-H n'est pas encore en vigueur officiellement, mais son champ d'application est nettement plus vaste que ceux des normes R-2000 et Novoclimat. En effet, cette norme va encore plus loin dans son approche environnementale, en subdivisant ce thème et en proposant divers niveaux de rendement possibles. Il sera intéressant de voir comment LEED-H s'imposera au Canada au cours des prochaines années et quelle sera la place de chacune de ces certifications dans le domaine résidentiel.

Évidemment, étant donné que toutes ces certifications sont octroyées pour des bâtiments résidentiels neufs, il est important, voire même essentiel d'utiliser une approche intégrée de conception et de réalisation des travaux tout au long du processus de construction, afin d'optimiser les résultats. Cela sera d'autant plus vrai pour des entreprises qui désireront obtenir des niveaux élevés de rendement dans le cadre du programme LEED-H. Notre prochain point traitera donc essentiellement du processus de conception des bâtiments durables.

2.2 Le processus de conception des bâtiments durables

Ce thème concerne le processus de conception des bâtiments durables. Nous traiterons d'abord du contexte et nous comparerons ensuite le processus de conception conventionnel au processus de conception intégrée préconisé pour la conception des bâtiments durables.

2.2.1 Description de la problématique

Pour mieux comprendre les enjeux qui motivent ce portrait de la conception intégrée visant à concevoir des bâtiments durables, il est judicieux de dresser un portrait réel de l'état actuel des choses sur le sujet.

Le réchauffement climatique, la ratification du protocole de Kyoto par le Canada et l'engagement international à réduire les émissions de gaz à effet de serre font en sorte que la société civile et l'industrie de la construction doivent réagir pour réduire les consommations énergétiques et les effets négatifs d'exploitation des bâtiments, contribuant ainsi à la préservation des ressources, à la réduction des effets négatifs sur l'environnement et à tous les autres bénéfices qui y sont rattachés (CNRC-IRC, 2005).

Près du tiers de toute l'énergie produite au Canada est consommée par les bâtiments (Ressources Naturelles Canada, 2004). L'essentiel de cette énergie est consommée par le chauffage et l'eau chaude. Toujours selon Ressources Naturelles Canada, cette énergie, la plupart du temps, est non renouvelable.

Du point de vue économique, les coûts d'exploitation et d'opération des bâtiments représentent un pourcentage élevé du coût total d'un cycle de vie. Ce pourcentage élevé est en partie attribuable aux coûts de l'énergie consommée pour le fonctionnement des bâtiments et aux coûts d'entretien (CNRC-IRC, 2005).

L'intérêt global pour le développement durable a résulté en un haut degré de pression pour les promoteurs et concepteurs de bâtiments, en imposant un niveau de rendement environnemental plus grand. Bien que plusieurs auteurs aient des visions différentes, la majorité d'entre eux s'entend pour dire que les bâtiments durables doivent produire un haut niveau de rendement, pendant tout le cycle de vie, dans les champs suivants (Poel, 2005) :

1. Une consommation minimale des ressources non-renouvelables incluant la terre, l'eau et les combustibles fossiles;
2. Des émissions atmosphériques minimales liées au réchauffement global et aux acidifications;
3. Un rejet minimal des déchets solides et liquides;
4. Un impact négatif minimal sur les écosystèmes;
5. Une qualité maximale de l'environnement intérieur quant à la qualité de l'air, au système de chauffage, à l'éclairage et au bruit.

Actuellement, les notions de durabilité du bâtiment, de bâtiment écologique et l'analyse du cycle de vie comme vision dans les choix des matériaux et des procédés sont de plus en plus adoptées par l'industrie de la construction comme mode de réalisation des projets. Cela oblige en quelque sorte l'adoption de nouvelles approches permettant l'intégration de tous ces aspects et le changement dans la façon de faire dans les processus de conception.

2.2.2 Description du processus de conception conventionnelle

Les derniers siècles ont été caractérisés par une conception intuitive, et le succès d'un projet y reposait sur les connaissances et les habiletés du spécialiste. Dans les années 1980, le nombre de facteurs à considérer pendant le processus de conception a augmenté, ce qui a entraîné des structures et des interactions plus complexes. Les méthodes traditionnelles de résolution des problèmes n'étant plus suffisantes, de nouveaux processus de conception ont vu le jour et se sont répandus (Széll, 2003).

En général, le processus de conception conventionnelle commence par une entente entre l'architecte et le client sur le design global. Ils s'entendent sur l'orientation du bâtiment, sur la fenestration et sur l'apparence générale de l'extérieur du bâtiment ainsi que sur les matériaux de base à employer.

Ensuite, les ingénieurs sont appelés à proposer les systèmes électriques et mécaniques appropriés. On parle alors d'une structure linéaire due à la contribution successive de différents membres de l'équipe de conception (IISBE, 2005).

L'optimisation est limitée lors du processus conventionnel, et l'optimisation dans les étapes suivant la conception devient difficile, voire impossible. De plus, puisque la simulation énergétique par ordinateur n'est que rarement utilisée lors de l'étape de la conception pour prédire le rendement énergétique du bâtiment, le faible rendement et les coûts élevés d'opération apparaissent comme une surprise pour le propriétaire, les opérateurs et les usagers (IISBE, 2005). La proposition d'utiliser la technologie avancée en matière de chauffage et de climatisation, par exemple, en cours de construction, n'aurait évidemment que peu d'impact comparativement à l'implantation de ces mêmes idées au début du processus de conception.

Bref, la conception conventionnelle est généralement incapable de livrer les hauts niveaux de rendement requis par la plupart des projets contemporains (Poel, 2005).

2.2.3 Description du concept de design écologique

Un bâtiment durable est le résultat de son intégration à l'environnement et du comportement de ceux qui l'habitent dans le temps. La construction d'une maison est inimitable, du fait de la variété environnementale et de la culture particulière de ses utilisateurs.

La conception écologique signifie la création d'un bâtiment ayant des incidences minimales sur l'environnement. Elle veut dire la création de bâtiments ayant des conséquences positives, réparatrices et productives sur l'environnement, et intégrant les structures établies de tous les aspects de l'écosystème à son cycle de vie.

Quelques architectes et ingénieurs concernés par la sensibilité environnementale emploient maintenant une variété de stratégies pour limiter les incidences néfastes sur l'environnement lors de la construction de bâtiments. Désormais, nous pouvons affirmer qu'il y a de grandes relations entre l'architecture, le génie et la technologie écologique.

L'architecture aborde maintenant la conception des environnements humains, et bon nombre d'architectes ont évalué les approches auxquelles la nature est sensible (Zeiher, 1996). Les exemples bien connus concernent des philosophies de l'architecture organique ou vivante (Wright, 1985) et l'idée de la « conception avec la nature » imaginée par McHarg, en 1969, dans son *Guide d'architecture de paysages* (McHarg, 1969). L'expression célèbre de McHarg a été dérivée réellement d'Olgyay's (1963) qui a utilisé le terme « architecture bioclimatique », qu'il a appelé « conception avec le climat » (Olgyay, 1963).

Le processus de conception est quelque peu différent dans l'architecture comparée de celui qu'on rencontre dans la technologie traditionnelle et les ingénieurs écologiques peuvent apprendre beaucoup de ce contraste. Souvent, les architectes semblent inaugurer de nouvelles lignes de pensée en créant des conceptions qui n'ont pas de limites pratiques. *Arcosanti* (Soleri, 1993), de Paolo Soleri, est un exemple de cette approche créatrice. En 1973, Soleri a créé une philosophie unique du futur environnement humain du bâtiment écologique (Soleri, 1973). Son approche consiste à concevoir et à construire à la fois des gratte-ciel énormes et des aires de travail fortement intégrées, de manière à concentrer l'environnement sur une petite surface, laissant autant que possible de l'espace pour l'agriculture et la nature. Un

modèle réel de Soleri existe et est exploité expérimentalement dans le nord des prairies désertiques de Phoenix, en Arizona.

D'après une autre architecture extrême, éminemment pratique, Butler (1981) explique la façon de construire une maison « écologique » fondée sur des principes d'efficacité énergétique.

Le travail de John et de Nancy Todd sur les biosphères est une autre expression de l'architecture écologique qui souligne la production de nourriture et le traitement des eaux résiduaires (Butler, 1981). Des examens de ces approches de l'architecture sont effectués par Steele, 1997 et Stitt, 1999.

Plusieurs initiatives d'architecture écologique constituent de nouvelles directions pour la collaboration entre les architectes et les ingénieurs écologiques. Des systèmes innovateurs en génie sont intégrés à l'architecture de manière plus que convaincante, comme l'amélioration de la qualité de l'air des milieux intérieurs et des jardins de toits au moyen de la gestion des précipitations exceptionnelles dans les environnements externes (Kohler, 1990).

Bien que ces applications comprennent l'horticulture franche, la technologie écologique peut s'avérer particulièrement importante si la fonction de traitement est optimisée. Par exemple, Golueke, en 1973, décrivent un plan de maison qui emploie un système régénérateur d'algues à des fonctions multiples. Une autre direction de la collaboration peut s'établir en termes de réutilisation des bâtiments et de leurs matériaux (Brand, 1994). Ici, les idées de l'écologie industrielle telles que l'analyse des cycles de vie et la comptabilité de réseaux des écoulements de matières peuvent être appropriées. Le terme « écologie de construction » a été récemment utilisé pour décrire toutes les applications énumérées ci-dessus (Kibert, 2002).

2.2.4 Description du processus de conception intégrée

À la lumière des lacunes de la conception conventionnelle des bâtiments durables, une nouvelle approche s'impose : la conception intégrée. Le terme « intégré » est utilisé pour décrire le processus qui tient compte des défis des conceptions mécanique, architecturale et électrique, en plus de la constructibilité et de l'entretien (NBI, 2005).

Maria Széll (Széll, 2003) définit plutôt la conception intégrée comme la coopération entre l'ingénieur en structure, l'ingénieur en bâtiment, le spécialiste en énergie, l'analyste financier, les experts en organisation et autres spécialistes au tout début du processus de conception. Cette conception considère la création des systèmes et de ses composantes comme une seule entité. Aussi, la conception intégrée permet-elle aux concepteurs d'optimiser le rendement du bâtiment et son coût (NBI, 2005).

Par exemple, il arrive souvent que le système mécanique soit conçu indépendamment du système d'éclairage et qu'il le soit sans considérer les possibilités d'éclairage naturel. Selon NBI, 2005, l'architecte, l'ingénieur mécanique, l'ingénieur électrique, les entrepreneurs et les autres membres de l'équipe ont chacun leur domaine, et la communication et l'interaction entre eux sont inadéquates.

Un avantage de la conception intégrée, selon le « New Buildings Institute Inc. », (NBI, 2005), est que de la valeur est ajoutée au projet, c'est-à-dire que les charges du bâtiment, les systèmes et les équipements sont optimisés dans les disciplines pendant le processus de conception. Par exemple, si un système de fenestration à rendement moins élevé est choisi pour réduire les coûts, celui-ci se répercutera sur la luminosité et la conception du système mécanique. Cela demandera une conception spécifique des nouveaux systèmes, et les économies apportées par la fenestration seront alors compensées par de nouveaux coûts. L'intégration des systèmes au début du projet est le meilleur moyen pour l'équipe d'éviter la dégradation de tout le bâtiment (NBI, 2005).

D'après le site web Betterbricks, l'intégration est davantage que le simple fait d'avoir tous les concepteurs de bâtiments réunis autour d'une même table. L'équipe de conception doit d'abord s'entendre sur les objectifs et établir les stratégies, afin de les atteindre à temps et de manière rentable. Ils doivent comprendre la durabilité du bâtiment, les économies d'énergie visées, l'impact sur l'environnement adjacent, et les autres paramètres spécifiques du projet doivent être définis dès le début. Après avoir pris connaissance du projet en tant que tel et de ses objectifs, le développement du projet peut alors commencer. La modélisation énergétique, la surveillance du contrôle des coûts, l'échéancier et l'assurance de la qualité doivent être gardés en tête à chaque réunion.

L'équipe, quant à elle, doit adopter une attitude positive, afin de favoriser le dynamisme du groupe et d'améliorer sa synergie. Les idées les plus novatrices ne sont pas nécessairement apportées par l'expert du domaine. Il appartient par contre à l'expert de vérifier la pertinence de l'idée soumise.

Pour être en mesure d'atteindre les objectifs qui ont été fixés, il faut remettre en question les idées traditionnelles en matière de construction et explorer de nouvelles façons de réduire l'impact que le bâtiment aura sur l'environnement (Coop, 2005).

D'une façon complémentaire, le site Web Betterbricks, en 2004, avance que les actions suivantes sont recommandées afin de réussir le processus de conception intégrée :

1. Commencer au tout début du processus de conception;
2. Désigner un facilitateur et un coordinateur dans le processus de conception intégrée;
3. Accorder du temps, peu importe le coût, aux rencontres des membres de l'équipe;
4. Incorporer les objectifs de rendement au design, à la construction et aux contrats;
5. Établir un bonus au rendement pour récompenser les membres de l'équipe pour leurs efforts supplémentaires et pour encourager la coopération et l'innovation;

6. Simuler les interactions entre les différents systèmes du bâtiment;
7. Analyser les coûts des cycles de vie des options;
8. Inclure l'objectif de maximiser l'économie d'énergie pour évaluer les systèmes et leurs composantes;
9. Employer un processus de vérification du rendement pendant le processus et la construction.

L'objectif principal de la conception intégrée est globalement de réduire au maximum les coûts énergétiques liés à l'exploitation des bâtiments. En pratique, trois approches permettent de réduire la consommation d'énergie :

1. La première est **la conservation de l'énergie** par des changements comportementaux de la part des résidents et des membres du personnel. Cette approche ne nécessite pas d'investissement, mais elle peut demander des séances de sensibilisation des futurs usagers;
2. La deuxième est **l'efficacité énergétique**, qui permet des économies grâce à des modifications techniques, comme le choix des équipements, des appareils, etc.
3. La troisième est **l'économie d'énergie**, qui consiste à choisir des matériaux et des produits qui, par leur conception, ne consomment pas d'énergie mais permettent de l'utiliser plus efficacement, par exemple, l'isolation thermique, les fenêtres à haut rendement, etc.

D'une manière générale, l'équipe doit favoriser les solutions dont le pourcentage d'économie d'énergie est important et dans lesquelles l'investissement ou le surcoût l'est moins. Pour pouvoir identifier les solutions et les mesures les plus rentables, il faut faire une simulation (Ressources Naturelles Canada, 2004), qui permettra de connaître les économies d'énergie liées à cette solution et de calculer son coût. Une fois ces deux paramètres connus, il est facile de déterminer le retour sur investissement de chaque mesure. Ce calcul nous permet de tenir compte des subventions qui peuvent être obtenues dans différents programmes. Il s'agit d'un autre indice qui pourra aider l'équipe à bien identifier les mesures pertinentes et efficaces à long terme et à effectuer le calcul au moyen du cycle de vie ; cet indice est

particulièrement intéressant dans le cas des technologies très efficaces énergétiquement mais nécessitant un entretien ou un mode d'opération onéreux.

Ainsi, il ne suffit pas d'avoir la volonté de réduire la consommation d'énergie des bâtiments. La conception intégrée joue sans doute un rôle clé, mais les nouvelles technologies ont également une grande importance dans la mise en place des bâtiments durables. C'est pourquoi notre prochain thème concernera les technologies durables.

2.3 La technologie et la construction durables

Pourquoi sommes-nous si souvent inquiets du niveau de technologie utilisée ? Notre intérêt réside dans l'illusion moderne que nous savons réellement ce que nous faisons et que nous sommes en train de le faire. Le monde est un ensemble incroyablement complexe de systèmes liés entre eux, dont les fonctionnements s'étendent clairement au-delà de notre capacité de comprendre. En effet, nous en savons très peu sur ce qui se produit et pourquoi. Que connaissons-nous vraiment des opérations qui ont été réalisées en prenant vingt tonnes de matières et en les transformant en l'ordinateur portable de quatre livres sur lequel nous travaillons ? La plupart des opérations sont invisibles, donc inconnues de nous. Plus le niveau technologique est avancé, moins nous pouvons comprendre ce qui se produit réellement dans la conception qui le met en œuvre.

Depuis longtemps déjà, plusieurs recherches et plusieurs modèles ont été mis en œuvre. Dans la plupart des cas, nous constatons que **l'énergie solaire et l'éclairage, l'orientation du bâtiment** avec son influence directe sur la géothermie, les nouveaux concepts de **toiture** et les **murs** peuvent modifier les caractéristiques et le cycle de vie d'un bâtiment dans une perspective de développement durable.

Les **matériaux** qui seront utilisés dans la future constitueront un retour aux sources naturelles, car les intervenants reconsidéreront les propriétés particulières d'intégration des matériaux dans l'environnement et leurs interactions avec le milieu.

2.3.1 L'énergie solaire et l'éclairage

Généralement, l'énergie consommée dans les bâtiments pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage et les équipements représente 40 % de la consommation de l'énergie primaire. En Europe, des incitatifs ont été créés en vue d'accroître l'usage de l'énergie solaire de 13 % à 50 % d'ici 2010 (Steemers, 1991).

En se donnant des objectifs visant principalement à diminuer la dépendance européenne en matière d'importation de pétrole et la réduction de la pollution environnementale, un projet, *Monitor Project*, a été mis en place par la Commission des communautés européennes, qui nous a permis de connaître les meilleurs ouvrages réalisés en utilisant **l'énergie solaire passive** ainsi que des informations architecturales sur la construction et le comportement des habitants. Le principe de base du fonctionnement d'un bâtiment solaire passif consiste à incorporer un captage, une distribution et un stockage de l'énergie solaire ainsi qu'un dispositif de ventilation et de chauffage auxiliaire. Les cas enregistrant du succès en Europe, des pays nordiques aux pays méditerranéens se sont fondés sur le principe des apports solaires directs au travers de grandes baies orientées vers le sud, permettant au soleil de pénétrer directement dans les locaux (en orientant le bâtiment selon un axe nord-sud).

Au Canada, le projet « Drake Landing : un système de chauffage solaire communautaire », a été réalisé en Alberta. L'objectif principal de ce projet est de capter les rayons solaires l'été afin de chauffer les maisons l'hiver. Ce projet de construction et d'exploitation constituera la première grande installation de chauffage solaire en Amérique du Nord ayant recours au stockage inter-saisonnier de l'énergie (<http://www.dlsc.ca/index.htm> - 2005). La communauté solaire Drake Landing (CSDL) se chauffe à l'aide d'un réseau d'énergie de quartier conçu pour emmagasiner dans le sous-sol l'énergie solaire en abondance dans les mois d'été, laquelle est ensuite répartie dans chaque maison l'hiver pour le chauffage des espaces.

2.3.2 L'orientation du bâtiment

L'orientation d'un bâtiment a des effets sur son cycle de vie et sur la qualité de vie de ses habitants. L'architecte qui intervient dans la conception d'un bâtiment doit connaître les conditions de son environnement : climat, microclimat, températures et comportements des matériaux dans ce microclimat. Quant à la géothermie, nous considérons les espaces des échanges entre différents champs, nous parlons de limites. L'architecte manipule ces limites en concevant des formes et des espaces. Quoi qu'il en soit de l'enveloppe extérieure ou des cloisonnements internes des bâtiments, nous modifions la qualité de l'ambiance thermique et lumineuse par nos choix. C'est pourquoi l'architecte doit concevoir des espaces en tenant compte des phénomènes physiques en jeu ainsi que la consommation énergétique des bâtiments (Lavigne, 1994). Il doit connaître les caractéristiques thermiques des matériaux qu'il utilise pour la conception et l'impact du microclimat sur ces matériaux, afin d'établir les régions les plus confortables pour l'humain dans un bâtiment et de pouvoir les augmenter. Ensuite, l'ingénieur doit s'engager lui-même davantage dans la conception avec des architectes ayant des connaissances des échanges des flux énergétiques et thermiques, des variables et des paramètres du climat. En effet, davantage de connaissances sont exigées des professionnels, et ensuite une collaboration plus étroite est désirable.

Aucun système simple de chauffage ne pourra jamais réparer l'erreur d'un grand vitrage froid situé trop proche d'un lieu de repas. D'un autre côté, aucune climatisation ne permettra de corriger correctement l'effet d'une paroi chaude causé par l'exposition au soleil. Surtout, nous ne devons pas oublier que tous les efforts de corrections, généralement nuisibles aux humains, sont gourmands d'énergie et, à la fin, produisent la pollution de l'environnement (Lavigne, 1994).

2.3.3 Les toitures

Un élément extrêmement important est la toiture. C'est, d'une part, une superficie importante dans les échanges thermiques et énergiques avec le microclimat. D'autre part, la toiture peut être considérée comme un filtre dans le processus de captage/perte d'énergie. En accord avec le climat, on peut procéder à la création de filtres de végétation. La ventilation de l'air est liée à la structure et à la conception du toit. Ainsi, les attiques ont été utilisés pour améliorer la ventilation de la toiture. Par exemple, en été, durant la journée, la masse se réchauffe suite à l'exposition au soleil, mais la présence de l'attique permet d'obtenir une quantité d'air qui fournit de la ventilation, qui réalise un tampon entre la toiture et le reste de la bâtisse. Si l'on effectue une rétroaction sur l'histoire de l'architecture, de Plin à Le Corbusier, on observe que nos ancêtres ont beaucoup étudié les effets du microclimat sur les bâtiments ainsi que sur le facteur humain (Cofaigh, 1996).

2.3.4 Les murs

Nous pouvons modifier les caractéristiques d'une bâtisse en utilisant différents matériaux pour l'enveloppe et différentes dimensions pour les portes et les fenêtres, qui constituent des éléments importants de l'échange énergétique avec le microclimat. En plus de servir d'appui aux planchers des étages supérieurs et à la couverture, les murs extérieurs doivent offrir une protection visuelle et thermique ainsi qu'un revêtement contre les intempéries. Les nouvelles technologies apporteront rapidement plusieurs solutions au cours de la décade suivante. Les innovations technologiques en matière de verre permettront une meilleure réponse des fenêtres à l'environnement qu'on avait jusqu'à maintenant, par exemple, le verre contre le soleil qui s'adapte à l'intensité de la lumière, facteur d'une grande importance dans la réalisation des bâtiments écologiques. On attend des enveloppes qu'elles répondent aux exigences écologiques si elles sont durables, économiques, dotées d'une certaine esthétique et sécuritaires. Dans un mur bien construit, ces composants œuvrent de paire pour produire un système durable et de bonne qualité, capable de résister à la chaleur, à l'air et à la migration de l'humidité (Randall, 1999).

2.3.5 Les matériaux de construction

Pour des considérations d'aménagement paysager et écologique, la théorie de l'habitat écologique s'est développée par rapport au recours systématique depuis très longtemps aux matériaux de construction industriels. À cause du dépistage de la nocivité de l'amiante, des PVC ou des laines minérales, des matériaux écologiques ou naturels s'impose.

Pouvons-nous, d'une façon ou d'une autre, modifier et réutiliser le bâtiment, ou pouvons-nous le démonter et en réemployer les pièces, ou encore peuvent-elles se retrouver à nouveau dans la nature sans créer de pollution ? Sont-elles toxiques ou simplement transformées, puisqu'elles ne peuvent être employées n'importe comment et qu'elles ne doivent pas être utilisées comme des remblais ?

Nous nous sommes concentrés pendant plusieurs années sur la technologie appropriée ou sur une technologie dont les gens pouvaient s'approprier pour leur propre utilisation et pour l'avantage de la communauté. De plus, nous pouvons affirmer que la technologie appropriée est le niveau le plus bas ou le plus simple de technologie qui peut être employée si nous voulons bien faire.

Par exemple, en 2001, les auteurs McGregor et Trulsson, dans leur livre *Living Homes – Sustainable architecture and design*, parlaient de ces matériaux naturels : l'adobe (le sol qui fait les briques, les briques elles-mêmes ou les maisons faites à partir de ces briques), la terre enfoncée, la balle de paille et les matériaux de haute technologie, réinventés et réutilisés.

Les architectes et les ingénieurs peuvent employer les matériaux toxiques qui exigent peu d'énergie de production, de transport et de montage, et qui sont renouvelables, modulaires (pour réduire la perte de construction) et préfabriqués. Aussi, le gestionnaire de projet doit-il

faire preuve d'une bonne coordination dans le choix des équipes qui travaillent et qui « pensent écologique ». Ce choix est d'une importance primordiale. Nous pouvons affirmer que le gestionnaire formera la constituante la plus importante du processus de construction écologique.

2.4 L'exploitation des bâtiments durables

Le présent sous-chapitre concerne l'exploitation des bâtiments durables. Nous y traiterons des avantages et des inconvénients, à court et à long terme, liés à l'exploitation des bâtiments durables.

En premier lieu, il convient de choisir les facteurs sur lesquels nous devons nous baser afin d'être en mesure de choisir entre la construction d'un bâtiment écologique ou l'édification conventionnelle. Pour la majorité des auteurs, les principales perspectives à considérer sont les aspects économiques, socioculturels et environnementaux (Peuportier, 2001). Pour d'autres, l'aspect organisationnel est également important à prendre en compte (Berg, 2004). Enfin, certains auteurs iront jusqu'à évaluer l'aspect technique du projet. Comme l'argument principalement utilisé par les promoteurs qui refusent de construire des bâtiments écologiques est, en général, l'aspect économique du projet, nous devons évidemment étudier ce point de vue, car la peur d'engendrer des coûts trop élevés représente souvent un frein au développement durable. Cependant, le côté financier n'est pas le seul facteur qu'il importe de considérer. Bien qu'ils soient plus difficilement quantifiables, les facteurs socioculturels et environnementaux ne doivent pas être négligés, et il importe de les évaluer avant de balayer du revers de la main l'aspect écologique d'un bâtiment.

Pour les fins de notre recherche, et considérant que l'aspect technique est souvent lié de très près à l'aspect économique, nous considérerons les quatre facteurs les plus étudiés : les facteurs économique, environnemental, socioculturel et organisationnel (Peuportier, 2001).

2.4.1 Le court terme

Nous considérerons ici que les avantages et les inconvénients à court terme sont ceux qui auront un impact important dans les deux années suivant la construction de l'édifice.

Les avantages

D'abord, l'utilisation de matériaux de construction écologiques comporte plusieurs avantages : ils sont non dommageables pour la santé ou pour l'environnement, et ils sont généralement le fruit d'une utilisation efficace des ressources (Berg, 2004). En plus de minimiser les effets néfastes sur l'environnement, ils augmentent la valeur des unités construites. Il est important de mentionner que le choix de matériaux écologiques a une influence directe sur le calcul de l'énergie incorporée du bâtiment. L'énergie incorporée d'un bâtiment est décrite comme suit : « l'énergie nécessaire pour extraire, transformer, fabriquer et transporter le matériel et ses composantes ». Ce type d'énergie est parfois calculé dans l'application de certaines normes décrites ci-dessus. Plus le niveau d'énergie incorporée est bas, plus la bâtisse est écologiquement responsable.

Enfin, à court terme, il est impératif de considérer la possibilité de fournir des habitations autonomes aux habitants des communautés défavorisées. Par exemple, ces projets de développement durable peuvent fournir de l'électricité grâce à l'installation de cellules photovoltaïques et ainsi permettre à une petite communauté cubaine d'avoir accès à l'électricité gratuitement. De cette façon, leurs maisons s'autosuffisent, et la communauté entière est propulsée dans un mode de vie plus contemporain.

Les inconvénients

La personne qui décide de construire un bâtiment durable devrait être informée des quelques inconvénients qui peuvent survenir à court terme avant de faire son choix. Par exemple,

l'utilisation de nouvelles technologies pourrait occasionner des pannes nécessitant de nombreux ajustements et, parce qu'ils seraient les premiers à en faire l'essai, les habitants de la nouvelle demeure pourraient se sentir des cobayes. En plus de faire preuve de patience, les utilisateurs devraient également suivre une formation, afin d'employer adéquatement les nouveaux outils en opération. Aussi, un soutien devrait être dispensé au départ par les fournisseurs d'équipements, et un suivi technique devrait être négocié pour une certaine période de temps. Dans le cas du développement d'une communauté, des comités de citoyens devraient être créés, afin de s'assurer que le démarrage se fasse en douceur et sans trop de problèmes.

Enfin, ce type de projet demande généralement plus de travail au début de la part de toutes les parties prenantes, donc un plus grand engagement de tous : architectes, ingénieurs, communautés locales, universités, fournisseurs, etc. Le projet doit, par conséquent et à cause de son risque, créé par l'inconnu, être très bien défini, comporter un design achevé dans les moindres détails, être défini par une politique environnementale, comprendre une assignation précise des rôles de chacun et une proposition d'indicateurs de mesures de durabilité.

2.4.2 Le long terme

Pour réaliser une analyse des avantages et des inconvénients à long terme, plusieurs auteurs préconisent une approche par analyse du cycle de vie (Peuportier, 2001). Il s'agit d'une analyse des impacts environnementaux qui est effectuée sur toute la vie du bâtiment, en commençant par l'approvisionnement en matériaux, la construction, puis l'exploitation et l'utilisation, les rénovations, la démolition, etc. Ce type d'analyse comprend le calcul de l'énergie incorporée, en plus de celui de l'énergie utilisée dans la vie opérationnelle de l'édifice jusqu'à sa démolition.

Les avantages économiques

Plusieurs facteurs économiques sont à considérer dans l'exploitation des bâtiments ou des communautés écologiques. Ces facteurs se traduisent plus souvent qu'autrement par des économies de coûts qui, réparties sur la durée de vie utile du bâtiment, justifient des investissements initiaux plus importants. Ces facteurs doivent cependant être pris en compte au début du projet, avant même de réaliser les premiers plans, car ils pourraient convaincre même les plus réticents de construire leur prochain édifice selon ce modèle environnemental.

Les économies énergétiques sont les principaux facteurs influençant les coûts pendant la phase d'opération d'un bâtiment durable. En moyenne, les bâtiments durables sont de 25 % à 30 % plus efficaces et ils consomment plus souvent de l'énergie renouvelable. L'analyse coûts-bénéfices, qui met en relation le coût entier du projet et les bénéfices totaux, est un moyen utilisé dans certains cas pour évaluer la viabilité d'un projet de développement durable. Grâce aux résultats de cette analyse, il est généralement simple de conclure, puisque la solution est représentée par un modèle mathématique concret. Donc, après analyse, si les bénéfices excèdent les coûts du projet, celui-ci est viable. Les habitants des communautés écologiques, grâce à une orientation vers le développement durable, bénéficient de plusieurs avantages économiques. Par exemple, on observe une diminution des coûts d'entretien et de maintenance des maisons ainsi que des tarifs de transport en commun, alors que se développent les marchés locaux (Berg, 2004), ce qui permet aux usagés de se déplacer sans grand frais sur de courtes distances. Ces progrès économiques doivent se faire sans empêcher des progrès semblables de se réaliser dans d'autres régions du globe, sans nuire à l'environnement environnant et en reconnaissant les besoins de la société en tant qu'entité.

Enfin, il est nécessaire de tenir compte des moyens de la population à long terme en ce qui a trait à l'utilisation de matériaux. Par exemple, au Mexique, on utilise des matériaux accessibles et pour lesquels l'opération et la maintenance peuvent se faire facilement par la

suite, en tenant compte des moyens financiers de la communauté. Sans cet aspect crucial, plusieurs projets seraient voués à l'échec.

Les avantages sociaux et culturels

Les avantages sociaux liés au développement des communautés écologiques sont très importants, et il est essentiel d'en tenir compte dans le processus de prise de décision. Ces communautés favorisent le développement de relations interpersonnelles entre voisins, considèrent les volontés et les désirs des personnes qui y vivent et misent sur l'utilisation de ressources locales. La société est ainsi considérée comme un tout, envers lequel toutes les parties prenantes sont engagées (Berg, 2004). Cela a pour objectif de redonner de l'importance aux communautés locales, afin de maintenir une société civile forte et de rapprocher les habitants en créant un esprit de coopération entre eux. Ce type de relations entre voisin se développe en augmentant le nombre d'activités locales et communautaires (Berg, 2004).

Certaines études incluent l'aspect esthétique et la qualité de vie au sein de ces communautés (Berg, 2004). En effet, cela peut agir comme un facteur social déterminant chez certains. D'autres ont préféré ne pas les utiliser dans leurs études, argumentant que ces données sont difficilement quantifiables (Peuportier, 2001). En réalité, bien que ces conditions soient en effet difficiles à calculer, ces facteurs sont parfois déterminants pour la prise de décision, car ils contribuent au bien-être et à la qualité de vie des individus. Les bénéfices sociaux de telles communautés constituent un aspect non négligeable quant aux choix qu'ont à faire ces populations pour l'avenir. Cela a pour conséquence de réduire le taux de déménagements à l'intérieur de ces collectivités, de créer de nouvelles amitiés entre les membres de la société et d'instaurer un climat de confiance profitable à chaque individu (Berg, 2004). Comme les citoyens prennent part à toutes les décisions et qu'ils s'engagent personnellement, cela crée une augmentation de la participation face aux nouvelles technologies et rend leur intégration plus facile. La gestion de la durabilité est alors beaucoup plus aisée. Les personnes

concernées acceptent de cette manière plus facilement de participer à des ateliers de formation et d'éducation. Quoi qu'il en soit, les communautés écologiques ont pour objectif le développement durable, c'est-à-dire de permettre aux générations futures d'être en mesure de répondre à leurs besoins et plusieurs personnes acceptent de vivre de cette manière afin d'atteindre ce but.

Les avantages organisationnels

Du point de vue organisationnel, de nombreux avantages sont offerts aux résidents des communautés écologiques. La proximité des commerces et des lieux de travail, l'accessibilité et l'importance des transports en commun sont quelques-uns des objectifs visés par de telles communautés (Berg, 2004). En effet, ces éléments contribuent à une organisation sociale favorisant la réduction des émissions de gaz à effet de serre et mettent l'accent sur l'importance des liens sociaux et sur la proximité avec les autres résidents.

De plus, la formation des habitants sur la maintenance favorise la responsabilisation des parties prenantes du projet.

Les avantages environnementaux

Puisque la survie à long terme de la vie sur la planète dépend des écosystèmes qui sont constamment en dégradation dus aux activités humaines, le concept de durabilité aide les organisations à reconnaître ce fait incontestable. Donc, à partir du moment où les gens se mobilisent pour permettre à notre espèce de survivre, quels sont les impacts néfastes sur notre environnement que nous sommes en mesure de minimiser ?

Les études environnementales et les calculs énergétiques se fondent principalement sur la faible consommation d'énergie de chauffage et sur des facteurs réduisant la consommation d'essence pour les voitures pour mesurer les bénéfices de ces regroupements. Des études plus approfondies prendront en considération la fabrication des matériaux, leur transport et

l'approvisionnement en eau, afin de démontrer clairement que de telles communautés sont en mesure de diminuer les impacts négatifs de l'humain sur son environnement. Il est important de mentionner que la quantité d'énergie nécessaire à l'opération du bâtiment est, en règle générale, plus grande que l'énergie incorporée du matériel utilisé pour construire et maintenir le bâtiment (Peuportier, 2001) (Berg, 2004).

De plus, la diminution de notre consommation d'énergie, l'amélioration de l'efficacité des appareils, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la production d'énergies renouvelables sont des facteurs qui contribuent grandement à une saine gestion des ressources (Plank, 2005, Berg, 2004).

Enfin, nous observons que les facteurs économiques, sociaux et environnementaux sont intimement liés, et que les résultats des uns ont souvent des conséquences sur les autres. Cela démontre l'importance d'intégrer l'aspect social aux dimensions organisationnelle et économique (Berg, 2004). De plus, il est important de mentionner qu'une fois la communauté mise en place, il est impératif de vérifier périodiquement si les objectifs fixés au départ ont été atteints (par exemple, une fois par année).

Les inconvénients

Les inconvénients prévisibles à long terme sont très peu nombreux. Pour certains, l'engagement nécessaire des résidents peut constituer un frein à l'intégration dans de tels milieux. Pour d'autres, la formation et l'éducation continue, les évaluations et la gestion de la durabilité peuvent paraître trop exigeants. Cependant, comme ces facteurs forment les pierres angulaires de la réussite du projet, il est impossible de passer outre ces éléments (Berg, 2004).

CHAPITRE 3

LA VOLUMÉTRIE ET LA FORME DU BÂTIMENT, L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET L'ÉMISSION DE CO₂

Pierre Pinon, Alain Borie et Pierre Micheloni, dans le premier chapitre de la réédition de 2006 de leur livre devenu un classique et intitulé « Forme et déformation des objets architecturaux et urbains », ouvrage traitant des formes architecturales et de la géométrie sous l'angle de la déformation, s'attardent sur la définition du concept de la « forme » en architecture. Ils tentent de trouver une définition actuelle et tangible de la forme, en partant des théories de Christophe Alexander, anthropologue et architecte anglais qui a étudié l'importance de la forme et de son adaptation au contexte.

Pour nos auteurs, il faudrait cependant davantage que la simple adaptation de la forme à son contexte : en effet, « la conception architecturale consiste dans l'adaptation réciproque des formes et de leur contexte ». Il y aurait d'ailleurs trois rapports entre la forme et le contexte. D'abord, le rapport de production explique que « l'espace lui-même (est) déterminé par une inscription sociale ou des dictées économiques » : le contexte socioéconomique et les rapports de production détermineraient l'espace. Puis, il y a le rapport de référence, voulant qu'« une forme (entretienne) toujours des rapports de référence avec une autre forme ou avec une idée ». Autrement dit, certains modèles dans la société, des prototypes culturels, tendent à se reproduire. Enfin, le rapport de signification concerne l'influence des formes sur les contextes : l'architecture est en quelque sorte un langage, elle créerait un signe architectural signifiant.

D'après Pinon, Borie et Micheloni, il faut utiliser ces trois rapports à la fois. De plus, comme ils engagent plusieurs individus dans une multitude de décisions, ces facteurs déterminent une infinité de relations.

Par ailleurs, on peut étudier la forme sans sa structure ni sa fonction. « Dans ce cas, on l'oppose au mot "structure" ou "constitution interne" de l'objet architectural, la forme n'étant qu'une espèce de cristallisation périphérique, un contour apparent. » D'où viendrait « La classique trilogie conceptuelle : "forme, fonction, structure" appliquée à l'architecture [...] » Mais nos auteurs pensent qu'il s'agit là d'une conception réductrice, alors qu'une véritable théorie « se doit (au moins) d'explicitier les rapports entre tous les éléments formels qu'elle décrit, et donc de mettre en évidence les structures qui assurent la cohérence de ces éléments ». Et « Si, en architecture, forme et structure ne sont qu'un seul et même phénomène, le problème se pose cependant de savoir quelle est la nature des structures formelles. ». C'est ici toute la recherche de leur livre.

Puis, les auteurs se penchent sur le concept de la forme, qui est à la fois structuration de la matière et structuration de l'espace. Ils tentent d'expliquer ce dernier concept. D'abord, l'espace est une substance indéfinie dans laquelle se trouvent les objets, un élément à la fois infini et indéfini. C'est également un lieu défini par des coordonnées. Il est relatif aux éléments matériels qui l'entourent et qui servent de coordonnées concrètes : un espace architectural dans un lieu déterminé. L'espace se situe enfin par rapport aux données physiques, psychologiques et sociologiques d'individus donnés et leurs différentes perceptions de celui-ci.

Ces données donnent lieu à une nouvelle définition de la part de nos auteurs : « la forme architecturale comme une double structuration, à la fois de la matière et de l'espace, c'est-à-dire de ce que les architectes appellent le plein et le vide ». D'où : « On peut donc préciser la définition de la forme architecturale comme étant un certain état d'équilibre entre la structuration de l'espace et celle de la matière. »

Pinon, Borie et Micheloni ajoutent qu'il faut adapter la forme aux contextes humain et physique, de même qu'aux structures de la matière et de l'espace.

Dans un même ordre d'idées, Jean-Louis Izard, du laboratoire ABC, ENSA-Marseille, étudie ce qu'il nomme « Le coefficient de forme du bâtiment » (Izard, 2006), qui est une donnée primordiale à prendre en compte dans l'étude de la consommation en énergie des bâtiments. Il s'agit du rapport de la « surface totale d'enveloppe et du volume habitable du bâtiment ». L'expression de ce coefficient de forme peut être affinée, ici, en évoquant le facteur de compacité, indépendant de la taille du bâtiment.

Le coefficient de forme peut être modifié en changeant soit la taille du bâtiment, soit sa forme. Certaines formes seront plus favorables que d'autres, et leur analyse permettra de hiérarchiser ces formes afin d'optimiser leur coefficient de forme à volume égal. Le concepteur, soucieux d'une haute qualité environnementale, devra donc prendre en compte, certes, l'importance des matériaux isolants, par exemple, mais également le coefficient de forme ou facteur de compacité. Ce geste est doublement économique, il ne coûte rien en conception et économise des matériaux et de l'énergie d'exploitation du fait de la linéarité des façades. « L'architecte tient là un motif très fort pour donner à son intervention dans la conception un sens à ses recherches morphologiques. » (Izard, 2006) La forme, on le voit, est très importante lorsqu'il s'agit d'économie énergétique, ce dont plusieurs articles traiteront.

Par exemple, dans un article intitulé « Qualité d'usage des bâtiments et contraintes énergétiques : synergie ou antagonisme ? », Claude-Alain Roulet (2007) démontre qu'il est possible de construire des bâtiments sains et confortables qui sont en même temps à dépense énergétique minimale. L'objectif de son article est de fournir des moyens pour construire de tels ouvrages écologiques.

Roulet commence par constater que les bâtiments – d'habitation ou commerciaux – qui sont les plus confortables sont le plus souvent des ouvrages à faible dépense énergétique. C'est ce qu'ont démontré deux enquêtes effectuées sur des immeubles résidentiels et administratifs ainsi que des études effectuées en Europe (« en moyenne, les occupants se sentent mieux dans les bâtiments à basse consommation d'énergie que dans les autres »). Or, d'après lui, la consommation d'énergie dépend davantage de la manière dont sont construites et exploitées

les constructions que de la température extérieure et intérieure. Et il serait possible d'allier la qualité de l'environnement intérieur, la qualité architecturale et la faible consommation d'énergie.

Les bons bâtiments sont habituellement plus récents, puisqu'une faible consommation d'énergie les caractérise. Ils occupent plus d'espace (surface et hauteur), ils optimisent l'éclairage naturel, les installations solaires d'eau chaude y sont plus fréquentes, et ils ont une meilleure ventilation, qui est souvent naturelle.

Le confort d'une maison exige d'abord de bonnes mesures architecturales et constructives, alliées à certaines mesures technologiques qui viennent les compléter (ventilation mécanique, dispositif de chauffage, etc.). Les mesures architecturales, qui sont des mesures « passives », concernent la distribution du volume (les petits emplacements sont faciles à chauffer), l'emplacement des ouvertures (fenêtres hautes ou basses), l'isolation thermique (à l'extérieur de la structure pour plus de stabilité), la ventilation thermique naturelle, qui est supérieure à la ventilation artificielle, le refroidissement passif (de nuit), le chauffage solaire, l'isolation, l'absorption acoustique et l'éclairage naturel, qui est de beaucoup préférable à la lumière artificielle.

Les mesures « actives » sont celles qu'on ajoute après la construction de l'établissement : la ventilation, la climatisation, l'éclairage électrique, etc. Même si celles-ci peuvent corriger certaines erreurs de conception architecturale, certaines architectures peuvent entraîner des conséquences désastreuses. En règle générale, un bâtiment devrait assurer, sans aucune consommation d'énergie, un confort au moins équivalent à celui régnant à l'extérieur. D'ailleurs, comme le prétend Claude-Alain Roulet, « S'il est bien conçu et construit, le bâtiment peut fournir un confort nettement supérieur. » Cela, sans trop de rattrapage à l'aide d'adjuvants mécaniques ajoutés.

L'auteur termine en donnant des façons de maximiser les gains solaires en chauffage. Il mentionne ainsi l'isolation thermique qui limite les besoins en chauffage et le vitrage à haute

performance, la répartition rationnelle des zones chauffées dans une maison, leur orientation par rapport au soleil, le chauffage adéquat, la protection solaire pour contrôler la chaleur en été et la régulation thermique adéquate grâce à des thermostats. Il fournit des idées pour refroidir une maison par une protection solaire efficace, par une ventilation adéquate pour évacuer la chaleur, par l'aération au moyen de trous d'air dans la structure (ouverts la nuit seulement), par une bonne isolation thermique et par des appareils à basse consommation énergétique pour diminuer la chaleur intérieure qu'ils produisent. D'après Roulet, dans une maison bien construite, les mesures actives ne devraient jouer qu'un rôle complémentaire. Pour lui, c'est d'abord et avant tout la conception architecturale qui est importante si l'on veut une bâtisse éco-énergétique.

C'est précisément ce dont parle « L'éco-construction au Royaume-Uni », une fiche de synthèse d'UBIFRANCE et les missions économiques (juillet 2010). On y constate que le gouvernement britannique a des projets ambitieux dans le domaine de la construction, en particulier de l'éco-construction. En effet, « Le secteur de la construction est au cœur de ses objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre [...] ». Pour ce faire, deux axes sont privilégiés : la réhabilitation des bâtiments anciens et l'augmentation progressive des standards énergétiques des bâtiments neufs. Des mesures fiscales et économiques encouragent ces efforts : réductions d'impôts, subventions, etc.

Six programmes ont été lancés entre 2008 et 2011 en vue de réhabiliter les logements anciens, ils sont financés par le gouvernement et les grands fournisseurs d'électricité et de gaz. Le gouvernement mise également sur des campagnes d'information du public.

Concernant les logements neufs, le gouvernement vise l'objectif zéro-carbone à l'horizon 2019. En 2006, le ministère de l'Intégration et des Collectivités locales avait déjà publié un code pour les maisons durables qui fait office de référence et permet de mesurer et de qualifier la durabilité des bâtiments.

Un autre de ses objectifs consiste à développer l'énergie solaire. C'est ainsi qu'un plan favorisant le chauffage par les énergies renouvelables a vu le jour en 2004. Les constructions

neuves font appel à l'utilisation de nouveaux matériaux et à des méthodes de construction innovantes. Elles se voient attribuer un certificat de performance énergétique. De plus, quatre nouvelles villes durables devraient voir le jour.

La gestion et le recyclage des déchets constituent le troisième objectif en matière d'écologie. Le marché de la gestion des déchets est très porteur. Trois ministères coordonnent la politique gouvernementale à cet égard : le ministère de l'Activité économique et de l'Industrie, le ministère de l'Intégration et des Collectivités locales et le ministère de l'Énergie et du Changement climatique. De nombreuses associations y collaborent également.

Il est intéressant de mentionner ici quelques projets pilotes : le Bedzed, quartier énergétiquement autonome, construit entre 2000 et 2002, à Wallington ; l'immeuble d'Adélaïde Wharf, à Shoreditch, titulaire du label « Eco Home Excellent » ; les logements Zedfactory, conformes au code des logements durables et le projet de dix « ecotowns » est encore à venir, ces villes réuniront tous les nouveaux aspects des normes environnementales.

