

Optimisation de la conception d'un bâtiment résidentiel afin de réduire sa consommation énergétique

par

Oualid BERGHOUT

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MEMOIRE
CONCENTRATION : GESTION DE PROJET D'INGENIERIE
M.Sc.A.

MONTRÉAL, LE 10 JANVIER 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Oualid Berghout, 2022



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Maref Wahid, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme. Claudine Ouellet-Plamondon, présidente du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Perraton, examinateur
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 13 DÉCEMBRE 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer d'une manière très particulière mes sincères remerciements à mon encadreur M. Maref Wahid pour son apport considérable, ses précieuses orientations méthodologiques et ses encouragements.

Mes remerciements s'adressent également à :

Toute ma famille, mon père, de même que l'ensemble de mes collègues pour leurs patiences et leurs encouragements sincères.

Ma femme qui m'a encouragé à finir ce travail.

À tout le personnel de la bibliothèque de l'ÉTS.

Mes remerciements sincères vont aussi aux membres de mon jury.

Enfin, je souhaite remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.

Optimisation de la conception d'un bâtiment résidentiel afin de réduire sa consommation énergétique

Oualid BERGHOUT

RÉSUMÉ

Les préoccupations actuelles du monde en général et du Canada et de l'Algérie en particulier, portent sur la nécessité de réduire les consommations énergétiques dans l'industrie de la construction, plus précisément dans le secteur résidentiel. À cet effet, la réalisation des conceptions de bâtiments plus économies en énergie est de plus en plus nécessaire.

L'objectif de ce travail est d'étudier les performances énergétiques de deux systèmes passifs intégrés dans la conception de bâtiments résidentiels situés dans la ville de Terrebonne, au Canada et à Batna, en Algérie. Ces deux villes sont caractérisées par deux climats contrastés : le premier est de type froid, le deuxième est semi-aride. Ces systèmes sont : une enveloppe de bâtiment contenant une isolation en béton de chanvre et une stratégie de ventilation passive (mezzanine et cheminées d'aération) par action de cheminée. Afin d'étudier le comportement énergétique de chacun des systèmes seuls ainsi que celui de leur combinaison, cinq configurations pour chaque ville ont été considérées en plus d'une configuration STANDARD, ne comportant aucun système passif et constitué de matériaux de construction communément utilisés dans les deux pays. Les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel EnergyPlus™ sur une année typique sous les conditions climatiques de la ville de Terrebonne et de Batna.

Les résultats montrent que ces systèmes passifs ont un effet positif sur le bilan énergétique global à travers une judicieuse combinaison. Les simulations réalisées pour la ville de Batna se sont traduites par une réduction de l'ordre de 24 % de la charge énergétique totale annuelle. Cependant, les simulations réalisées pour la ville de Terrebonne se sont traduites par des résultats identiques à la charge annuelle totale du bâtiment standard. Cette différence par rapport à la ville de Batna s'explique notamment par l'impact mitigé de la stratégie de ventilation passive surtout dans un contexte de climat froid.

En conclusion, cette recherche introduit les conditions de faisabilité d'intégrer le béton de chanvre et les systèmes de ventilation passifs dans les bâtiments résidentiels en tant que stratégie de réduction de la consommation énergétique. Et ceci pour le cas du Canada et de l'Algérie.

Les résultats obtenus dans cette recherche pour le béton de chanvre sont confirmés par l'étude de Melle Aguerata Kabore (2020).

Mots-clés: conception, énergie, climat, stratégies, passif, isolation en béton de chanvre, ventilation passive, action de cheminée, effet combustible, bâtiment.

Optimization of the residential building design to reduce the energy consumption

Oualid BERGHOUT

ABSTRACT

The current concerns of Canada and Algeria relate to the need to reduce the consumption of energy in the construction industry, more specifically in the residential sector. To achieve this aim, the conception of buildings should be accomplished in a more energy efficient way.

The purpose of this work is to study precisely the energy performance of the two passive systems integrated in the conception of residential building located in the city of Terrebonne in CANADA and the city of Batna in Algeria. Both cities have distinct climate, the first city is characterized by a cold while, the second by a semi-arid one. These systems are: a building envelope containing a hemp-concrete insulation, and a passive ventilation strategy (mezzanine and ventilation chimney) by chimney effect. In order to study the energetic performance of these systems separately as well as that of their combination, five configuration for each city were used in addition to a STANDARD configuration, which does not contain any passive system and made up of construction materials commonly used in the regions under study. The simulations are carried out using the EnergyPlus™ software within a year, while taking into consideration the climatic conditions for both cities Terrebonne and Batna.