Dans la même veine, la « Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments » a été écrite « Aux fins de la réduction de la consommation d'énergie et de la limitation des émissions de dioxyde de carbone [...] » (article 9) dans les bâtiments des États membres de la Communauté européenne. Elle est la preuve même que les nations commencent à se préoccuper de la réduction de l'énergie, de la construction de bâtisses moins énergivores et de la sauvegarde de l'environnement. En fait, ce texte contribue à « disposer d'un instrument juridique complémentaire permettant de mettre sur pied des actions plus concrètes afin d'exploiter le vaste potentiel d'économies d'énergie existant et de réduire les différences considérables entre les États membres [...] » (septième considérant). La directive énonce, dans son troisième considérant, que « L'amélioration de l'efficacité énergétique représente un volet important du train de politiques et de mesures nécessaires pour respecter le protocole de Kyoto [...] »

Cette directive vient en quelque sorte entériner les idées de Claude-Alain Roulet sur l'utilisation de la forme des bâtiments lorsqu'elle mentionne :

Les bâtiments auront une incidence sur la consommation d'énergie à long terme et les bâtiments neufs devraient donc répondre à des exigences minimales en matière de performance énergétique adaptées aux conditions climatiques locales. Les bonnes pratiques à cet égard devraient viser à une utilisation optimale des éléments relatifs à l'amélioration de la performance énergétique. (douzième considérant)

Ou encore :

L'élaboration de stratégies contribuant à améliorer les performances techniques des bâtiments en été devrait donc être une priorité. À cette fin, il convient plus particulièrement de développer les techniques de refroidissement passif [...] » (dix-huitième considérant)

Il s'agit donc, comme l'explique la directive de la Communauté européenne :

que les ouvrages ainsi que leurs installations de chauffage, de refroidissement et d'aération soient conçus et construits de manière à ce que la consommation d'énergie requise pour leur utilisation reste modérée eu égard aux conditions climatiques locales et au confort des occupants. (huitième considérant).

Les concepteurs et les constructeurs de bâtiments doivent donc désormais donner à leurs ouvrages une architecture qui favorise elle-même naturellement l'épargne et la conservation de l'énergie. Quant aux États membres de la Communauté européenne, ils « prennent les mesures nécessaires pour garantir que les bâtiments neufs respectent les exigences minimales en matière de performance énergétique [...] (article 5) Il en va de même pour les bâtiments anciens qui subissent des rénovations (article 6). De plus, « Les États membres veillent à ce que, lors de la construction, de la vente ou de la location d'un bâtiment, un certificat relatif à la performance énergétique soit communiqué au propriétaire [...] » (article 7.1). Ce certificat assure que des mesures sérieuses sont vraiment prises.

La maîtrise de l'énergie passe également par différents plans et projets, comme en témoigne un article publié en avril 1992 par Hydro-Québec intitulé : « Plan directeur pour la maîtrise

de l'énergie dans les municipalités ». Ce plan devait se réaliser avant 1999. D'abord, Hydro-Québec devait obtenir l'adhésion de ses clients à l'idée d'économiser l'énergie.

Le plan directeur de maîtrise de l'énergie en milieu municipal s'inscrivait dans un projet général d'efficacité énergétique. Les municipalités avaient été choisies comme groupe cible, car elles étaient des clients, mais elles pouvaient également être les diffuseurs d'une mentalité d'efficacité énergétique dans notre société.

L'efficacité énergétique n'est pas un pouvoir délégué aux municipalités, c'est plutôt une préoccupation à inculquer à l'administration municipale. Celle-ci peut agir sur l'efficacité énergétique selon les deux volets du projet d'Hydro-Québec : l'économie d'énergie et la gestion de la consommation. Elle peut également édicter des normes en matière d'aménagement du territoire et en urbanisme. L'efficacité énergétique est donc « un des éléments, des intrants permettant à une municipalité d'exercer ses juridictions ». Les municipalités sont donc sollicitées pour participer au projet d'efficacité énergétique en tant que clientes, mais plus que cela, en tant que diffuseurs et « démonstratrices de technologies ou de mesures d'efficacité énergétique pour chacun des marchés de l'entreprise ».

Après avoir adhéré au projet d'Hydro-Québec les municipalités avaient le rôle d'intermédiaires et devaient démontrer que ce projet permet d'améliorer la qualité de vie et d'optimiser l'allocation des ressources financières.

Même si les municipalités sont toutes préoccupées par ce sujet, elles ne sont pas pour autant toutes motivées à intervenir. Cette résistance se situe au niveau de tous les décideurs. Éliminer la résistance des décideurs est la raison qui justifie les différentes interventions d'Hydro-Québec.

Hydro-Québec visait l'adhésion d'un grand nombre de municipalités, ce qui exigeait une planification élaborée de ses interventions. C'était un plan ambitieux, qui, au final, devait permettre aux municipalités de réaliser une diminution appréciable de leur consommation énergétique et de jouer un rôle d'informateur de la population.

Le projet d'Hydro-Québec se voyait ainsi diffusé grâce aux municipalités, et, par la suite, par la population. L'intégration de nouvelles normes dans les règlements d'urbanisme assurerait la pérennité des résultats. Cette intervention aurait eu d'autres répercussions bénéfiques : rénovation de l'habitat, recherche et fabrication de nouveaux matériaux. Le succès d'une telle entreprise reposait essentiellement sur un très bon partenariat Hydro-Québec/municipalités.

Une des priorités énergétiques du Québec est la réduction des besoins en énergie à des fins de chauffage (ce qui explique l'importance de l'exploitation de l'énergie solaire). Cette réduction de la consommation passe par l'éclairage naturel, la protection contre le rayonnement solaire intense durant l'été et l'utilisation de matériaux peu énergivores.

Certains bâtiments sont plus faciles à adapter à ces nouveaux projets que d'autres : ce sont les bâtiments dont l'implantation et la forme optimisent les conditions climatiques et l'apport solaire et minimisent l'impact des vents violents en hiver. La fenestration peut aussi, parfois, pallier certains inconvénients d'implantation, et la configuration des lots de bâtiments peut être imaginée en fonction de l'ensoleillement.

Les bâtiments isolés obéissent à d'autres critères : ainsi, une habitation individuelle mais groupée aura un impact sur sa voisine. Il s'agit alors de maximiser les effets d'ensoleillement et d'ombre dans ces bâtiments.

Les auteurs de « Énergie, urbanisme et aménagement en milieu municipal », de l'Institut d'urbanisme, faculté de l'aménagement de l'Université de Montréal pour Hydro-Québec

(juillet 1996), fournissent, dans leur article, des exemples de bâtiments groupés, familiaux ou multifamiliaux.

La planification en amont de tout projet est de première importance, et « la localisation et l'orientation sur le terrain [...] est un facteur stratégique pour la consommation énergétique à des fins de chauffage et de climatisation ». Il s'agit de bien localiser l'implantation générale (mettre les bâtiments principaux au sud du terrain) et les espaces intérieurs (déterminer les espaces de jour et ceux n'ayant aucun besoin de lumière).

La forme donnée au bâtiment permettra de réduire les pertes de chaleur. Et il apparaît que le cube offre le meilleur rapport entre la surface de l'enveloppe et le volume. Après la localisation et la forme des bâtiments, l'attention se portera sur les ouvertures (grandes ouvertures au sud, sud-est et sud-ouest, minimisation des fenestrations au nord). La surface vitrée correspondra à environ 10 % à 12 % de la surface habitable. Le vitrage devra être choisi en fonction de l'orientation de l'ouverture. Lorsque cela est possible, il est intéressant d'envisager l'espace d'un solarium.

L'aménagement des ouvertures permettra de contrôler le rayonnement solaire pour éviter la surchauffe en été. On pourra prévoir une végétation adéquate, des pare-soleils, des surplombs bien dimensionnés et des rideaux ou des vitres teintées.

Certains moyens d'action municipaux ont été mis en place pour aider à réaliser ces objectifs, des guides comme « Protecting solar access for residential development » (American planning association, 1981), des interventions directes des municipalités ou des sensibilisations en direction des promoteurs et des particuliers. On peut également visiter des maisons types construites selon ces techniques de solaire actif et passif, comme la maison de l'APCHQ, à Laval.

Dans leur « Rapport de recherche – Série sur la maison et les collectivités saines – Gestion communautaire de l'énergie : document de base » de la SCHL-CMHC, 2000, Torrie Smith et ses associés traitent de la gestion communautaire de l'énergie, qu'ils définissent ainsi : « la gestion communautaire de l'énergie (GCE), (est) l'intégration des facteurs énergétiques aux processus de planification et de gestion municipaux, de manière à produire de multiples avantages dépassant les répercussions des initiatives individuelles et séparées ». Leur document « explore le potentiel de planification communautaire de l'énergie (PCE) pour contribuer à réduire les émissions de gaz de serre au Canada. » On parle alors de gestion axée sur la demande (GAD) et de planification intégrée des ressources (PIR), afin de diminuer les dépenses énergétiques qui, évidemment, ont un important effet sur les gaz à effet de serre. Il s'agit d'utiliser au maximum l'énergie disponible, de réduire les déchets et de tenter d'abaisser la dépendance à l'égard de l'automobile, entre autres solutions.

À ce sujet, l'auteur affirme :

La densité, la composition et l'aménagement des utilisations des terrains dans une localité influent sensiblement sur le nombre et la nature des moyens de transport et, par conséquent, l'usage de l'énergie pour le transport et ses répercussions environnementales connexes. Ces mêmes caractéristiques urbaines influent également sur la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer et climatiser des bâtiments, et pour construire et exploiter une infrastructure communautaire. Les collectivités contribuent à la production, à la distribution et à la consommation efficaces d'énergie, par les choix de planification et de conception qu'elles sont amenées à faire.

Les municipalités doivent donc s'occuper en premier lieu de choisir des terrains pour la construction qui soient efficaces en termes de gains en énergie et de solutions environnementales. C'est pourquoi elles doivent aussi établir « un plan détaillé pour l'usage efficace des ressources renouvelables et non renouvelables. »

L'auteur poursuit en expliquant que les municipalités doivent désormais veiller à réduire les gaz à effet de serre en choisissant des bâtiments plus efficaces et des mesures qui réduisent la pollution de l'air. C'est ainsi que des aménagements urbains compacts réduisent les dépenses

d'énergie et la prestation des services publics, et que les transports en commun, particulièrement, diminuent la pollution et la dépense énergétique. Le choix de l'énergie renouvelable, le recyclage de l'énergie des déchets, l'« usage de l'énergie solaire passive et les considérations relatives au microclimat [...] » viennent également diminuer les dépenses et procurer un cadre de vie plus sain. Il est donc important de considérer que « la densité et les modes d'utilisation des terrains influent sur les exigences en matière de service énergétique », et que par conséquent, « 50 % des émissions de gaz de serre du pays sont directement ou indirectement contrôlés par les gouvernements locaux », c'est-à-dire par les administrations municipales.

L'auteur appuie ses affirmations par cette citation :

Susan Owens (1991), dans un rapport préparé pour l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), faisait observer que la planification de l'utilisation des terrains, le choix des emplacements et les règlements en matière d'habitation seront d'une importance considérable dans la gestion énergétique urbaine, car les systèmes énergétiques sont fondamentalement liés aux types d'utilisation des terrains et à la structure du milieu urbain.

Il donne pour exemple que « [...] Newman et Kenworthy (1989) ont compilé des preuves manifestes de la relation inverse entre la densité et la consommation d'énergie pour le transport dans les collectivités urbaines ». Aussi, il donne pour exemple Quant, Dunphy et Fisher (1993), qu'ils constatent que plus forte est la population pauvre d'une ville, plus le transport en commun y est utilisé, diminuant ainsi la dépense d'énergie, mais entraînant cependant un haut degré de congestion de la circulation dans les villes, qui sont surtout habitées par des célibataires et des couples sans enfants.

Fait important donc, « les changements apportés aux plans directeurs, aux plans officiels et aux normes d'aménagement de l'utilisation des terrains peuvent fournir la base d'un changement fondamental dans les types d'utilisation de l'énergie, à long terme ».

Ainsi, les centres d'emplois, les détaillants, les services sociaux, les sports, etc., doivent être rapprochés pour une utilisation maximale du transport en commun. D'ailleurs, plus la densité d'une ville est forte, plus est grande la possibilité d'intégrer les immeubles aux systèmes énergétiques de quartier. Et plus la densité d'une agglomération augmente, moins les infrastructures sont coûteuses et moins d'énergie est dégagée proportionnellement dans l'atmosphère. Les gros immeubles nécessitent moins d'énergie pour le chauffage, ils dégagent aussi proportionnellement moins de gaz, etc. On peut également profiter du chauffage solaire passif et des effets microclimatiques, afin de créer un environnement plus sain et plus économique.

En fait, « le point où une collectivité peut fonctionner et prospérer tout en réduisant les VKD (VKD - voitures-kilomètres de déplacement) devient une mesure de force et de succès ». Torrie Smith en conclut qu'il faut refaire entièrement le transport en commun ainsi que la conception des quartiers et des collectivités. Et, pour lui, il revient aux gouvernements locaux de planifier et d'utiliser les terrains et les routes de manière à réduire les VKD. Or, au Canada, on opérerait trop peu pour la densité urbaine et, d'une manière générale, on manquerait de gestion communautaire de l'énergie. Pourtant, « Les lignes directrices sur le choix d'emplacements et la conception peuvent améliorer l'usage de l'énergie solaire passive pour le chauffage et réduire la consommation d'énergie en tirant parti des conditions microclimatiques. »

Smith conclut sur une note positive, en affirmant : « les résultats montrent assez clairement que de plus en plus de municipalités considèrent l'écologisation de leurs collectivités, non seulement comme un objectif environnemental, mais également comme une stratégie de développement économique à long terme ». Parlant des écovillages, il ajoute :

Les aménagements de l'écovillage partagent des caractéristiques, comme une forme compacte et une orientation vers les piétons, avec les collectivités conçues selon les principes du nouvel urbanisme, mais insistent davantage sur l'impact environnemental de l'habitation humaine.

Et il fait jaillir une lueur d'espoir lorsqu'il écrit : « En outre, certains écovillages européens élaborent des technologies de cogénération sur une petite échelle [...] »

Dans un texte préconisant des idées semblables et intitulé « Gestion communautaire de l'énergie – Document de base », Le Point en Recherche, février 2003, série technique 02-112, les auteurs affirment que « La gestion communautaire de l'énergie (GCE) est une composante clé de la réduction des besoins énergétiques d'une collectivité et de l'amélioration des puits de gaz à effet de serre. » Elle comprend « l'emploi plus efficace de l'énergie, la réduction des déchets et une dépendance moindre à l'égard des véhicules » Elle « encourage les consommateurs à réduire au minimum leur utilisation de l'énergie par différents moyens, dont l'achat d'électroménagers éconergétiques et le réglage des thermostats à des températures modérées plutôt qu'à des températures élevées ou basses ».

Parlant des systèmes d'acheminement de l'énergie, de la climatisation, du chauffage à distance, de la chaleur et de l'énergie combinées, des énergies renouvelables, de l'efficacité énergétique des bâtiments, de l'utilisation efficace des ressources, de la conception solaire passive, de la réduction des pertes thermiques dans les bâtiments, de la diminution de la consommation d'eau et de la production d'eaux usées, les auteurs invitent à l'utilisation maximale des ressources et à prendre conscience des conséquences des choix personnels sur la consommation d'énergie. Ils expliquent :

En résumé, la planification communautaire de l'énergie s'appuie sur une conception détaillée et à long terme de la consommation énergétique dans une collectivité. Elle cherche à créer les conditions et à influencer sur les choix de manière à susciter le développement communautaire durable.

Les solutions proposées touchent une multitude de domaines : l'intensification résidentielle (les aménagements à haute densité), les transports en commun bien conçus, les vélos, la marche, l'utilisation de l'énergie solaire passive (comme chauffage) et l'exploitation des conditions microclimatiques, le recyclage, le compostage, les systèmes énergétiques de quartier, le gaz de méthane tiré des décharges, les déchets de bois, etc.

Ramenant la consommation énergétique à un problème plus terre à terre, les auteurs de « Vers une consommation énergétique nette de zéro dans les maisons », juin 2008, Le Point en Recherche, Série technique 08-104, définissent ainsi la maison à consommation énergétique zéro : « La “Maison à consommation énergétique nette zéro”, tel que l’entend la SCHL, est une maison qui produit autant d’énergie qu’elle en consomme en une année». La maison préconisée a une enveloppe de bâtiment à performance élevée, son éclairage est éconergétique, elle utilise des techniques solaires passives, des installations mécaniques à haute performance, le chauffage de l’eau, des thermopompes et des panneaux photovoltaïques. Il est également important de « trouver des moyens efficaces de rénover les maisons afin qu’elles offrent une consommation énergétique nette zéro ». Pour les maisons anciennes, il est bon de ré-isoler les sous-sols, d’ajouter des systèmes à énergie renouvelable, de perfectionner l’enveloppe du bâtiment, de moderniser l’installation de chauffage, de ventilation et de climatisation, et d’ajouter des capteurs solaires thermiques. De telles transformations s’avéreront assez rapidement rentables.

Les auteurs concluent en expliquant qu’il « est faisable techniquement d’approcher la cible de consommation énergétique nette zéro dans une maison existante. Les technologies autorisant les travaux de rattrapage énergétique net zéro existent. »

En 2006, dans l’étude réalisée par la société Voé « Bilan Carbone du bâtiment URBILOG: une construction créditrice en CO₂ », il s’agit d’un bâtiment pilote de 280 m² construit par la société KASA BIO pour la SCI ECO Nord. Le profil environnemental de ce bâtiment en phase de construction a été réalisé sur la base du Bilan Carbone. Effectué en phase de conception, « le Bilan Carbone permet de disposer d’une unique référence permettant de hiérarchiser les émissions de GES pour faire des choix de matériaux moins impactants ». Or, la France s’est engagée à réduire de 54 millions de tonnes de CO₂ ses émissions par an à l’horizon 2010. On démontre, dans cette étude, que le choix des matériaux permet d’économiser des émissions qui, à elles seules, atteignent les objectifs de réduction fixés.

Les principaux atouts de ce bâtiment sont l'emploi du « bois », l'utilisation du fret par bateau et l'usage modéré des engins de chantier. Du point de vue de l'indicateur de carbone, les résultats obtenus pour la construction de bâtiments URBILOG sont globalement positifs.

La construction permet de disposer d'un « gain d'émissions de GES de l'ordre de 3,7 tonnes équivalent carbone, soit 13,6 tonnes équivalent CO₂ ». Une construction métallique aurait engendré, en revanche, une perte pour l'environnement, et une construction en béton aurait généré une perte plus importante encore.

Dans « Bilan Carbone appliqué aux bâtiments » (ADEME, 2010), on constate que dans un contexte de raréfaction des énergies fossiles et de lutte contre le changement climatique, la France a ratifié, en 1997, le Protocole de Kyoto, incitant à réduire ses émissions de CO₂ d'un facteur 4.

Le secteur du bâtiment est l'un des premiers concernés, étant lui-même un grand émetteur de GES (gaz à effet de serre). Ces émissions n'ont cessé d'augmenter durant les 30 dernières années. Certains leviers d'action existent pour parvenir à la maîtrise de la consommation d'énergie (rénovation thermique du parc existant, constructions neuves, maîtrise de la demande de la part des usagers et dépendant du fonctionnement des équipements). Une loi a été publiée en août 2009 pour fixer les mesures et les objectifs quantifiés de réduction des consommations énergétiques et des émissions de GES des bâtiments neufs et existants : le Grenelle Environnement 1. Son objectif est de réduire la consommation d'énergie de 38 % d'ici 2020 et les émissions de GES de 50 %.

Pour ce faire, il convient de réaliser un Bilan Carbone pour les bâtiments (alors non plus considérés comme des objets mais comme des activités). « Le Bilan Carbone d'un bâtiment est la quantification ou la comptabilisation des émissions des GES. » Les quatre processus

liés à une telle évaluation répondant à la norme XP P010-020-3 sont les suivants : la mise à disposition du bâti, le fonctionnement du bâtiment, les activités dont le bâtiment est le support et le déplacement des personnes.

L'évaluation est basée sur une analyse de cycle de vie du bâtiment : on établira à un bâtiment une DVP (durée de vie programmée). Le Bilan Carbone prend en compte 6 GES. Les produits de construction contribueront à l'évaluation dans leur phase de conception, ils se verront attribuer une DVE (durée de vie estimée). On notera la quantité de chaque produit et son facteur d'émission.

L'évaluation de la consommation d'énergie en phase d'exploitation comprendra la consommation des postes réglementaires, des autres postes liés au bâti, à l'activité et au logement. La méthode « Bilan Carbone » ne prendra en compte la séquestration carbone que dans le cas d'un bâtiment d'une durée de vie de plus de 100 ans.

Dans le cadre d'une réhabilitation ou d'une démolition suivies d'une reconstruction neuve, « le Bilan Carbone de l'opération devra intégrer l'amortissement de la valeur résiduelle de Bilan Carbone de l'ouvrage initial ». Le bilan prend en compte les techniques de démolition et l'élimination des déchets. Lors de la réalisation d'un Bilan Carbone, différentes sources d'émission de GES peuvent être comptabilisées selon les quatre processus mentionnés ci-dessus. Les facteurs d'émission des produits sont ceux des produits en sortie d'usine, ils sont issus des FDES (fiches de déclaration environnementale et sanitaire) ou des PEP (profils environnementaux produits).

Le facteur d'émission est directement disponible dans le PEP, car le référentiel impose la différenciation des étapes du cycle de vie du bâtiment. En revanche, les indicateurs environnementaux des FDES sont fournis sur le cycle de vie complet du bâtiment et non par

étapes. Le facteur d'émission à partir d'une valeur par défaut est obtenu en appliquant un pourcentage fixe de 80 % aux valeurs calculées pour le cycle de vie complet.

Les différents articles dont nous avons traité mettent tous en évidence l'importance de la construction des édifices dans l'épargne énergétique. Aussi, nous avons donc réuni un ensemble d'articles dont le but est de démontrer l'urgence de réduire les émissions d'énergies polluantes qui augmentent les émissions de CO₂, et par conséquent, les gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique. Nul ne saurait sous-estimer ces données ni l'urgence d'agir dans ce domaine. Or si les expérimentations dans ce champ de l'activité humaine semblent nombreuses, elles ne le sont pas encore suffisamment pour réduire drastiquement les émissions de CO₂ qui contribuent au réchauffement de la planète. On ne peut parler jusqu'à maintenant que du début d'une prise de conscience tardive, mais néanmoins absolument nécessaire à « sauver la planète ».

CHAPITRE 4

LA MODÉLISATION VIRTUELLE ET LES CRITÈRES DE BASE DU BÂTIMENT

Un bâtiment construit doit être avant tout confortable et sain. C'est en réalité sa raison d'être. Il doit protéger les occupants de l'environnement extérieur, assurer un climat agréable à l'intérieur et fournir des services tels que les communications et le transport. Jusqu'à maintenant, l'analyse des bâtiments a été effectuée par rapport aux matériaux de construction, à l'enveloppe du bâtiment, à l'orientation et à l'influence du climat sur le rendement de la construction ou la relation entre les différentes sources d'énergie et le bâtiment.

L'objectif principal de ce chapitre est de démontrer comment la forme bâtie d'une construction peut être analysée en utilisant des outils informatiques et, ainsi, amener la personne qui conçoit ce bâtiment et le gestionnaire de projet à prendre de bonnes décisions aux points de vue opérationnel, environnemental, de la durée de réalisation, du cycle de vie et des coûts associés au développement.

Aussi, ce chapitre illustre les critères de base qui permettent de charger automatiquement des données dans le modèle de bâtiment. Les données au niveau de la surface sont utilisées pour la définition du modèle de simulation. Aussi, toutes les données d'activité, d'éclairage, de systèmes de chauffage, de ventilation et climatisation (CVC), d'équipement sont des valeurs prédéfinies. La seule exception sont les données de centrale de traitement d'air (CTA) pour les systèmes CVC Compact dont les paramètres sont déterminés au niveau du bâtiment.

4.1 Vers la modélisation et l'analyse virtuelle du bâtiment

L'architecture du XX^e siècle a été influencée par une analogie simple formulée par le grand architecte français Le Corbusier. En effet, il a conçu la « Cité Radieuse » une unité

d'habitation a Marseille ou il a affirmé et proposé que « l'immeuble est une machine à habiter ». Cela a été le résultat d'une évolution historique tenant compte de la révolution industrielle. Les besoins de la société en matière d'habitation ont conduit à recourir de plus en plus à la production d'une énergie provenant de machines avec des techniques permettant une forte productivité du travail. La production en grandes séries, centralisée, utilisant des normes ou des standards afin d'obtenir des produits d'une qualité homogène, s'est traduite par l'industrialisation et la mécanisation du bâtiment.

Aujourd'hui, on remarque qu'un bâtiment est très différent d'une machine. Les machines sont fixes, ce sont des objets statiques, sujettes à une appréciation scientifique. Il est vrai que le bâtiment peut être contrôlé par ses occupants, mais les forces motrices qui agissent sur le bâtiment pour créer du confort dans l'abri sont le climat et des conditions météorologiques qui ne peuvent être contrôlées, prévues ou transformées. Les bâtiments sont le cadre d'une interaction complexe entre les personnes, les bâtiments eux-mêmes, le climat et l'environnement.

Les bâtiments sont également bien encadrés par certains types d'analyses scientifiques qui se penchent sur les facteurs suivants : la lumière du jour, le flux d'énergie, le transfert thermique, la ventilation, la mécanique et ainsi de suite.

Le bâtiment doit être conçu en tenant compte des éléments visibles, des matériaux, par exemple, et invisibles, comme la température. L'être humain a bâti depuis des millénaires des maisons bien adaptées aux différents climats et environnements. Cette évolution s'est faite par apprentissage, avec le bénéfice de différents instruments et mécanismes et par expériences répétitives.

Aujourd'hui, grâce à la technologie, le concepteur et le gestionnaire de projet disposent d'outils informatiques adéquats pour simuler un bâtiment.

On remarque que les technologies de l'information sont indispensables à chaque discipline. De la construction d'un bâtiment à la planification urbaine, on peut affirmer qu'on a besoin d'un logiciel qui, par son architecture, sera capable de soutenir le processus de prise de décision, tant au sein d'une même organisation qu'entre plusieurs intervenants. Son importance ira jusqu'à la gestion de l'information.

Concernant les aspects techniques relatifs à l'exécution du bâtiment, l'outil informatique vient résoudre une vieille problématique de coordination due à une pratique courante dans l'industrie, qui consiste à conférer des mandats à plusieurs sous-traitants différents. Parfois, il arrive que le processus de coordination des systèmes (ventilation, climatisation, chauffage, électricité, tuyauterie, etc.) devienne long, difficile et qu'il engendre des retards considérables dans l'échéancier du projet. Pour contrer ce problème, des chercheurs ont créé un prototype de logiciel pour la coordination des différents systèmes mentionnés ci-dessus. Cependant, son rendement est efficace en fonction de la représentation tridimensionnelle des systèmes dans l'espace et de l'analyse systématique des possibilités d'interférences.

Depuis quelques années, l'émergence de plusieurs outils informatiques a eu des répercussions dans le domaine de la construction. Ces innovations ne sont guère le fruit du hasard, mais plutôt une réponse à une demande grandissante de l'industrie. D'autre part, le développement de logiciels répond à de plus grandes problématiques que celles qu'a connues le domaine de la construction, dont notamment la mondialisation. En effet, avec le développement et l'apogée que connaît le domaine actuellement, la précision, la rapidité et le rendement exigent des outils bien spécifiques et plus avancés afin d'être en mesure de suivre les tendances. Cela dit, plusieurs études sont menées partout dans le monde pour mettre en place des logiciels capables de servir les différents acteurs de la construction.

Dans quelle mesure les architectes, les ingénieurs, les entrepreneurs et autres acteurs de l'industrie pourront-ils trouver des outils informatiques adaptés à leurs besoins spécifiques ?

Pour tenter de répondre à cette question, la méthodologie choisie consiste à étudier, à manipuler et à comparer différents logiciels à plusieurs points de vue. Le but, tout en tenant compte de la forme en plan bâtie d'une construction résidentielle, consiste à voir comment la maîtrise de la réalité virtuelle d'un bâtiment permettra, sans doute, de cerner le modèle de simulation d'efficacité énergétique de la construction et les émissions de CO₂, en utilisant la modélisation spatiale en 3D.

Pour créer le modèle en 3D du bâtiment à l'aide de logiciels de dessins assistés par ordinateur, on utilise une technologie informatique ayant une capacité de visualisation tridimensionnelle. Cette technologie rend possible de circuler virtuellement à l'intérieur et à l'extérieur de l'espace d'une manière interactive. Elle permet de réduire les malentendus entre les professionnels et leurs clients. Ceux-ci auront une meilleure perception de l'espace, tout en ayant la possibilité de participer au processus de conception.

Nous devons donc considérer deux critères importants :

- La possibilité de créer le modèle en 3D de la construction directement dans l'interface du logiciel ;
- La qualité des résultats obtenus par rapport aux données fournies à plusieurs niveaux.

Pour étudier l'environnement et l'efficacité énergétique du bâtiment, on peut utiliser plusieurs logiciels qui vont maintenir l'utilisateur immergé dans la réalité virtuelle. Voici quelques logiciels utilisés et testés : RETScreen, EE4, IES Virtual Environment et DesignBuilder.

Le logiciel RETScreen est un logiciel d'analyse de projets d'énergies propres créé par le ministère des Ressources Naturelles Canada (RNCAN) en collaboration avec de nombreux membres de l'industrie. Il peut être utilisé pour évaluer la production, les économies d'énergie, les coûts, les réductions des émissions, la viabilité financière, le risque de

différentes technologies d'énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Le logiciel comprend des bases de données de produits, de projets ainsi que des bases de données hydrologiques et climatiques.

L'analyse a été réalisée en quelques étapes. Premièrement, on a fourni les données et les paramètres, de même que les conditions du site. Par la suite, un modèle énergétique a été choisi pour les feuilles de calculs. Puis, ont été obtenues différentes analyses des coûts. À la quatrième étape, on a pu effectuer une analyse des émissions, et à la cinquième, une analyse financière et une analyse des risques.

Nous devons remarquer que ce logiciel est fondé sur l'utilisation des bases de données numériques climatiques RETScreen. L'avantage de ce logiciel est qu'il a été augmenté, en y ajoutant des données climatiques rendues nécessaires par l'outil et tirées de 6 500 stations météorologiques au sol, afin de couvrir la surface entière de la planète, incluant les régions raccordées à un réseau d'électricité central, isolées et hors du réseau. Pour le moment, il est impossible d'y intégrer la capacité de modélisation ou de visualisation tridimensionnelle virtuelle d'un bâtiment à étudier, de même qu'est exclue la possibilité d'analyser la forme et la volumétrie d'un bâtiment, les corrélations avec les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie.

Quant au logiciel EE4, c'est un logiciel de simulation offert par le ministère des Ressources Naturelles Canada qui permet d'évaluer les bâtiments commerciaux, institutionnels et à logements résidentiels. Le logiciel EE4 valide la conception des nouveaux bâtiments, des rallonges de bâtiments et des rénovations importantes relativement au Code national de l'énergie pour les bâtiments – Canada. Ayant un rendement moindre que le RETScreen, la technologie ne constitue cependant qu'une partie de la réponse. Le logiciel est fondé également sur l'utilisation des bases de données numériques fournies par le concepteur. Malgré cela, il a été démontré qu'en suivant un processus de conception intégrée auquel des professionnels en conception collaborent étroitement dès le premier jour, on peut réduire les

coûts finaux en limitant les besoins de révision du concept et en augmentant les possibilités d'économies d'énergie. Comme RETScreen, EE4 n'a pas le potentiel de modélisation ou de visualisation tridimensionnelle virtuelle d'un bâtiment dans l'interface du logiciel, la possibilité d'étudier la forme et la volumétrie d'un bâtiment est exclue, de même que les corrélations avec les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie.

Parmi tous les logiciels utilisés et testés, le programme IES Virtual Environment est celui qui est le plus près d'atteindre les deux critères énoncés et recherchés pour répondre aux besoins de cette étude : la possibilité d'avoir le modèle en 3D de la construction directement dans l'interface du logiciel, la possibilité de changer la qualité des résultats obtenus par rapport aux données présentées à plusieurs niveaux et de visualiser le bâtiment. Avec ce logiciel, il est possible de modéliser la ventilation naturelle, de régler les niveaux de lumière du jour, de contrôler l'éclairage artificiel, dont la consommation énergétique, les niveaux de dioxyde de carbone, le confort thermique des occupants et de visualiser les résultats en 3D. En manipulant IES Virtual Environment, nous nous sommes aperçu qu'il fallait utiliser différentes autres méthodes et plusieurs logiciels pour créer le modèle virtuel en 3D de la construction, en se servant des logiciels de modélisation SketchUp de Google ou Revit Architecture, qui est un produit créé par AutoCAD. Le bâtiment conçu avec les deux logiciels de modélisation en 3D mentionnés précédemment a le désavantage majeur qu'une fois exporté dans l'interface virtuelle de IES Virtual Environment, on ne peut y apporter les modifications nécessaires et au fur et à mesure des nouveaux besoins du concepteur.

Bien que IES Virtual Environment ait été très près de combler les besoins de cette étude, il est important de préciser que cet inconvénient pourrait nous amener à perdre des données lors des transferts répétés entre les interfaces de SketchUp et de Revit Architecture. De plus, la difficulté rencontrée quant à la simulation nous a conduit à devoir attendre au cours de notre démarche.

Relativement récent comme produit, en fonction de la forme bâtie en plan et de la volumétrie d'une construction, le logiciel DesignBuilder permet de voir l'interaction des séquences de

construction, d'accéder aux informations sur la qualité des processus de construction et sur la quantité des éléments qui y interviennent. Aux points de vue du concepteur du bâtiment et du gestionnaire du projet, le fait d'avoir intégré la possibilité de bâtir un modèle virtuel en 3D directement dans l'interface du logiciel, d'avoir un contrôle facile entre les différentes variables et les données introduites dans l'analyse et l'alternative de ne pas avoir utilisé des logiciels de modélisation comme AutoCAD ou SketchUp nous ont conduit à choisir pour cette étude le logiciel DesignBuilder. De plus, fondé sur le moteur EnergyPlus, DesignBuilder est une interface graphique offrant des solutions avancées pour la simulation thermique statique et dynamique du bâtiment. L'avantage de l'utilisation de DesignBuilder réside dans le fait qu'il offre des fonctionnalités qui ne sont pas disponibles simultanément dans d'autres logiciels existants :

1. Le dessin du bâtiment en 3D avec vue des ombres portées directement dans l'interface du programme;
2. L'évaluation de la production et des économies d'énergie;
3. Le coût, les réductions des émissions;
4. La gestion de l'occupation;
5. Le calcul des déperditions/gains thermiques de l'enveloppe en hiver/été;
6. Les dimensions du chauffage;
7. La dimension du rafraîchissement par ventilation naturelle et/ou climatisation;
8. La simulation dynamique restituant des données de confort, de bilan thermique, de ventilation, etc.;
9. La construction en 3D réaliste avec vue des ombres créées;
10. Le modeleur du bâtiment, comprenant des assistants de création de fenêtres, la composition de la construction, la détection automatique du type de paroi qui évite de nombreuses saisies ou dessins;
11. La gestion de la ventilation mécanique, des ouvertures de fenêtres, de l'occultation des baies, des apports internes par planning paramétrable selon le type, le jour, les mois, les heures (ou infra-horaire);

12. L'économie d'énergie : « free-cooling », le récupérateur d'énergie sur air extrait, la ventilation nocturne, la gradation de l'éclairage selon la luminosité, la régulation des températures d'air soufflé selon la demande, le volume d'air variable déjà disponible en quelques clics;
13. La viabilité financière et le risque de faire intervenir différentes technologies d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique;
14. Le support de communication lors des réunions de conception du bâtiment.

EnergyPlus est un moteur de calcul et de simulations dynamiques, de bilan thermique, d'analyse de confort, de panneaux solaires, etc. EnergyPlus a été créé par l'Office de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables du Département de l'Énergie du gouvernement des États-Unis. C'est uniquement un moteur sans interface de saisie ni sortie de résultats. DesignBuilder permet la saisie graphique d'un modèle, la gestion de ses bases de données (matériaux, vitres, planification d'activités, etc.) et il gère de manière transparente la liaison au moteur jusqu'à la restitution des résultats sous forme de graphiques ou de tableaux. C'est la raison principale pour laquelle DesignBuilder a été créé.

DesignBuilder offre actuellement l'utilisation des systèmes de chauffage, de ventilation et climatisation (CVC) Compact d'EnergyPlus. Un système CVC est composé d'une centrale qui gère le chauffage, la ventilation et la convection d'un bâtiment. Aussi, ce système prend-il en charge l'échange d'air, la qualité de l'air et les contrôles environnementaux. Ces systèmes sont prédéfinis par EnergyPlus, qui utilise un schéma système et des paramètres par défaut pour en simplifier l'usage. La possibilité de créer ses propres systèmes est une fonction à venir de DesignBuilder.

4.2 Critères de base des bâtiments

Les critères de base permettent de charger rapidement des données dans le modèle de bâtiment. Pour cette recherche, ont été choisies celles qui correspondent le mieux aux activités et aux besoins résidentiels. Les critères de bases suivantes sont disponibles :

- Critères de base d'activité;
- Critères de base de construction;
- Critères de base de vitrage et Critères de base de façade;
- Critères de base d'éclairage;
- Critères de base des systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air (CVC);
- Les normes énergétiques.

Les critères de base sont associés spécifiquement au modèle et sont alors appelées « Critères de base du modèle ».

Les modifications apportées aux prédéfinitions de la bibliothèque n'ont aucune incidence sur les modèles de bâtiments existants, car ils se réfèrent à leur propre ensemble de prédéfinitions du modèle.

Ainsi, toute modification apportée à une prédéfinition ne concernera le modèle qu'une fois les données chargées.

4.2.1 Critères de base d'activité

Les critères de base d'activité servent de source de données relatives aux activités dans le cadre de l'utilisation du bâtiment pour les modèles de bâtiment. Ces données concernent

l'occupation, l'utilisation du matériel et les températures de conception internes acceptables, ainsi que les niveaux d'éclairage et les taux de ventilation par personne.

Il est également déterminé le taux de consommation d'eau chaude par personne, ainsi que le niveau du métabolisme en fonction de l'activité dans l'espace. Sont alors définis les apports en provenance des ordinateurs, des équipements de bureau, et des cuisines (voir Figure 4.1).

En ce qui concerne l'ambiance, les données relatives aux exigences en matière d'ambiance et de confort, sont définies les éléments suivants :

- Température de consigne de chauffage (si le lieu est chauffé);
- Température de consigne de climatisation (si le lieu est refroidi);
- Température de consigne de ventilation naturelle;
- Niveau d'éclairage requis;
- Niveau d'air frais requis par personne (définit le taux de renouvellement d'air de la ventilation mécanique);

Dans la figure ci-dessous on remarque quelles sont les données de référence choisies concernant l'activité qui a lieu dans le bâtiment.

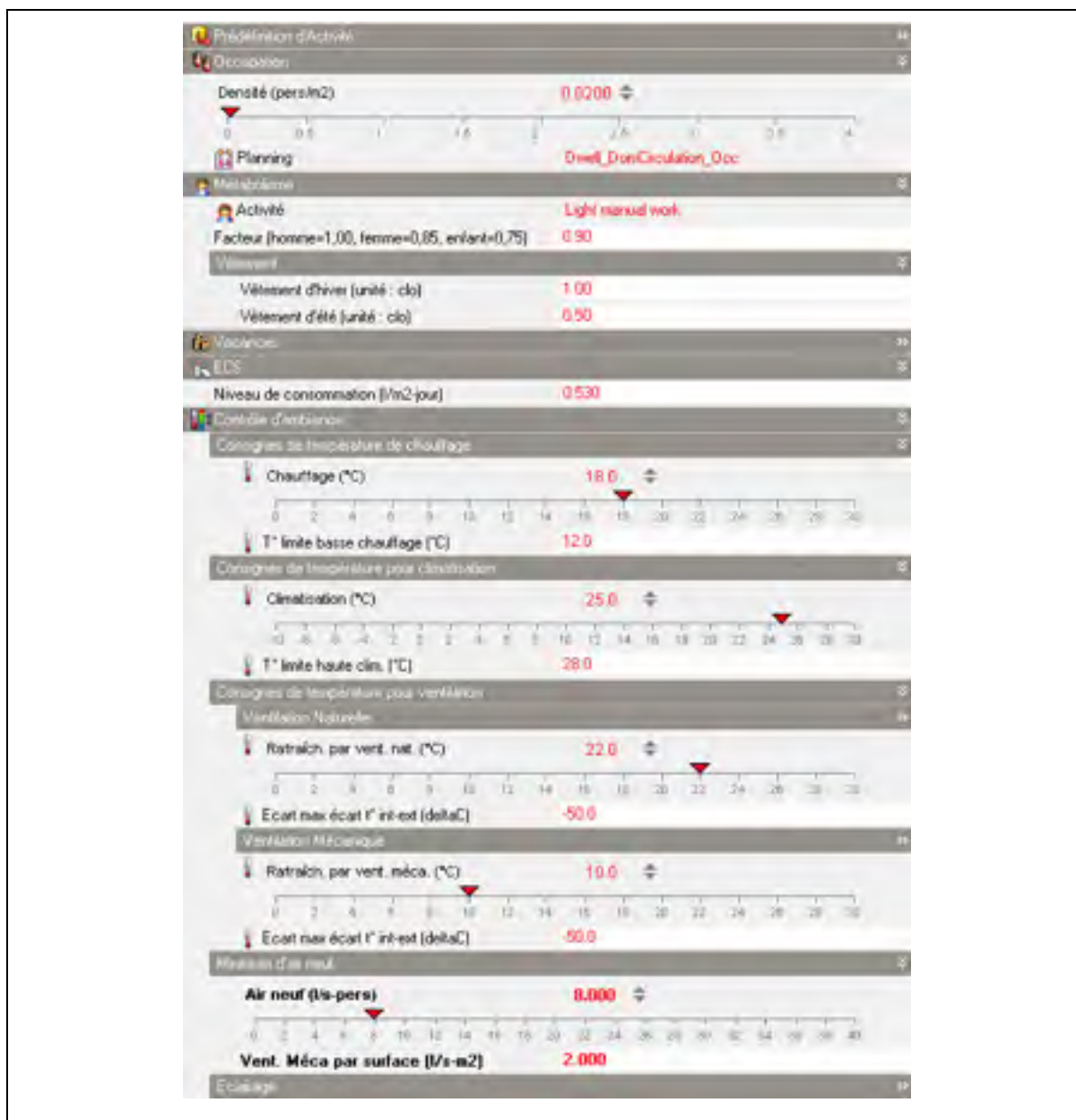


Figure 4.1 Critères de base d'activités
Tirée de logiciel DesignBuilder

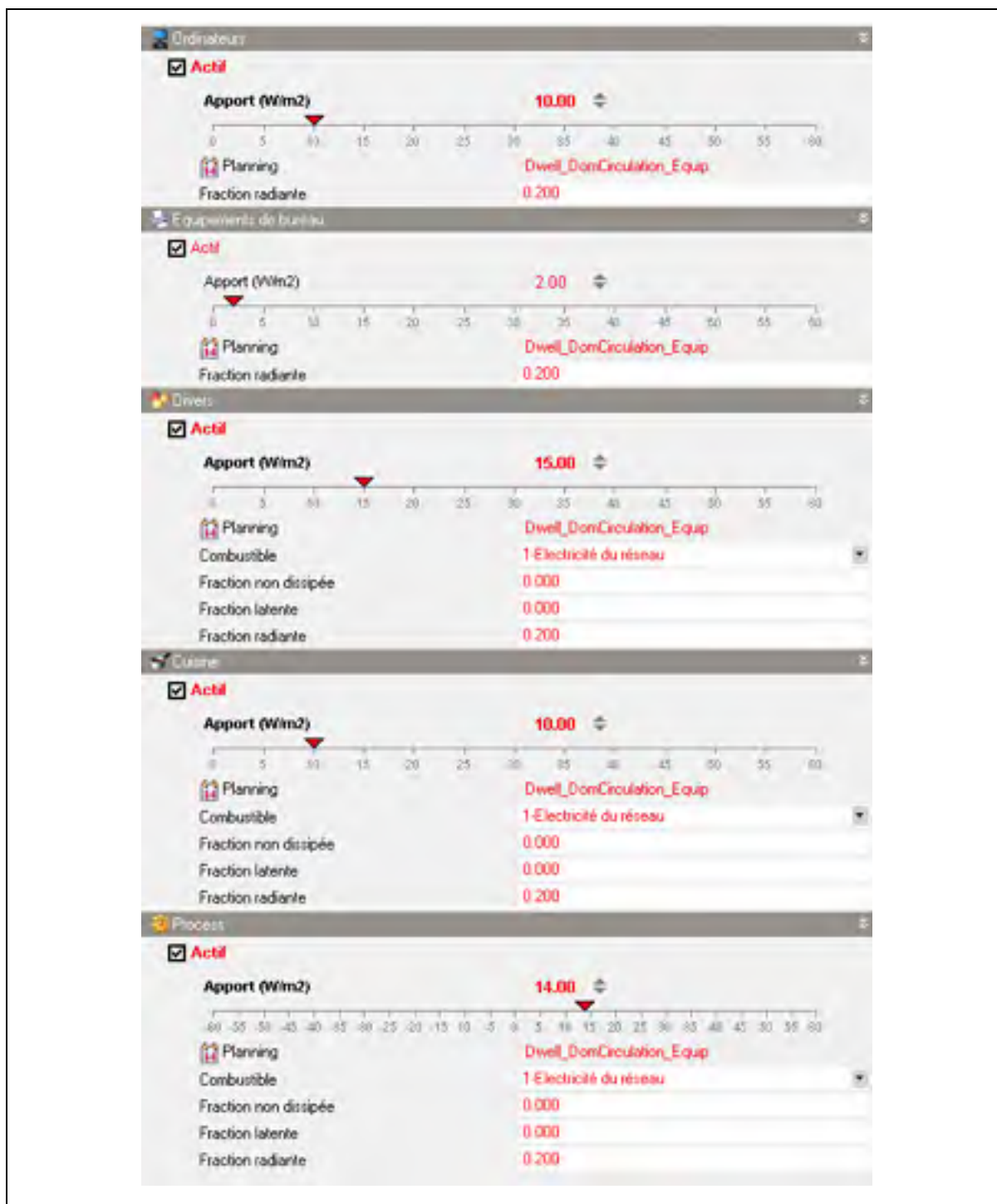


Figure 4.1 (suite) Critères de base d'activités
Tirée de logiciel DesignBuilder

4.2.2 Critères de base de construction

Les critères de base de construction servent comme source de données de construction génériques pour les modèles de bâtiments étudiés. Le critère de base fournit des données sur la construction des murs internes et extérieurs, des toitures, des sols, des cloisons, des dalles et plafonds, des portes internes et externes, ainsi que sur les perméabilités à l'air et la ventilation naturelle. Aussi, il est indiqué les niveaux d'isolation et d'inertie thermique par défaut pour ce type de construction. Dans les figures présentées plus bas on remarque quelles sont les données de référence choisies concernant les critères de base de la construction (voir Figure 4.2).



Prédéfinition	Canadian energy code, Poids moyen
Construction	
Murs externes	Insulated cavity wall
Toiture terrasse	Canadian energy code Toiture terrasse, Poids moyen
Toit incliné (occupé)	Canadian energy code Toiture inclinée, Poids moyen
Toit incliné (inoccupé)	Clay tiles (25mm) on air gap (20mm) on roofin
Cloisons internes	105mm brick (plastered both sides)
Semi exposé	
Murs semi exposés	Insulated cavity wall
Plafond semi exposé	Canadian energy code Plafond semi exposé, Poids moy
Plancher semi exposé	Canadian energy code Plancher semi exposé, Poids m
Plancher	
Plancher bas sur terrain	Canadian energy code Plancher bas sur terrain, Poids
Plancher extérieur	Canadian energy code Plancher extérieur, Poids moy
Plancher intermédiaire	100mm reinforced concrete
Sous-sol	
Murs	100mm concrete slab
Interne	100mm concrete slab
Toit	100mm concrete slab
Porte externe	Wooden door
Porte interne	Wooden door
Isolation thermique interne	
Construction	100mm concrete slab

Figure 4.2 Critères de base de construction
Tirée de logiciel DesignBuilder

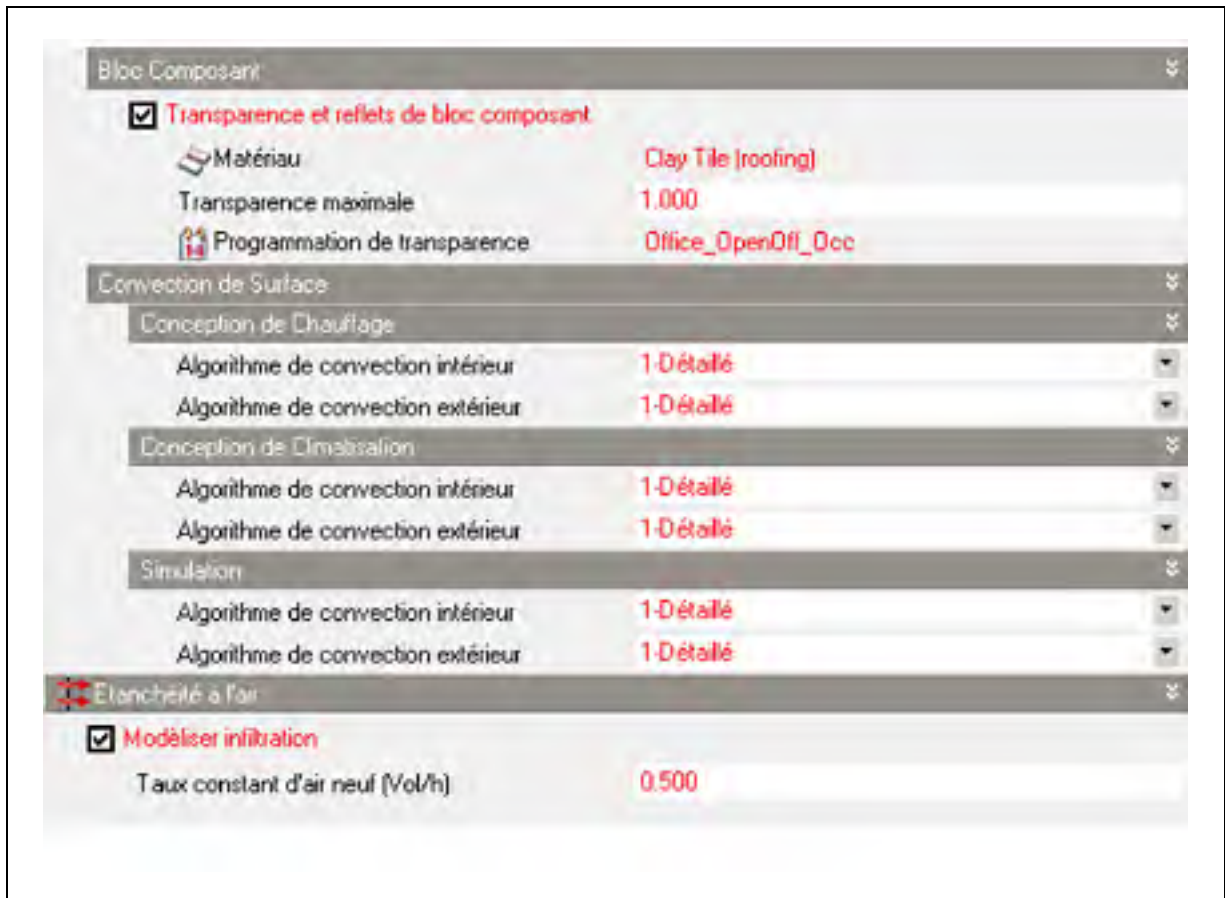


Figure 4.2 (suite) Critères de base de construction
Tirée de logiciel DesignBuilder

Les caractéristiques thermiques des matériaux de construction sont utilisées pour chacun des matériaux et tiennent compte de la masse d'inertie thermique dans leurs simulations.

4.2.3 Critères de base de vitrage et Critères de base de façade

Les critères de base de vitrage sont utilisés comme source pour les données sur le vitrage, les cadres et les protections solaires des modèles du bâtiment. Pour cette étude, il est à remarquer les données sur les matériaux du vitrage, cadres et aire d'ouverture pour les vitrages externes

et les vitrages internes. Aussi, un dispositif d'ombrage a été appliqué lors de ce critère de base de vitrage qui est chargée dans le modèle.

Les critères de base de façade sont utilisées pour fournir un choix de dispositions de façades simples typiques et des définitions de cadre pouvant être chargées facilement dans le modèle de bâtiment (voir Figure 4.3, Figure 4.4 et Figure 4.5).

Il existe plusieurs types de façades vitrées standards à utiliser :

- Aucun : pas de vitrage;
- Continu horizontal : le vitrage est généré selon une bande continue horizontale utilisant une hauteur d'appui et un certain pourcentage de vitrage;
- Hauteur fixée : le vitrage est généré avec une hauteur fixe à la hauteur d'appui spécifiée et la largeur est calculée à l'aide du pourcentage de vitrage. Cette option utilise ce pourcentage, mais donne priorité à la hauteur des fenêtres;
- Hauteur préférée : le vitrage est généré par rapport à la hauteur de fenêtre et le pourcentage de vitrage, mais la hauteur de fenêtre peut être ajustée de manière à obtenir le pourcentage de vitrage requis. Cette option utilise les hauteurs de fenêtre et d'appui, mais donne priorité au pourcentage de vitrage;
- Largeur et hauteur fixées: les fenêtres ont une dimension fixée. Cette option utilise le pourcentage de vitrage, mais donne priorité à cette dimension;
- Toute la surface (100 %) : la surface entière est occupée par le vitrage, sans aucun cadre.

Dans cette étude, nous avons choisi les données suivantes :

Prédéfinition de vitrage	
Prédéfinition	Canadian energy code
Fenêtres extérieures	
Type de vitrage	Canadian energy code Vitrage
Disposition	No glazing
Dimensions	
Type	3-Hauteur préférée
% fenêtre sur mur	15.00
Hauteur de fenêtre (m)	1.20
Espacement entre fenêtres (m)	4.00
Hauteur d'appui (m)	0.90
Position du dormant dans le mur	
Cadres et diviseurs	
☒ A un cadre/diviseurs ?	
Construction	Painted Wooden window frame
Diviseurs	
Type	1-Divisé
Largeur (m)	0.020
Diviseurs horizontaux	1
Diviseurs verticaux	1
Projection extérieure (m)	0.000
Projection intérieure (m)	0.000
Ratio de conduction du verre bord-centre	1.000
Cadre	
Largeur cadre (m)	0.040
Largeur entre bord intérieur du cadre et ...	0.000
Largeur entre bord extérieur du cadre et...	0.000
Ratio de conduction du verre bord-centre	1.000
Ombiage	
☒ Occlusion de fenêtre	
Type	Blind with high reflectivity slats
Position	3-Extérieur
Type de contrôle	3-Programmé
Fonctionnement	
Planning de fonctionnement	Dwell_DomCirculation_Occ
☒ Pare-soleil local	
Type	Louvre, 0.5m projection + 0.5m overhangs an

Figure 4.3 Critères de base de vitrage et critères de base de façade
Tirée de logiciel DesignBuilder

Fenêtres intérieures

Type de vitrage: Canadian energy code Interne

Disposition: Horizontal strip, 90% glazed

Dimensions

Type: 1-Continu horizontal

% fenêtre interne sur mur: 40.00

Espacement entre fenêtres (m): 5.00

Hauteur d'appui (m): 0.80

Cadres et diviseurs

☒ A un cadre/diviseurs ?

Construction: Painted Wooden window frame

Diviseurs horizontaux: 1

Diviseurs verticaux: 1

Largeur cadre (m): 0.040

Largeur du diviseur (m): 0.020

Fonctionnement

% de surface de vitrage ouvert: 40

Planning de fonctionnement: Dwell_DomCirculation_Doc

Fenêtres de toiture/lucarnes

Type de vitrage: Canadian energy code Toit

Disposition: No roof glazing

Dimensions

Type: 4-Largeur et hauteur fixées

Largeur de fenêtre (m): 0.50

Hauteur de fenêtre (m): 1.00

Espacement entre fenêtres (m): 5.00

Hauteur d'appui (m): 0.80

Cadres et diviseurs

☒ A un cadre/diviseurs ?

Construction: Painted Wooden window frame

Diviseurs horizontaux: 1

Diviseurs verticaux: 1

Largeur cadre (m): 0.040

Largeur du diviseur (m): 0.020

Ombfrage

☒ Occultation de fenêtre

Type: Blind with high reflectivity slats

Position: 1-Intérieur

Type de contrôle: 3-Programmé

Fonctionnement

Planning de fonctionnement: Dwell_DomCirculation_Doc

Figure 4.4 Critères de base de la fenestration
Tirée de logiciel DesignBuilder

Portes

Externe

☒ Auto-générer

Largeur préférée (m) 1.10

Hauteur préférée (m) 2.10

Interne

☒ Auto-générer

Largeur préférée (m) 1.10

Hauteur préférée (m) 2.10

Fonctionnement

% de surface de porte ouverte 50

% du temps où les portes sont ouvertes 80

Planning de fonctionnement Dwell_DomCirculation_Occ

Aérations

Interne

Type d'aération Grille, small, light slats

☒ Auto-générer

Surface d'aération (m2) 0.0900

Espacement entre aérations (m) 5.00

Hauteur d'aération au dessus du sol (m) 0.20

Fonctionnement

Planning de fonctionnement Dwell_DomCirculation_Occ

Figure 4.5 Critères de base de portes et aérations
Tirée de logiciel DesignBuilder

4.2.4 Critères de base d'éclairage – la sortie et le contrôle

Les critères de base d'éclairage sont utilisées comme source de données des systèmes d'éclairage génériques, qui peut être chargée dans les données du bâtiment.

Dans l'étude, l'énergie d'éclairage de sortie est indiquée pour l'éclairage général, en W/m2/100 Lux. Ces données permettent de définir l'énergie d'éclairage réelle en W/m2, pour chaque zone, selon la formule suivante :

- Énergie d'éclairage (W/m^2) = Éclairage ($\text{W/m}^2/100 \text{ lux}$) x Niveau de lux de la conception (onglet Activité) / 100.

Les données de sortie sont utilisées pour générer des charges d'éclairage basées sur le type d'éclairage et le niveau d'éclairement requis, tel qu'il est fixé dans les données du critère de base de l'Activité. Aussi, dans l'étude, l'éclairage est contrôlé selon le niveau de lumière naturelle. Il y a trois types de contrôle voulu : le contrôle continu, le contrôle par gradation continue ou l'extinction et le contrôle par paliers. Pour le contrôle de type continu, les lampes s'affaiblissent sans interruption et de manière linéaire depuis leur puissance électrique maximale, luminosité maximale, jusqu'à leur puissance électrique minimale, luminosité minimale, en fonction de l'augmentation de la luminosité naturelle. Les lampes restent à leur niveau minimum, même en cas d'augmentation supplémentaire de la luminosité naturelle.

Dans la Figure 4.6 il est représenté le contrôle d'éclairage de type Continu et le contrôle d'éclairage de type Gradation continue/Extinction.

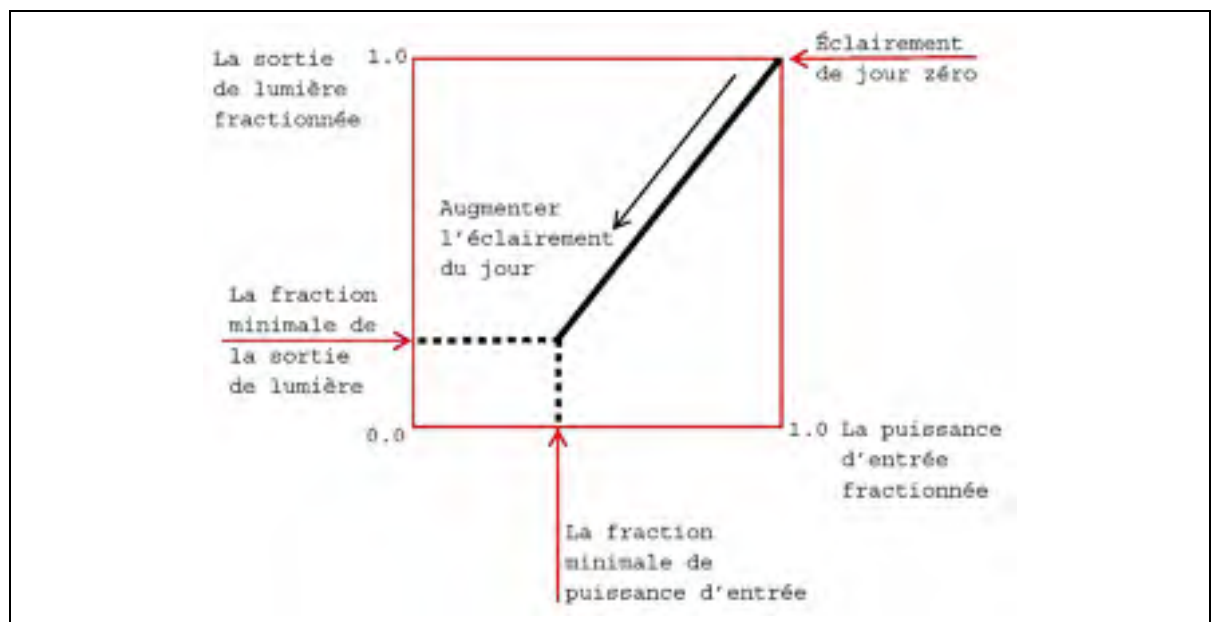


Figure 4.6 Le contrôle d'éclairage de type Continu et Gradation continue/Extinction

La fraction minimum de la puissance consommée pour ce type de contrôle correspond à la puissance la plus basse que le système d'éclairage puisse atteindre, exprimée sous la forme d'une fraction de la puissance maximale consommable.

Pour un contrôle d'éclairage « gradation continue/extinction », il s'agit de la fraction de puissance atteinte juste avant que la lampe ne s'éteigne complètement.

La fraction minimale de puissance du type de contrôle « continu » correspond à la puissance la plus basse que le système d'éclairage puisse atteindre, exprimée sous la forme d'une fraction du maximum de puissance. Il s'agit de la fraction de lumière que produit le système à sa puissance minimum.

Pour un contrôle d'éclairage « gradation continue/extinction », il s'agit de la fraction de puissance atteinte juste avant que la lampe ne s'éteigne complètement. Ce type de contrôle est identique au contrôle continu, sauf que les lampes s'éteignent complètement quand le point minimum d'éclairage est atteint.

Pour cette étude, le contrôle par paliers n'est pas utilisé, car les deux autres types de contrôles donnent des solutions plus pertinentes et affinées. À titre d'exemple, pour ce type de contrôle, la puissance électrique et l'éclairement varient par paliers discrets, qui sont définis en tenant compte de la période de la journée, sans avoir la qualité d'adaptation en fonction de l'utilisation du bâtiment par les habitants et leurs activités (voir Figure 4.7).

Prédéfinition d'éclairage

Prédéfinition Canadian energy code

Eclairage général

☒ **Actif**

Energie d'éclairage (W/m2-100 lux) 9.00

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40

Planning Dwell_DomCirculation_Light

Type de luminaire 1-Suspendu

Fraction radiante 0.420

Fraction visible 0.180

Fraction convective 0.400

Eclairage de tâche et d'accentuation

☒ **Actif**

Apport (W/m2) 140.000

Planning 8:00 - 18:00 Mon - Sat

Eclairage Extérieur

☒ **Actif**

Niveau de dimensionnement (W) 100.000

Planning On

Option de contrôle 2-Planning + Forcer à inactif en journée

Contrôle d'éclairage

☒ **Actif**

Type de contrôle 3-Gradué

Nombre de pas 1

Eblouissement

Index d'éblouissement maximum autorisé 22.0

Voir angle rel. à l'axe Y (°) 0.0

Surface d'éclairage 1

% de zone couverte par la surface d'éclaira... 100

Surface d'éclairage 2

☒ **Seconde zone d'éclairage**

Eclairage souhaité (lux) 300

% de zone couverte par la surface d'écl... 0.0

Figure 4.7 Critères de base d'éclairage
Tirée de logiciel DesignBuilder

4.2.5 Critères de base de CVC

Les systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air (CVC) sont utilisés dans les installations, tant pour le confort des occupants que pour les besoins des différents procédés conçus de manière à compenser les pertes et les gains de chaleur, à assurer la ventilation et à régler la température et l'humidité.

Dans l'étude, les critères de base CVC sont utilisées comme source de données génériques des systèmes de chauffage/refroidissement et de ventilation, qui peut être chargée dans les données du bâtiment (voir Figure 4.8).

Pour la ventilation, il est introduit le taux de renouvellement d'air maximum approprié à la ventilation naturelle/mécanique.

Les données du système CVC sont divisées en trois sections : Système (c'est-à-dire les données d'un système complet), Chauffage et Climatisation. Quand l'option du modèle CVC est définie « Simple », les besoins de ventilation naturelle et mécanique sont définis par l'énergie auxiliaire nécessaire aux ventilateurs, aux pompes et autres équipements auxiliaires. Cette valeur énergétique correspond à une évaluation de la consommation lors des périodes au cours desquelles aucun système de chauffage ou de refroidissement ne fonctionne.

Lorsque l'option du modèle CVC est définie « Compact », il y a la possibilité de déterminer le type de système compact en sélectionnant l'une des valeurs ci-dessous :

- Une valeur unitaire de zone unique, qui permet de modéliser les unités de conditionnement d'air de type fenêtre, ainsi que tout autre système n'utilisant pas de conduit aéraulique;

- Une valeur unitaire nommé multi-zone, qui permet de modéliser des systèmes de conditionnement d'air à débit constant;
- Une valeur unitaire VAV, qui permet de modéliser des systèmes de conditionnement d'air à Volume d'Air Variable (VAV).

Lorsqu'on utilise le système compact VAV, il y a la possibilité de définir le système plus en détail, selon les options suivantes :

- Par le type de contrôle de l'air extérieur introduit dans le système, c'est-à-dire, par une valeur corrigée ou une valeur proportionnelle. La première valeur signifie que le taux minimum d'air extérieur est déterminé, quel que soit le taux du système présent. La seconde valeur signifie que le taux minimum d'air extérieur varie en fonction du flux total d'air du système;
- Ratio minimum, c'est-à-dire, la fraction minimum d'air fourni : cette valeur correspond à la fraction du maximum d'air fourni jusqu'à laquelle la centrale de traitement d'air en VAV peut réduire sa charge.

Lors de l'utilisation de l'option du modèle CVC définie sur « Simple » il est déterminé le coefficient de performance (CoP) saisonnier complet du système de chauffage et climatisation, incluant les pertes de distribution.

Lors de l'utilisation de l'option du modèle CVC définie sur « Compact » il est déterminé le coefficient de performance (CoP) saisonnier de chauffage et climatisation, excluant toute énergie consommée par les ventilateurs, pompes, etc., ainsi que les pertes de distribution.

Quand il est décrit la distribution des températures d'air, par défaut, EnergyPlus suppose que la température de l'air dans une zone est entièrement uniforme (c'est-à-dire que l'air est mélangé de manière homogène).

Les données de cet onglet permettent de choisir un gradient de température qui varie de manière dynamique, sur la base des éléments suivants :

- Température extérieure;
- Température intérieure;
- Différence entre les températures extérieure et intérieure;
- Charge en chauffage;
- Charge en refroidissement.

Prédéfinition CVC

Prédéfinition Canadian energy code

Ventilation mécanique

☒ **Actif**

Méthode de définition de l'air extérieur 1-Pat zone

Air extérieur (Vol/h) 20.000

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20

Fonctionnement

Planning Dwell_DomCirculation_Occ

Ventilateurs

Type de ventilateur 1-Injection (Ajout chaleur du ventilateur)

Augmentation de pression (Pa) 1400

Rendement total (%) 70

Chaleur du moteur dans l'air (%) 100

Energie auxiliaire

Energie des auxiliaires (kWh/m2) 2.00

Figure 4.8 Critères de base de systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air (CVC)

Tirée de logiciel DesignBuilder

Chauffage		OK
☒ Chauffé		
Combustible	2-Gaz naturel	
COP du système de chauffage	0.620	
Type		
Type de chauffage	1-Convectif	
Condition d'injection d'air		
Température d'air injecté (°C)	35.00	
Taux d'humidité air injecté (g/g)	0.010	
Fonctionnement		
Planning	Dwell_DomCirculation_Heat	
Climatisation		
☒ Climatisé		
Combustible	1-Electricité du réseau	
COP du système de climatisation	1.320	
Condition d'injection d'air		
Température d'air injecté (°C)	12.00	
Taux d'humidité air injecté (g/g)	0.008	
Fonctionnement		
Planning	Dwell_DomCirculation_Cool	
ECS		
☒ Actif		
Prédéfinition ECS		<None>
Type	1-Même que CVC	
Températures d'eau		
Température de consigne (°C)	80.00	
Température d'eau réseau (°C)	10.00	
Fonctionnement		
Planning	Dwell_DomCirculation_Doc	
Ventilation naturelle		
☒ Actif		
Méthode de définition de l'air extérieur	1 Par zone	
Air extérieur (Vol/h)	3.000	
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12		
Fonctionnement		
Planning	Dwell_DomCirculation_Doc	
Distribution des Températures d'Air		
Mode de distribution	1-Mélangé	

Figure 4.8 (suite) Critères de base de systèmes de chauffage,
de ventilation et de conditionnement d'air (CVC)
Tirée de logiciel DesignBuilder

4.2.6 Normes énergétiques

Les données des normes énergétiques sont utilisées dans le logiciel DesignBuilder pour indiquer l'efficacité énergétique prescrite d'un composant du bâtiment et/ou de tout le bâtiment.

Il y a trois types de normes concernant la transmission thermique :

- Performance de composant d'enveloppe;
- Performance de l'enveloppe entière du bâtiment;
- Performance énergétique totale du bâtiment.

Les normes énergétiques d'un composant définissent le coefficient de transmission de chaleur U maximum ou « indice U » maximum prescrit pour les composants individuels (murs, fenêtres, toits, etc.). Les données indiquent les coefficients U maximum requis.

S'agissant de l'enveloppe de bâtiment et la performance énergétique, les critères de base de normes énergétiques fixent une limite pour le taux de transfert de chaleur au travers de l'enveloppe complète du bâtiment. La limite est généralement fixée sous la forme d'un coefficient de transmission de chaleur U moyen pour l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment.

4.3 Le calcul de la conception de chauffage et de la climatisation

DesignBuilder a été conçu pour proposer plusieurs méthodes de calcul pour chaque type de simulation énergétique. Il existe quatre types de simulation énergétique :

- Simulation de conception de chauffage;
- Simulation de conception de climatisation;
- Simulation en conditions météorologiques réelles;

- Simulations des indicateurs de performance énergétique.

4.3.1 Conception de chauffage

Les calculs de conception de chauffage sont effectués en vue de déterminer la taille de l'équipement de chauffage correspondant aux conditions météo d'hiver les plus froides, susceptibles de se produire au niveau de la localisation du site. Ces calculs de conception sont normalement effectués au moyen de méthodes en régime permanent, comme celles proposées par l'« American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers » (ASHRAE) et l'organisme d'ingénierie professionnelle britannique, le « Chartered Institution of Building Services Engineers » (CIBSE).

DesignBuilder permet de réaliser de manière efficace le même calcul à l'aide du système de simulation thermique dynamique EnergyPlus.

Les simulations de conception de chauffage à l'aide d'EnergyPlus présentent les caractéristiques suivantes :

- Température externe constante (en régime permanent) définie sur la température externe de conception d'hiver;
- Vitesse et direction du vent définies sur les valeurs de conception;
- Sans apport solaire;
- Sans apport interne (éclairage, équipement, occupation etc.);
- Zones chauffées constamment en vue d'obtenir la consigne de température de chauffage à l'aide d'un simple système de chauffage par convection, en prenant en compte la conduction et la convection thermique entre les zones de températures différentes.

La simulation se poursuit jusqu'à ce que les températures/flux de chaleur de chaque zone convergent. Si la convergence n'a pas lieu, la simulation continue pendant le nombre de jours maximum spécifié dans les options de calcul.

La simulation calcule les puissances de chauffage requises à la conservation des consignes de température de chaque zone et affiche la perte de chaleur totale répartie au niveau :

- du vitrage;
- des murs;
- des cloisons;
- des planchers pleins;
- des toits;
- de l'infiltration extérieure;
- de la ventilation naturelle intérieure (c'est-à-dire la perte de chaleur au niveau d'autres espaces adjacents plus froids par l'intermédiaire des fenêtres, des aérations, des portes et des trous).

La perte totale thermique de chaque zone est multipliée par un facteur de sécurité (1,5 par défaut), afin de déterminer la puissance de dimensionnement de chauffage recommandée. Ce dimensionnement de chauffage peut être consigné directement dans les données du modèle *Puissance de chauffage* en fonction du paramètre de l'option du modèle *Dimensionnement des installations* de l'onglet « Données » sous les systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air, CVC.

Aussi, il est important de remarquer que les calculs de conception de chauffage n'utilisent pas les données de ventilation naturelle.

Il y a plusieurs façons pour afficher les données souhaitées :

1. *Tout* : apports/pertes de chaleur de l'enveloppe et de la ventilation, apports internes (pas de conception de chauffage), et température extérieure de bulbe sec;
2. *Données site* : toutes les données de site;
3. *Confort* : air intérieur, températures radiantes et de confort;
4. *Apports internes* : apports internes comprenant l'équipement, l'éclairage, l'occupation, l'apport solaire et l'apport de climatisation/chauffage CVC;
5. *Enveloppe et ventilation* : apports de chaleur à l'espace à partir des éléments de surface (murs, planchers, plafonds etc.) et de la ventilation. Les valeurs négatives indiquent une perte de chaleur dans l'espace.

4.3.1.1 Résultats de la répartition des pertes thermiques

Les résultats détaillés de la conception de chauffage sont affichés sous forme d'histogramme et de tableau (voir Figure 4.9). Les données de perte thermique des surfaces (murs, plafonds, planchers, etc.) se rapportent au transfert de chaleur qui a lieu de la zone étudiée à la surface intérieure des éléments du bâtiment.

La chaleur fournie est la somme des valeurs de perte thermique des composants suivants :

- *Température d'air* : température moyenne de l'air calculée;
- *Température radiante* : moyenne pondérée de (surface 'x' émissivité) de la température des surfaces internes de la zone;
- *Température opérative* : moyenne des températures de l'air intérieur et des températures radiantes;
- *Température sèche extérieure* ;
- *Vitrage* : perte de chaleur à travers tout le vitrage;
- *Murs* : perte de chaleur à travers les murs extérieurs;

- *Plafonds (intérieurs)* : perte de chaleur à travers les plafonds intérieurs (par exemple, zone supérieure plus froide);
- *Planchers (intérieurs)* : perte de chaleur à travers les planchers intérieurs (par exemple, zone inférieure plus froide);
- *Planchers (extérieurs)* : perte de chaleur à travers les planchers extérieurs (pas les planchers sur terre-plein ; par exemple, plancher dans un espace en porte-à-faux, avant-toit, etc.);
- *Portes et aérations* : perte de chaleur par conduction à travers les portes et les aérations;
- *Planchers sur terre-plein* : perte de chaleur à travers les planchers sur terre-plein;
- *Cloisons (intérieures)* : perte de chaleur à travers toutes les cloisons intérieures (par exemple, zone adjacente plus froide);
- *Infiltration extérieure* : perte de chaleur par les infiltrations d'air (entrées d'air par les fissures et les trous de l'enveloppe du bâtiment);
- *Ventilation mécanique externe* : perte de chaleur due à la pénétration de l'air extérieur par le système de distribution d'air. Il est possible d'exclure la ventilation mécanique des calculs de conception de chauffage en excluant les données du modèle « Ventilation mécanique active »;
- *Ventilation naturelle intérieure* : perte de chaleur due à l'échange d'air par les fenêtres intérieures ouvertes, les portes, les aérations, les trous et les cloisons virtuelles avec les espaces adjacents;
- *Zone de chaleur sensible* : chaleur fournie pour maintenir la température de conception de chauffage intérieure.

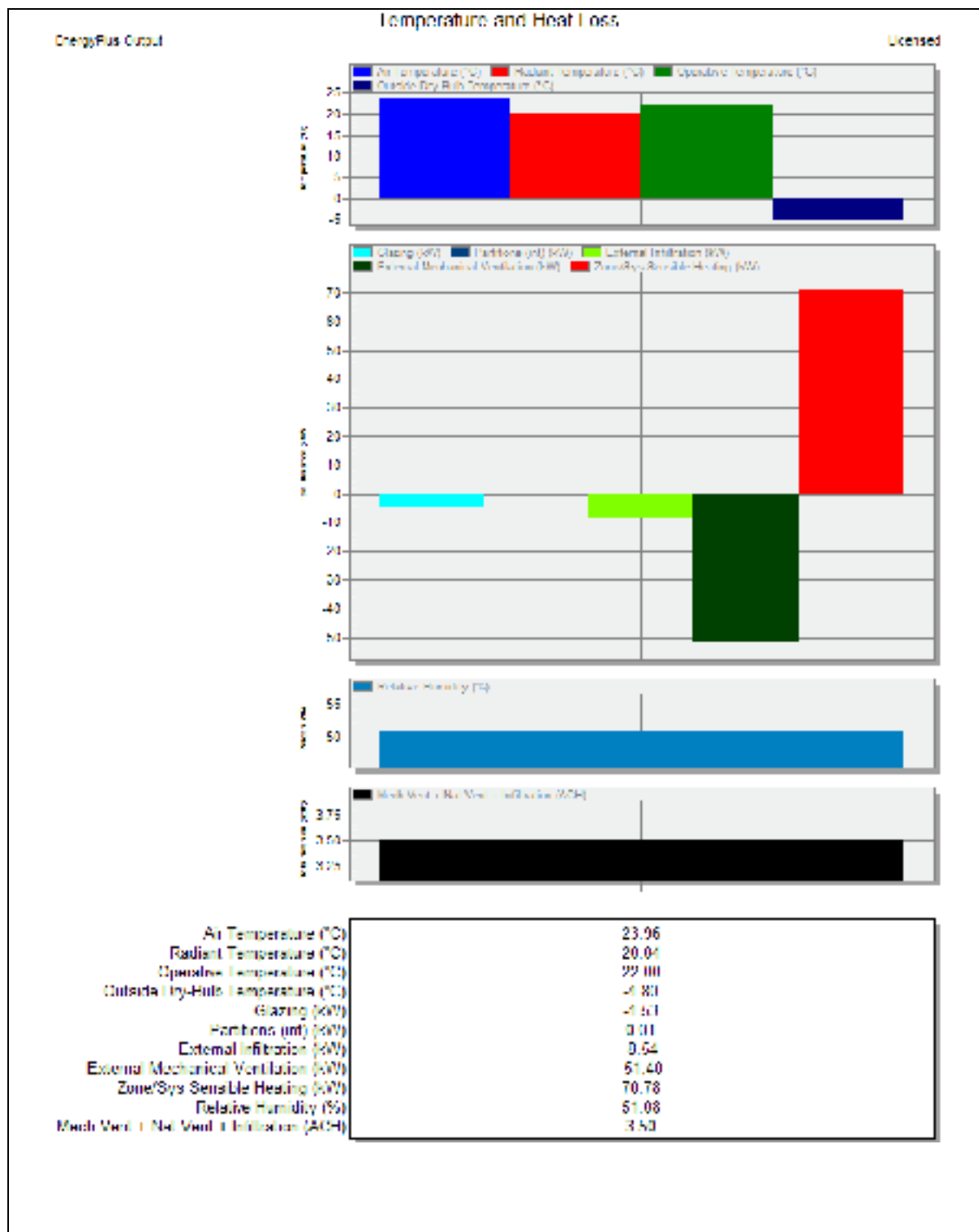
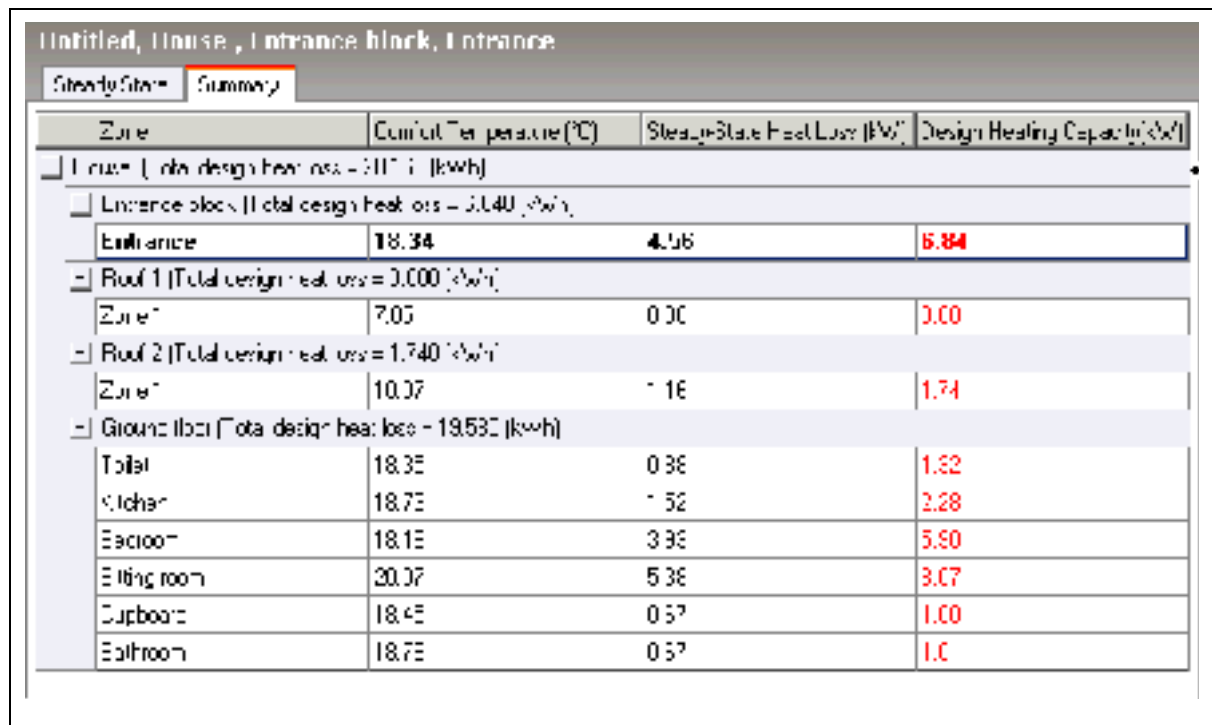


Figure 4.9 Conception de chauffage – la température et la perte de chaleur
Tirée de logiciel DesignBuilder

4.3.1.2 Récapitulatif – conception de chauffage

La Figure récapitulative montre la température de confort, la perte thermique en régime permanent et la puissance de chauffage de conception :

- *Température de confort* : moyenne des températures de l'air intérieur et des températures radiantes (également appelé température «opérationnelle»);
- *Perte thermique en régime permanent*;
- Similaire à la chaleur fournie dans l'onglet Régime permanent : chaleur fournie pour maintenir la température de conception de chauffage interne;
- *Puissance de dimensionnement* : perte thermique en régime permanent multipliée par le facteur de dimensionnement pour fournir la puissance de dimensionnement de chauffage de l'équipement.



The screenshot shows the 'Summary' tab of a DesignBuilder window titled 'Untitled1, House, Entrance block, Entrance'. It displays a table with heating design data for different zones. The table has four columns: Zone, Comfort Temperature (°C), Steady-State Heat Loss (kW), and Design Heating Capacity (kW). The data is organized into expandable sections for Entrance block, Roof 1, Roof 2, and Ground floor.

Zone	Comfort Temperature (°C)	Steady-State Heat Loss (kW)	Design Heating Capacity (kW)
Entrance block (Total design heat loss = 3.117 (kwh))			
Entrance	18.34	4.56	5.84
Roof 1 (Total design heat loss = 3.000 (kwh))			
Zone 1	7.05	0.00	3.00
Roof 2 (Total design heat loss = 1.740 (kwh))			
Zone 2	10.07	1.16	1.74
Ground floor (Total design heat loss = 19.532 (kwh))			
Toilet	18.35	0.36	1.62
Kitchen	18.75	1.52	2.28
Bedroom	18.15	3.35	5.90
Living room	20.07	5.36	8.07
Garage	18.45	0.57	1.00
Bedroom	18.75	0.57	1.00

Figure 4.10 Récapitulatif – conception de chauffage
Tirée de logiciel DesignBuilder

4.3.2 Conception de la climatisation

Les calculs de conception de la climatisation servent à déterminer la puissance de l'équipement de climatisation mécanique correspondant aux conditions météo de conception d'été les plus chaudes, susceptibles de se produire au niveau de la localisation du site.

Dans les zones qui ne sont pas refroidies mécaniquement, les températures flottantes sont calculées selon les effets de ventilation naturelle ou mécanique.

Ces calculs de conception sont normalement effectués au moyen de méthodes périodiques en régime permanent, telles que les méthodes de facteurs d'admission et de réaction proposées par l'« American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers » (ASHRAE) et les méthodes de l'organisme d'ingénierie professionnelle britannique, le « Chartered Institution of Building Services Engineers » (CIBSE).

DesignBuilder permet de réaliser, de manière efficace, le même calcul à l'aide du système de simulation thermique dynamique EnergyPlus.

Les simulations de conception de climatisation à l'aide d'EnergyPlus présentent les caractéristiques suivantes :

- Températures périodiques extérieures en régime permanent calculées à partir des conditions météo de conception d'été minimales et maximales en comptant dans les calculs le vent;
- Apports solaires à travers les fenêtres et ventilation naturelle planifiée;
- Apports internes provenant des occupants, de l'éclairage et autres équipements pris en compte de la conduction et de la convection thermique entre les zones de températures différentes.

La simulation se poursuit jusqu'à ce que les températures/flux de chaleur de chaque zone convergent. Si la convergence n'a pas lieu, la simulation continue pendant le nombre de jours maximum spécifié dans les options de calcul.

La simulation calcule les températures et flux de chaleur toutes les demi-heures pour chaque zone et détermine les charges de climatisation requises pour maintenir toutes les consignes de température de climatisation dans chaque zone.

La charge maximale de climatisation de chaque zone est multipliée par un facteur de sécurité (1,3 par défaut) pour fournir un dimensionnement de climatisation. Ce dimensionnement de climatisation peut être consigné directement dans les données du modèle de puissance de climatisation, en fonction du paramètre de l'option du modèle de dimensionnement des installations de l'onglet Données dans les systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air, CVC.

Il est important de préciser que les calculs de conception de la climatisation utilisent les données du modèle de ventilation naturelle planifiée définies dans l'onglet CVC, même lorsque l'option de ventilation naturelle calculée est active. Cela permet d'apporter les données d'entrée aux calculs de conception de la climatisation. Les données d'entrée de ventilation naturelle calculée sont trop complexes pour être correctement résumées dans cette étude.

4.3.2.1 Résultats de la conception de climatisation

Les résultats comportent des analyses détaillées de toutes les demi-heures de la conception de climatisation (affichés, par défaut, sous forme de graphique linéaire) (voir Figure 4.11).

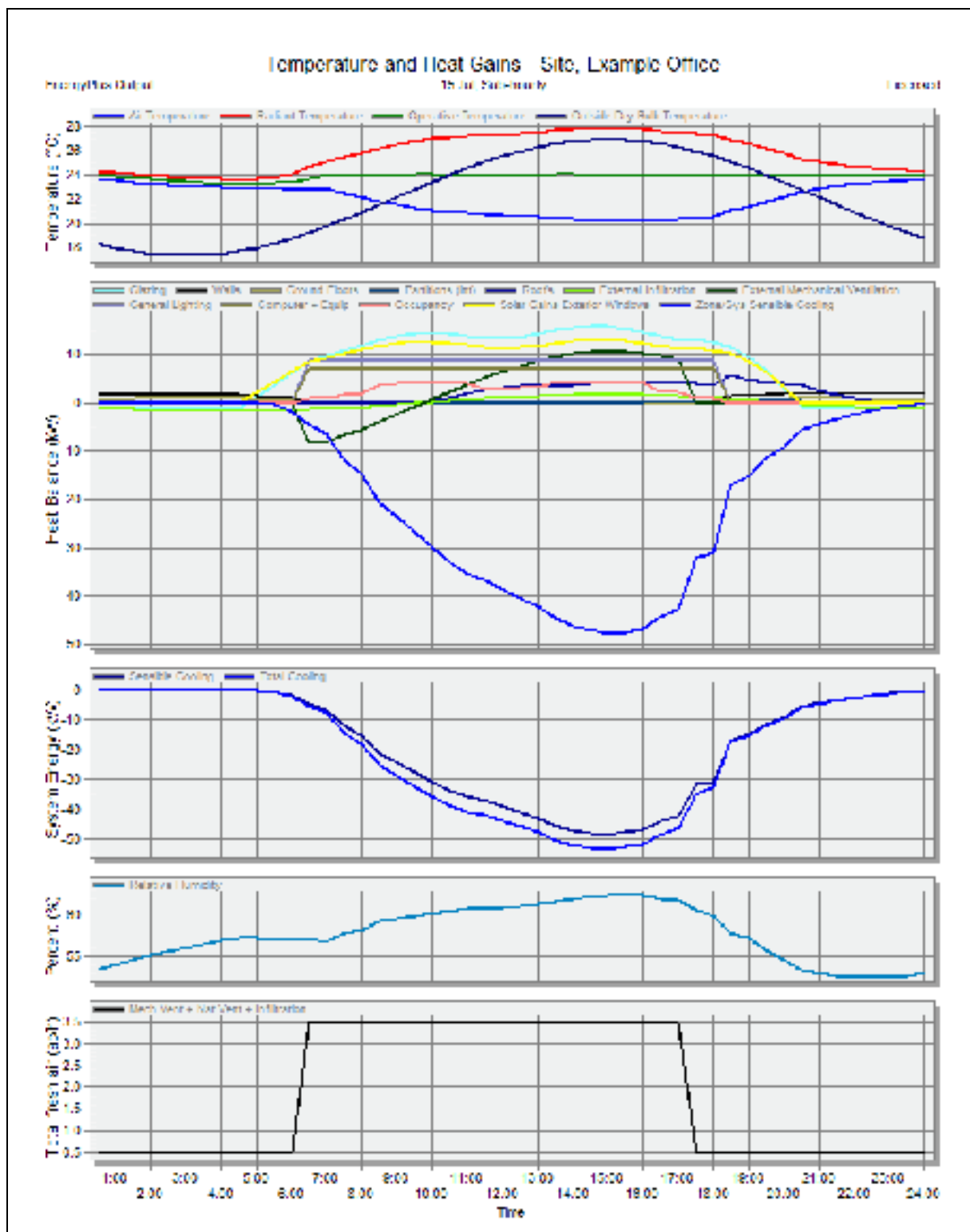


Figure 4.11 Conception de climatisation – la température et le gain de chaleur
Tirée de logiciel DesignBuilder

La climatisation fournie est la somme des valeurs de gaine thermique des composants suivants :

- *Température d'air* : température moyenne de l'air calculée;
- *Température radiante* : moyenne pondérée de (surface 'x' émissivité) de la température des surfaces internes de la zone;
- *Température résultante sèche* : moyenne des températures de l'air intérieur et des températures radiantes;
- *Température sèche extérieure* ;
- *Vitrage* : flux de chaleur total de la zone provenant du vitrage, du cadre et du diviseur du vitrage extérieur, moins le rayonnement solaire à ondes courtes transmis (pris en compte dans l'option ci-dessous Apports solaires Fenêtres extérieures);

Pour les fenêtres ne comportant pas d'équipement d'ombrage intérieur, ce flux de chaleur est égal à :

1. '+' [Flux de chaleur convectif de la zone provenant du côté de la zone du vitrage].
2. '+' [Flux de chaleur infrarouge net de la zone provenant du côté de la zone du vitrage].
3. '-' [Rayonnement à ondes courtes de la zone transmis en dehors de la fenêtre].
4. '+' [Conduction de la zone provenant du cadre et du diviseur de la fenêtre, le cas échéant].

Dans ce cas, le rayonnement à ondes courtes désigne le rayonnement provenant de l'éclairage et diffuse un rayonnement solaire intérieur.

Pour les fenêtres pourvues d'un équipement d'ombrage intérieur, ce flux de chaleur est égal à :

1. '+' [Flux de chaleur convectif de la zone provenant de l'air qui pénètre à travers l'espace entre le vitrage et l'équipement d'ombrage].
2. '+' [Flux de chaleur convectif de la zone provenant du côté de la zone de l'équipement d'ombrage].

3. ‘+’ [Flux de chaleur infrarouge net de la zone provenant du côté de la zone du vitrage].
 4. ‘+’ [Flux de chaleur infrarouge net de la zone provenant du côté de la zone de l’équipement d’ombrage].
 5. ‘-’ [Rayonnement à ondes courtes de la zone transmis en dehors de la fenêtre]
 6. ‘+’ [Conduction de la zone provenant du cadre et du diviseur de la fenêtre, le cas échéant]
- *Murs* : apport de chaleur grâce à la conduction à travers les murs extérieurs, comprenant l’effet du rayonnement solaire et le rayonnement à ondes longues dans le ciel;
 - *Toits* : apport de chaleur grâce à la conduction à travers les toits extérieurs, comprenant l’effet du rayonnement solaire et le rayonnement à ondes longues dans le ciel;
 - *Plafonds (intérieurs)* : apport de conduction thermique à travers les plafonds intérieurs (par exemple, zone supérieure plus froide);
 - *Planchers (intérieurs)* : apport de conduction thermique à travers les planchers intérieurs (par exemple, zone inférieure plus froide);
 - *Planchers (extérieurs)* : apport de conduction thermique à travers les planchers extérieurs (pas les planchers sur terre-plein ; par exemple, plancher dans un espace en porte-à-faux, avant-toit, etc.);
 - *Planchers sur terre-plein* : apport de conduction thermique à travers les planchers sur terre-plein;
 - *Cloisons (intérieures)* : apport de conduction thermique dû à la conduction thermique à travers toutes les cloisons intérieures des zones adjacentes de différentes températures;
 - *Portes et aérations* : apport de conduction thermique à travers les portes et les aérations;
 - *Infiltration extérieure* : apport de chaleur à travers l’infiltration d’air (entrée d’air prévue par les fissures et les trous de l’enveloppe du bâtiment);
 - *Ventilation naturelle extérieure* : apport de chaleur due à la pénétration de l’air extérieur par la ventilation naturelle (comme indiqué dans l’onglet CVC);

- *Ventilation naturelle intérieure* : apport de chaleur provenant d'autres zones dû à l'échange d'air par les fenêtres intérieures ouvertes, les portes, les aérations, les trous et les cloisons virtuelles;
- *Ventilation mécanique extérieure* : apport de chaleur dû à la pénétration de l'air extérieur par le système de distribution d'air. Il y a la possibilité d'exclure la ventilation mécanique des calculs de conception de la climatisation en excluant les données du modèle Ventilation mécanique active;
- *Éclairage de tâche* : apport de chaleur dû à l'éclairage de tâche;
- *Éclairage général* : apport de chaleur dû à l'éclairage général;
- *Divers* : apport de chaleur dû aux divers équipements;
- *Cuisine* : apport de chaleur dû à la cuisine;
- *Ordinateur et équipement* : apport de chaleur dû aux ordinateurs et autres équipements informatiques;
- *Occupation* : apport sensible dû aux occupants. Il faut noter que cet apport peut varier en fonction des conditions intérieures. Avec des températures très élevées, l'apport sensible peut chuter à zéro à cause de tous les effets de refroidissement provoqués par le transfert de chaleur latent;
- *Apports solaires Fenêtres extérieures* : transmission du rayonnement solaire à ondes courtes à travers les fenêtres extérieures. Pour une fenêtre simple, ce rayonnement transmis se compose de rayonnement solaire passant à travers le verre et de rayonnement diffus provenant du soleil qui se reflète sur le dormant de fenêtre extérieur, le cas échéant. Pour les fenêtres avec stores, ce rayonnement transmis est totalement diffus (les stores étant supposés assurer une diffusion parfaite). Pour les fenêtres avec stores, ce rayonnement transmis se compose de rayons et de rayonnement diffus passant entre les lamelles et de rayonnement diffus provenant de la réflexion des rayons entre les lamelles. Le rayonnement solaire se reflétant sur la fenêtre extérieure est transmis par la fenêtre intérieure et il n'est pas soustrait;

- *Apports solaires Fenêtres intérieures* : rayonnement total et transmission du rayonnement solaire diffus à travers les fenêtres intérieures;
- *La zone de Refroidissement sensible* : effet de refroidissement sensible sur la zone de l'air introduit dans la zone par le système CVC. Cet effet inclut tout « refroidissement gratuit » dû à l'introduction d'air extérieur relativement froid. Le refroidissement apparaît toujours en tant qu'apport de chaleur négatif dans les résultats. Il s'agit de la meilleure considération dans le cadre de l'équilibre thermique de la zone.

Pour cette étude, le Flux d'air représente la somme d'air extérieur pénétrant chaque étage du bâtiment, par les systèmes de distribution d'air du système de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air, CVC, par les systèmes de ventilation naturelle et les infiltrations. Ce Flux est mesuré en unités Vol/h pénétrant dans les zones qui composent le bâtiment.

Le refroidissement du bâtiment dépend de la méthode de dimensionnement :

- Refroidissement total.

Pour la méthode de dimensionnement ASHRAE, le refroidissement total est la puissance à laquelle l'énergie totale (sensible et latente) est soustraite du flux d'air extrait et d'air extérieur mélangé, afin de porter le flux d'air extérieur mélangé à la température et au taux d'humidité spécifié pour le flux d'air injecté. Pour le dimensionnement CVC Compact, le refroidissement total au niveau Bâtiment est le transfert de refroidissement sensible et latent à l'air soufflé provenant de la batterie froide CTA '+' tous les autres systèmes unitaires zone unique et ventilo-convecteurs du bâtiment.

- Refroidissement sensible.

Pour la méthode de dimensionnement ASHRAE, le refroidissement sensible est la puissance à laquelle l'énergie est soustraite du flux d'air extrait et d'air extérieur mélangé, afin de diminuer sa température au niveau de la température spécifiée du flux d'air injecté. Toute énergie nécessaire à l'ajout ou à la suppression d'humidité n'est pas prise en compte. Pour le dimensionnement CVC Compact, le refroidissement sensible

consiste au transfert de refroidissement uniquement de la batterie froide vers l'air soufflé. La puissance latente de la batterie peut être calculée par : Refroidissement total '–' refroidissement sensible.

Les données d'apport thermique des surfaces se rapportent au transfert de chaleur qui a lieu de la surface intérieure des éléments du bâtiment à l'environnement.

4.3.2.2 Récapitulatif – conception de climatisation

La figure suivante, 4.12, affiche les charges de climatisation de conception et les taux de flux d'air de chaque bâtiment, ainsi que les autres données associées :

- *Puissance de dimensionnement*, indiquée en gras, désigne la valeur maximale de la charge de refroidissement totale et de refroidissement sensible multipliée par le facteur de dimensionnement pour fournir le dimensionnement de climatisation de l'équipement. Cette valeur est consignée dans les données du modèle de puissance de climatisation dans l'onglet CVC, si l'option du modèle appropriée de dimensionnement des installations est active;
- *Débit pour dimensionnement*, indiqué en gras, désigne le débit de flux d'air requis pour fournir la charge de climatisation sensible à l'aide de la température de dimensionnement soufflée et de la température d'air de la zone au moment de la charge maximale multipliée par le facteur de dimensionnement;
- *Charge totale de refroidissement* désigne les charges totales sensible et latente maximales de la zone, au moment de la charge maximale de refroidissement sensible. Si la charge latente est négative, elle n'est pas prise en compte dans ce cas et la charge totale de refroidissement est la même que la charge sensible;
- *Charge sensible* désigne la charge maximale de refroidissement sensible de la zone pour le jour de dimensionnement;

- *Charge latente* désigne la charge de la zone au moment de la charge sensible maximale, calculée comme refroidissement total ‘-’ refroidissement sensible;
- *Température d’air* désigne la température de l’air de la zone au moment de la charge sensible maximale;
- *Humidité* désigne l’humidité (en %) de la zone au moment de la charge sensible maximale;
- *Heure de la climatisation Max* désigne le moment où a lieu le refroidissement sensible maximal;
- *Température Op Max du jour* désigne la température opérative maximale de la zone (avec la fraction radiante de 0,5) sur l'ensemble du jour de conception, y compris les périodes pendant lesquelles la zone peut être non conditionnée;
- *Surface au sol* désigne la surface au sol de la zone;
- *Volume* désigne le volume de la zone;
- *Débit/Surface au sol* (MBH/ft² en unités IP) désigne le débit de dimensionnement divisé par la surface au sol de la zone. Il s’avère utile pour contrôler les taux de flux d’air calculés.

Zone	Design sensible (kW)	Design total (kW)	de supply	Exhaust (kW)	Zone (kW)	Exhaust (kW)	Supply (kW)	Exhaust (kW)	Supply (kW)	Exhaust (kW)	Supply (kW)	Exhaust (kW)
[1] Zone 1: Fan Coil Unit (FCU) Design sensible = 2000 (kW)												
[2] Zone 2: Fan Coil Unit (FCU) Design sensible = 2000 (kW)												
Zone 1	10.00	1.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00
Zone 2	10.00	1.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00
[3] Fan Coil Unit (FCU) Design sensible = 2000 (kW)												
Fan	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00

Figure 4.12 Récapitulatif – conception de climatisation
Tirée de logiciel DesignBuilder

CHAPITRE 5

L'ANALYSE ET LA COMPARAISON DES BÂTIMENTS

L'énergie est un bien précieux, l'opinion publique en a de plus en plus conscience. Mais si l'on connaît de nos jours la consommation énergétique des voitures et des réfrigérateurs, il arrive encore bien souvent que la consommation énergétique des bâtiments ou leurs émissions de CO₂ soient encore méconnues, ce qui ne devrait plus être le cas.

À l'avenir, la consommation énergétique et les émissions de CO₂ d'un bâtiment ainsi que les coûts qui lui sont attachés seront donc les critères principaux qui amèneront à décider si un bâtiment peut être durable et à quel prix. Toutes les personnes conscientes des problèmes de l'énergie et soucieuses de réduire leur facture énergétique exigeront un certificat énergétique et d'émission de CO₂ d'un bâtiment.

Le certificat énergétique et d'émission de CO₂ des bâtiments permet de comparer des bâtiments s'agissant de leur consommation énergétique et de leurs émissions de CO₂. Munis de ce certificat, nous pourrions déterminer ce qui est possible au niveau technique.

Pour cela, dans ce recueil de textes, en premier lieu, nous définissons les données spécifiques des bâtiments à l'étude. Pour bien comprendre les résultats des simulations et ensuite des comparaisons, nous nous proposons de travailler sur deux hypothèses : une avec un vitrage de 15 % de la surface générale de murs extérieurs, et l'autre avec un vitrage de 40 % de la surface générale des murs extérieurs.

Ensuite, nous effectuons une estimation sommaire des coûts des murs extérieurs. Puis, nous comparons le résultat de la simulation de la consommation énergétique et le résultat de

simulation d'émission de CO₂, et nous terminons par la comparaison du coût sommaire en fonction des superficies des murs extérieurs versus l'efficacité énergétique.

Pour effectuer cette comparaison, nous utilisons le logiciel Microsoft Excel. Ce logiciel permet de comparer graphiquement des données selon deux critères. Ces critères recouvrent l'ensemble des indicateurs générés qui composent les bâtiments par le logiciel de simulation DesignBuilder.

Ces critères de comparaison pour les bâtiments à l'étude nous aideront à obtenir une réponse à notre hypothèse de départ : Quelle est la typologie de la forme d'un bâtiment la plus performante du point de vue de la consommation énergétique, de l'émission de CO₂, à des coûts raisonnables ? Pour terminer, nous pouvons dire que ces critères de comparaison nous aideront à obtenir une réponse claire à la question : Comment la forme d'un bâtiment peut-elle avoir une influence lors de la prise de décision des concepteurs et des décideurs ?

5.1 La forme bâtie en plan et la volumétrie d'une construction résidentielle sur plusieurs étages

En tenant compte de la forme bâtie en plan et de la volumétrie d'une construction résidentielle sur plusieurs étages, pour analyser l'efficacité énergétique de la construction et les émissions de CO₂, il est proposé d'analyser six bâtiments ayant une forme bâtie en plan différente, mais avec les mêmes caractéristiques techniques.

Les données de construction sont les suivantes :

- Volume approximatif $V = 19.600 \text{ m}^3$ (voir Figure 5.1);
- Surface en plan d'approximativement 700 m^2 (voir Figure 5.2);
- Huit étages;
- Hauteur du bâtiment : 28 mètres;

- Sur la façade, une surface transparente vitrée (portes et fenêtres) de 15 pour cent et 40 pour cent;
- Pour la simulation, le site d'emplacement des bâtiments est a priori situé à Montréal;
- La région législative concernée à l'étude, les normes énergétiques et les règles de construction sont considérées comme étant celles du Québec. Aussi, sont pris en considération les normes canadiennes d'énergie et les facteurs d'émission du dioxyde de carbone.

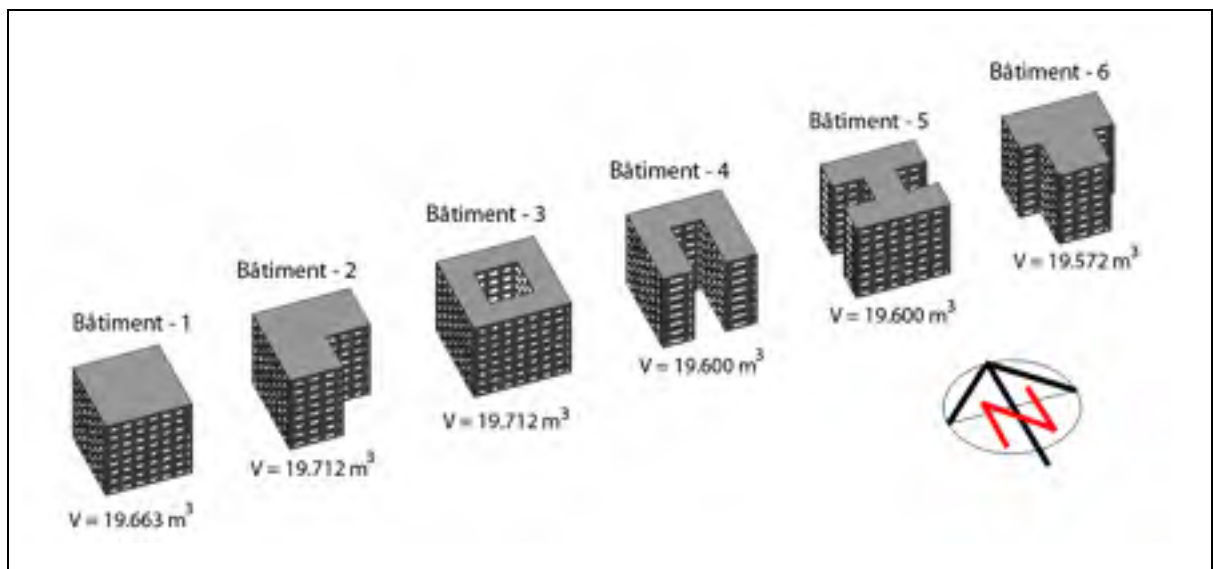


Figure 5.1 Six bâtiments ayant une forme bâtie en plan différente, d'un volume approximativement égal à 19 600 m³

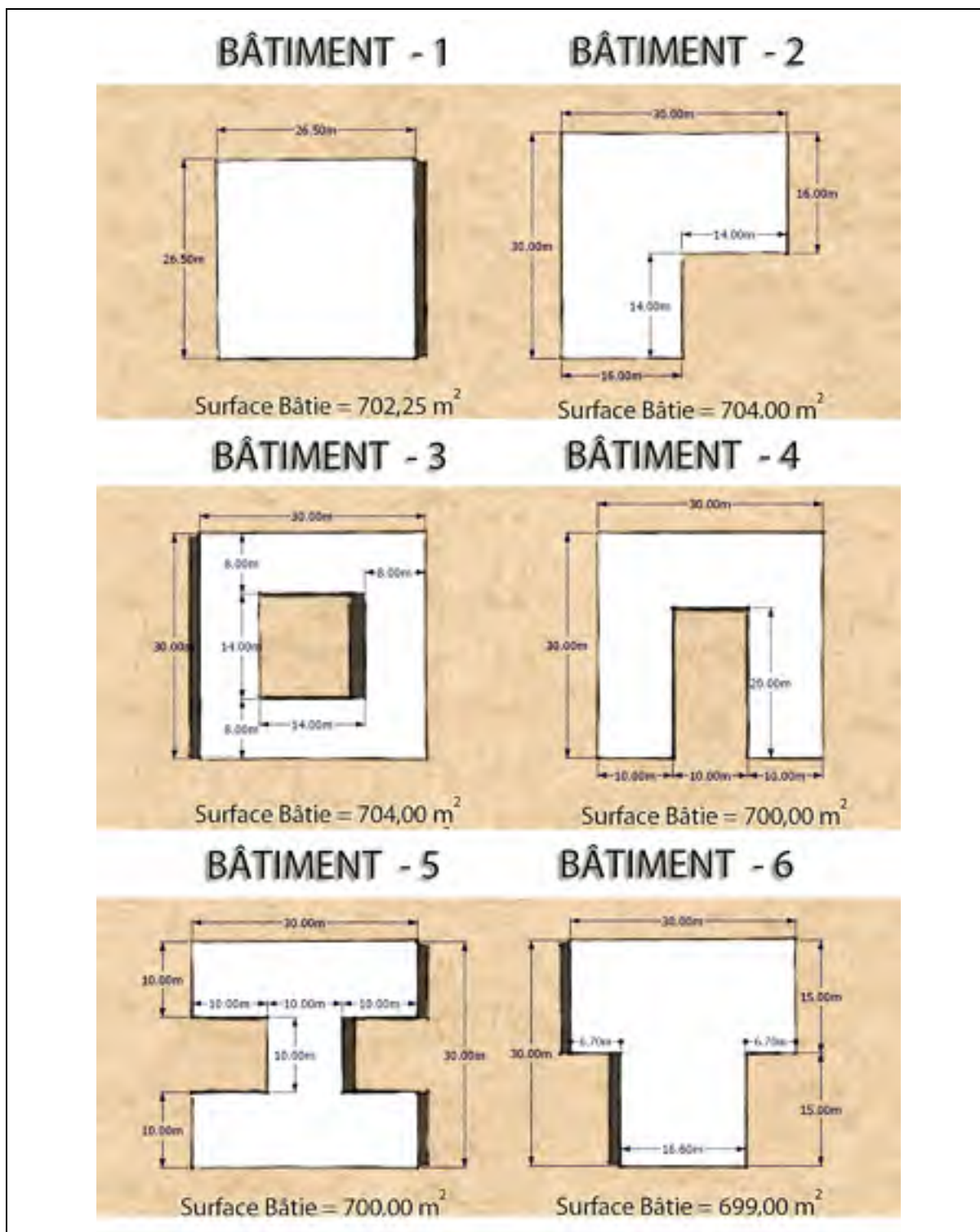


Figure 5.2 Six bâtiments ayant une forme bâtie en plan différente et les surfaces bâties approximativement égales à 700 m²

Les bâtiments sont orientés à un angle de 90 degrés par rapport au nord. Le nord est indiqué par la direction de la flèche dans la vue du plan de site.

Pour le coût sommaire des superficies de mur extérieur nous avons utilisé un livre de référence dans le domaine de l'estimation de bâtiments, *Yardsticks for Costing : Cost Data for the Canadian Construction Industry*, publié par l'éditeur RSMMeans en 2010.

Aussi, il est proposé un modèle de base pour la coupe verticale d'un mur (voir Figure 5.3).

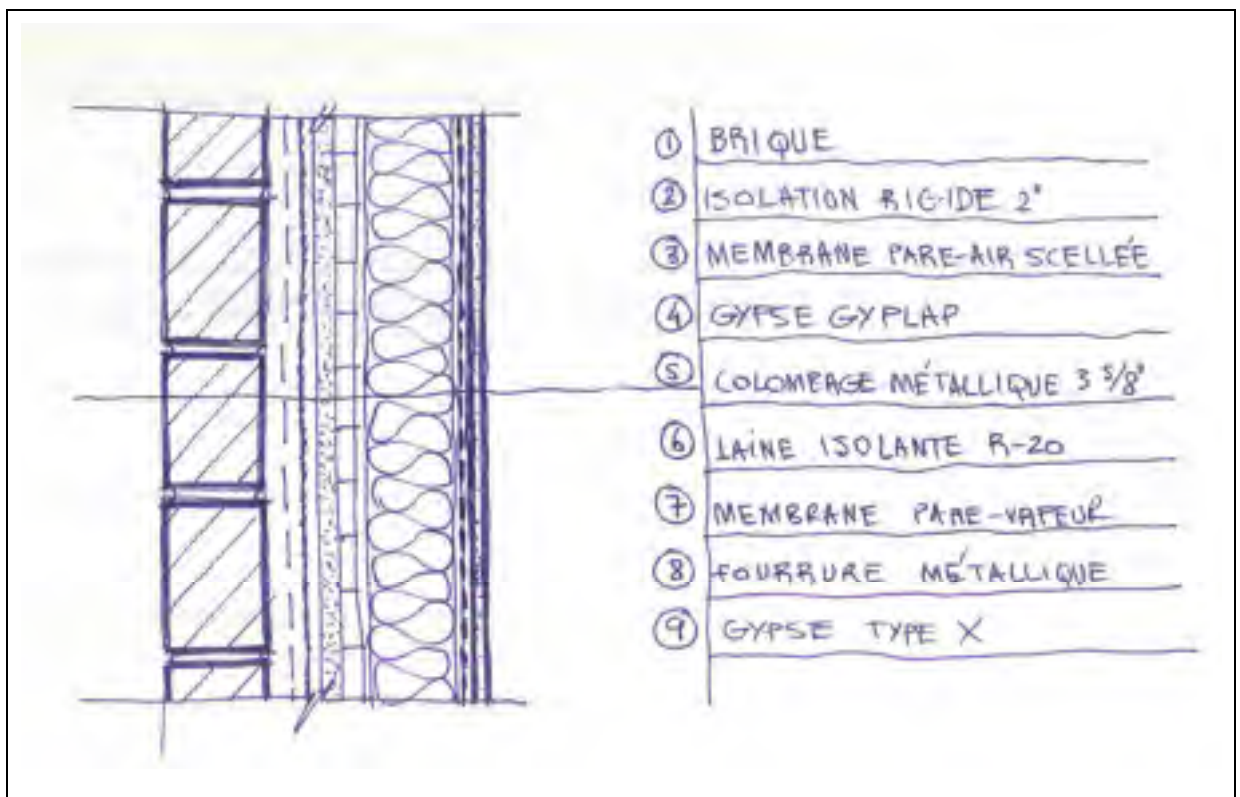


Figure 5.3 Coupe verticale de mur

Pour mieux comprendre les résultats des simulations et ensuite de comparaison, on propose de calculer les coûts des murs extérieurs selon deux hypothèses : une avec un vitrage de 15% de la surface générale de murs extérieures et l'autre avec un vitrage de 40% de la surface générale de murs extérieures. À l'ANNEXE I, les tableaux représentent les coûts des murs extérieurs dans les deux hypothèses mentionnés ci-dessus.

5.2 L'analyse d'efficacité énergétique des bâtiments

Ce sous-chapitre analyse le modèle de simulation d'efficacité énergétique de six bâtiments ayant une forme bâtie en plan différente, les surfaces bâties approximativement égales à 700 m² et le volume approximativement égales à 19 600 m³.

La performance énergétique du bâtiment détaillé est basée sur des simulations utilisant des données météo réelles, données météo stockées au niveau du site et dérivées du fichier météo horaire de la région de Montréal, fourni par l'aéroport international Pierre-Elliott Trudeau. Les caractéristiques météo suivantes sont prises en considération :

- Température sèche extérieure;
- Température de rosée extérieure;
- Énergie solaire directe à la normale;
- Énergie solaire horizontale diffuse;
- Vitesse du vent;
- Direction du vent;
- Pression atmosphérique;
- Altitude solaire.

Les simulations d'efficacité énergétique effectuées à l'aide d'EnergyPlus présentent les caractéristiques suivantes : il est pris en compte la conduction et la convection thermique entre les zones de températures différentes, il est saisi l'apport solaire à travers les fenêtres, et la simulation d'équipement CVC se poursuit pendant plusieurs jours d'initialisation pour garantir une répartition correcte de la chaleur dans l'inertie thermique du bâtiment. La phase d'initialisation se poursuit jusqu'à ce que les températures/flux de chaleur de chaque zone convergent. Si la convergence n'a pas lieu, la simulation continue pendant le nombre de jours maximum spécifié dans les options de calcul.

Pour obtenir des sorties annuelles, dans le logiciel, il faut sélectionner des intervalles mensuels.

Au niveau de bâtiment, les données de la consommation du combustible et d'énergie sont réparties par utilisation finale :

- Production de chaleur : consommation totale de combustible due au fonctionnement des générateurs de chaleur, telles que les chaudières et les pompes à chaleur;
- Groupe froid : consommation totale de combustible des groupes froids;
- Ventilateurs : énergie électrique totale consommée par les ventilateurs CVC;
- Pompes : énergie électrique totale consommée par les pompes CVC;
- Préchauffage : énergie thermique transférée des batteries de préchauffage de l'installation principale à l'air du système CVC, lors de l'utilisation de données CVC compact;
- Éclairage : électricité consommée par l'éclairage général et de tâche/d'accentuation;
- Électricité pour la zone : électricité consommée par l'équipement de la zone autre que l'éclairage (ordinateurs, équipement, procès, etc.);

Donc, la consommation totale du combustible et d'énergie du bâtiment est générée par les données disponibles au niveau du bâtiment, dont, la consommation totale d'électricité.

Avant de faire l'analyse comparative entre les six bâtiments, il est nécessaire de les représenter un peu plus en détail. Les figures qui suivent offrent des informations sur leur dimensionnement. Il est important de remarquer la forme en plan et volumétrique de la construction. Pour une meilleure compréhension, il est suggéré d'associer la forme du bâtiment comme suit :

- Bâtiment -1 : bâtiment en forme 'Carré' (voir Figure 5.4);

- Bâtiment -2 : bâtiment en forme de 'L' (voir Figure 5.5);
- Bâtiment -3 : bâtiment en forme 'Carré avec Atrium' (voir Figure 5.6);
- Bâtiment -4 : bâtiment en forme de 'U' (voir Figure 5.7);
- Bâtiment -5 : bâtiment en forme de 'H' (voir Figure 5.8);
- Bâtiment -6 : bâtiment en forme de 'T' (voir Figure 5.9).

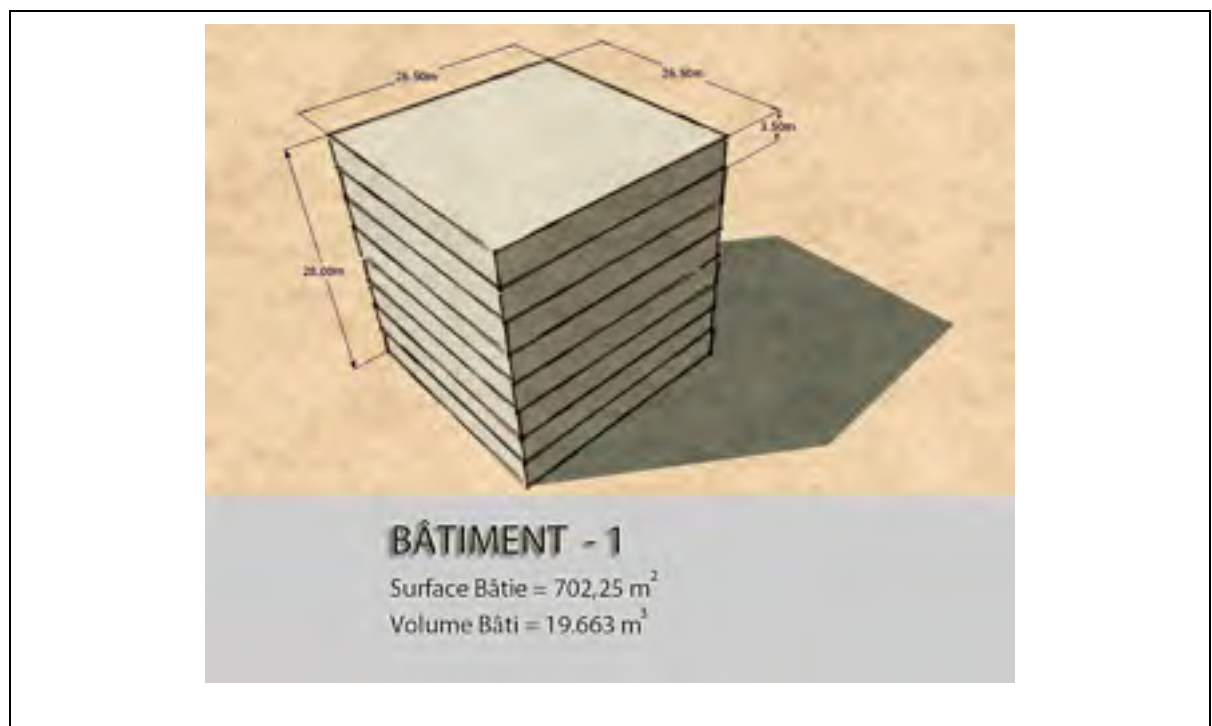


Figure 5.4 Le dimensionnement du Bâtiment – 1 en Forme 'Carré'

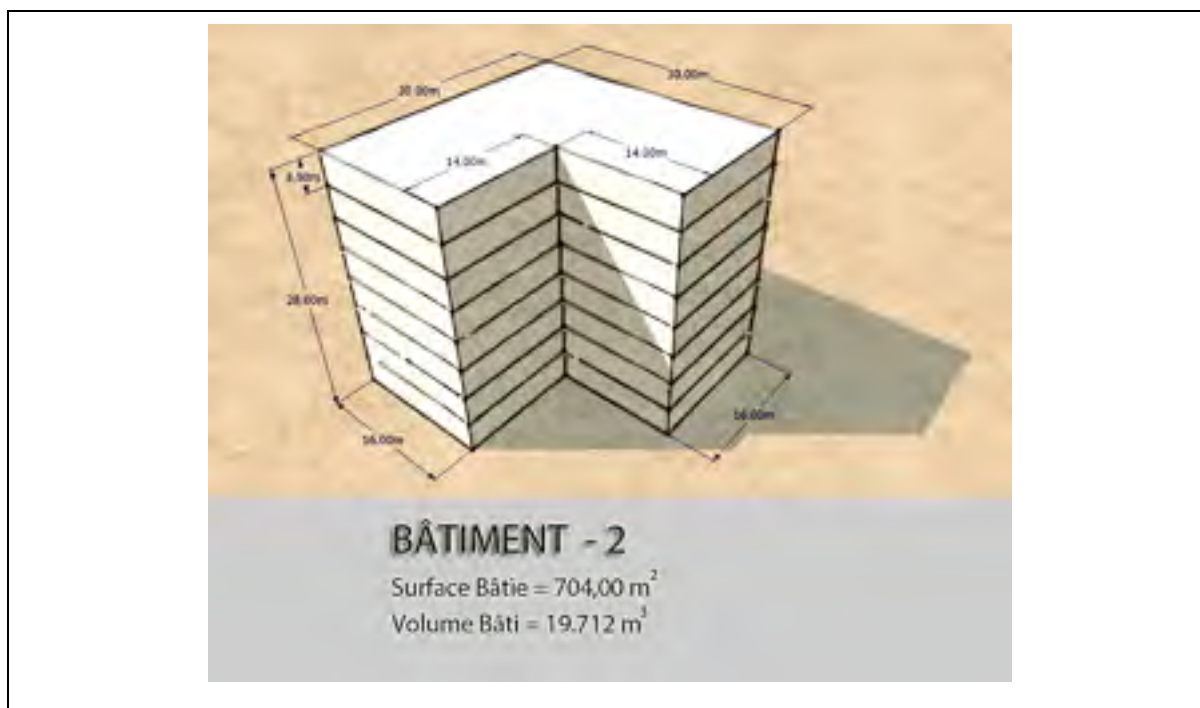


Figure 5.5 Le dimensionnement du Bâtiment – 2 en Forme de ‘L’

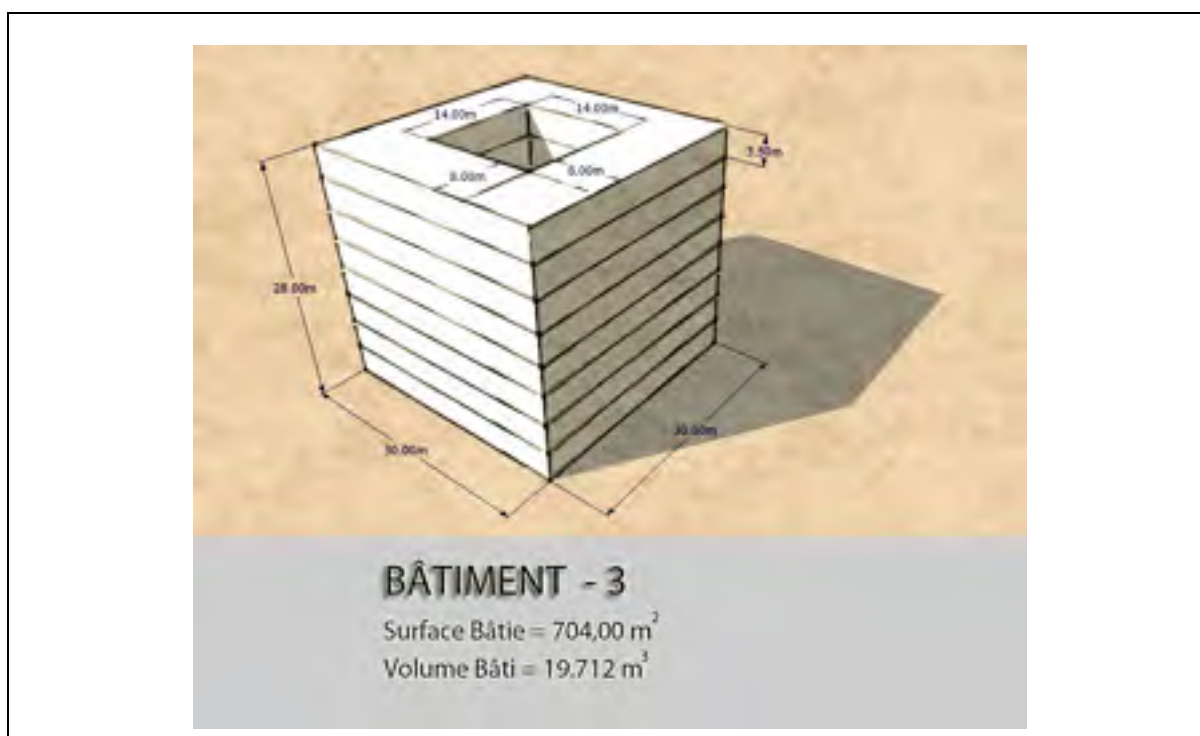


Figure 5.6 Le dimensionnement du Bâtiment – 3 en Forme ‘Carré avec Atrium’

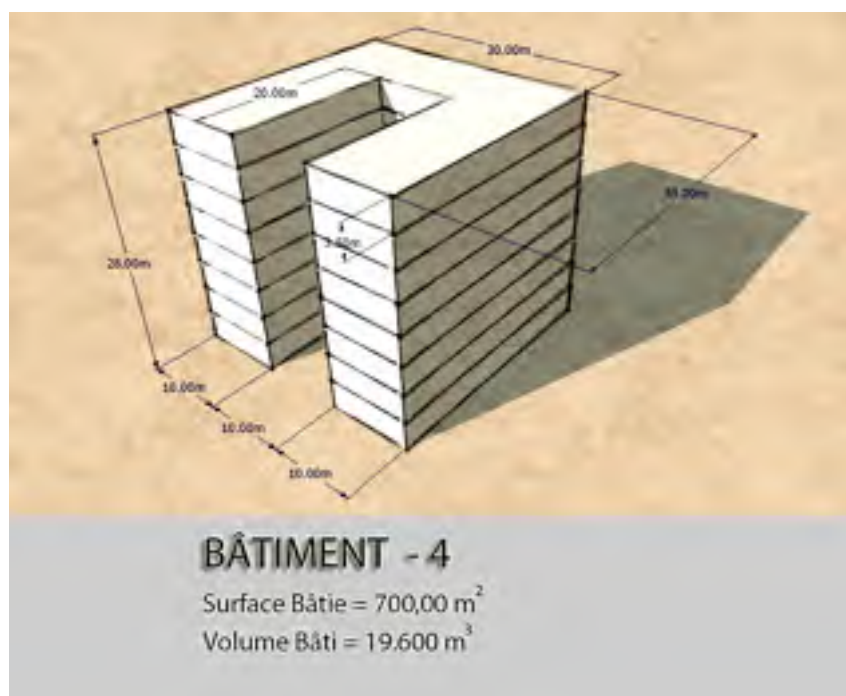


Figure 5.7 Le dimensionnement du Bâtiment – 4 en Forme de ‘U’

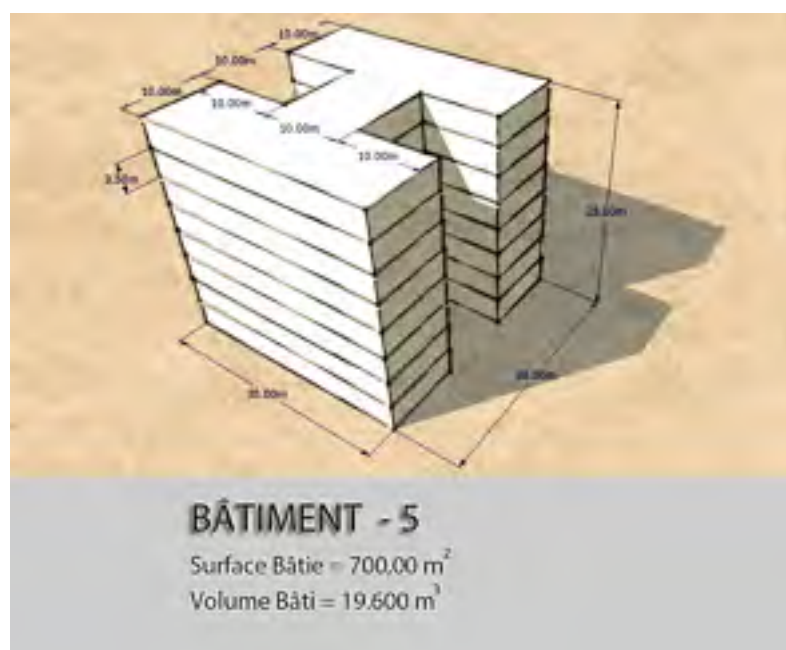


Figure 5.8 Le dimensionnement du Bâtiment – 5 en Forme de ‘H’

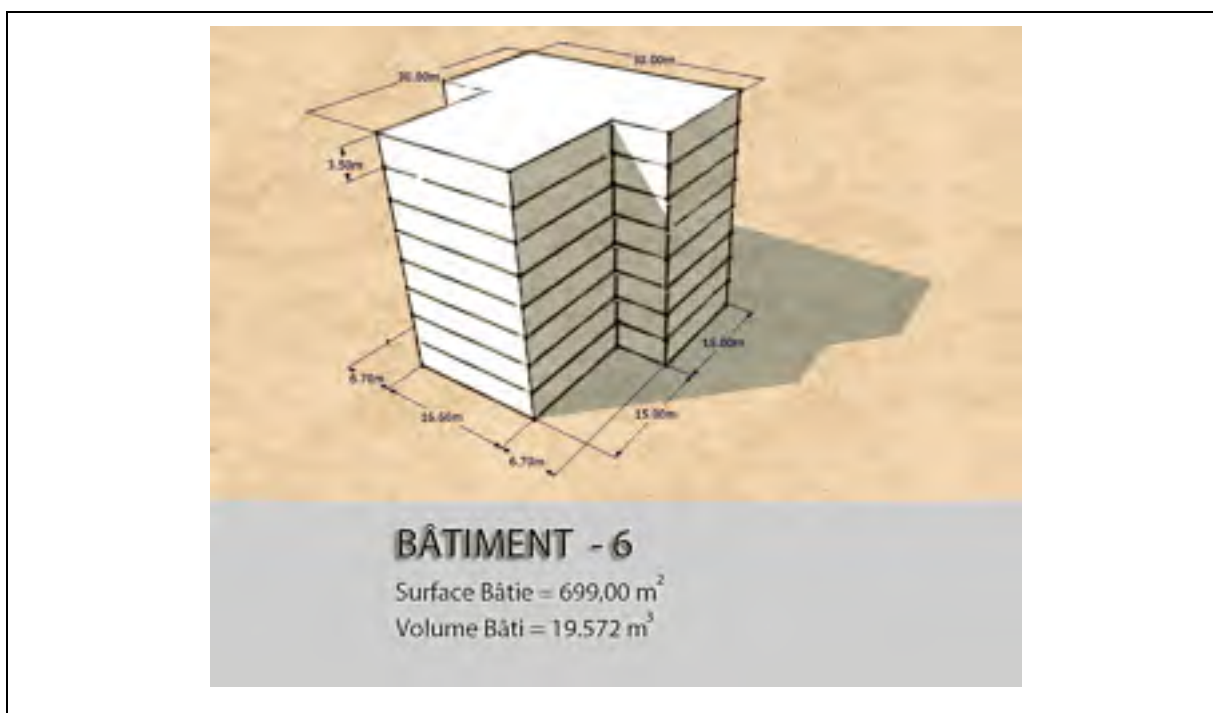


Figure 5.9 Le dimensionnement du Bâtiment – 5 en Forme de ‘T’

Le design, le contrôle et la gestion d’un bâtiment sont des processus transversaux destinés à aider les architectes, les ingénieurs et les administrateurs responsables, à piloter leurs activités et à agir dans le sens du développement durable stratégique de la construction.

Le budget est un outil classique et, en général, un outil central du contrôle de gestion, puisque c’est en l’élaborant que sont précisés les objectifs et les moyens qui seront mis sur l’exercice considéré. S’agissant de cette étude, il a été convenu d’illustrer et de comparer la consommation totale d’énergie électrique.

Les données recueillies seront présentées sous forme de tableaux et de graphiques. Les tableaux serviront, entre autre, à produire le graphique de la consommation. Ils servent aussi à synthétiser les données. Lorsque les tableaux sont faits à l’aide de logiciels informatiques spécialisés, l’ajout de formules permet de procurer des indicateurs comme l’indice de l’énergie électrique mesuré en MW/h et l’indice de la consommation mesuré mensuellement

ou à l'année. Une fois les résultats listés et illustrés, une analyse sera effectuée. Les graphiques servent, entre autre, à visualiser les différentes proportions entre les types de données.

Dans l'ANNEXE II, les figures représentent les graphes de la consommation totale mensuelle d'énergie électrique pour chaque bâtiment étudié et les données recueillies nécessaires à produire les graphiques.

La modélisation des données est réalisée pour les six types des bâtiments afin de permettre d'observer la consommation d'énergie électrique dans deux hypothèses : surface de vitrage de murs extérieurs de 15 % et surface de vitrage de murs extérieurs de 40 %.

La figure suivante, 5.10, résume la consommation mensuelle d'énergie électrique entre les six bâtiments étudiés, dans l'hypothèse où le vitrage est de 15 % de la surface générale de murs extérieurs.

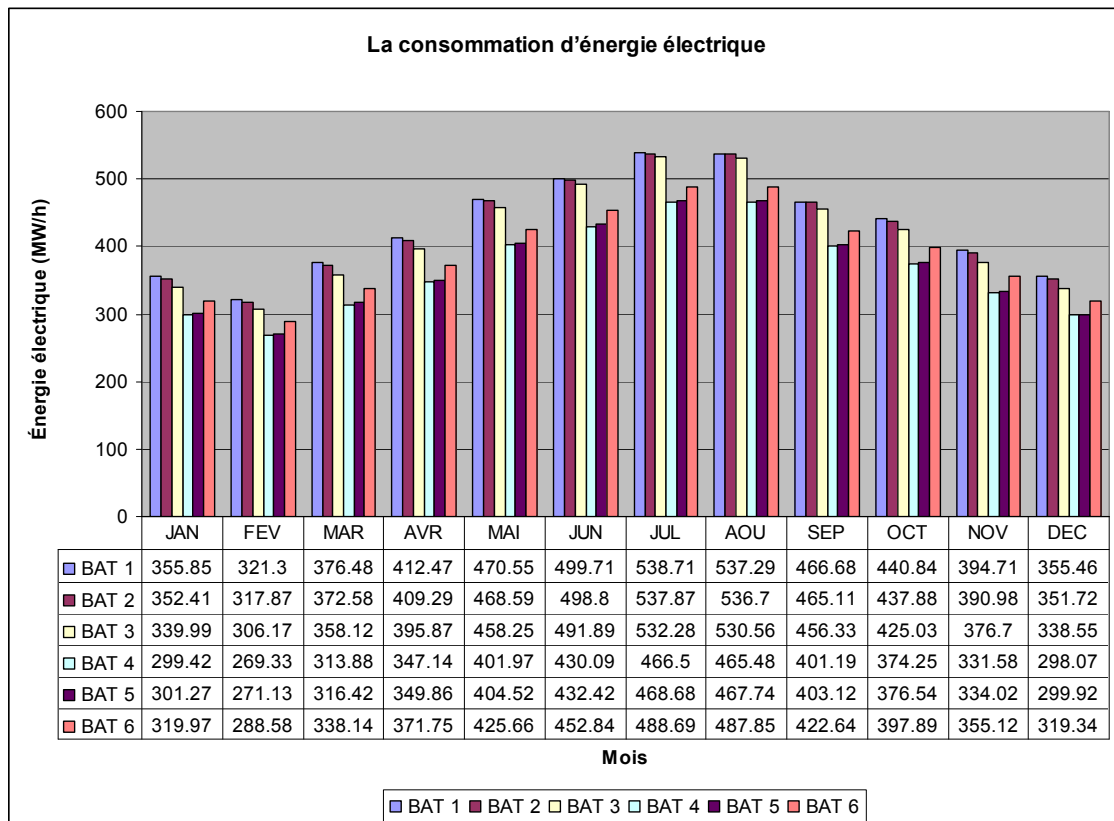


Figure 5.10 La consommation mensuelle d'énergie électrique pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 15% de la surface générale des murs extérieurs

Les données concernent la consommation mesurée pendant une année.

Il est à remarquer que la consommation des bâtiments 1 et 2 est la plus élevée. En revanche, la consommation des bâtiments 4 et 5 est la plus faible.

En observant la figure suivante, 5.11, lors l'analyse de la consommation annuelle totale de l'énergie électrique ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15 %, il est clair que nous pouvons valider les valeurs observées dans la figure précédente : en comparant les six bâtiments, le bâtiment numéro 4 se démarque par sa consommation faible d'énergie électrique.

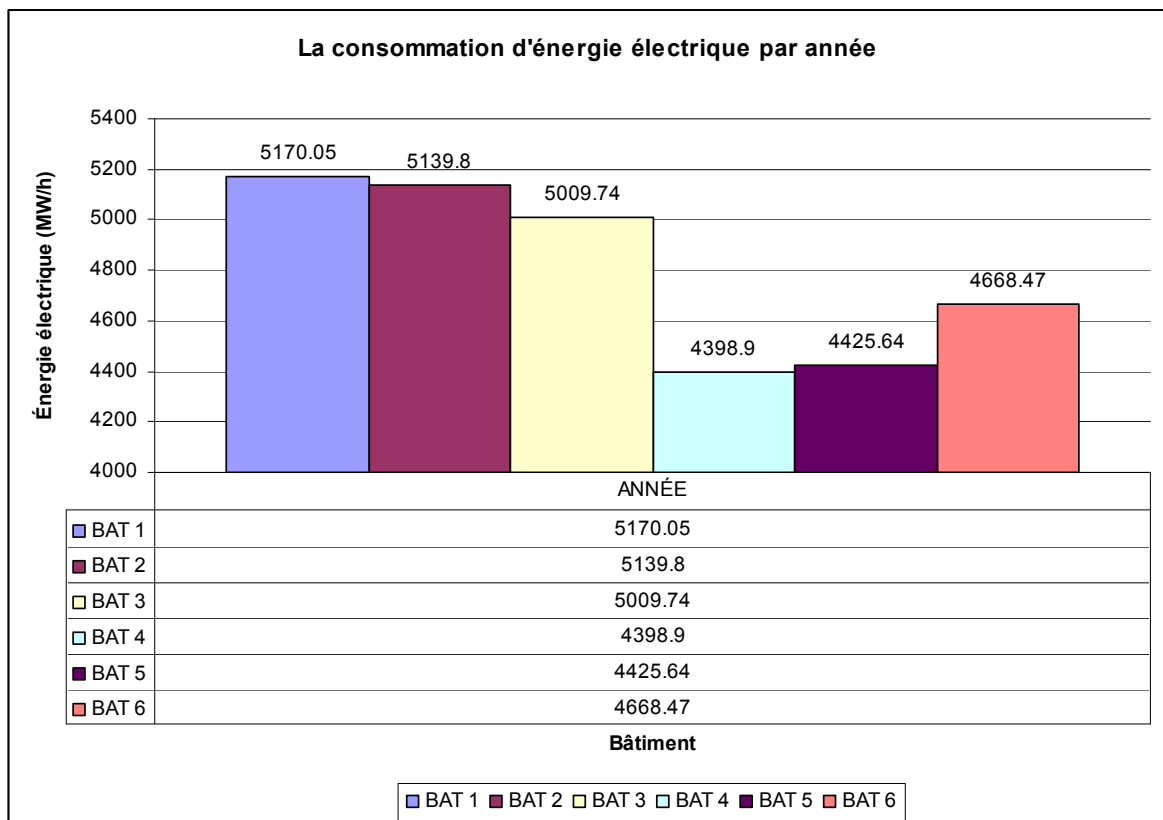


Figure 5.11 La consommation totale annuelle d'énergie électrique pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 15% de la surface générale des murs extérieurs

Au contraire, le bâtiment numéro 1 génère la plus grande consommation totale annuelle d'énergie électrique.

Dans la figure 5.12, la modélisation des données permet d'observer la consommation d'énergie électrique pendant les 12 mois de l'année de six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 40 %. Il apparaît que c'est durant les mois de juillet et août que la consommation est la plus élevée et durant le mois de février qu'elle est la plus faible. La consommation croît de février à juillet, pour décroître ensuite d'août à janvier.

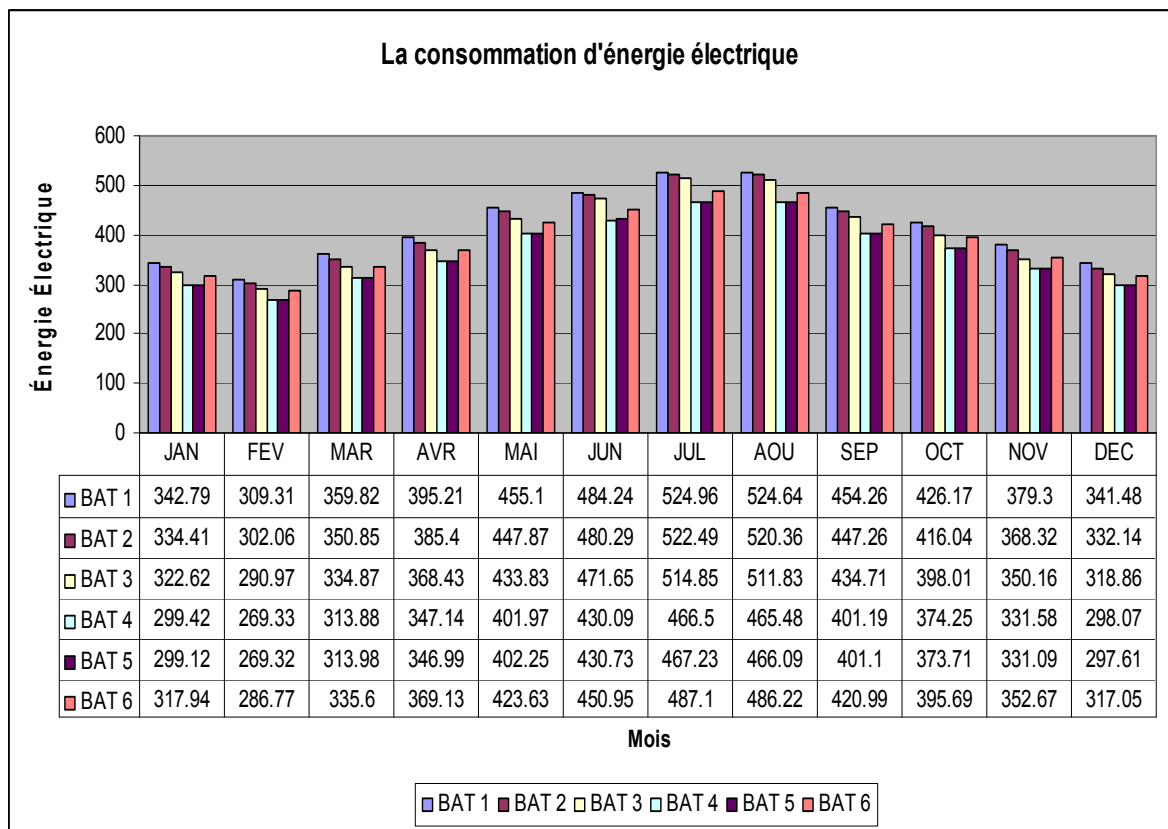


Fig. 5.12 La consommation mensuelle d'énergie électrique pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 40% de la surface générale des murs extérieurs

Deux bâtiments (4 et 5) affichent une consommation presque semblable et consomment un peu moins que les autres. Le bâtiment 1 est le plus consommateur, suivi du bâtiment 2 et du 3, ce dernier étant presque au même niveau que le bâtiment 6.

La modélisation des données de la figure 5.12' permet de mesurer la moyenne annuelle de la consommation d'énergie électrique annuelle des six mêmes bâtiments. Nous pouvons observer que l'ordre des bâtiments consommateurs d'électricité reste le même en moyenne annuelle que lors de l'analyse détaillée par mois. Les bâtiments les plus consommateurs sont le bâtiment 1, suivi du bâtiment 2, puis du 3 et du 4. Les bâtiments les plus économes sont toujours les bâtiments 4 et 5, leur consommation est toujours quasiment identique.

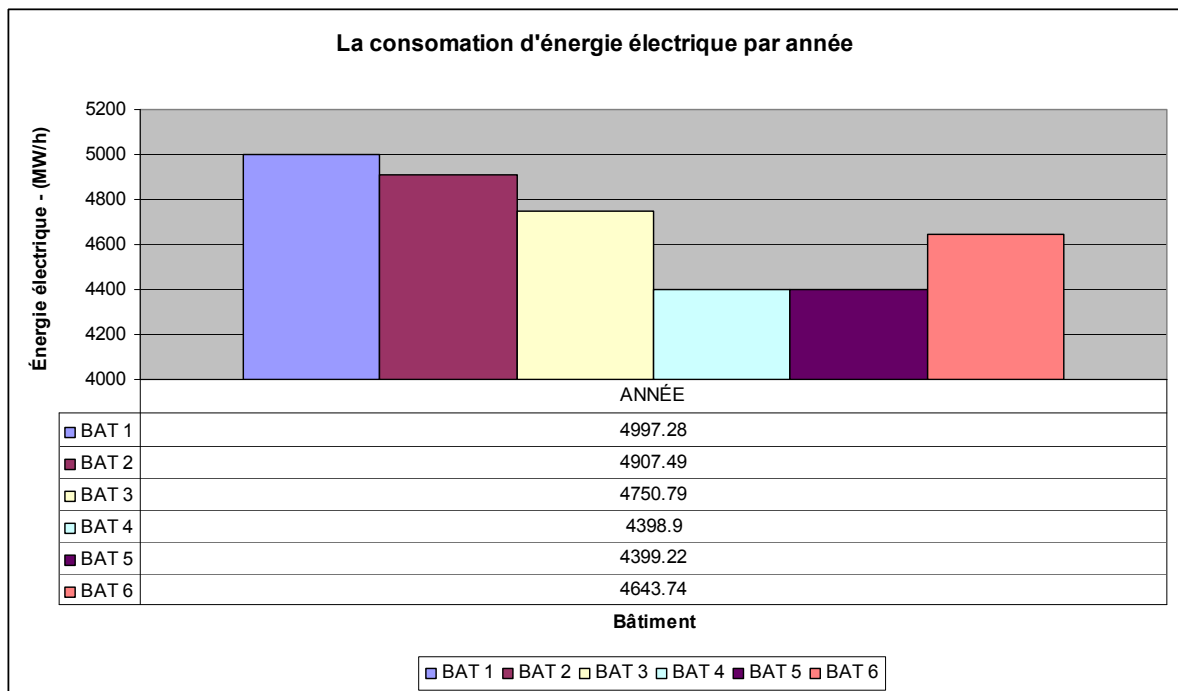


Fig. 5.12' La consommation totale annuelle d'énergie électrique pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 40% de la surface générale des murs extérieures

Dans la figure 5.14, la modélisation des données permet de comparer la consommation de l'énergie électrique entre six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15 % et les mêmes six bâtiments dans l'hypothèse d'une surface vitrée de 40 %.

Le bâtiment le plus énergivore est le bâtiment 1, suivi du bâtiment 2, puis du bâtiment 3.

Les bâtiments les moins consommateurs sont, en ordre décroissant, les bâtiments 6, 5 et 4.

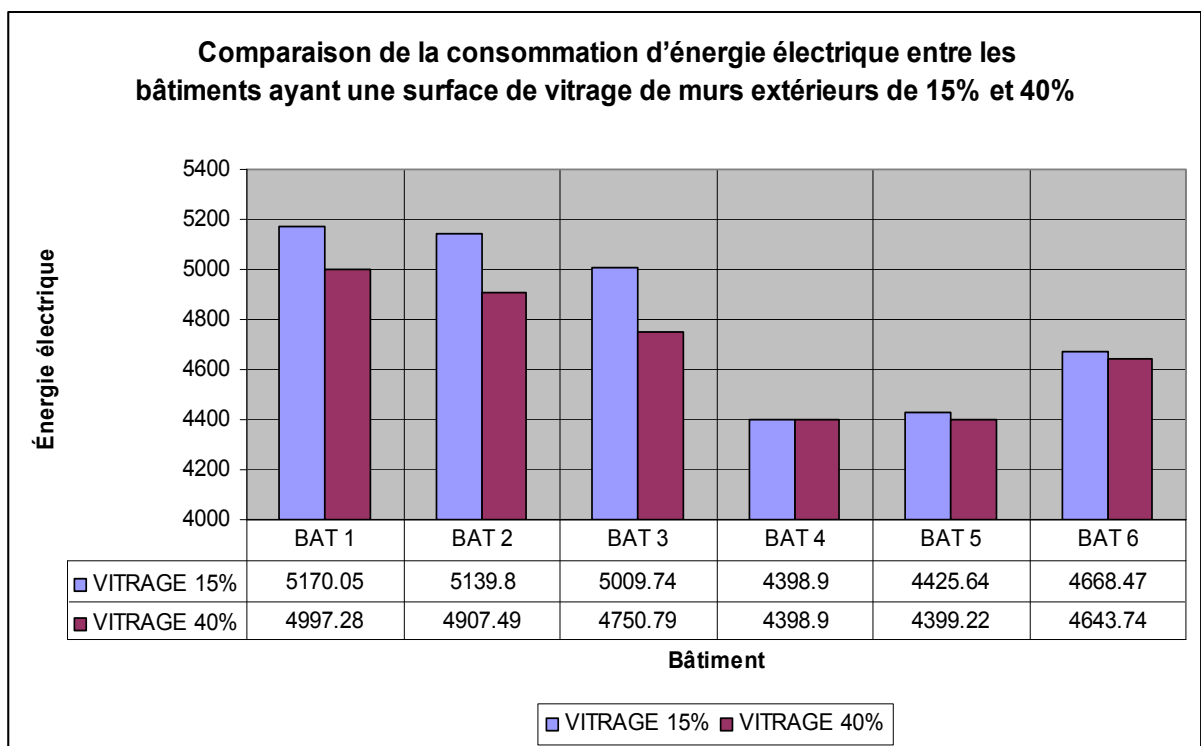


Fig.5.14 Comparaison de la consommation d'énergie électrique entre les bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15% et 40%

Sauf le bâtiment 4, dans tous les cas de figures, les bâtiments ayant une surface de vitrage de 15 % consomment plus que ceux ayant une surface de vitrage de 40 %. Une surface vitrée plus importante diminue donc la consommation d'électricité. Tous les bâtiments mentionnés ici obéissent à cette règle.

En conclusion, l'analyse conduite à affirmer que le bâtiment '4' construit en Forme de 'U' est plus économique en exploitation, pour ce qui est de l'énergie électrique consommée, que les

autres types de bâtiments étudiés. D'autre part, le bâtiment '1', de Forme 'Carré', est plus énergivore que les autres. Il est important de remarquer que la plupart des bâtiments construits à ce jour ont été conçus de cette manière, de Forme 'Carré'.

5.3 La simulation et l'analyse des émissions de CO₂ des bâtiments

La politique actuelle de réduction des émissions de CO₂ ainsi que la nécessité de trouver des solutions techniques dits « vertes », oblige les architectes, les ingénieurs et les administrateurs responsables, à diriger leurs activités et à agir dans le sens du développement durable stratégique de la construction. Ils se préoccupent, eux aussi, de plus en plus, de trouver le chemin vers le développement « vert ». Toute société en mesure de fournir des données chiffrées sur l'impact qu'elle a sur l'environnement, comme, par exemple, des émissions de CO₂ par tonne, est considérablement en avance.

Afin de déterminer le potentiel, ce sous-chapitre analyse les émissions de CO₂ d'une construction résidentielle sur plusieurs étages, en tenant compte de la forme bâtie en plan et sa volumétrie. Le calcul des valeurs CO₂ se fait à l'appui de chiffres d'émission portant sur l'année. Les données générées seront présentées sous forme de tableaux et de graphiques. Les tableaux serviront, entre autre, à produire le graphique de l'émission. Ils servent aussi à synthétiser les données. Lorsque les tableaux sont faits à l'aide de logiciels informatiques spécialisés, l'ajout de formules permet de se procurer des indicateurs, comme l'indice de CO₂ mesuré en (kg) x10³ et l'indice de l'émission de CO₂ mesuré mensuellement ou à l'année. Une fois les résultats listés et illustrés, une analyse sera effectuée.

Dans l'ANNEXE III, les figures représentent les graphes de l'émission annuelle totale de CO₂ pour chaque bâtiment étudié. De plus, les tableaux présentent les données recueillies nécessaires à produire les graphiques.

La modélisation des données est réalisée pour le six types des bâtiments afin de permet d'observer l'émission annuelle totale de CO₂ dans deux hypothèses : surface de vitrage de murs extérieurs de 15 % et surface de vitrage de murs extérieurs de 40 %.

La figure suivante, 5.15, résume l'émission mensuelle de CO₂ pour les six bâtiments étudiés, dans l'hypothèse où le vitrage est de 15 % de la surface générale de murs extérieurs. L'émission totale de dioxyde de carbone des bâtiments, dont l'inertie de l'émission qui en fait partie, est une donnée disponible au niveau du bâtiment uniquement.

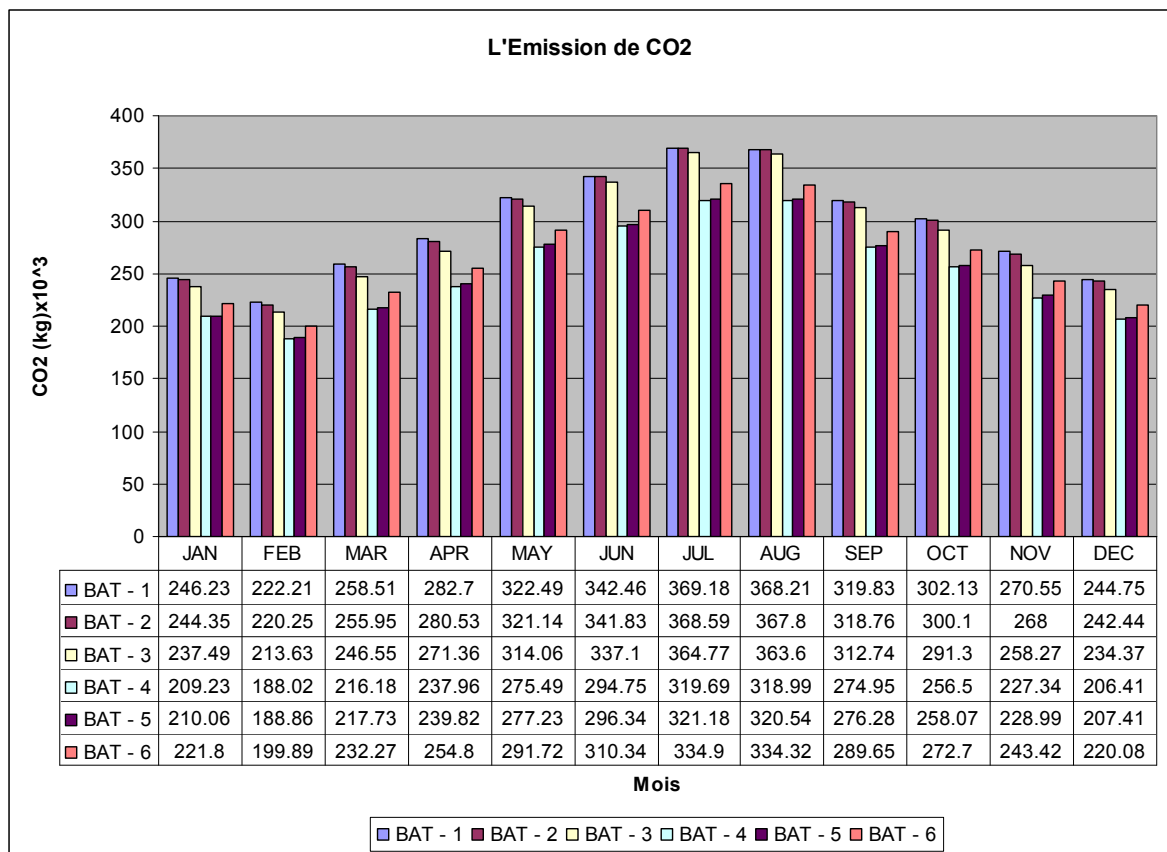


Figure 5.15 L'émission mensuelle de CO₂ pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 15% de la surface générale des murs extérieures

La modélisation des données concerne les consommations mesurées pendant une année. Il reste à découvrir que l'émission de CO₂ des bâtiments 1 et 2 est la plus élevée. En revanche, l'émission des bâtiments 4 et 5 est la plus faible.

En comparant les six bâtiments, lors de l'analyse de la figure suivante, 5.16, il est évident que l'émission de CO₂ annuelle totale du bâtiment numéro 4 est la plus faible. La plus proche de l'émission du bâtiment numéro 4 est celle du bâtiment numéro 5. L'émission du bâtiment numéro 6 a des valeurs moyennes, si l'on compare les six constructions.

Au contraire, le bâtiment numéro 1 génère la plus grande émission de dioxyde de carbone totale annuelle. Très proche de lui est situé le bâtiment numéro 2 et, un peu plus loin, le bâtiment numéro 3.

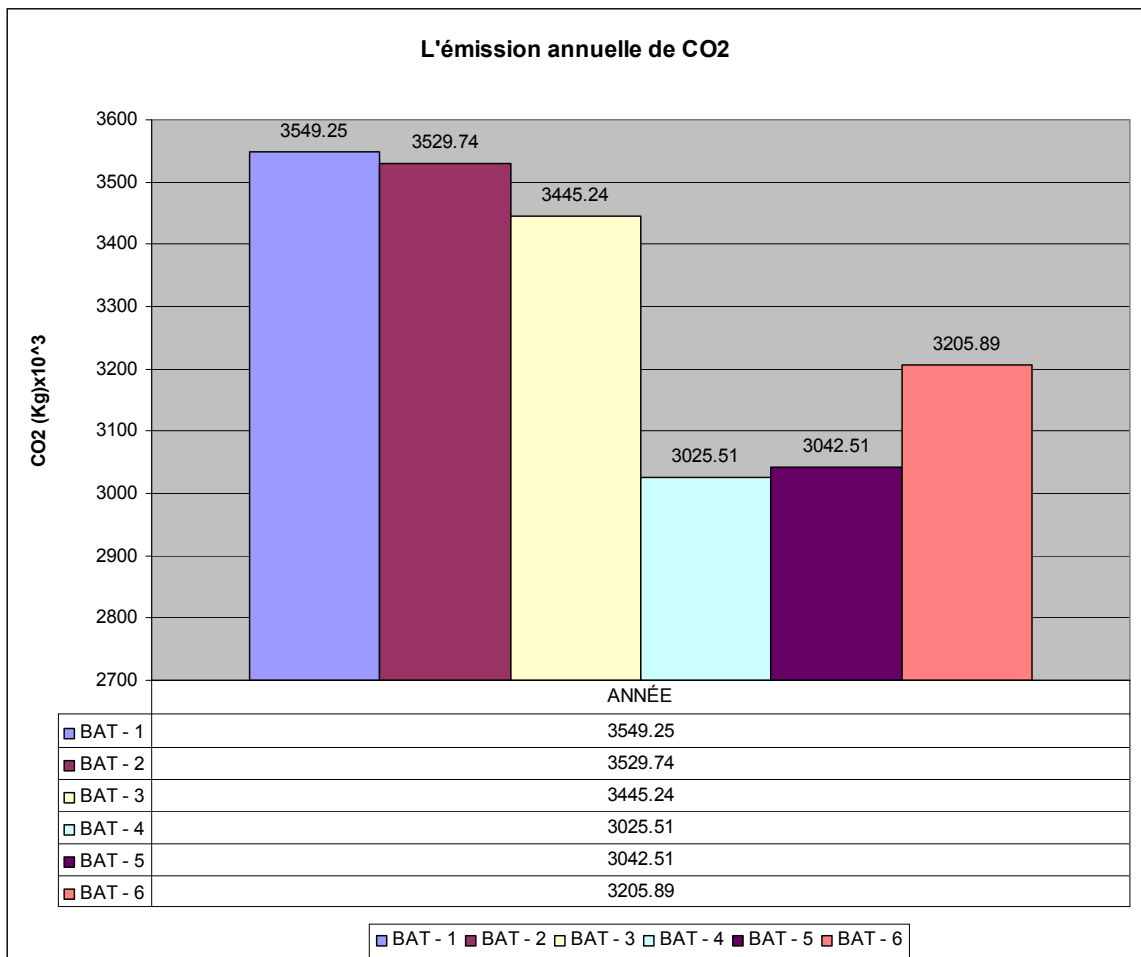


Figure 5.16 L'émission totale annuelle de CO₂ pour les bâtiments ayant la surface de vitrage de 15% de la surface générale des murs extérieures

Dans la figure 5.17, la modélisation des données permet de mesurer les émissions de CO₂ de six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 40 %. Il apparaît que c'est durant les mois de juillet et août que les émissions de CO₂ sont les plus fortes, elles décroissent ensuite jusqu'en février, pour croître de mars à juillet.

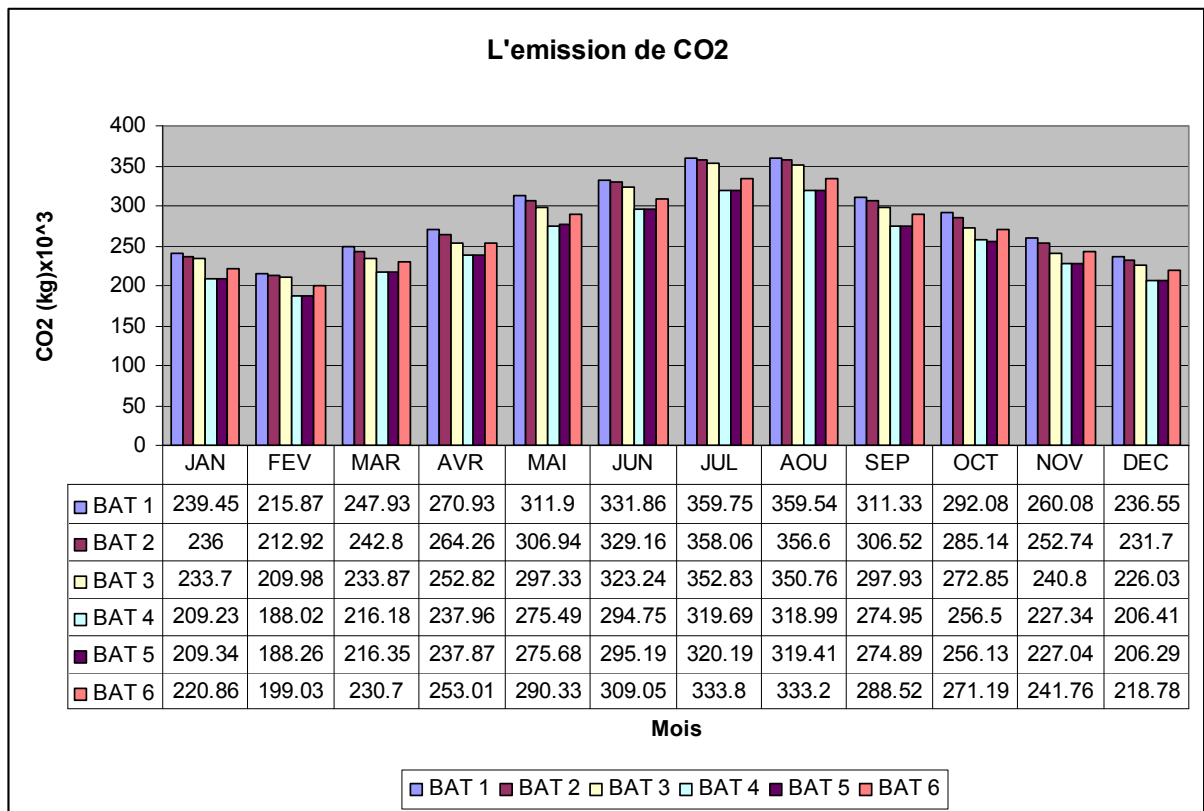


Fig. 5.17 L'émission mensuelle de CO₂ des bâtiments ayant la surface de vitrage de 40% de la surface générale des murs extérieures

Les bâtiments 1 et 2 sont les plus émetteurs de CO₂, suivis du bâtiment 3, puis du bâtiment 6.

Les bâtiments 4 et 5 émettent moins de CO₂, leurs émissions sont quasiment identiques.

La modélisation des données de la figure suivante, 5.18, permet d'observer que la moyenne annuelle des émissions de CO₂ confirme l'ordre précédemment établi dans le graphique détaillé par mois. Les bâtiments les plus émetteurs de CO₂ sont toujours les bâtiments 1, suivi

du bâtiment 2 et du 3, puis du 6. Les deux bâtiments 4 et 5, dont les émissions sont presque du même ordre, émettent moins de CO₂.

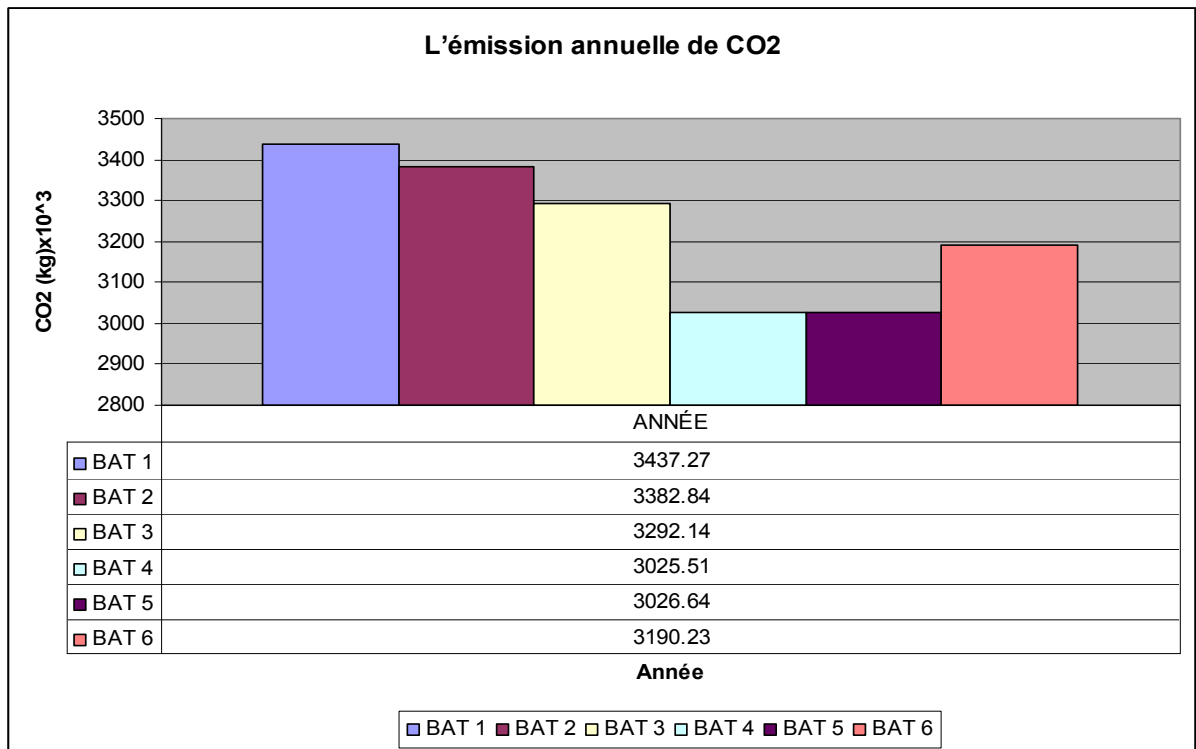


Fig. 5.18 L'émission totale annuelle de CO₂ des bâtiments ayant la surface de vitrage de 40% de la surface générale des murs extérieures

Dans la figure 5.19, la modélisation des données permet de comparer les émissions de CO₂ entre six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15 % et les mêmes six bâtiments dans l'hypothèse d'une surface vitrée de 40 %.

La modélisation des données du graphique de la figure 5.19 nous permet de comparer les émissions de CO₂ entre six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15 % et six autres bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 40 %.

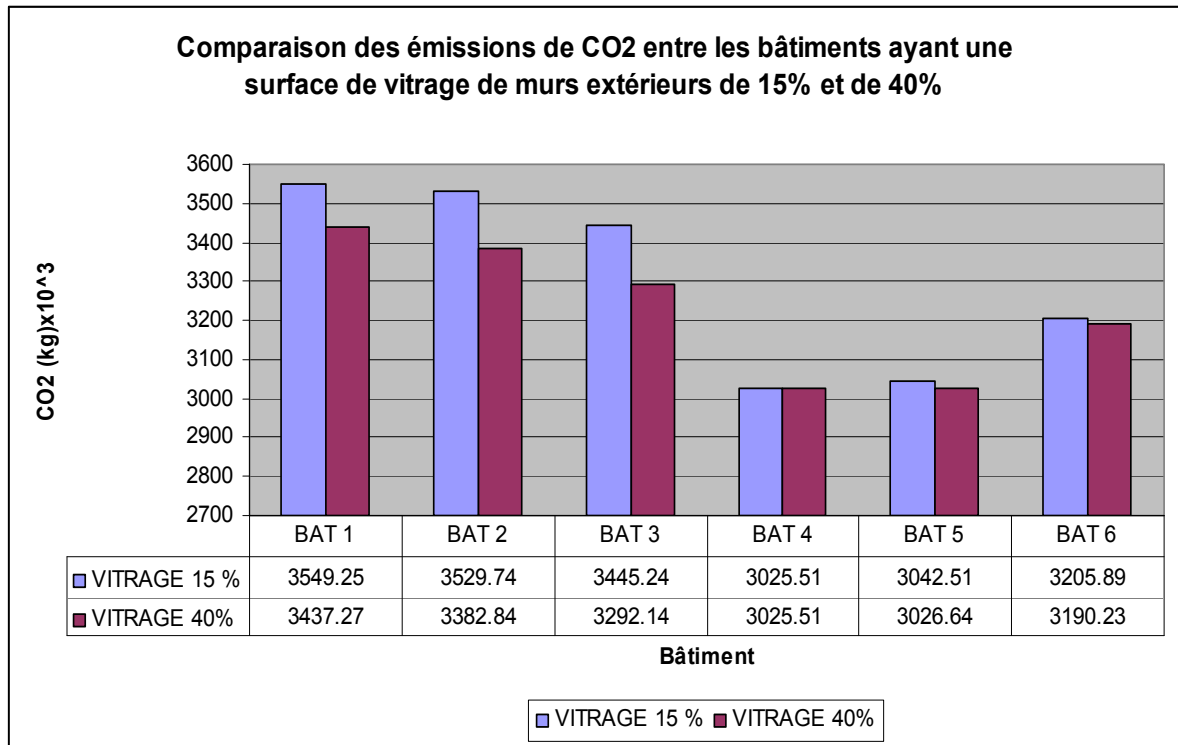


Fig.5.19 Comparaison des émissions de CO₂ entre les bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15% et de 40%

Sauf le bâtiment 4, dans tous les cas de figures, les bâtiments pourvus de la surface vitrée de 40 % émettent moins de CO₂ que les bâtiments dont la surface vitrée n'est que de 15 %.

Les bâtiments les plus émetteurs de CO₂ sont les bâtiments 1, suivi du bâtiment 2 et du 3, puis du 6. Les deux bâtiments les moins émetteurs de CO₂ sont les bâtiments 4 et 5.

Enfin, la modélisation permet de visualiser que le bâtiment '4', construit en Forme de 'U', est la plus environnemental quand on parle de l'émission de CO₂. Il émet nettement moins de dioxyde de carbone que le bâtiment '1', de Forme 'Carré', qui est le plus polluant. Il est important de noter que la plupart de bâtiments construits à ce jour ont été conçus de cette manière, de Forme 'Carré', ayant un taux élevé de pollution.

5.4 Analyse des coûts en fonction des superficies des murs extérieurs *versus* la consommation d'énergie électrique annuelle

Dans ce sous-chapitre, nous avons souhaité réaliser une analyse nécessaire des coûts en fonction des superficies des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15 % et de 40 % *versus* la consommation d'énergie électrique annuelle.

Les données suivantes du tableau 5.1 nous permettent d'analyser le ratio « Coût des murs extérieurs / Consommation d'énergie électrique » de six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15 %.

Tableau 5.1 Ratio coût des superficies des murs extérieurs *versus* la consommation d'énergie électrique d'après une surface de vitrage de 15 %

Vitrage 15%	Coût des murs extérieurs (\$)	Consommation énergie électrique (ÉE) (MW/h)	Ratio Coût/ÉE
Bâtiment 1	926609.60	5170.05	179.22
Bâtiment 2	1033174.80	5139.80	201.01
Bâtiment 3	1583521.60	5009.74	316.08
Bâtiment 4	1398656.00	4398.90	317.95
Bâtiment 5	1398656.00	4425.64	316.03
Bâtiment 6	1033174.80	4668.47	221.30

Le bâtiment dont le coût des murs extérieurs est le plus élevé est le bâtiment 3, suivi du bâtiment 4 et du bâtiment 5 (ces derniers ayant un coût identique), puis vient les bâtiments 2 et 6 avec un coût identique et, pour terminer, le bâtiment 1, qui a un coût beaucoup moins élevé.

Lorsqu'il s'agit de la consommation d'énergie électrique, c'est le bâtiment 1 qui est le plus consommateur, suivi du bâtiment 2, puis du bâtiment 3 et, pour finir, en ordre décroissant, les bâtiments 6, 5 et 4. Nous pouvons remarquer que les bâtiments 2 et 6 ont des coûts identiques, mais que leur consommation d'énergie électrique est différente, le bâtiment 2 étant plus onéreux. Nous pouvons faire la même constatation pour les bâtiments 4 et 5, dont le coût des murs est identique, mais qui ont une consommation d'énergie électrique différente (le bâtiment 4 étant le moins cher).

Le ratio « Coût des murs extérieurs / Consommation d'énergie électrique » le plus élevé déduit de ces données est celui du bâtiment 4, suivi des bâtiments 3 et 5 (presque identiques), puis du bâtiment 6 et des bâtiments 2 et 1.

Les données du tableau 5.2 nous permettent d'analyser le ratio « Coût des murs extérieurs / Consommation d'énergie électrique » de six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 40 %.

Tableau 5.2 Ratio coût des superficies des murs extérieurs *versus* la consommation d'énergie électrique ayant une surface de vitrage de 40 %

Vitrage 40%	Coût des murs extérieurs (\$)	Consommation énergie électrique (ÉE) (MW/h)	Ratio Coût/ÉE
Bâtiment 1	1095785.60	4997.28	219.27
Bâtiment 2	1240512.00	4907.49	252.77
Bâtiment 3	1819417.60	4750.79	382.97
Bâtiment 4	1654016.00	4398.9	376.00
Bâtiment 5	1654016.00	4399.22	375.97
Bâtiment 6	1240512.00	4643.74	267.13

À l'ANNEXE I, les tableaux représentent les coûts des murs extérieurs dans l'hypothèse mentionnée ci-dessus.

Pour autant, la consommation d'énergie électrique diffère suivant les bâtiments. Le bâtiment 1 est le plus consommateur, suivi des bâtiments 2 et 3, puis du bâtiment 6. Les bâtiments les moins consommateurs sont les bâtiments 4 et 5 (consommation presque identique). Le ratio « Coût des murs extérieurs / Consommation d'énergie électrique » le plus élevé déduit de ces données est celui des bâtiments 6 et 2. Le bâtiment le moins cher est le bâtiment 1.

La modélisation des données de la figure 5.20 permet de comparer les ratios « Coût des murs extérieurs / Consommation d'énergie électrique » entre six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15 % et ces six mêmes bâtiments pourvus, cette fois, d'une surface de vitrage de murs extérieurs de 40 %.

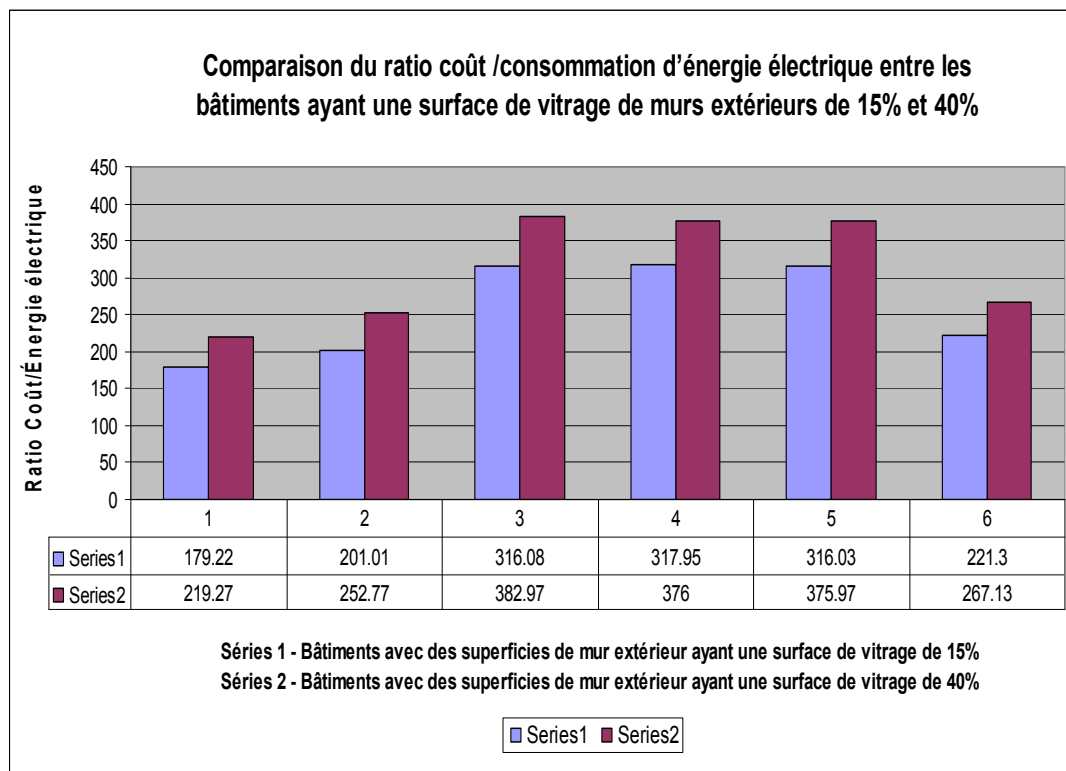


Fig.5.20 Comparaison du ratio Coût / Consommation d'énergie électrique annuelle entre les bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15 % et de 40 %

La comparaison entre ces bâtiments fait apparaître que les ratios « Coût / Consommation électrique » sont, dans tous les cas de figures, plus élevés dans le cas de bâtiments pourvus de surfaces vitrées plus importantes (40 %), plus particulièrement dans le bâtiment 3, qui se trouve, par ailleurs, à être le plus cher. C'est le bâtiment qui voit le plus son coût s'élever lorsque sa surface vitrée augmente.

Les bâtiments 4 et 5 sont également chers, mais avec peu de différences de coûts, quelle que soit l'importance de la surface vitrée. Le bâtiment 1 est le moins cher, un peu plus cher, toutefois, si sa surface vitrée atteint 40 %. Le bâtiment 2 est un peu plus cher que le bâtiment 1 et il obéit à la même règle : l'augmentation de sa surface vitrée augmente son prix. Le bâtiment 6 est bien placé, son ratio « Coût / Consommation d'électricité » représente une moyenne entre le bâtiment 1 et le bâtiment 3, quelle que soit sa surface vitrée.

Contrairement au constat de base, où la consommation d'énergie du bâtiment 4 en forme de « U » est moins énergivore en comparaison avec le bâtiment 1 en forme de « carré », le ratio « Coût des murs extérieurs / Consommation d'énergie électrique » nous montre que le bâtiment 1 est le mieux situé pour ce qui est de son prix, il est donc moins cher à construire. Mais, comme il est mentionné ici, le bâtiment 1 est moins respectueux au niveau environnemental.

5.5 Analyse des coûts en fonction des superficies des murs extérieurs *versus* les émissions de CO₂ des bâtiments

Ce sous-chapitre propose une analyse des coûts en fonction des superficies des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15 % et de 40 % *versus* les émissions de CO₂ annuelles des bâtiments.

Les données suivantes du tableau 5.3 nous permettent d'analyser le ratio « Coût des murs extérieurs / Émission annuelle de CO₂ » de six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15 %.

Tableau 5.3 Ratio coût des superficies des murs extérieurs *versus* les émissions de CO₂ annuelles des bâtiments ayant une surface de vitrage de 15 %

Vitrage 15%	Coût des murs extérieurs (\$)	Émission annuelle de CO₂ (ÉACO₂) (Kg$\times$10³)	Ratio Coût/ ÉACO₂
Bâtiment 1	926609.60	3549.25	261.07
Bâtiment 2	1033174.80	3529.74	292.70
Bâtiment 3	1583521.60	3445.24	459.62
Bâtiment 4	1398656.00	3025.51	462.28
Bâtiment 5	1398656.00	3042.51	459.70
Bâtiment 6	1033174.80	3205.89	322.27

Le bâtiment dont le coût des murs extérieurs est le plus élevé est le bâtiment 3, suivi du bâtiment 4 et du bâtiment 5 (ces derniers ayant un coût identique), puis vient les bâtiments 2 et 6 avec un coût identique et, pour terminer, le bâtiment 1, qui a un coût beaucoup moins élevé.

Lorsqu'il s'agit de l'émission annuelle de CO₂, c'est le bâtiment 1 qui est le plus consommateur, suivi du bâtiment 2, puis du bâtiment 3 et, pour finir, en ordre décroissant, les bâtiments 6, 5 et 4. Nous pouvons remarquer que les bâtiments 2 et 6 ont des coûts identiques, mais que leur émission annuelle de CO₂ est différente, le bâtiment 2 étant plus onéreux. Nous pouvons faire la même constatation pour les bâtiments 4 et 5, dont le coût des murs est identique, mais qui ont une émission annuelle de CO₂ différente (le bâtiment 4 étant la construction qui émet le moins de dioxyde de carbone).

Le ratio « Coût des murs extérieurs / Émission annuelle de CO₂ » le plus élevé déduit de ces données est celui du bâtiment 4, suivi des bâtiments 5 et 3 (presque identiques), puis du bâtiment 6 et des bâtiments 2 et 1.

Les données du tableau 5.4 nous permettent d'analyser le ratio « Coût des murs extérieurs / Émission annuelle de CO₂ » de six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 40 %.

Tableau 5.4 Ratio coût des superficies des murs extérieurs *versus* les émissions de CO₂ annuelles des bâtiments ayant une surface de vitrage de 40 %

Vitrage 40%	Coût des murs extérieurs (\$)	Émission annuelle de CO₂ (ÉACO₂) (Kgx10³)	Ratio Coût/ ÉACO₂
Bâtiment 1	1095785.60	3437.27	318.79
Bâtiment 2	1240512.00	3382.84	366.70
Bâtiment 3	1819417.60	3292.14	552.65
Bâtiment 4	1654016.00	3025.51	546.68
Bâtiment 5	1654016.00	3026.64	546.48
Bâtiment 6	1240512.00	3190.23	388.84

À l'ANNEXE I, les tableaux représentent les coûts des murs extérieurs dans l'hypothèse mentionnée ci-dessus.

Pour autant, l'émission annuelle de CO₂ diffère suivant les bâtiments. Le bâtiment 1 est le bâtiment qui émet le plus de dioxyde de carbone, suivi des bâtiments 2 et 3, puis du bâtiment 6. Les bâtiments qui émettent le moins de dioxyde de carbone sont les bâtiments 4 et 5 (avec une émission de CO₂ presque identique). Le ratio « Coût des murs extérieurs / Émission annuelle de CO₂ » le plus élevé déduit de ces données est celui du bâtiment 3, suivi

des bâtiments 4 et 5 (ces derniers ayant un ratio presque identique). Le bâtiment ayant la valeur de ratio la plus petite est le bâtiment 1.

La modélisation des données de la figure 5.21 permet de comparer les ratios « Coût des murs extérieurs / Émission annuelle de CO₂ » entre six bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15 % et ces six mêmes bâtiments pourvus, cette fois, d'une surface de vitrage de murs extérieurs de 40 %.

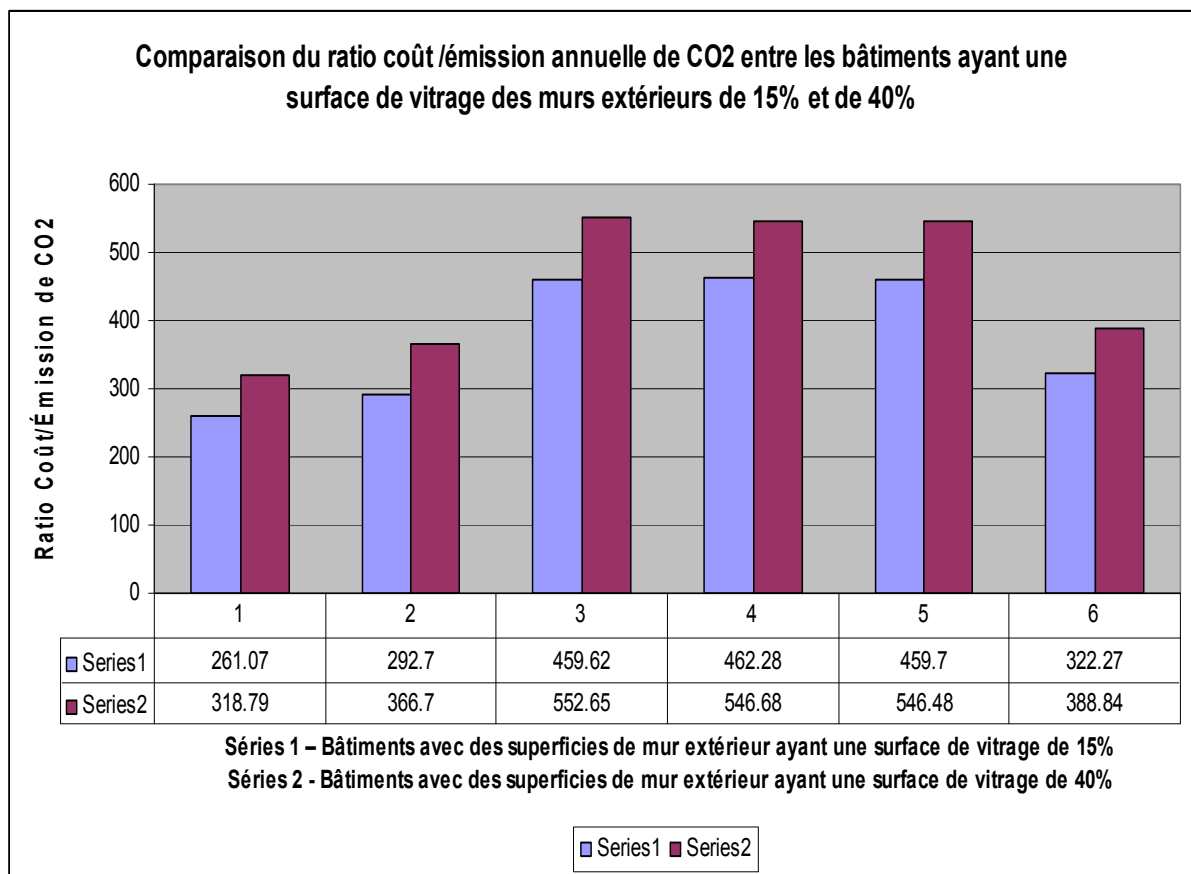


Fig.5.21 Comparaison du ratio Coût / Émission annuelle de CO₂ entre les bâtiments ayant une surface de vitrage de murs extérieurs de 15 % et de 40 %

La comparaison entre ces bâtiments fait apparaître que les ratios « Coût / Émission de CO₂ » sont, dans tous les cas de figures, plus élevés dans le cas de bâtiments pourvus de surfaces

vitrées plus importantes (40 %), plus particulièrement dans le bâtiment 4. C'est le bâtiment qui voit le plus son coût s'élever lorsque sa surface vitrée augmente.

Les bâtiments 3 et 5 sont également chers, mais avec peu de différences de coûts, quelle que soit l'importance de la surface vitrée. Le bâtiment 1 est le moins cher, un peu plus cher, toutefois, si sa surface vitrée atteint 40 %. Le bâtiment 2 est un peu plus cher que le bâtiment 1 et il obéit à la même règle : l'augmentation de sa surface vitrée augmente son prix. Le bâtiment 6 est bien placé, son ratio « Coût / Émission de CO₂ » représente une moyenne entre le bâtiment 1 et le bâtiment 4, quelle que soit sa surface vitrée.

Contrairement au constat de base, où l'émission annuelle de CO₂ du bâtiment 4 en forme de « U » est moins émettrice de CO₂ en comparaison avec le bâtiment 1 de forme « carrée », le ratio « Coût des murs extérieurs / Émission de CO₂ » nous montre que le bâtiment 1 est le mieux situé au point de vue du prix, il est donc moins cher à construire. Mais comme il est mentionné ici, le bâtiment 1 est moins respectueux au niveau environnemental.

CONCLUSION

Nous pouvons conclure que le développement durable occupe une place de plus en plus importante dans la société d'aujourd'hui, et que l'intérêt pour ce sujet ne cesse de croître. En effet, de nouvelles normes environnementales sont disponibles, et de plus en plus de projets tentent de s'y conformer. Les mentalités concernant les processus de conception tendent également à changer. Les techniques de construction et d'aménagement comptent, chaque année, de nombreux nouveaux projets qui permettent de mesurer les bénéfices liés à la construction des bâtiments résidentiels durables. De plus, ces projets apporteront également de nouvelles données permettant l'étude des avantages et des inconvénients des bâtiments durables. Enfin, la gestion d'équipes intégrées dans lesquelles sont apparus des gestionnaires de projets dans l'industrialisation commence à connaître un certain succès et à obtenir la reconnaissance des professionnels et même de la population.

En premier lieu, par un exercice inductif, est effectuée une étude de l'information disponible sur la conception, la construction, la gestion des bâtiments résidentiels durables, la volumétrie, la forme, l'efficacité énergétique et l'émission de CO₂ des bâtiments.

En second lieu, par un exercice déductif, est produite une analyse au niveau de la modélisation spatiale du bâtiment, tout en tenant compte de la forme en plan bâti d'une construction résidentielle. Le présent ouvrage suggère que le travail des intervenants dans le domaine de la construction résidentielle pourrait être facilité, et qu'il serait possible de rendre plus performantes des simulations et un suivi réel en mode virtuel. Comme plusieurs environnements s'informatisent afin de mieux opérer des simulations, il est certain que la simulation de la consommation énergétique ou d'émission de dioxyde de carbone dans le domaine de la construction est un objectif réalisable. L'utilisation typique des simulations paramétriques est la suivante :

- La création de courbes de simulation pour conception, afin d'aider la prise de décision dès les premières étapes de la conception ;

- Un outil pédagogique aidant les utilisateurs à comprendre l'impact des variations de conception ;
- Le support pour expliquer les concepts de simulation de bâtiments aux clients, ingénieurs, architectes, etc. Les ingénieurs et les architectes aiment particulièrement la nature visuelle des courbes de simulation pour conception ;
- Un instrument d'optimisation du design.

En troisième lieu, les analyses comparatives des coûts, des consommations d'énergies électriques et des émissions de CO₂ de six bâtiments ayant une forme bâtie en plan différente, d'un volume approximativement égal à 19600 m³ et de surfaces bâties approximativement égales à 700 m² ont été présentées.

La modélisation des données est réalisée pour six types des bâtiments afin de permettre d'observer la consommation d'énergie électrique dans deux hypothèses : surface de vitrage de murs extérieurs de 15 % et surface de vitrage de murs extérieurs de 40 %.

Pour une meilleure compréhension, il est suggéré de décrire la forme du bâtiment comme suit :

- Bâtiment -1 : bâtiment en forme « carrée » (voir Figure 5.4);
- Bâtiment -2 : bâtiment en forme de « L » (voir Figure 5.5);
- Bâtiment -3 : bâtiment en forme « carrée avec atrium » (voir Figure 5.6);
- Bâtiment -4 : bâtiment en forme de « U » (voir Figure 5.7);
- Bâtiment -5 : bâtiment en forme de « H » (voir Figure 5.8);
- Bâtiment -6 : bâtiment en forme de « T » (voir Figure 5.9).

Quant à la simulation de consommation d'énergie électrique, sauf pour le bâtiment 4, les bâtiments ayant une surface de vitrage de 15 % consomment plus que ceux ayant une surface

de vitrage de 40 %. Une surface vitrée plus importante diminue donc la consommation d'électricité. Tous les bâtiments mentionnés ici obéissent à cette règle. L'analyse de la consommation d'énergie électrique conduit à affirmer que le bâtiment 4 construit en forme de « U » est plus économique lorsqu'il s'agit de son exploitation, pour ce qui est de l'énergie électrique consommée, que les autres types de bâtiments étudiés. D'autre part, le bâtiment 1, de forme « carrée », est plus énergivore que les autres. Il est important de remarquer que la plupart des bâtiments construits à ce jour ont été conçus de cette manière, de forme « carrée ».

Quant à la simulation d'émission de CO₂, sauf pour le bâtiment 4, les bâtiments pourvus de surface vitrée de 40 % émettent moins de CO₂ que les bâtiments dont la surface vitrée n'est que de 15 %. Les bâtiments qui émettent les plus de CO₂ sont les bâtiments 1, suivis du bâtiment 2 et du 3, puis du 6. Les deux bâtiments les moins émetteurs de CO₂ sont les bâtiments 4 et 5. La modélisation permet de visualiser que le bâtiment 4, construit en forme de « U », est le plus conforme aux normes environnementales pour ce qui est de l'émission de CO₂. Il émet nettement moins de dioxyde de carbone que le bâtiment 1, de forme « carrée », qui est le plus polluant. Il est important de noter que la plupart des bâtiments construits à ce jour ont été conçus de cette manière, de forme « carrée », leur taux de pollution est élevé.

Ensuite, nous avons jugé nécessaire de réaliser une analyse de coûts en fonction des superficies des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15 % et de 40 % *versus* la consommation d'énergie électrique annuelle et *versus* l'émission annuelle de CO₂ des bâtiments étudiés.

La comparaison entre ces bâtiments fait apparaître que les ratios « Coût / Consommation électrique » sont, dans tous les cas de figures, plus élevés dans le cas des bâtiments pourvus de surfaces vitrées plus importantes (40 %), plus particulièrement dans le bâtiment 3, qui se

trouve, par ailleurs, être le plus cher. C'est le bâtiment qui voit le plus son coût s'élever lorsque sa surface vitrée augmente.

Les bâtiments 4 et 5 sont également chers, mais avec peu de différences de coûts, quelle que soit l'importance de la surface vitrée. Le bâtiment 1 est le moins cher, un peu plus cher, toutefois, si sa surface vitrée atteint 40 %. Le bâtiment 2 est un peu plus cher que le bâtiment 1 et il obéit à la même règle : l'augmentation de sa surface vitrée augmente son prix. Le bâtiment 6 est bien placé, son ratio « Coût / Consommation d'électricité » représente une moyenne entre le bâtiment 1 et le bâtiment 3, quelle que soit sa surface vitrée.

Contrairement au constat de base, où la consommation d'énergie du bâtiment 4 en forme de « U » est moins énergivore en comparaison avec le bâtiment 1 en forme de « carré », le ratio « Coût des murs extérieurs / Consommation d'énergie électrique » nous montre que le bâtiment 1 est le mieux situé au niveau du prix, il est donc moins cher à construire. Mais comme il est mentionné ici, le bâtiment 1 est moins respectueux au point de vue environnemental.

Les ratios « Coût / Émission de CO₂ » sont, dans tous les cas de figures, plus élevés dans le cas de bâtiments pourvus de surfaces vitrées plus importantes (40 %), plus particulièrement dans le bâtiment 4. C'est le bâtiment qui voit le plus son coût s'élever lorsque sa surface vitrée augmente.

Les bâtiments 3 et 5 sont également chers, avec peu de différences de coûts, quelle que soit l'importance de la surface vitrée. Le bâtiment 1 est le moins cher, un peu plus cher, toutefois, si sa surface vitrée atteint 40 %. Le bâtiment 2 est un peu plus cher que le bâtiment 1. Le bâtiment 6 est toujours mieux placé, son ratio « Coût / Émission de CO₂ » représente une moyenne entre le bâtiment 1 et le bâtiment 4, quelle que soit sa surface vitrée.

Le ratio « Coût des murs extérieurs / Émission de CO₂ » nous montre que le bâtiment 1, contrairement au constat de base où l'émission annuelle de CO₂ du bâtiment 4 en forme de « U » est moins émettrice de CO₂ en comparaison avec le bâtiment 1 en forme de « carré » est le mieux situé au niveau du prix, il est donc moins cher à construire. Toutefois, comme nous l'avons déjà mentionné, le bâtiment 1 est moins respectueux au point de vue environnemental.

En conclusion, l'analyse nous amène à affirmer que le bâtiment 4 construit en forme de « U » est plus économique pour ce qui est de son exploitation, de l'énergie électrique consommée et de l'émission de CO₂ que les autres types de bâtiments étudiés. D'autre part, le bâtiment 1, de forme « carrée », est plus énergivore que les autres. D'autre part, le bâtiment 1 en forme « carrée » est le mieux situé au niveau du prix, il est donc moins cher à construire. Il est important de remarquer que la plupart des bâtiments construits à ce jour ont été conçus de cette manière, de forme « carrée ».

L'analyse de bâtiment montre, d'une part, la consommation d'énergie électrique et, d'autre part, les émissions de CO₂, elle permet de constater que les deux phénomènes sont interdépendants. D'une manière générale, la plus forte consommation d'énergie électrique, et donc la plus forte émission de CO₂, apparaît durant l'été (juillet et août). Les mois d'hiver sont plus économes et moins polluants. Cette analyse permet également de constater que les bâtiments pourvus d'une plus grande surface de vitrage (40 %) sont moins consommateurs d'énergie électrique et donc, émettent moins de CO₂.

À notre avis, le bâtiment 6 est le mieux placé, ses ratios « Coût / Consommation d'électricité » et « Coût / Émission de CO₂ » représentent la moyenne entre le bâtiment 1 et le bâtiment 3 et 4, quelle que soit sa surface vitrée. Peut-être ce type de bâtiment en forme de « T » sera-t-il le bâtiment de l'avenir dont le coût, la consommation d'énergie électrique et l'émission de CO₂ se verront harmonisés dans une seule construction ?

Quant à l'analyse, nous sommes amenés à conclure que la forme bâtie en plan d'une construction crée un volume d'édifice qui perd ou qui gagne plus d'énergie et assure une émission différente de CO₂ durant sa durée de vie. Donc, la forme bâtie d'une construction a une nette influence sur la consommation d'énergie et l'émission de dioxyde de carbone.

Le problème de la durabilité a crû très rapidement dans l'ordre des priorités des décisionnaires au cours de la dernière décennie. Stimulés par des accords internationaux, comme le protocole de Kyoto de 1997, et soutenus par des preuves scientifiques croissantes sur les changements climatiques, les gouvernements orientent de plus en plus leurs actions vers l'amélioration de la durabilité des équipements construits. La présence d'un acteur virtuel – les générations à venir – vient ajouter une autre dimension à la définition de la mission du projet. De plus, l'aspect global et l'intégration de toutes les parties engagées dans la prise des décisions semblent donner plus de sens au projet, ils permettent ainsi de mieux gérer les problèmes.

À la lumière des faits exposés, nous sommes à même de soulever une problématique sur la conception des bâtiments durables. Il est facile de comprendre que la conception intégrée est une méthode très efficace pour concevoir des bâtiments durables. Le succès d'une conception, tout en accomplissant ses objectifs écologiques, dépend beaucoup de la créativité du gestionnaire de projet et de l'esprit d'invention de solutions.

À notre avis, le succès du partenariat de l'analyse qui a été présentée dans ce document passe par une bonne communication, par des règles claires et précises, par le respect des exigences du client ainsi que par la volonté d'atteindre l'objectif commun de fournir un service de qualité aux bénéficiaires.

En bref, le modèle de gestion intégrée semble être une bonne méthode de résolution de ce type de problème. En revanche, il est impératif qu'il soit soutenu par un cadre rigide de procédures à suivre par les acteurs, par la volonté des acteurs face au bon fonctionnement et à

l'atteinte d'un consensus, par des ressources financières disponibles pour l'élaboration, l'établissement et la mise en œuvre des actions.

Pour finir, nous pouvons dire que l'introduction du gestionnaire de projet diminuera considérablement les coûts d'un projet. En gérant la chaîne de production, la fabrication, l'assemblage, l'exploitation et la dissolution d'une construction, le futur gestionnaire de projet garantira la création d'un bâtiment dont la consommation d'énergie sera faible et son émission de CO₂ réduite.

RECOMMANDATIONS

Le présent ouvrage est une proposition technologique sous expérimentation. Compte tenu de ce contexte, plusieurs travaux devront être exécutés afin de pouvoir faire fonctionner l'analyse énergétique du bâtiment ou ses émissions de CO₂.

À cette étape d'évolution, il est important que chaque municipalité, ville, organisme gouvernemental adoptent leur plan de développement durable (PDD). Le PDD devra contenir la politique et l'action corporative « pour préserver le climat » ainsi que la politique de développement durable (DD) des édifices corporatifs.

Afin d'accentuer le virage « vert » de leur parc immobilier, la Direction des immeubles doit créer une nouvelle unité d'affaires, soit la Division de l'énergie et de l'environnement, dont la mission est de fournir des services d'expertise en gestion de l'efficacité énergétique et en développement durable afin de diminuer la consommation énergétique et l'empreinte écologique des bâtiments municipaux et gouvernementaux.

Aussi, la direction de la Section développement et soutien technique en lien avec les principes de développement durable doit être occupée par un gestionnaire de projet écologique. Ce chef de service, ainsi que les autres personnes en charge de la Division de l'énergie et de l'environnement, doit fournir le soutien technique et professionnel auprès des unités opérationnelles pour un fonctionnement optimal des systèmes, élabore, met en œuvre et assure le suivi des pratiques, des solutions novatrices, des concepts et des standards adaptés aux divers programmes, projets ou plans directeurs, prépare des plans et devis de projets favorisant l'obtention de bénéfices économiques, écologiques et sociaux et fournit les services d'accompagnements et de soutien à l'accréditation LEED.

Donc, si l'on reconnaît l'importance de travailler sur les compétences, il devient nécessaire d'établir une ingénierie de formation adaptée aux besoins de changements que connaît le milieu des organisations.

Les entreprises privées devront intégrer dans leur équipe le gestionnaire de projet écologique ayant une formation dans la maîtrise de la consommation énergétique et l'empreinte écologique du cadre bâti. Ils devront effectuer les activités de soutien à la rédaction du programme fonctionnel et technique et aux études de concept, à la revue des audits des immeubles, à l'élaboration de listes de travaux des installations vétustes, à la mise en service de base LEED, aux services professionnels de conception et de suivi de chantier et au support technique aux équipes d'entretien.

Les architectes, les urbanistes et les ingénieurs doivent travailler de façon concertée pour favoriser le développement de nouveaux quartiers et l'aménagement urbain en général et changer la mentalité de promoteurs et développeurs immobiliers. S'ils ont la capacité de démontrer aux acteurs du développement immobilier les avantages financiers d'adopter des stratégies d'efficacité énergétique et favorables à l'environnement, tous auront à y gagner : l'humanité, la biodiversité de l'environnement et la Terre.

La forme bâtie de la construction doit être extrapolée à la forme bâtie d'une communauté. Il faut changer la façon traditionnelle de la planification d'un développement immobilier.

Une étude de cas intéressante d'un nouveau développement en Hongrie démontre, qu'après de nombreuses tentatives de planification de site, il a été conçu un nouveau plan qui a réduit les surfaces des routes et des lignes de services, à condition de créer une ambiance verte, un endroit créé en tenant compte de l'intégration environnementale et axé sur la forme physique de la communauté et l'orientation de bâtiments (voir Figure - La forme bâtie d'un développement immobilier).

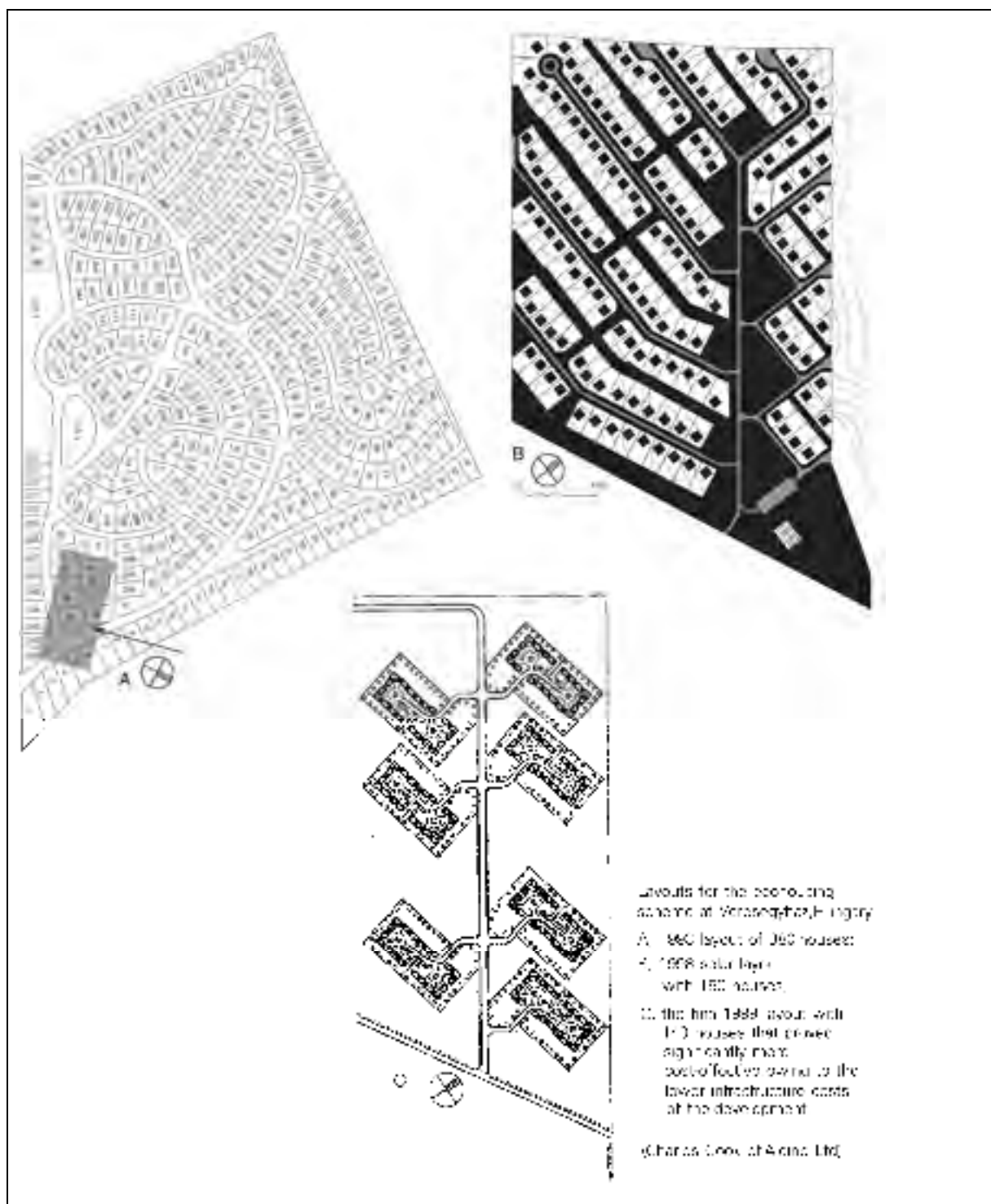


Figure - La forme bâtie d'un développement immobilier
Tirée de « Ecohouse: a design guide » (2007, p.41)

Le développeur a bâti des culs-de-sac de groupes de 20 maisons. Les culs-de-sac mis en place sont desservis par une seule route principale qui génère un contrôle plus efficace du trafic local de voitures, du bruit et diminue les risques locaux pour les piétons. Ce faisant, le coût des routes, des trottoirs et de l'éclairage a été sensiblement réduit, de même que le coût de l'infrastructure de drainage sous le site. La consommation totale annuelle d'énergie électrique ainsi que les émissions de dioxyde de carbone ont été réduites de manière considérable.

À la suite de cette expérience, il est sûr que les développeurs accompagnés par les professionnels doivent examiner sérieusement et réévaluer la manière de faire amplifier la croissance ou régénérer l'ancien quartier de la ville. Dans l'équation de la planification et pour assurer la création des communautés en santé, il faut ajouter de nouvelles composantes, telles que l'accès à l'énergie solaire, la sécurité, l'accès au transport collectif, la qualité de l'environnement et l'ambiance sociale, l'économie de la consommation énergétique et diminuer l'empreinte du cadre bâti.

Enfin, l'objectif d'avoir le bâtiment autonome est proche d'être réalisé. Dans les pays développés, une quantité importante d'énergie est consommée à l'intérieur des bâtiments, en particulier pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, mais aussi pour la cuisson alimentaire, l'éclairage et la climatisation. Cet apport d'énergie est assuré principalement par des énergies fossiles et par l'électricité, elle-même produite à partir de différentes sources. Ces logements sont donc très dépendants des énergies non renouvelables, et des réseaux de distribution.

Un bâtiment autonome est une construction qui produit elle-même l'énergie qu'elle consomme. Ce type de bâtiment est un édifice énergétiquement indépendant. Il produira lui-même la totalité de l'énergie dont il a besoin.

ANNEXE I

LES COÛTS DES MURS EXTÉRIEURS AYANT UNE SURFACE DE VITRAGE DE 15% ET DE 40%

Bâtiment No.1 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%						
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 15% (m2)	Vitrage 15% (m2)	Total (\$)
Brique	106	3.5	371	315.35	0	35,319.20 \$
Isolation Rigide	106	3.5	371	315.35		7,852.22 \$
Membrane	106	3.5	371	315.35		8,545.99 \$
Gypse Gyplap	106	3.5	371	315.35		6,723.26 \$
Colombage Métallique	106	3.5	371	315.35		6,275.47 \$
Laine Isolante R20	106	3.5	371	315.35		8,199.10 \$
Membrane Pare-vapeur	106	3.5	371	315.35		8,545.99 \$
Fournure Métallique	106	3.5	371	315.35		1,431.69 \$
Gypse Type X	106	3.5	371	315.35		4,774.40 \$
Inclus						
Joint 3 couc.						
Fenêtre en bois de pin					55.65	269.0 \$
Verre isolant 2 vitres de 4 mm					55.65	237.0 \$
Total coût par étage						115,826.20 \$
Total coût 8 étages						926,609.60 \$

Tableau-A I-1 Bâtiment No.1 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%

Bâtiment No.1 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%						
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 40% (m2)	vitrage 40% (m2)	Total (\$)
Brique	106	3.5	371	222.6		24,931.20 \$
Isolation Rigide	106	3.5	371	222.6		5,542.74 \$
Membrane	106	3.5	371	222.6		6,032.46 \$
Gypse Gyplap	106	3.5	371	222.6		4,745.83 \$
Colombage Métallique	106	3.5	371	222.6	0	4,429.74 \$
Laine Isolante R20	106	3.5	371	222.6		5,787.60 \$
Membrane Pare-vapeur	106	3.5	371	222.6		6,032.46 \$
Fournure Métallique	106	3.5	371	222.6		1,010.60 \$
Gypse Type X	106	3.5	371	222.6		3,370.16 \$
Joint 3 couc.				Inclus		
Fenêtre en bois de pin					148.4	39,919.60 \$
Verre Isolant 2 vitres de 4 mm					148.4	35,170.80 \$
Total coût par étage						136,973.20 \$
Total coût 8 étages						1,095,785.60 \$

Tableau-A I-2 Bâtiment No.1 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%

Bâtiment No.2 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%							
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 15% (m2)	Vitrage 15% (m2)	Coût unit. (\$)	Total (\$)
Brique	120	3.5	420	357	0	112.00 \$	39,984.00 \$
Isolation Rigide	120	3.5	420	357		24.90 \$	8,889.30 \$
Membrane	120	3.5	420	357		27.10 \$	9,674.70 \$
Gypse Gyplap	120	3.5	420	357		21.32 \$	7,611.24 \$
Colombage Métallique	120	3.5	420	357		19.90 \$	7,104.30 \$
Laine Isolante R20	120	3.5	420	357		26.00 \$	9,282.00 \$
Membrane Pare-vapeur	120	3.5	420	357		27.10 \$	9,674.70 \$
Fournure Métallique	120	3.5	420	357		4.54 \$	1,620.78 \$
Gypse Type X	120	3.5	420	357		15.14 \$	5,404.98 \$
Joint 3 couc.	Inclus						
Fenêtre en bois de pin					63	269.0 \$	14,969.85 \$
Verre isolant 2 vitres de 4 mm					63	237.0 \$	14,931.00 \$
Total coût par étage							129,146.85 \$
Total coût 8 étages							1,033,174.80 \$

Tableau-A I-3 Bâtiment No.2 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%

Bâtiment No.2 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%						
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 40% (m2)	vitrage 40% (m2)	Total (\$)
Brique	120	3.5	420	252	0	112.00 \$
Isolation Rigide	120	3.5	420	252		24.90 \$
Membrane	120	3.5	420	252		27.10 \$
Gypse Gyplap	120	3.5	420	252		21.32 \$
Colombage Métallique	120	3.5	420	252		19.90 \$
Laine Isolante R20	120	3.5	420	252		26.00 \$
Membrane Pare-vapeur	120	3.5	420	252		27.10 \$
Fournure Métallique	120	3.5	420	252		4.54 \$
Gypse Type X	120	3.5	420	252		15.14 \$
Joint 3 couc.	Inclus					
Fenêtre en bois de pin					168	269.0 \$
Verre isolant 2 vitres de 4 mm					168	237.0 \$
Total coût par étage						155,064.00 \$
Total coût 8 étages						1,240,512.00 \$

Tableau-A I-4 Bâtiment No.2 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%

Bâtiment No.3 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%						
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 15% (m2)	vitrage 15% (m2)	Total (\$)
Brique	176	3.5	616	523.6	0	58,643.20 \$
Isolation Rigide	176	3.5	616	523.6		13,037.64 \$
Membrane	176	3.5	616	523.6		14,189.56 \$
Gypse Gyplap	176	3.5	616	523.6		11,163.15 \$
Colombage Métallique	176	3.5	616	523.6		10,419.64 \$
Laine Isolante R20	176	3.5	616	523.6		13,613.60 \$
Membrane Pare-vapeur	176	3.5	616	523.6		14,189.56 \$
Fournure Métallique	176	3.5	616	523.6		2,377.14 \$
Gypse Type X	176	3.5	616	523.6		15.14 \$
Inclus						
Joint 3 couc.						
Fenêtre en bois de pin				92.4	269.0 \$	24,855.60 \$
Verre isolant 2 vitres de 4 mm				92.4	237.0 \$	21,898.80 \$
Total coût par étage						192,315.20 \$
Total coût 8 étages						1,538,521.60 \$

Tableau-A I-5 Bâtiment No.3 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%

Bâtiment No.3 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%						
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 40% (m2)	vitrage 40% (m2)	Total (\$)
Brique	176	3.5	616	369.6	0	41,395.20 \$
Isolation Rigide	176	3.5	616	369.6		9,203.04 \$
Membrane	176	3.5	616	369.6		10,016.16 \$
Gypse Gyplap	176	3.5	616	369.6		7,879.87 \$
Colombage Métallique	176	3.5	616	369.6		7,355.04 \$
Laine Isolante R20	176	3.5	616	369.6		9,609.60 \$
Membrane Pare-vapeur	176	3.5	616	369.6		10,016.16 \$
Fourrure Métallique	176	3.5	616	369.6		1,677.98 \$
Gypse Type X	176	3.5	616	369.6		5,595.74 \$
Inclus						
Joints 3 couc.						
Fenêtre en bois de pin					246.4	269.0 \$
Verre isolant 2 vitres de 4 mm					246.4	237.0 \$
Total coût par étage						227,427.20 \$
Total coût 8 étages						1,819,417.60 \$

Tableau-A I-6 Bâtiment No.3 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%

Bâtiment No.4 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%						
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 15% (m2)	vitrage 15% (m2)	Total (\$)
Brique	160	3.5	560	476		53,312.00 \$
Isolation Rigide	160	3.5	560	476		11,852.40 \$
Membrane	160	3.5	560	476		12,899.60 \$
Gypse Gyplap	160	3.5	560	476		10,148.32 \$
Colombage Métallique	160	3.5	560	476	0	9,472.40 \$
Laine Isolante R20	160	3.5	560	476		12,376.00 \$
Membrane Pare-vapeur	160	3.5	560	476		12,899.60 \$
Fournure Métallique	160	3.5	560	476		2,161.04 \$
Gypse Type X	160	3.5	560	476		7,206.64 \$
Joint 3 couc.				Inclus		
Fenêtre en bois de pin					84	22,596.00 \$
Verre isolant 2 vitres de 4 mm					84	19,908.00 \$
Total coût par étage						174,832.00 \$
Total coût 8 étages						1,398,656.00 \$

Tableau-A I-7 Bâtiment No.4 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%

Bâtiment No.4 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%							
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 40% (m2)	vitrage 40% (m2)	Cout unit. (\$)	Total (\$)
Brique	160	3.5	560	336	0	112.00 \$	37,632.00 \$
Isolation Rigide	160	3.5	560	336		24.90 \$	8,366.40 \$
Membrane	160	3.5	560	336		27.10 \$	9,105.60 \$
Gypse Gyplap	160	3.5	560	336		21.32 \$	7,163.52 \$
Colombage Métallique	160	3.5	560	336		19.90 \$	6,686.40 \$
Laine Isolante R20	160	3.5	560	336		26.00 \$	8,736.00 \$
Membrane Pare-vapeur	160	3.5	560	336		27.10 \$	9,105.60 \$
Fourrure Métallique	160	3.5	560	336		4.54 \$	1,525.44 \$
Gypse Type X	160	3.5	560	336		15.14 \$	5,087.04 \$
Inclus							
Joints 3 couc.							
Fenêtre en bois de pin				224		269.0 \$	60,256.00 \$
Verre Isolant 2 vitres de 4 mm				224		237.0 \$	53,088.00 \$
Total coût par étage							206,752.00 \$
Total coût 8 étages							1,654,016.00 \$

Tableau-A I-8 Bâtiment No.4 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%

Bâtiment No.5 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%							
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 15% (m2)	vitrage 15% (m2)	Coût unit. (\$)	Total (\$)
Brique	160	3.5	560	476	0	112.00 \$	53,312.00 \$
Isolation Rigide	160	3.5	560	476		24.90 \$	11,852.40 \$
Membrane	160	3.5	560	476		27.10 \$	12,899.60 \$
Gypse Gyplap	160	3.5	560	476		21.32 \$	10,148.32 \$
Colombage Métallique	160	3.5	560	476		19.90 \$	9,472.40 \$
Laine Isolante R20	160	3.5	560	476		26.00 \$	12,376.00 \$
Membrane Pare-vapeur	160	3.5	560	476		27.10 \$	12,899.60 \$
Fournure Métallique	160	3.5	560	476		4.54 \$	2,161.04 \$
Gypse Type X	160	3.5	560	476		15.14 \$	7,206.64 \$
Inclus							
Joint 3 couc.					84	269.0 \$	22,596.00 \$
Fenêtre en bois de pin					84	237.0 \$	19,908.00 \$
Verre isolant 2 vitres de 4 mm					84		
Total coût par étage							174,832.00 \$
Total coût 8 étages							1,398,656.00 \$

Tableau-A I-9 Bâtiment No.5 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%

Bâtiment No.5 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%						
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 40% (m2)	vitrage 40% (m2)	Total (\$)
Brique	160	3.5	560	336	0	37,632.00 \$
Isolation Rigide	160	3.5	560	336		8,366.40 \$
Membrane	160	3.5	560	336		9,105.60 \$
Gypse Gyplap	160	3.5	560	336		7,163.52 \$
Colombage Métallique	160	3.5	560	336		6,686.40 \$
Laine Isolante R20	160	3.5	560	336		8,736.00 \$
Membrane Pare-vapeur	160	3.5	560	336		9,105.60 \$
Fournure Métallique	160	3.5	560	336		1,525.44 \$
Gypse Type X	160	3.5	560	336		5,087.04 \$
Inclus						
Joints 3 couc.						
Fenêtre en bois de pin					224	269.0 \$
Verre isolant 2 vitres de 4 mm					224	237.0 \$
Total coût par étage						206,752.00 \$
Total coût 8 étages						1,654,016.00 \$

Tableau-A I-10 Bâtiment No.5 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%

Bâtiment No.6 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%						
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 15% (m2)	vitrage 15% (m2)	Total (\$)
Brique	120	3.5	420	357		39,984.00 \$
Isolation Rigide	120	3.5	420	357		8,889.30 \$
Membrane	120	3.5	420	357		9,674.70 \$
Gypse Gyplap	120	3.5	420	357		7,611.24 \$
Colombage Métallique	120	3.5	420	357	0	7,104.30 \$
Laine Isolante R20	120	3.5	420	357		9,282.00 \$
Membrane Pare-vapeur	120	3.5	420	357		9,674.70 \$
Fournure Métallique	120	3.5	420	357		1,620.78 \$
Gypse Type X	120	3.5	420	357		5,404.98 \$
Joint 3 couc.				Inclus		
Fenêtre en bois de pin					63	269.0 \$
Verre isolant 2 vitres de 4 mm					63	237.0 \$
Total coût par étage						129,146.85 \$
Total coût 8 étages						1,033,174.80 \$

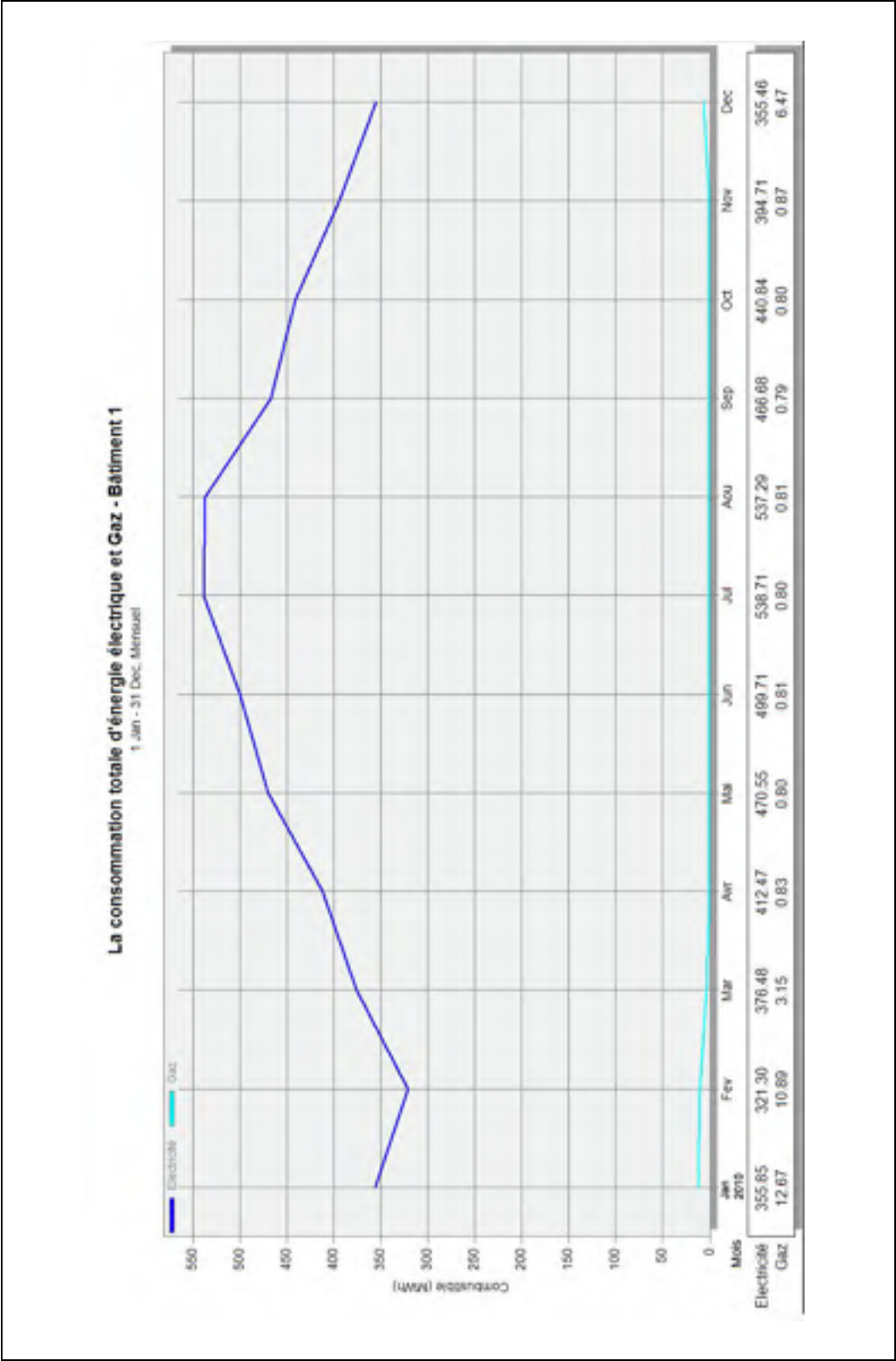
Tableau-A I-11 Bâtiment No.6 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 15%

Bâtiment No.6 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%							
Description	Longueur m/l	Hauteur m/l	Surface totale (m2)	Surface sans vitrage 40% (m2)	vitrage 40% (m2)	Court unit. (\$)	Total (\$)
Brique	120	3.5	420	252	0	112.00 \$	28,224.00 \$
Isolation Rigide	120	3.5	420	252		24.90 \$	6,274.80 \$
Membrane	120	3.5	420	252		27.10 \$	6,829.20 \$
Gypse Gyplap	120	3.5	420	252		21.32 \$	5,372.64 \$
Colombage Métallique	120	3.5	420	252		19.90 \$	5,014.80 \$
Laine Isolante R20	120	3.5	420	252		26.00 \$	6,552.00 \$
Membrane Pare-vapeur	120	3.5	420	252		27.10 \$	6,829.20 \$
Fournure Métallique	120	3.5	420	252		4.54 \$	1,144.08 \$
Gypse Type X	120	3.5	420	252		15.14 \$	3,815.28 \$
Inclus							
Joints 3 couc.							
Fenêtre en bois de pin					168	269.0 \$	45,192.00 \$
Verre isolant 2 vitres de 4 mm					168	237.0 \$	39,816.00 \$
Total coût par étage							155,064.00 \$
Total coût 8 étages							1,240,512.00 \$

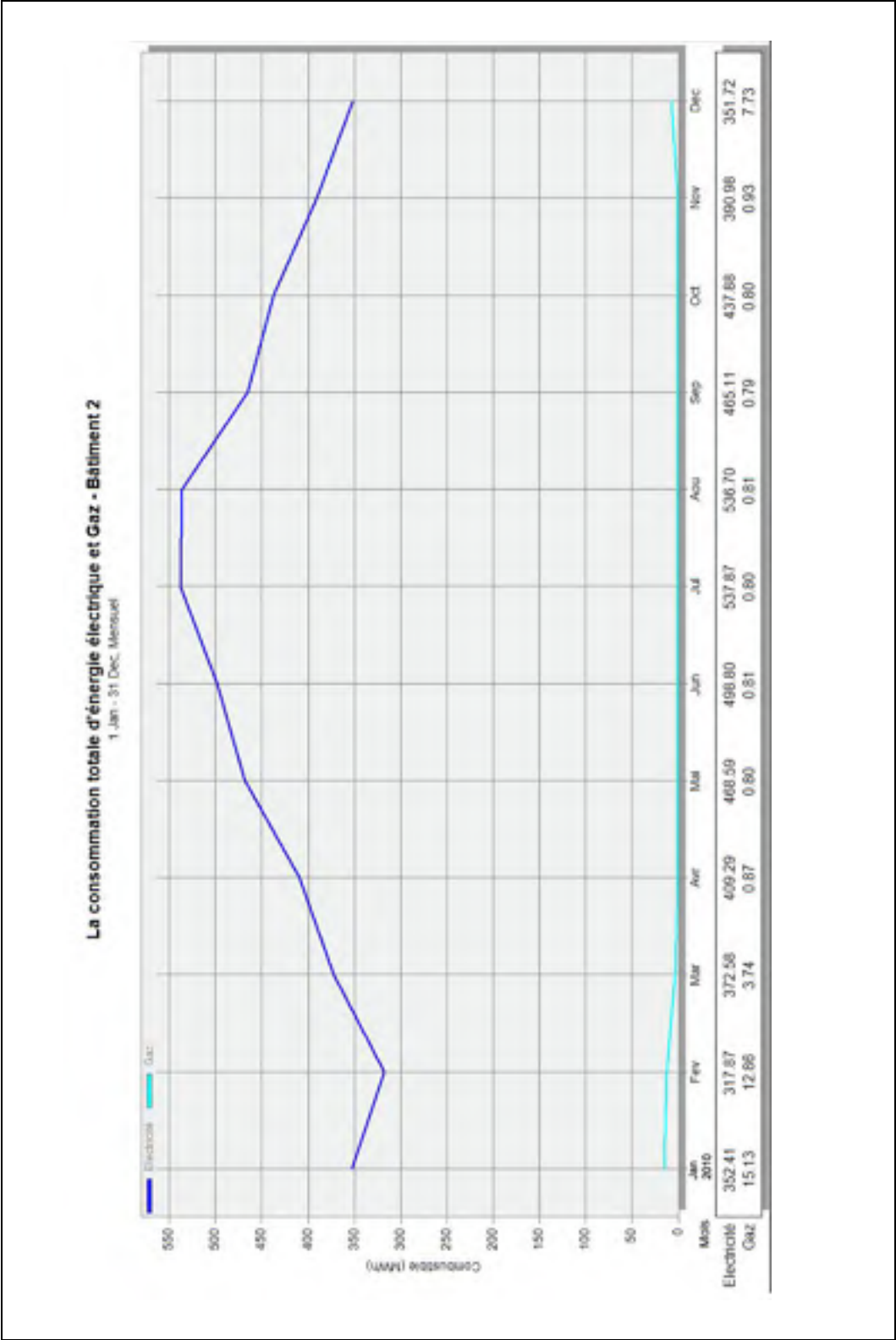
Tableau-A I-12 Bâtiment No.6 - Coût des murs extérieurs ayant une surface de vitrage de 40%

ANNEXE II

LA CONSOMMATION TOTALE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DU BÂTIMENT



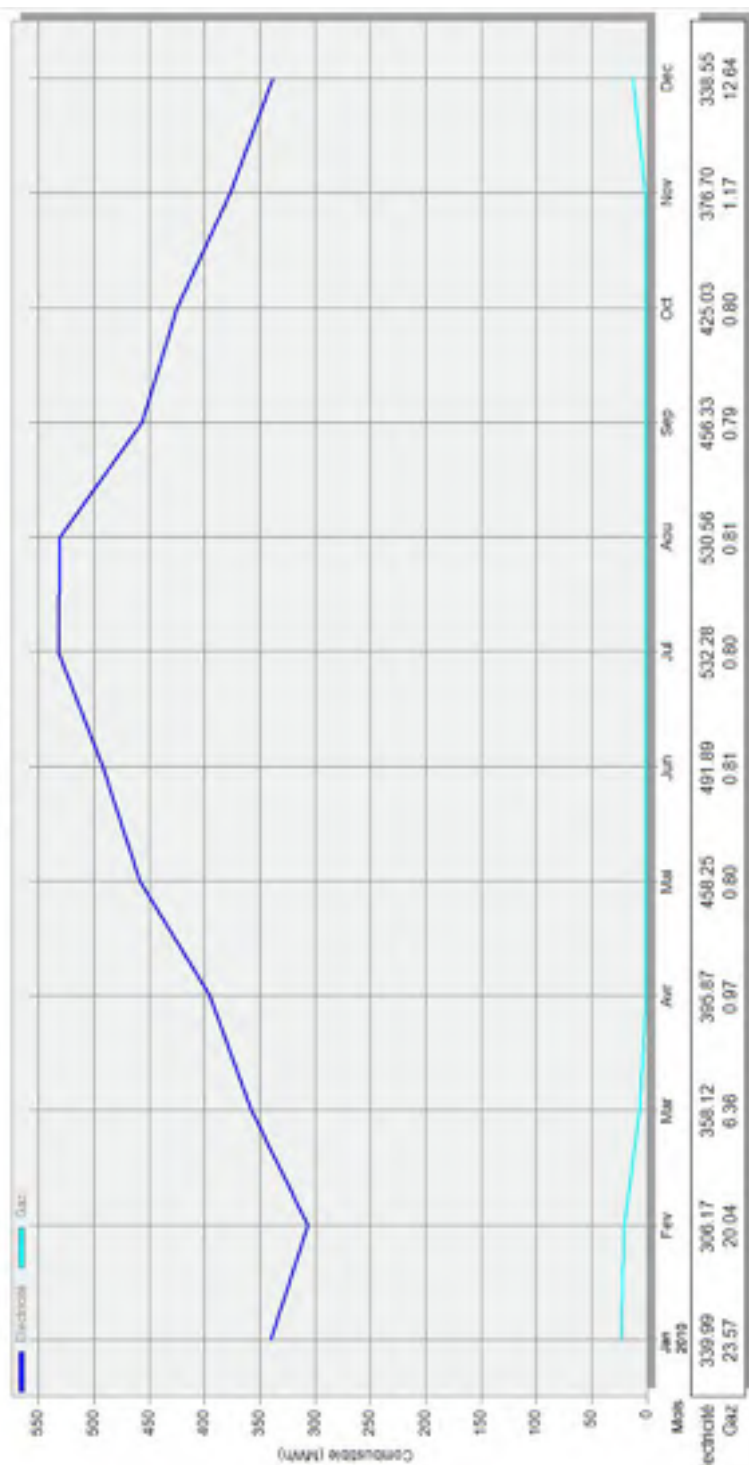
Graphique-A II-1 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 1 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



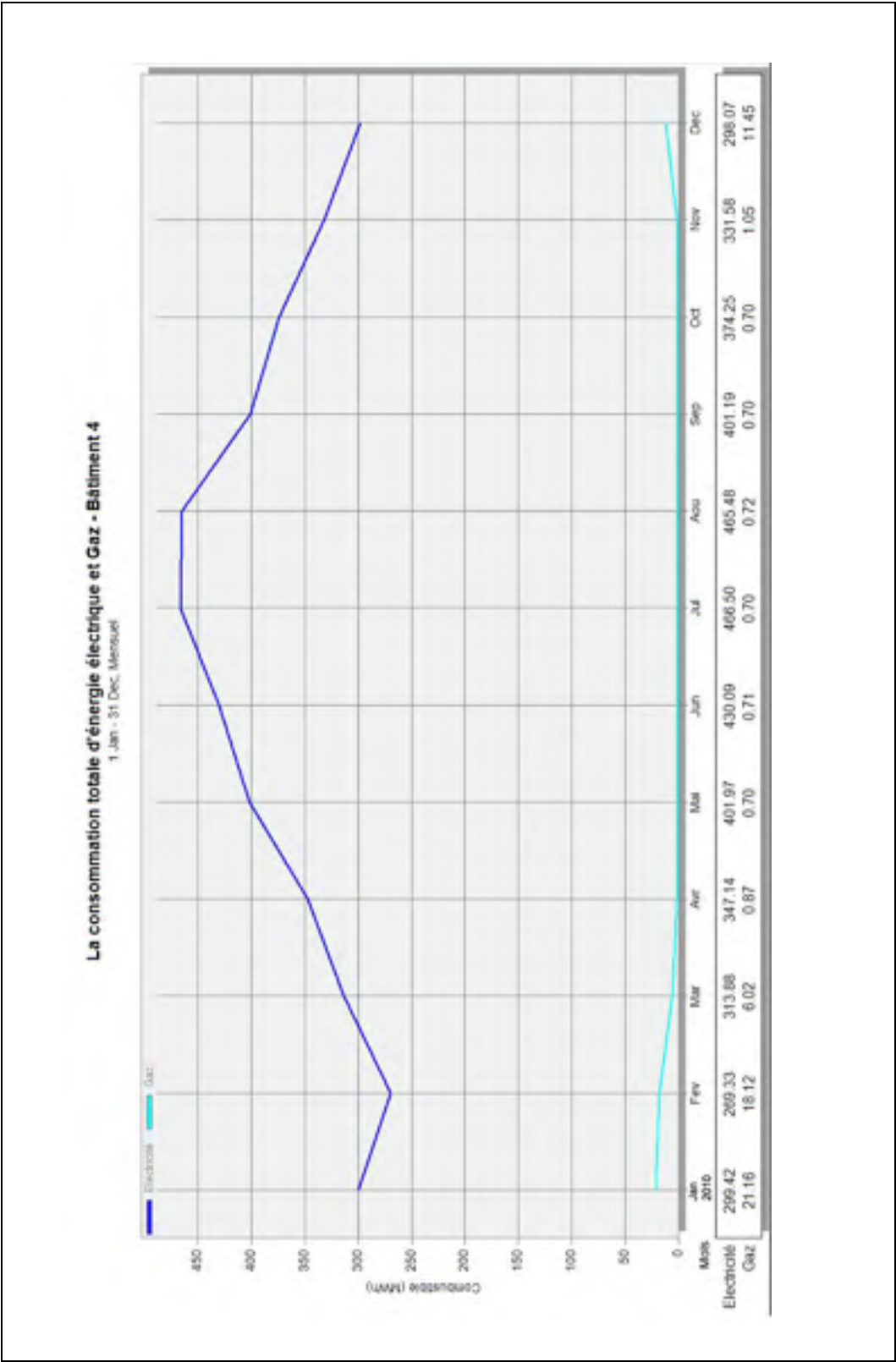
Graphique-A II-2 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 2 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation

La consommation totale d'énergie électrique et Gaz - Bâtiment 3

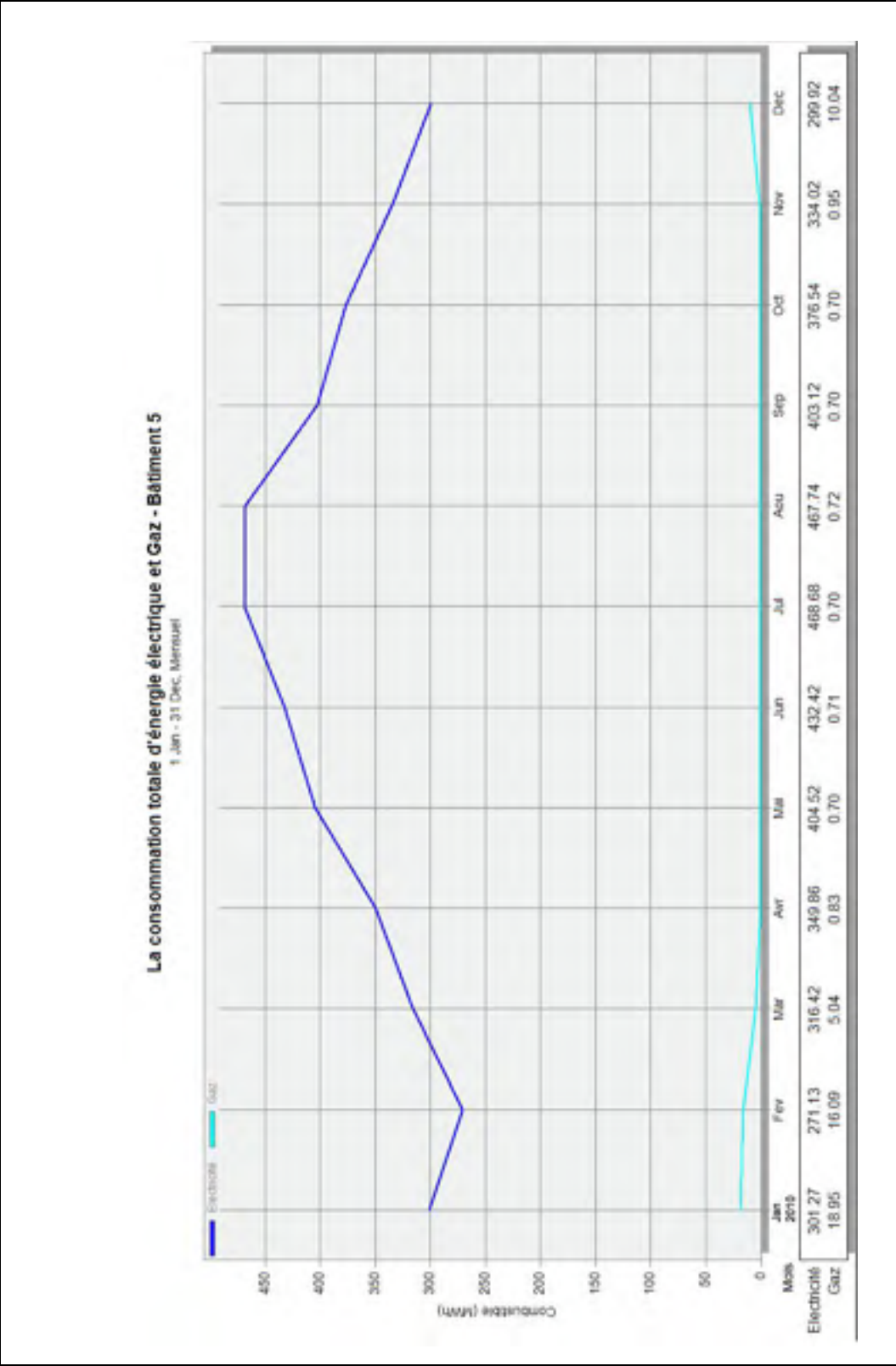
1 Jan - 31 Dec, Mensuel



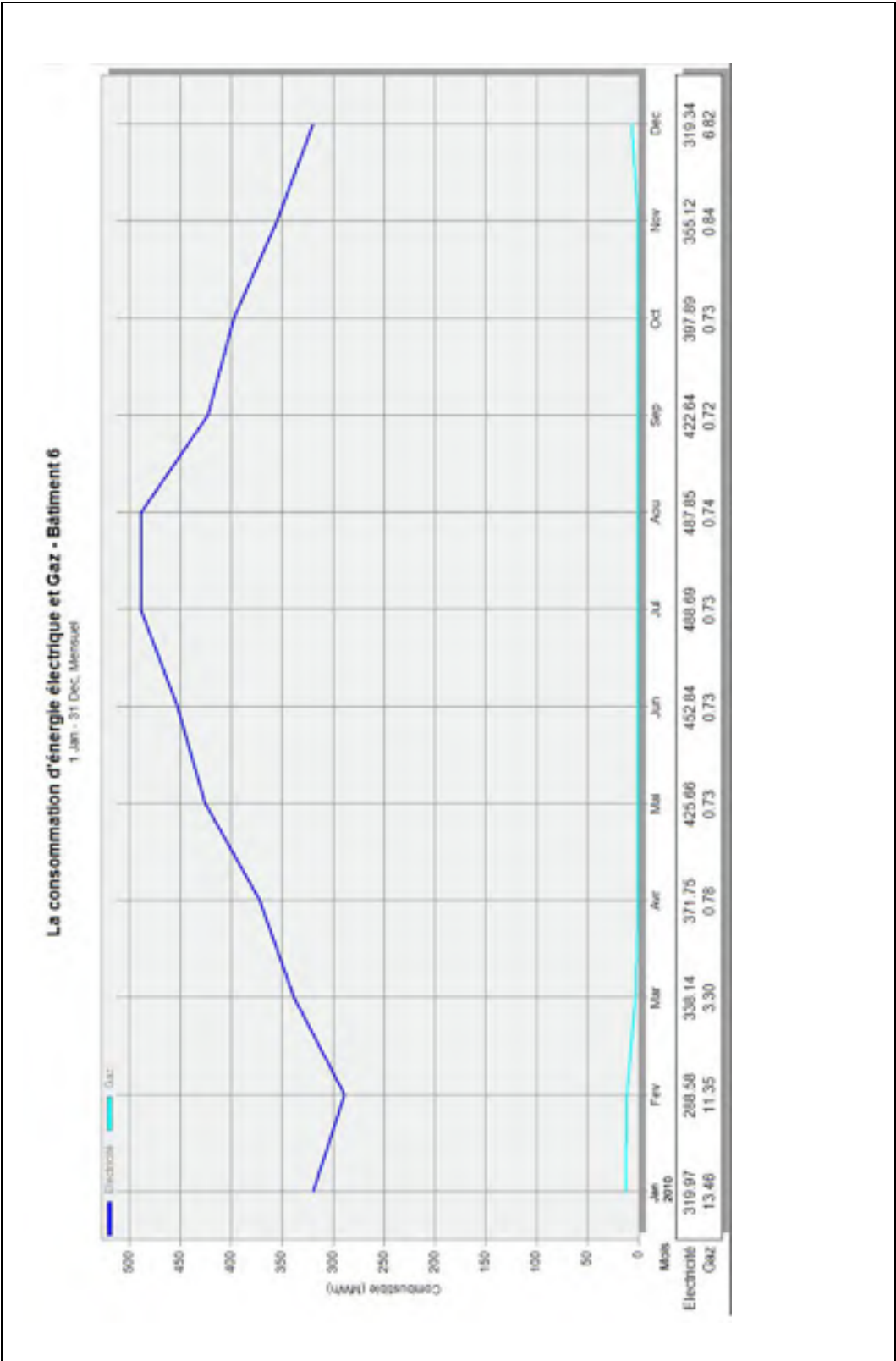
Graphique-A II-3 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 3 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



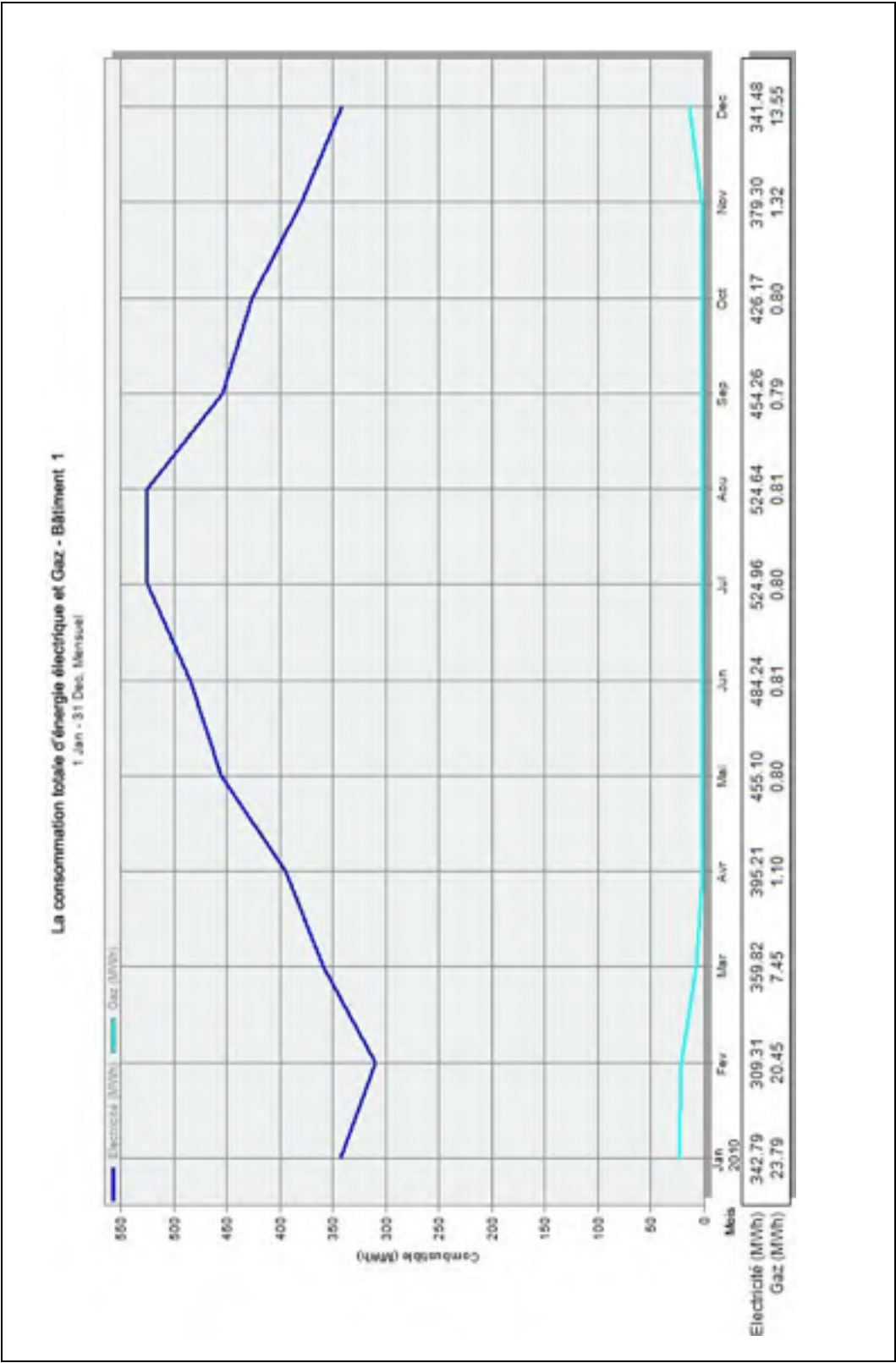
Graphique-A II-4 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 4 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



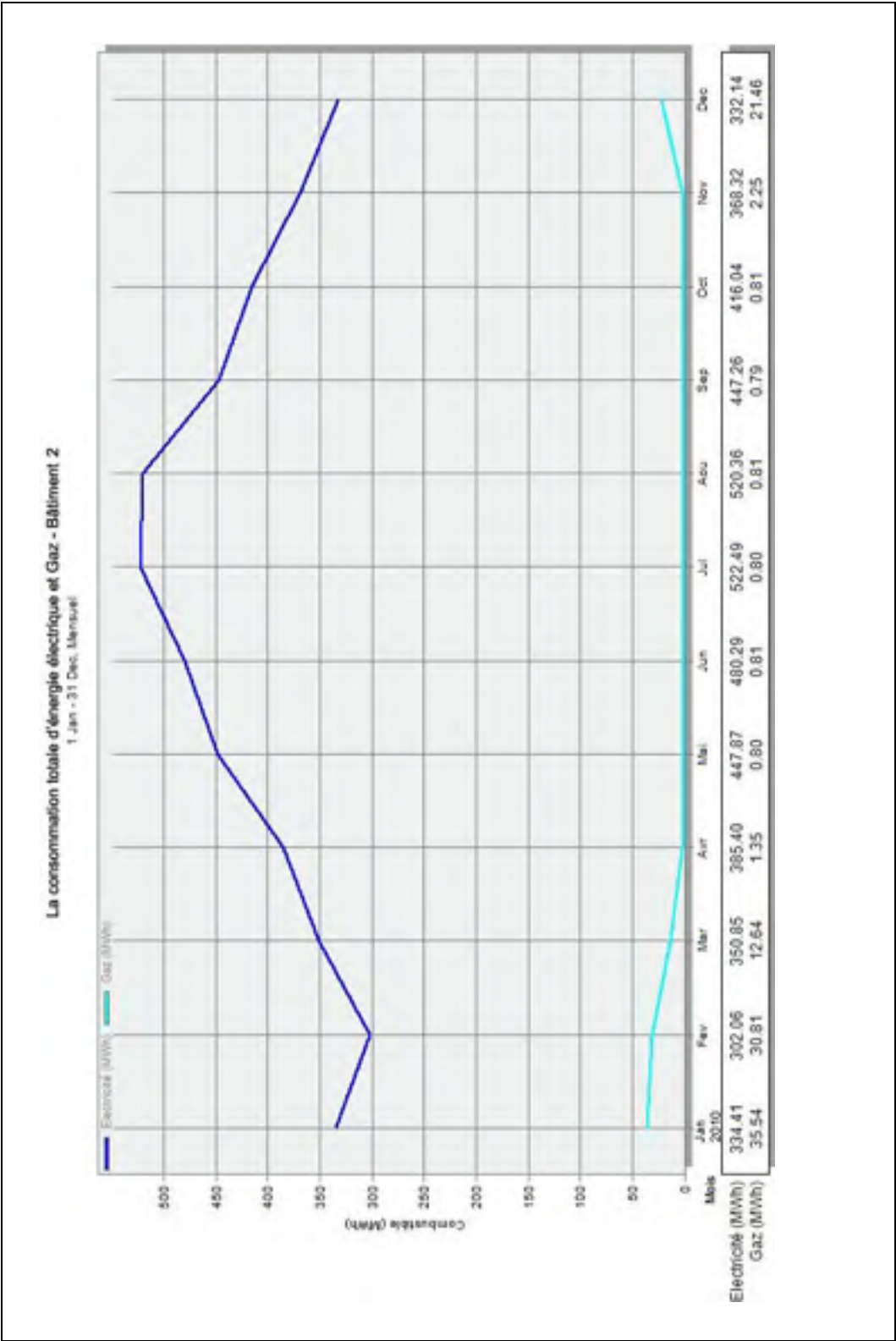
Graphique-A II-5 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 5 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



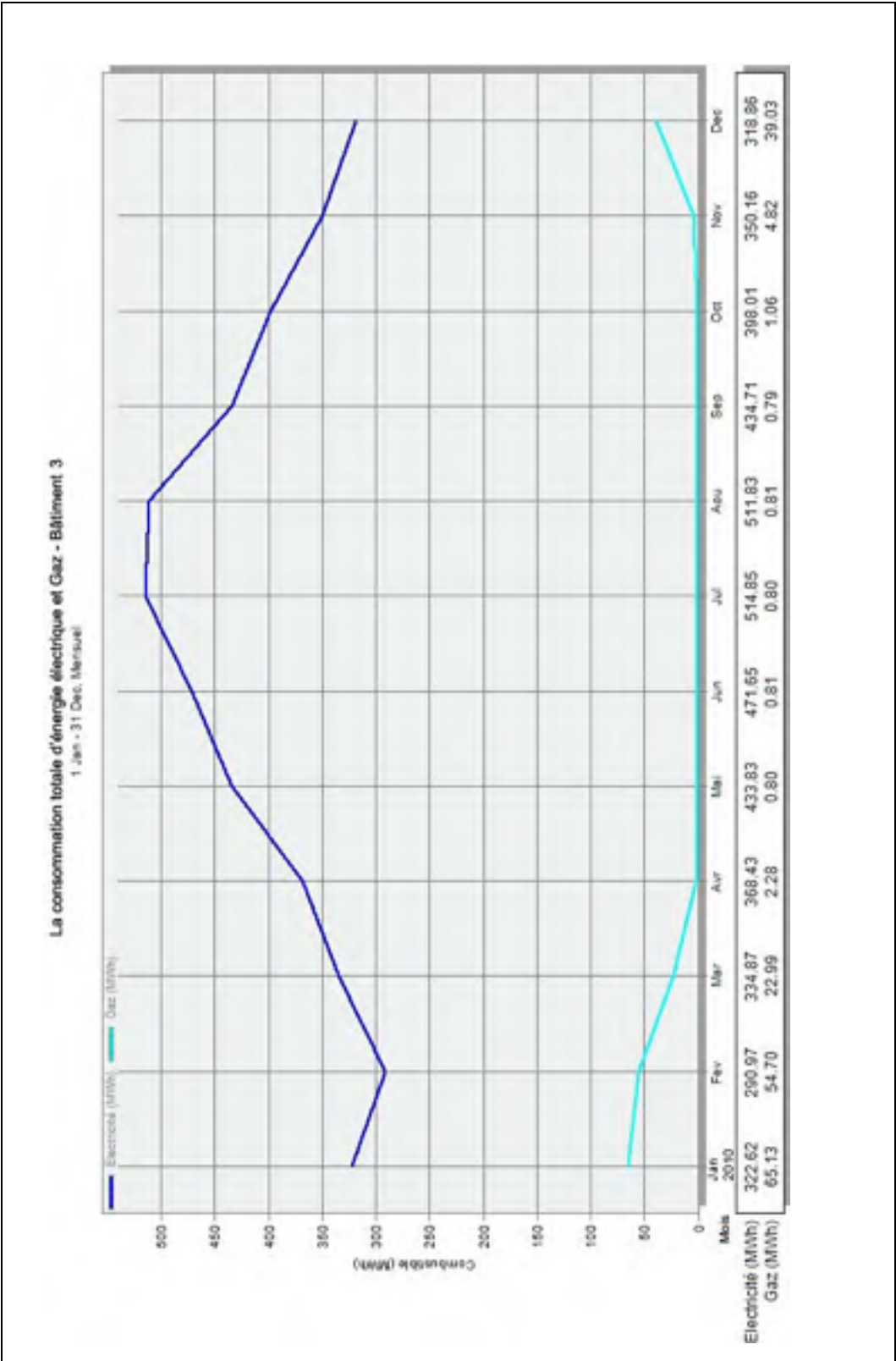
Graphique-A II-6 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 6 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



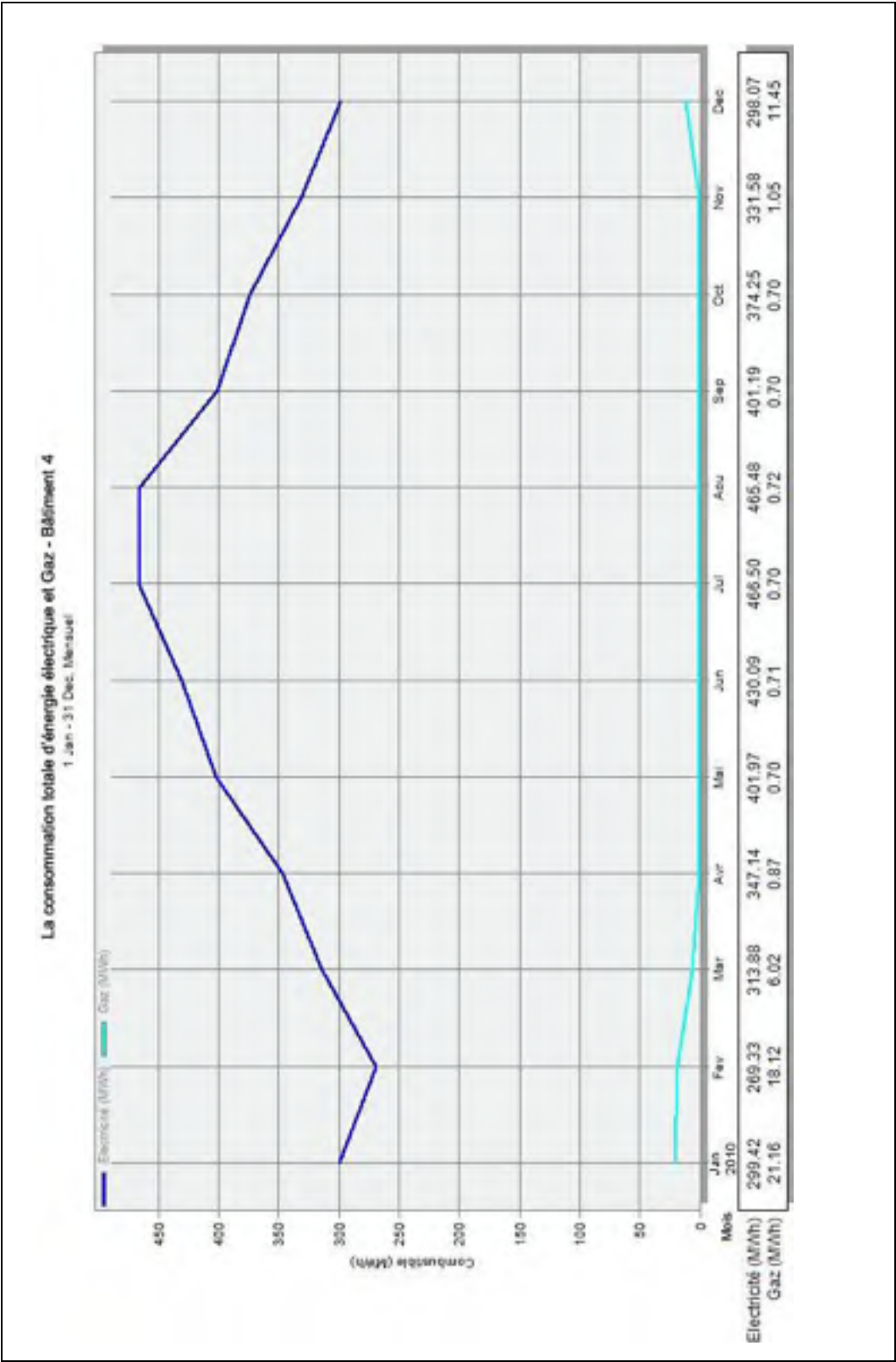
Graphique-A II-1 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 1 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation



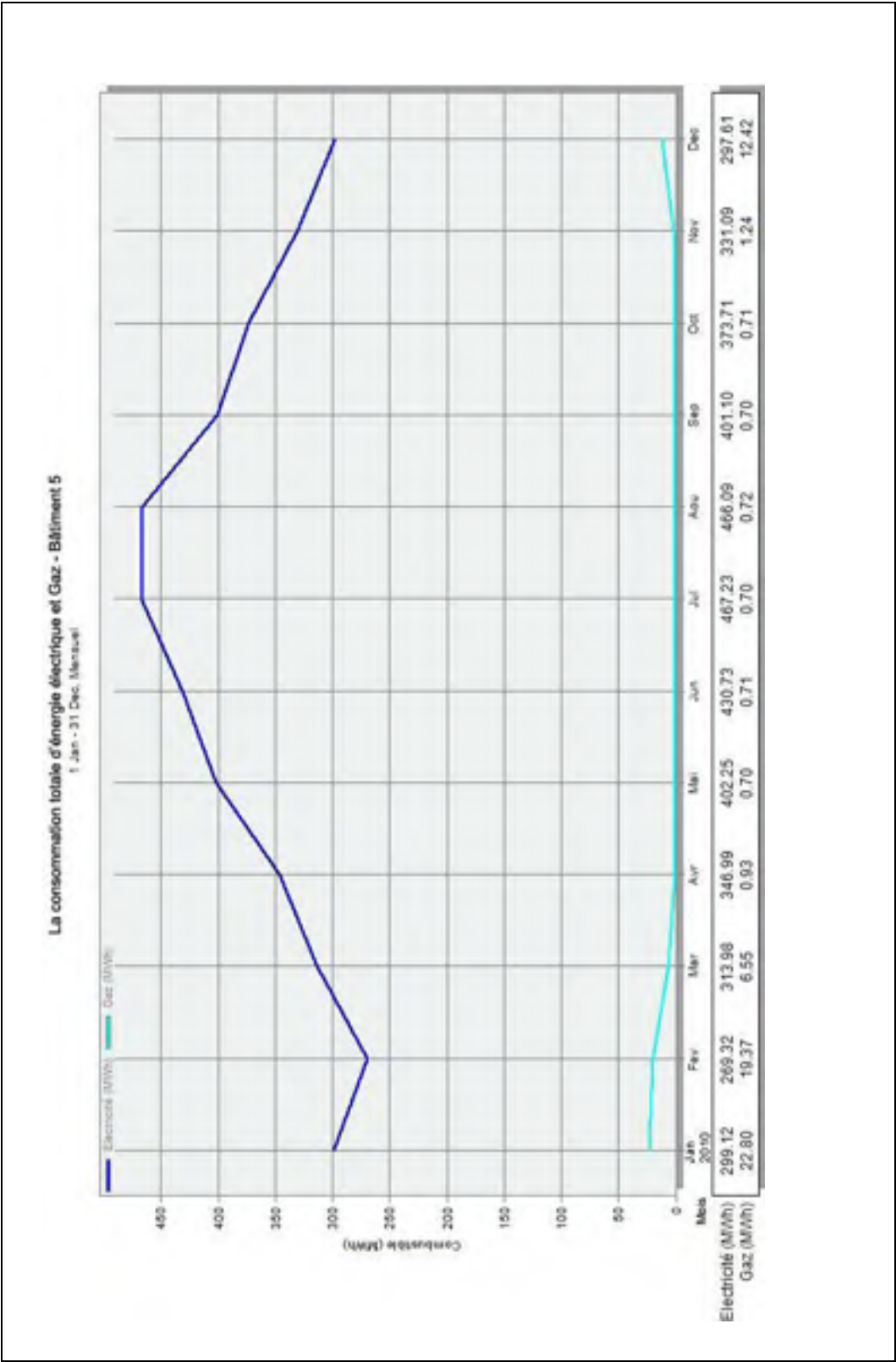
Graphique-A II-2 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 2 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation



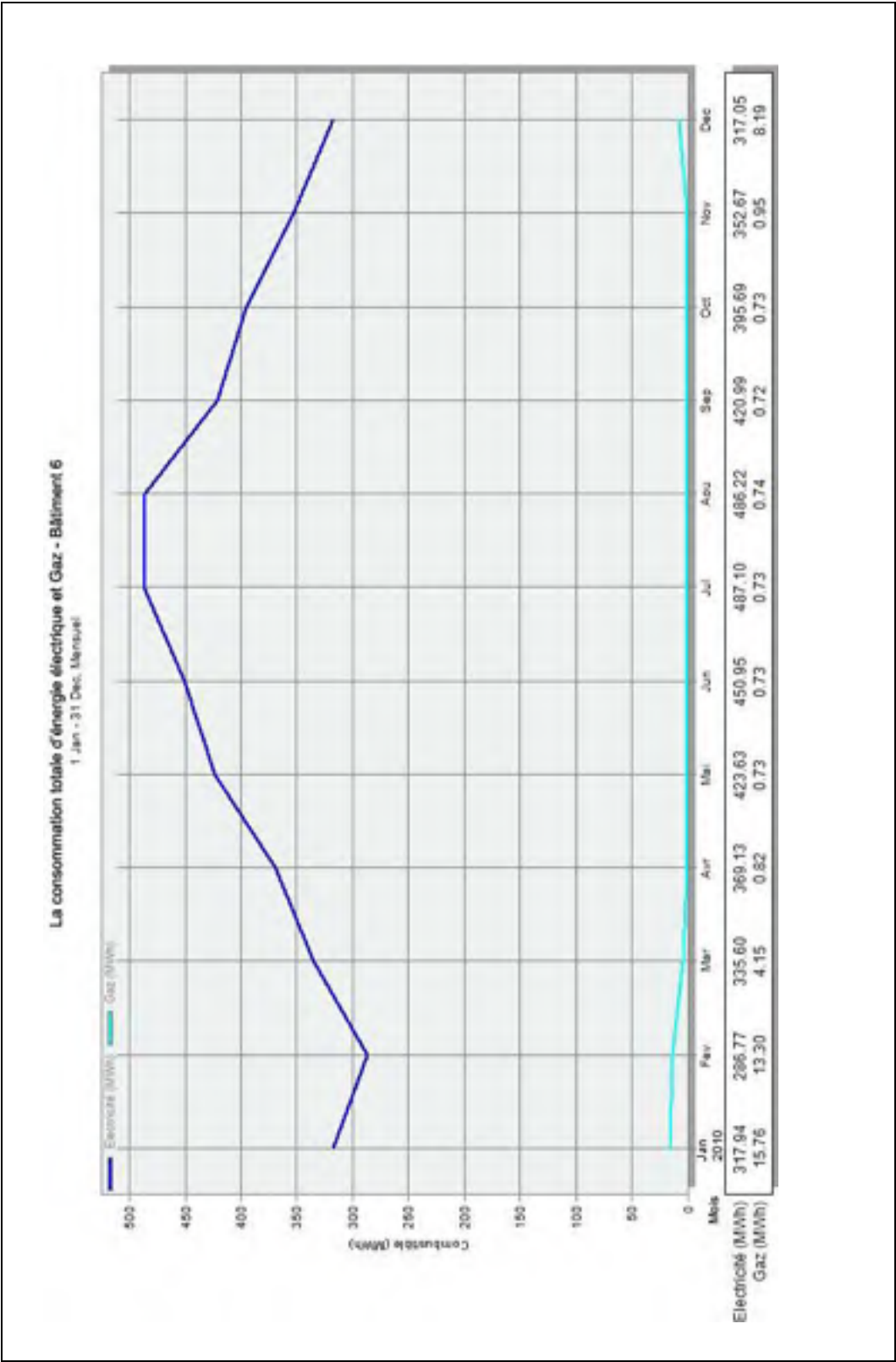
Graphique-A II-3 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 3 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation



Graphique-A II-4 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 4 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation



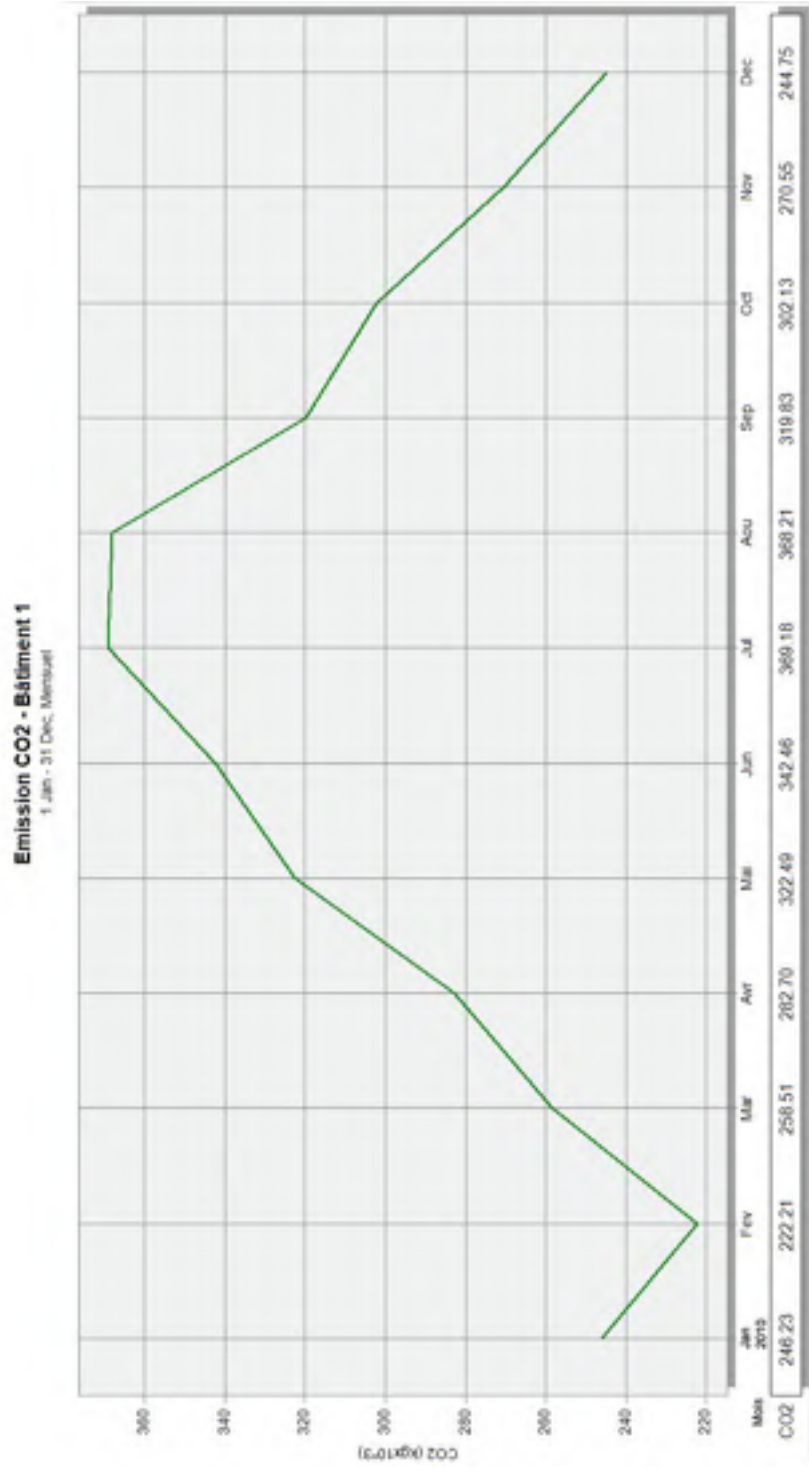
Graphique-A II-5 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 5 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation



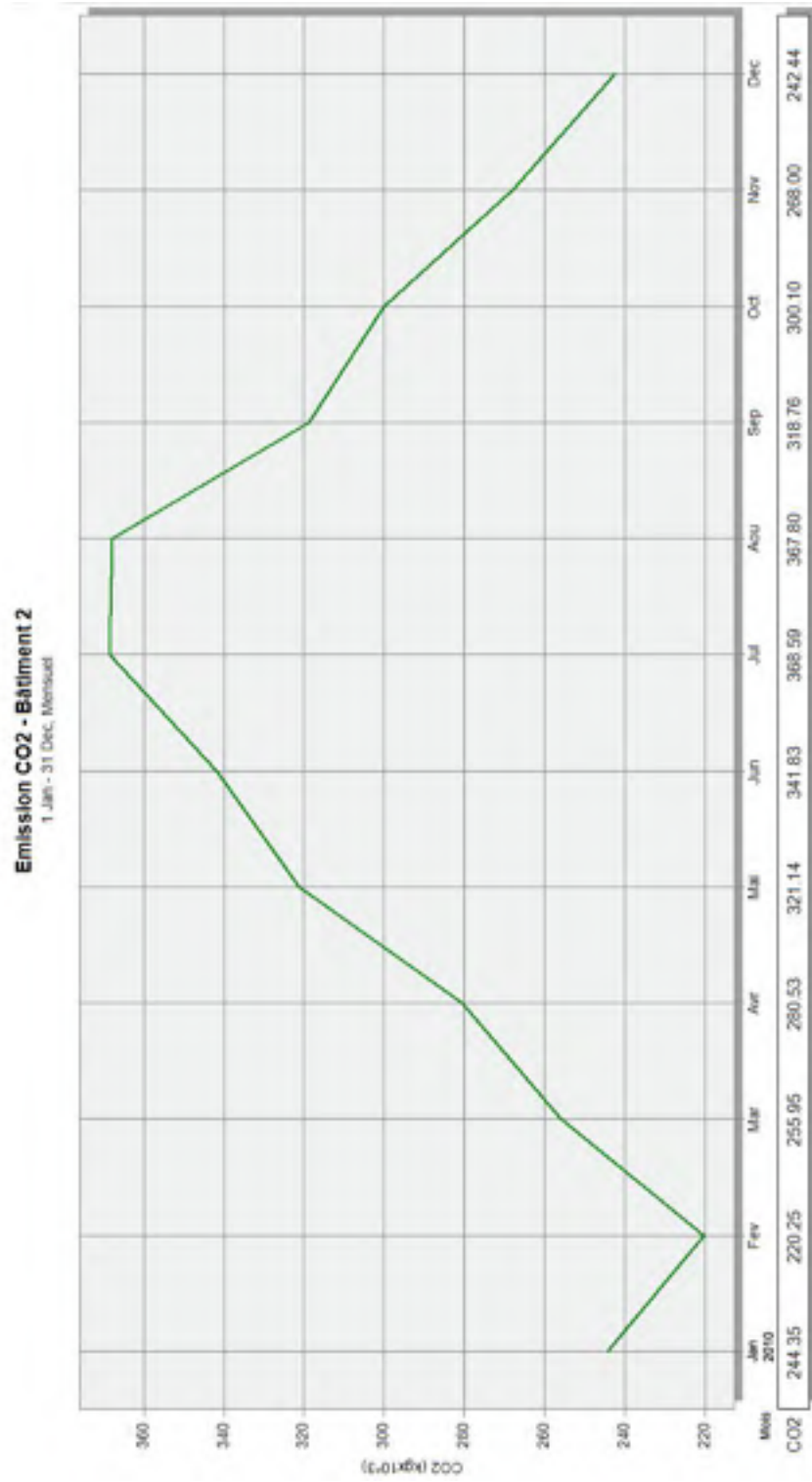
Graphique-A II-6 La consommation totale d'énergie électrique et Gaz Bâtiment 6 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation

ANNEXE III

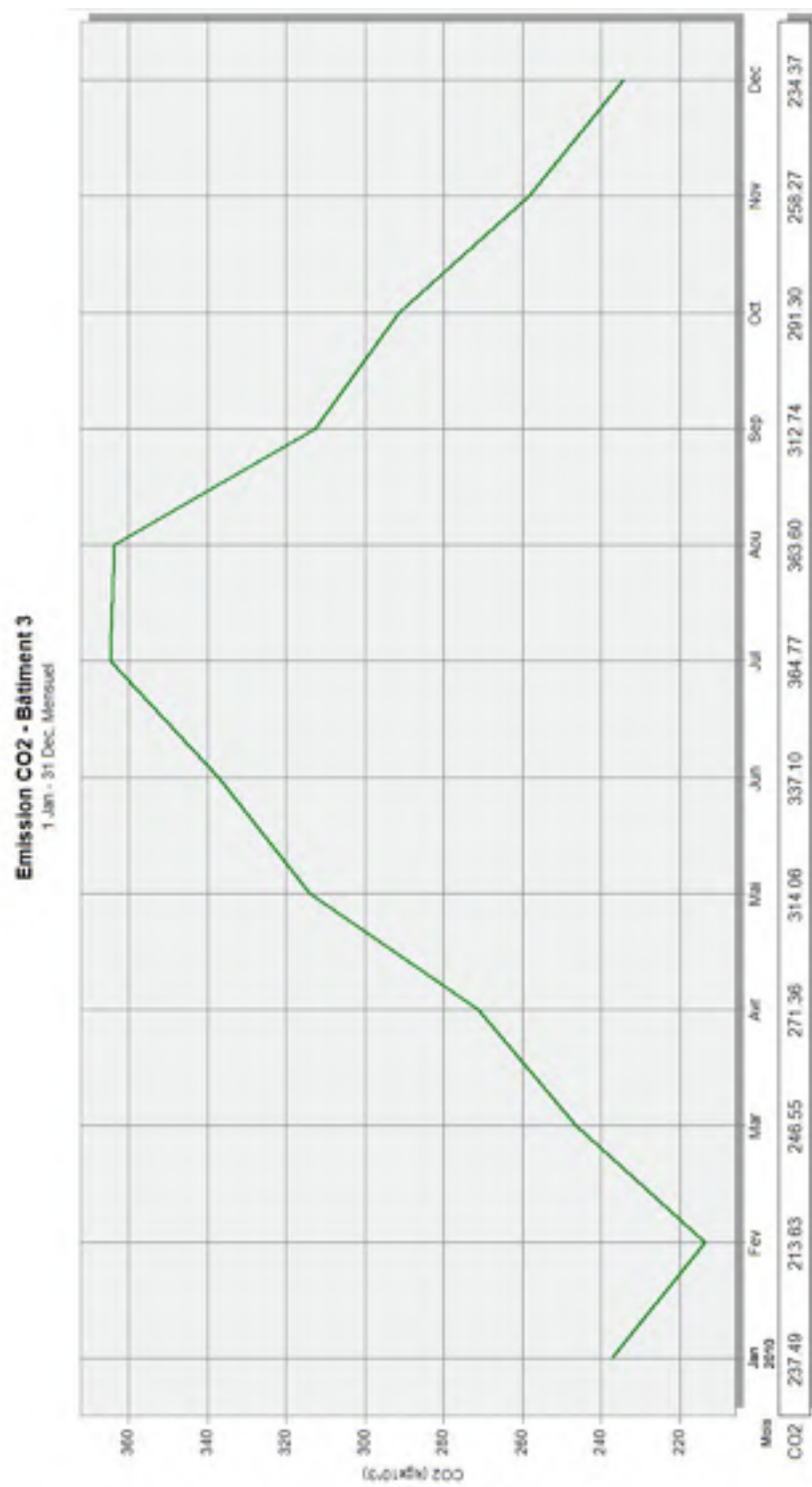
L'ÉMISSION CO₂ DU BÂTIMENT



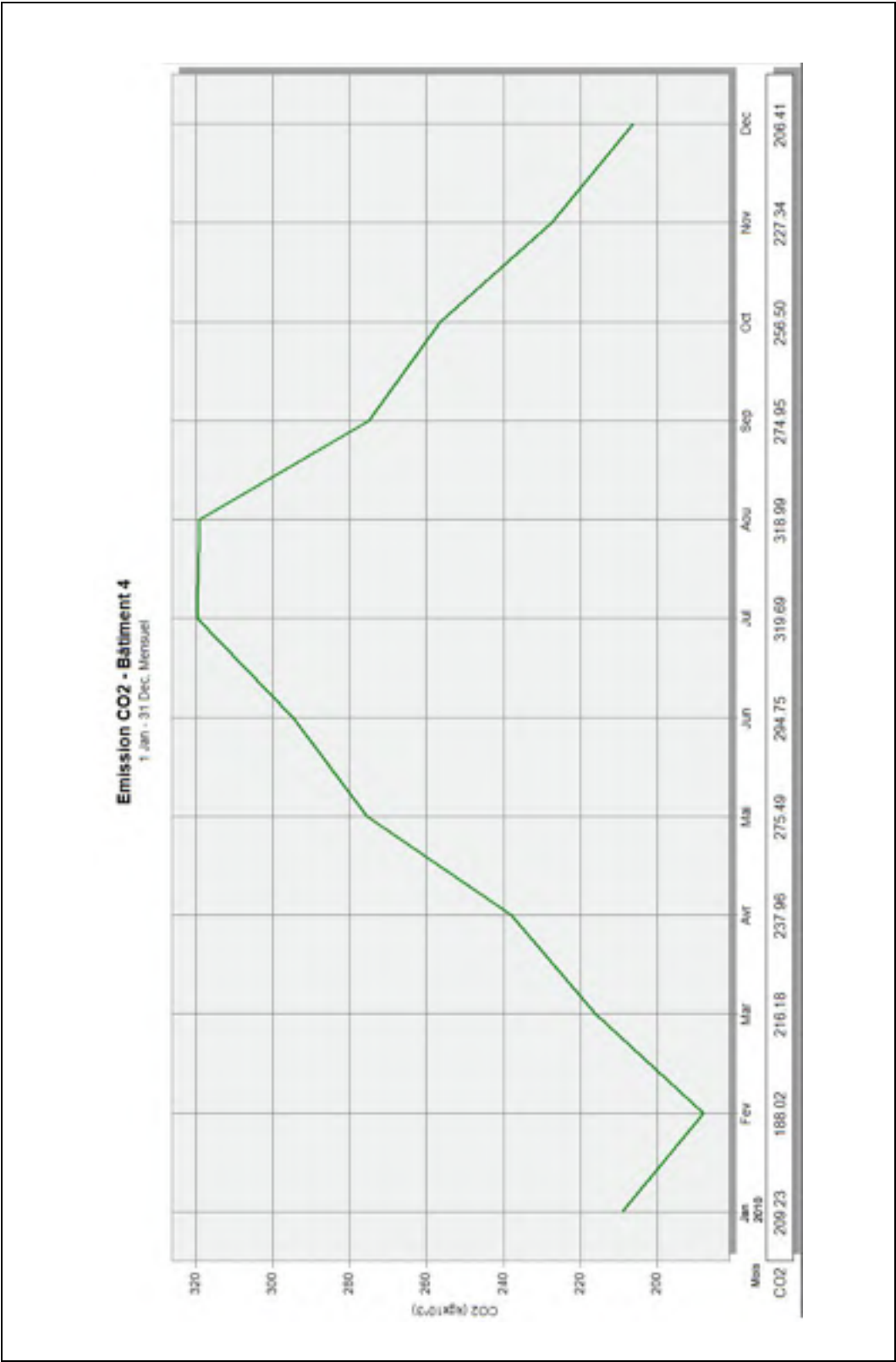
Graphique-A III-1 Émission CO₂ Bâtiment 1 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



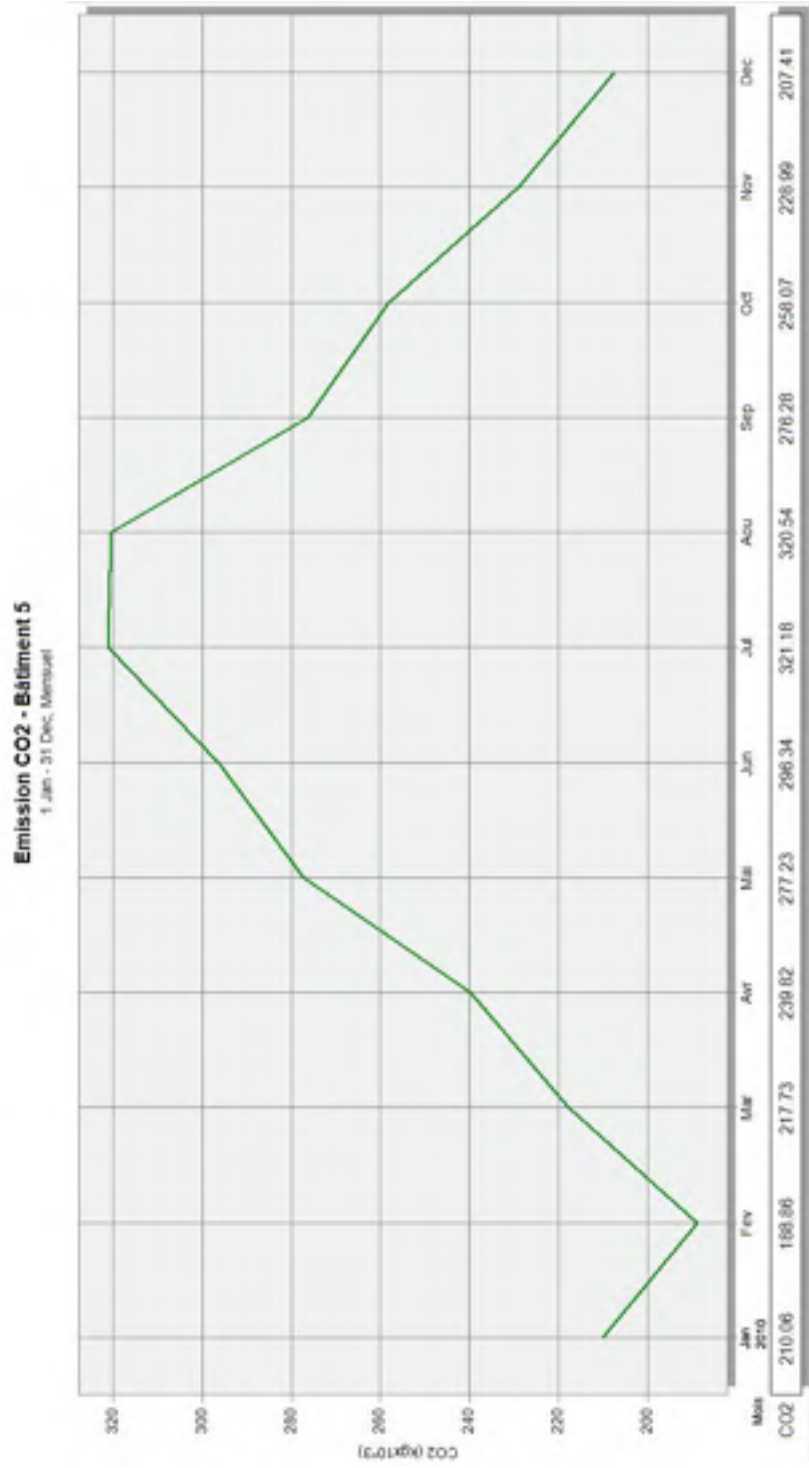
Graphique-A III-2 Émission CO₂ Bâtiment 2 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



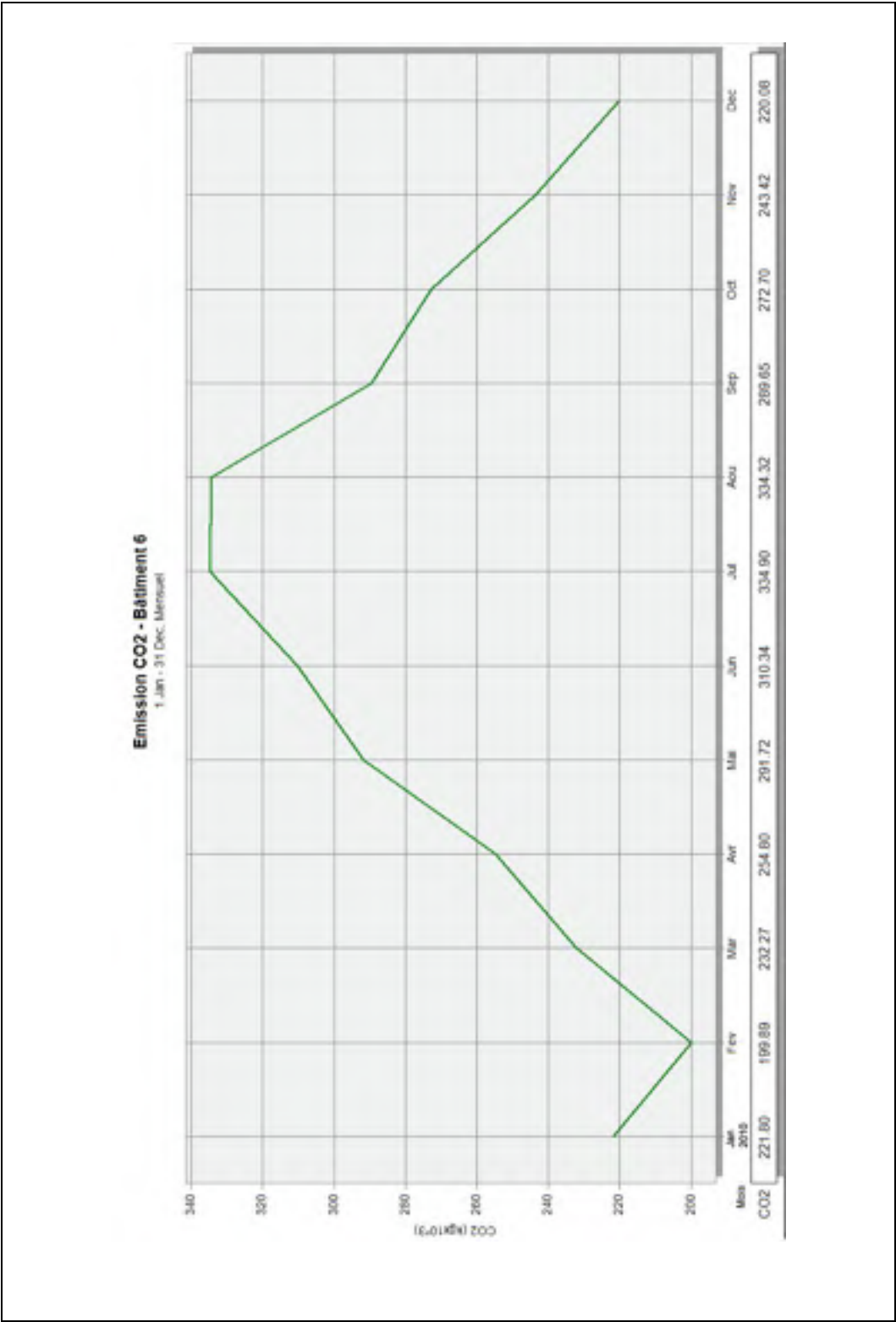
Graphique-A III-3 Émission CO₂ Bâtiment 3 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



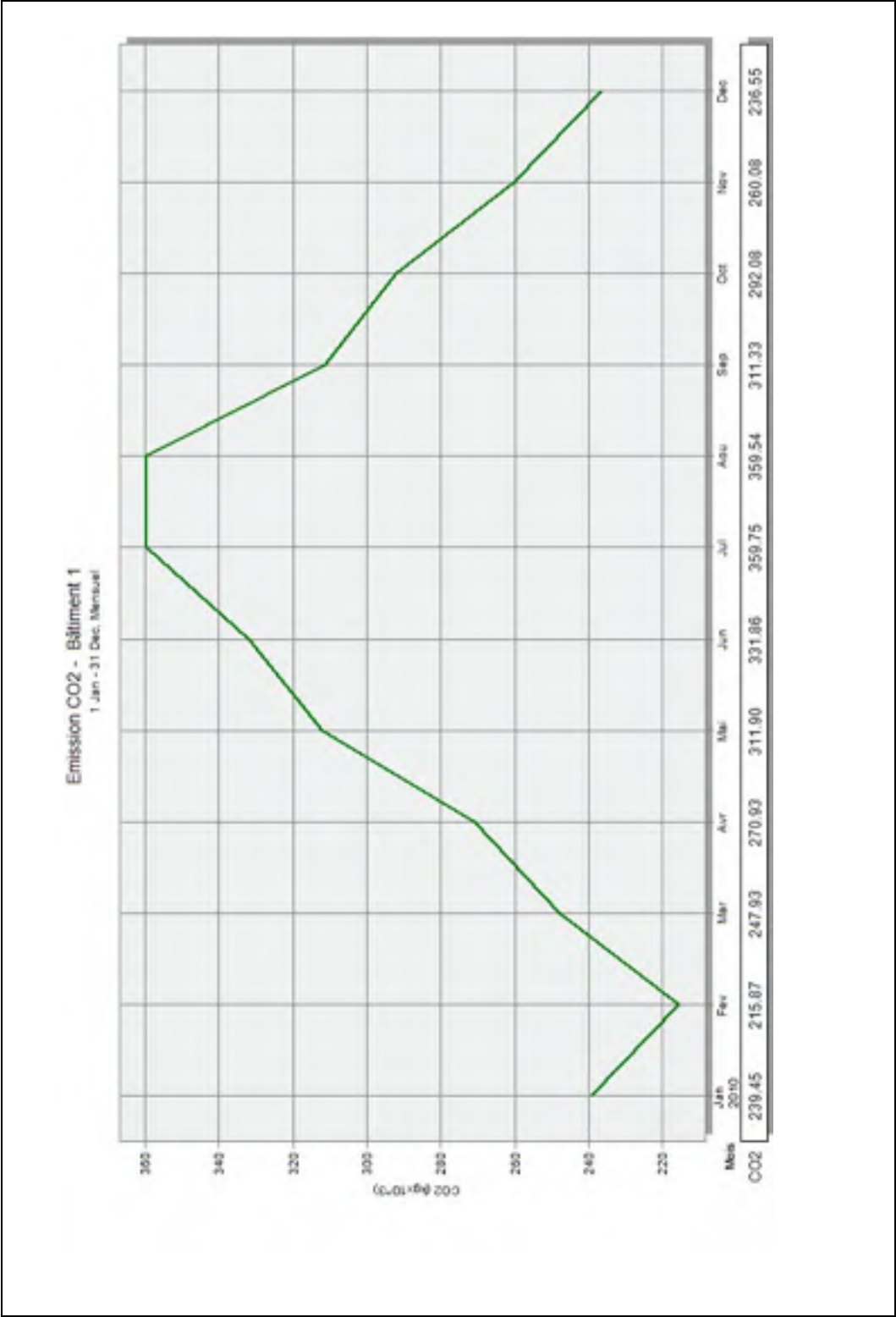
Graphique-A III-4 Émission CO₂ Bâtiment 4 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



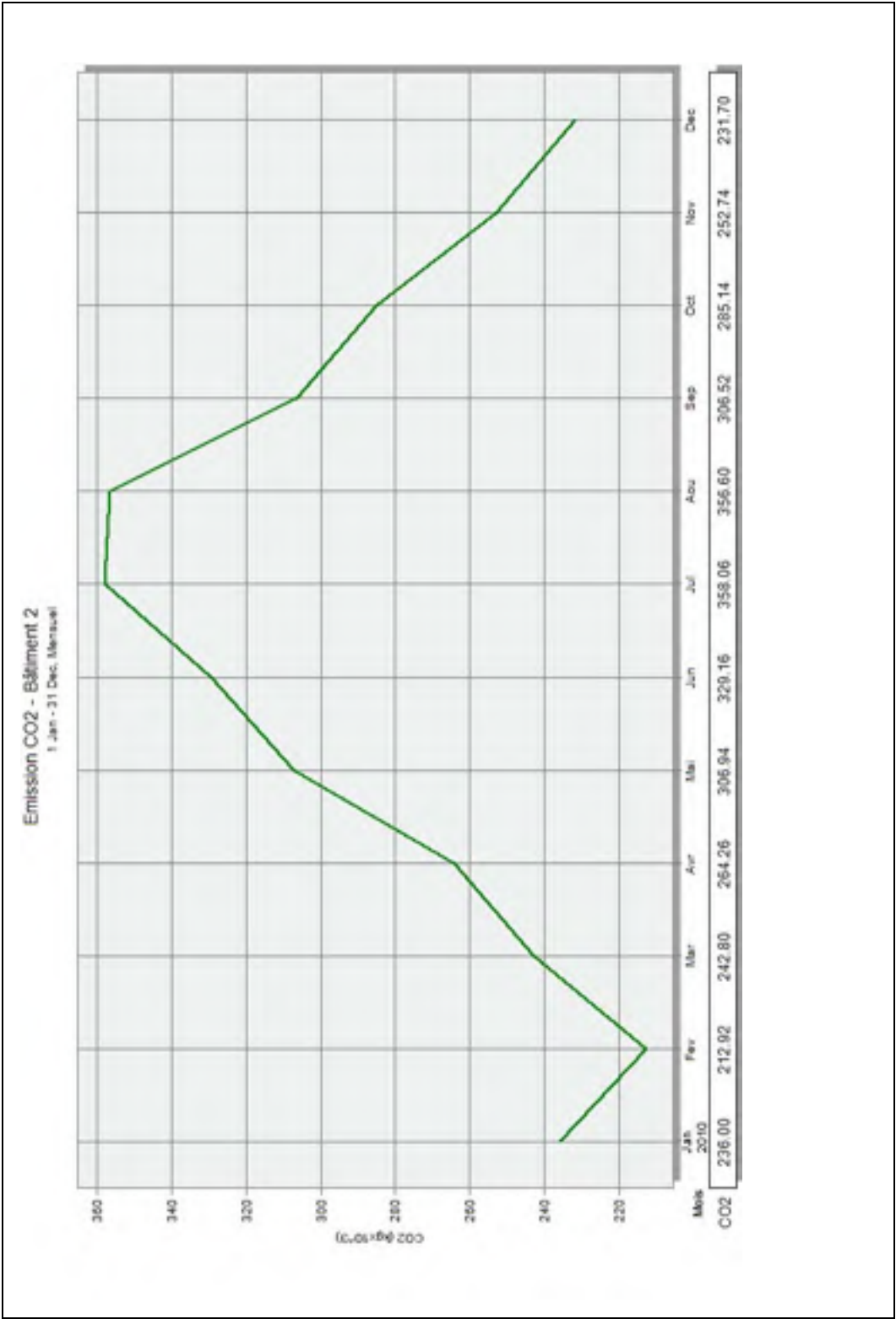
Graphique-A III-5 Émission CO₂ Bâtiment 5 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



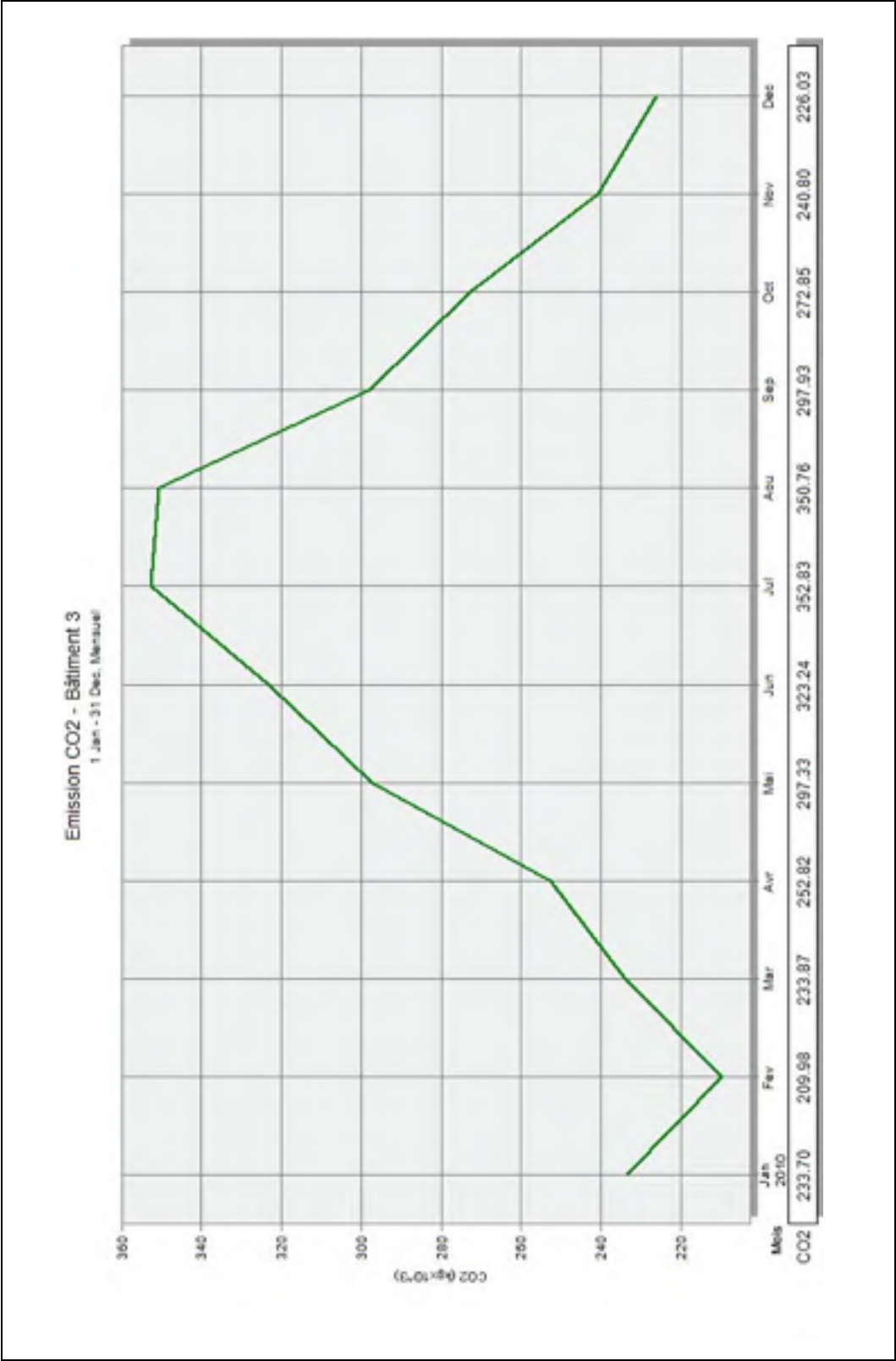
Graphique-A III-6 Émission CO₂ Bâtiment 6 – Vitrage 15%.
Tirée de Simulation



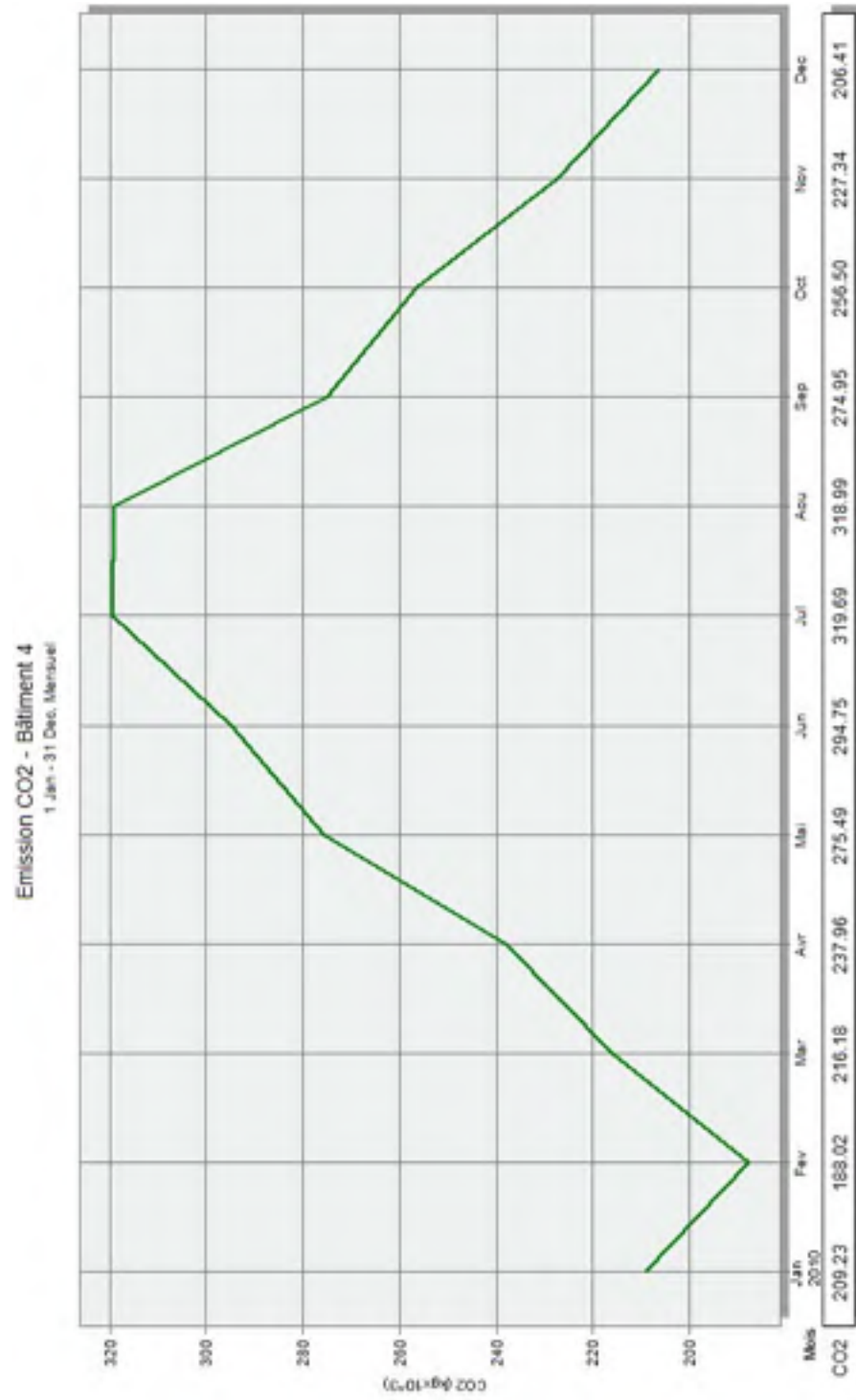
Graphique-A III-1 Émission CO₂ Bâtiment 1 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation



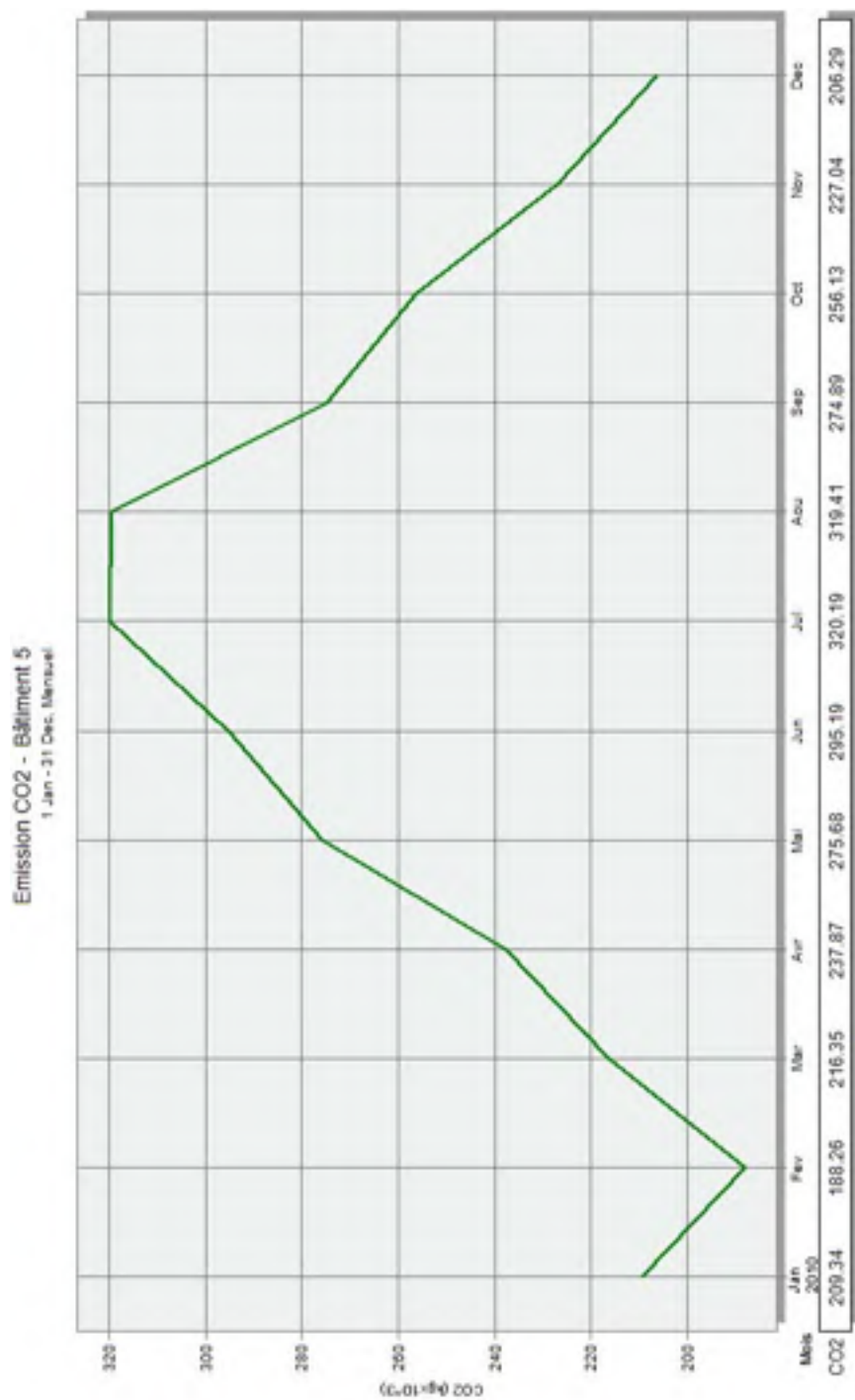
Graphique-A III-2 Émission CO₂ Bâtiment 2 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation



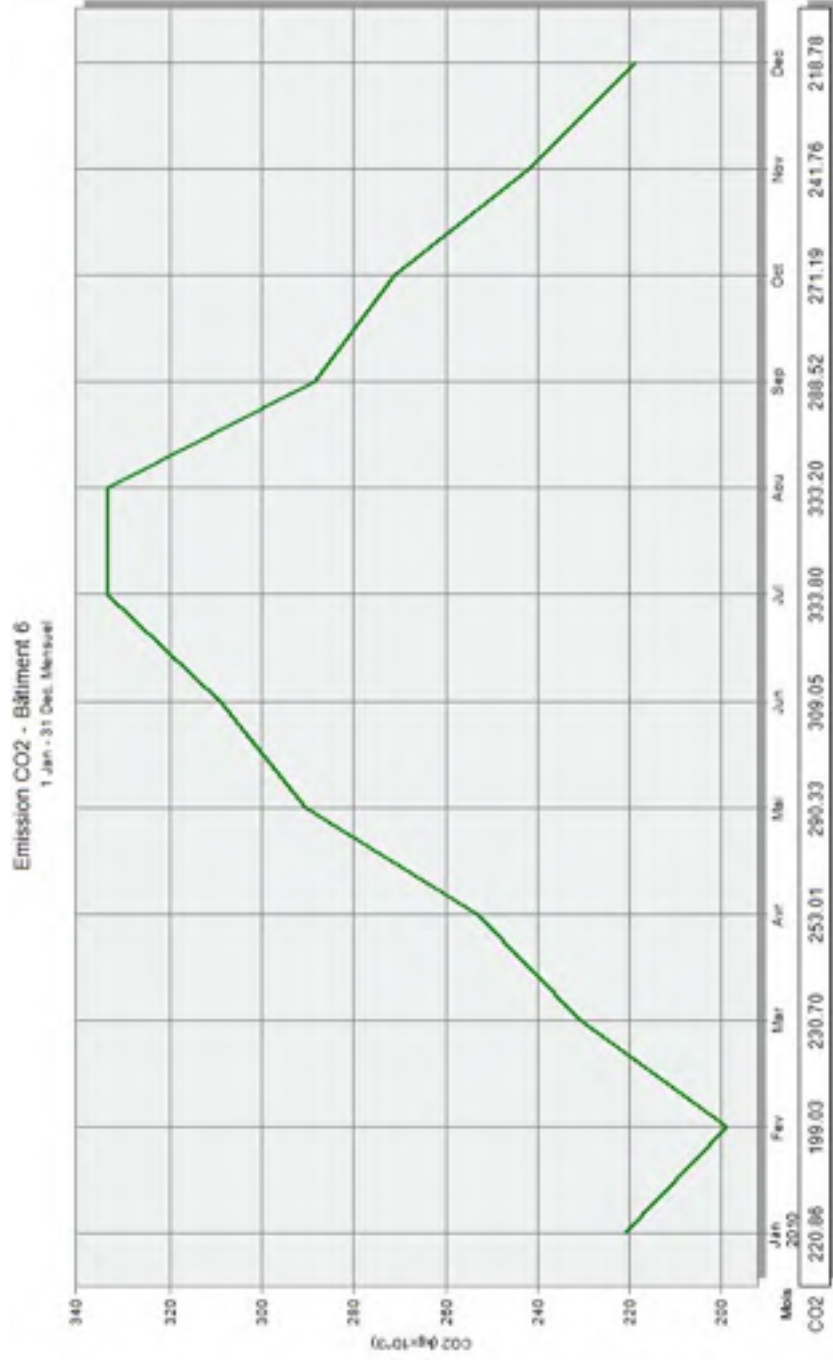
Graphique-A III-3 Émission CO₂ Bâtiment 3 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation



Graphique-A III-4 Émission CO₂ Bâtiment 4 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation



Graphique-A III-5 Émission CO₂ Bâtiment 5 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation



Graphique-A III-6 Émission CO₂ Bâtiment 6 – Vitrage 40%.
Tirée de Simulation

BIBLIOGRAPHIE

- Abrams, Charles. 1964. *Man's Struggle for Shelter in an Urbanizing World*, MIT Press, Cambridge.
- ADEME. 2010. *Bilan Carbone appliqué aux bâtiments*, Cedex01
- AEE. 2005. *Agence de l'efficacité énergétique*.
- Alexander Christopher. 1977. *The Pattern Language*, Oxford University Press, NY.
- Alexander Christopher. 1971. *De la synthèse de la forme*, Dunod, Paris.
- Alexander Christopher. November 1968. *Systems Generating Systems*, Architecture Canada.
- Alexander Christopher. 1965. *A city is not a tree*. AF, 1965SWE.
- Alexander Christopher. 1964. *Notes on the Synthesis of Form*, Harvard University Press.
- Appartements flexibles. D'après une enquête sur l'immeuble expérimental de « Jarnbrott »*, Goteborg, Stockholm, SIB, 1974, 84 p., fig. 1, microfiche 98 vues ; (traduit du suédois par G. Almquist-Bois pour le compte de CDU).
- Application du SOM (système ouvert modulaire)*, Lomé, Centre de la construction et du logement, 1974, fig. pl., (ONU rapport Tog. 72/007).
- Atelier Trois (Vuarnesson *et al.*), 1971, *Recherche pour un habitat personnalisé*, Eyrolles, Paris.
- Aubert Claude, Bosse-Platiere, Antoine, Micmacher Claude, Saint-Jours Yvan, Terre Vivante. 2003. *Annuaire national de l'habitat écologique*, La Maison Écologique, CREEE, 256 p.
- Berg, P. G. 2004. *Sustainability resources in Swedish townscape neighbourhoods: Results from the model project Hagaby and comparisons with three common residential area*, Landscape and Urban Planning, p. 29-52.
- Bertrand Annie. 2002. *Notre habitat écologique : Détails pratiques d'une expérience réussie*, Éditions du Dauphin, 191 p.
- Brand, S. 1994. *How Buildings Learn: What Happens after They're Built*, Viking, New York.

- Bosse-Platiere Antoine. mars/avril 2005. *Essayez le plâtre*, Quatre Saisons du Jardinage (Les), p. 54-58.
- Bosse-Platiere Antoine. mars-avril 2001. *Ossature bois et paille : une maison manifeste*, Quatre Saisons du jardinage (les), n° 127, p.49 -53.
- Butler, R. B. 1981. *The Ecological House*, Morgan & Morgan, Dobbs Ferry, NY.
- Carter, K. and C. Fortune. 2002. *Towards an understanding of sustainability in social housing projects*, Department of building, engineering and surveying, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK.
- Carreu Noak. janvier-février 2003. *Construire en bois*, Quatre Saisons du jardinage (les), n°138, p. 48-51.
- Chàvez, J. R. G. 2002. *Innovative building materials for sustainable applications in low cost housing*, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.
- Chiras, Daniel D. 2004. *The new ecological home: a complete guide to green building options*, White River Junction, Verm. : Chelsea Green Pub. Co.
- CNRC-IRC. 2005. *Conseil National de Recherches Canada, Institut de Recherche en Construction*.
- Cofaigh, E. O. Lewis, J. O. and Olley, J. A. 1996. *The climatic dwelling : an introduction to climate-responsive residential architecture*, on behalf of the European Commission, Directorate General XII for Science Research and Development, James & James (Science Publishers) Ltd., London.
- Co-op. 2005. M. E., *Montain équipement*, Co-OP.
- Corbusier (Le), 1920. 1983. *Art et urbanisme*, Charre Alain, Presses universitaires de France, Paris, p.117.
- Corrado M. 1998. *La Maison écologique : manuel de bio-habitat*, Éditions De Vecchi.
- Couvrette, R. 2005. *Planification et contrôle des ressources*, cours AME-6046, Université de Montréal.
- Desombre François. 2005. *J'attends une maison : le livre de l'habitat écologique*, Garrigues : La Pierre Verte, 504 p.
- Diaz Lopez, J. R., J. E. Camejo Cuan, et al. 2000. *Two year experience in the operation of the first community photovoltaic system in Cuba*, Renewable & Sustainable Energy Reviews, p.105-10.

- Ding, G. K. C. 1999. *MCDM and the assessment of sustainability in construction*, University of Technology, Sydney, Australia, p. 206-216.
- Dubigeon, Olivier. 2002. *Mettre en pratique le développement durable*, Paris : Village Mondial.
- Eicker, Ursula. 2003. *Solar technologies for buildings*, Chichester ; Hoboken, NJ : Wiley.
- Férone, Geneviève, Debas, Dominique, Genin, Anne-Sophie. 2004. *Ce que développement durable veut dire*, Paris : Éditions d'Organisation.
- Golueke, C. G., and W. J. Oswald. 1973. *An algal regenerative system for single-family farms and villages*, Compost Science.
- Hydro-Québec. 1992. *Plan directeur pour la maîtrise de l'énergie dans les municipalités*, Service Développement commercial et technologique, Direction efficacité énergétique.
- IISBE. 2005. *The integrated design process*, International Initiative for a Sustainable Built Environment, 7 p.
- Institut d'Urbanisme. 1996. *Énergie, urbanisme et aménagement en milieu municipal*, Faculté de l'aménagement de l'Université de Montréal pour Hydro-Québec
- Izard, Jean-Louis. 2006. *Le coefficient de forme du bâtiement*, Laboratoire ABC, ENSA-Marseille
- Jencks, C. 1973. *Modern Movements in Architecture*, Penguin Books, London.
- Kangas, Patrick C. 2004. *Ecological engineering*, Boca Raton : Lewis Publishers.
- Kats, G. H. 2003. *Green building costs and financial benefits*, Massachusetts technology collaborative.
- Kendall, Stephen and Teicher, Jonathan. 2000. *Residential Open Building*, London.
- Khalfan, M. M. A., N. M. Bouchlaghem, et al. 2003. *Knowledge Management for Sustainable Construction: The C-SanD Project*, Construction Research Congress, Winds of Change: Integration and Innovation in Construction, Proceedings of the Congress, March 19-21 2003, Honolulu, HI., United States, American Society of Civil Engineers.
- Kibert, C. J., J. Sendzimir, and G. Bradley Guy. 2002. *Construction Ecology: Nature as the Basis for Green Buildings*, Spon Press, London.

- Kohler, M. and M. Schmidt. 1990. *The importance of roofs covered with vegetation for the urban ecology: biotic factors*, Terrestrial and Aquatic Ecosystems, Perturbation and Recovery, O. Ravera, Ellis Horwood Publishing, New York, p.153-161.
- Kur Friedrich. 1998. *L'habitat écologique : quels matériaux choisir*, Terre Vivante, 191 p.
- Lacrampe Corinne. janvier-février 2002. *La maison aux 1000 bouteilles*, Quatre Saisons du jardinage (les), n° 132, p. 53-56.
- Lavigne, P., Brejon, P. and Fernandez, P. 1994. *Architecture climatique : une contribution au développement durable*, Edisud, Aix-en-Provence, France.
- Levasseur, Serge, Normandie. 2003. *Biomasse, Guide pratique du chauffage et de la climatisation*, Paris : Éditions Weka.
- MEDD. 2005. *Ministère de l'écologie et du développement durable*.
- McHarg, I. L. 1969. *Design with Nature*, Doubleday, Garden City, New York.
- McGregor Suzi, Trulsson Nora. 2001. *Living Homes - Sustainable architecture and design*, First Chronicle Books LLC, San Francisco.
- Morel, P. 2002. *La maison en ballots de paille : une réponse à la conservation de l'environnement*, Sciences de l'environnement. Montréal, Université du Québec à Montréal, 127 p.
- Mortgat Bruno. 10/2004. *L'éco-conception: UN Graal de plus en plus accessible aux PME/PMI*, Environnement et Technique, p. 32-36.
- NBI. 2005. *Applying the benchmark to high performance building design*.
- Olgyay, V. 1963. *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Oliva Jean-Pierre, Aubert Claude, Bosse-Platiere, Antoine. 2002. *Maisons écologiques d'aujourd'hui*, Terre Vivante, 144 p.
- Oliva Jean-Pierre. 2001. *L'isolation écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*, Terre Vivante, 237 p.
- Parlement européen. 2002. *Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002*

- Peuportier, B. 2001. *La simulation et les nouvelles attentes liées au concept de développement durable*, École des Mines de Paris.
- Pinon Pierre, Borie Alain, Micheloni Pierre. 2006. *Forme et déformation des objets architecturaux et urbains*, Eupalinos, Paris.
- Poel, B. 2005. *Integrated Design with a focus on Energy Aspects*, 10 p.
- Poulin, Rémi. 1999. *Analyse du système géothermique d'un bâtiment performant (Centre intégré de mécanique industrielle de la chaudière)*, Montreal : R. Poulin ; Montréal : École de technologie supérieure.
- Plank, R. J. 2005. *Sustainable Construction - A UK Perspective*, ASCE.
- Randall, T. 1999. *Environmental design: an introduction for architects and engineers*, New York : E & FN Spon, London.
- Richard, Roger B. 1980. *Topologies de l'habitation*, Université de Montréal.
- Ressources Naturelles Canada. 2004. *Office de l'efficacité énergétique*.
- Ressources Naturelles Canada. 2002. *Les systèmes géothermiques résidentiels*.
- Roaf Sue, Fuentes manuel, Thomas Stephanie. 2007. *Ecohouse*, 3rd, Elsevier, 352 p.
- Roulet, Claude-Alain. 2007. *Qualité d'usage des bâtiments et contraintes énergétiques : synergie ou antagonisme ?*, Revue économique et sociale 65 181-195
- SCHL (Société canadienne d'hypothèques et de logement), 2008, *Vers une consommation énergétique nette de zero dans les maisons existantes*, Ottawa
- SCHL (Société canadienne d'hypothèques et de logement), 2000, *Gestion communautaire de l'énergie*, Serie sur la maison et les collectivites saines, Ottawa
- SCHL (Société canadienne d'hypothèques et de logement), 2003, *Gestion communautaire de l'énergie - document de base*, Série technique 01-112, Ottawa
- ScienceDirect. 1992. *Ecological engineering* , New York, NY : Elsevier Science Pub. Co.
- Seongwon, S., A. Toshiya, et al. 2004. *Fuzzy Decision-Making Tool for Environmental Sustainable Buildings*, Journal of Construction Engineering and Management, p.415-423.
- Sioros, Donna. 2000. *Building for the 21st century*, Lilburn, Ga. : Fairmont Press.

- Shriberg, M. 2002. *Toward sustainable management: The University of Michigan Housing Division's approach*, Journal of Cleaner Production, p. 41-45.
- Soleri, P. 1993. *Arcosanti: An Urban Laboratory?*, 3rd ed., Cosanti Press, Scottsdale, AZ.
- Soleri, P. 1973. *Matter Becoming Spirit*, Anchor Books, Garden City, NY.
- Steemers, T. C. 1991. Commission des Communautés européennes, *Architectures Solaires en Europe*, Édisud, London.
- Steele, J. 1997. *Sustainable Architecture: Principles, Paradigms, and Case Studies*, McGraw-Hill, New York.
- Stitt, F. A. 1999. *Ecological Design Handbook: Sustainable Strategies for Architecture, Landscape Architecture, Interior Design, and Planning*, McGraw-Hill, New York.
- Széll, M. 2003. *Intelligent building, integrating design*, periodica polytechnica serv. civ. eng., p. 49-56.
- Tassin Maxime. juillet-août 2002. *Choix des matériaux, ayez du nez*, Quatre Saisons du Jardinage (les), n°135, p. 48-50.
- Thomas, Randall. 1999. *Environmental design*, London ; New York : E & FN Spon.
- Todd, N. J. and J. Todd. 1984. *Bioshelters, Ocean Arks, City Farming: Ecology as the Basis of Design*, Sierra Club Books, San Francisco, CA
- Voé. 2006. *Bilan Carbone du bâtiment URBILOG: une construction créditrice en CO₂*, étude financée par l'agence de développement et d'urbanisme de Lille métropole, EKOAMO, Linselles
- Wright, D. H., C. E. Folsome, D. Obenhuber. 1985. *Competition and efficiency in closed freshwater algal systems: tests of ecosystem design principles*, BioSystems, p. 233-239.
- Winther, B. N. and A. G. Hestnes. 1999. *Solar versus green: the analysis of a Norwegian row house*, Solar Energy, p. 387-393.
- Yohanis, Y. G. and B. Norton. 2002. *Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK*, Energy, p. 77-92.
- Younés, Chris. 2003. *Art et philosophie, ville et architecture*, Éditions de la Découverte, Paris.
- Younés, Chris. 1998. *Maison/Mégapole*, Les Éditions de la Passion, Paris.

UBIFRANCE. 2010. *L'éco-construction au Royaume-Uni*, Mission Économique de Londres

USGBC, *US green building council*, 2005.

Zeihner, L. C. 1996. *The Ecology of Architecture: A Complete Guide to Creating the Environmentally Conscious Building*, Whitney Library of Design, New York.

<http://archissi3000.ht.st/>

<http://www.aee.gouv.qc.ca/habitation/novoclimat/novoclimat.jsp>

<http://www.agora21.org>

<http://autoconstruction.free.fr/menu.htm>

<http://www.bestpractices.org>

<http://www.betterbricks.com/>

<http://biohabitat.forumactif.com>

<http://www.biospeedhome.be/default.htm>

<http://www.cagbc.org/> - Canada Green Building Council.

<http://r2000.chba.ca/>

<http://www.canadiantirepower.ca/>

<http://www.castors.asso.fr>

<http://www.confortbois.com/autoconstruction.html>

<http://www.cr3e.com>

<http://www.crcdg.culture.fr>

<http://www.culture.fr>

http://www.dlsc.ca/DLSC_Brochure_f.pdf (2006)

http://www.dlsc.ca/DLSC_Brochure_f.pdf (2007)

<http://www.ecocentre.org>

<http://www.ecologie-pratique.org/construire>

<http://www.enluminures.culture.fr>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Auto-construction>

<http://www.farigoule.net>

<http://www.gcbbw.org/construct/const01.html>

<http://www.habiter-autrement.org> (Site sur l'auto-construction).

<http://www.ideesmaison.com>

<http://www.ideosystemes.com/autoconstruction.htm>

<http://www.ladocumentationfrancaise.fr>

http://www.lesavoirfaire.com/f_index.html

<http://maisonconstruction.chez.tiscali.fr/index.html>

<http://www.maison-ecolo.com/>

<http://www.mei.gov.on.ca/en/index.php>

<http://members.aol.com/isorastfrance/>

<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/english/energy/index.jsp>

<http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rcmmn/hm-eng.html>

<http://oee.nrcan.gc.ca/residentiel/energystar-portail.cfm>

<http://www.paris.fr/fr/Urbanisme>

<http://www.regie-energie.qc.ca/>

<http://www.retscreen.net/> Outils d'analyse de projets d'énergies propres.

<http://www.sel-gabare.info/spip>

<http://www.snedition.fr>

<http://www.solarsolutions.ca/>

<http://www.windenergy.com/>

<http://www.usgbc.org>