The results show that these passive systems have a positive effect on the global energy balance through a judicious combination. The simulations realized for the city of Batna have translated by 24 % reduction in the total annual energy charge. However, the simulations carried out for the city of Terrebonne resulted in identical results to the total annual load of the standard building. This difference of results, specifically in the city of Batna is explained by the mixed impact of the passive ventilation strategy used on a cold climate backdrop.

In conclusion, this research introduces the ability to integrate hemp-concrete and passive ventilation systems into residential buildings as a strategy for reducing energy consumption for both countries CANADA and ALGERIA.

The results obtained in the study of hemp-concrete are improved by Aguérata Kabore study (2020).

Keywords: conception, energy, climate, strategies, passive, hemp-concrete insulation, passive ventilation, chimney effect, combustible effect, building.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	9
1.1 Impact environnemental des différents systèmes de l'enveloppe du bâtiment.....	9
1.1.1 Définition et généralités	10
1.1.2 L'enveloppe du bâtiment et son rôle de modulateur thermique	12
1.1.3 Enjeux climatiques et son impact sur l'enveloppe du bâtiment.....	18
1.2 Consommation énergétique contexte et enjeux	22
1.3 Les produits de construction	28
1.3.1 La méthodologie constructive à ossature de bois et en acier	36
1.4 Le Chanvre un isolant à base végétal.....	39
1.4.1 Présentation et utilisations en granules de chènevotte	40
1.4.2 Le béton de chanvre un matériau d'isolation écologique	43
1.5 Synthèse	47
CHAPITRE 2 L'APPROCHE ÉNERGÉTIQUE DE L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE	49
2.1 Les éco-techniques du bâtiment vernaculaire	49
2.1.1 L'habitat troglodytique « le site dicte la forme ».....	50
2.1.2 Le zonage thermique	51
2.1.3 La forme du volume.....	52
2.1.4 L'espace central (cour intérieur, patio) et galerie	54
2.1.5 Matériaux et technique de mise en œuvre.....	54
2.1.6 Synthèse	55
2.2 Mise en valeur des systèmes de rafraîchissement passifs	56
2.2.1 Le « moucharabieh »	57
2.2.2 Le malkef, ou les capteurs à vent.....	58
2.2.3 Les tours à vent	58
2.2.4 Synthèse	59
2.3 Apport du vernaculaire dans les pratiques architecturales contemporaines	60
2.3.1 Les parois poreuses « effet de moucharabieh »	60
2.3.2 Les murs végétaux	63
2.3.3 Les galeries extérieures.....	65
2.3.4 L'espace central, la cour intérieure ou le patio	67
2.3.5 La paroi réfléchissante	69
2.3.6 Autres réalisations contenant une configuration de ventilation passive ...	71
2.3.7 Synthèse	75
CHAPITRE 3 CODE DU BÂTIMENT ET DE CONSTRUCTION AU CANADA ET EN ALGÉRIE	77
3.1 Code et construction des bâtiments au Canada et au Québec	77

3.1.1	Le code national du bâtiment.....	77
3.1.2	Le code national de l'énergie du bâtiment.....	78
3.1.3	Les normes et certifications au canada	78
3.2	Les conditions climatique et géographique.....	85
3.3	La construction en Algérie.....	88
3.3.1	Condition climatique.....	89
3.4	Synthèse	92
CHAPITRE 4 VALIDATION DE LA PROGRAMMATION DU LOGICIEL ENERGY PLUS.....		93
4.1	Hypothèse de la simulation Berghout, 2019	93
4.2	Conditions aux limites	94
4.3	Configurations d'assemblage des murs pour la vérification cas de Berghout, 2019 ville de Biskra	95
4.4	Vérifications des résultats Open Studio 2,7 à ceux de Berghout, 2019	95
4.5	Synthèse	98
CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE ET SIMULATION NUMÉRIQUE DES CAS D'ÉTUDE		99
5.1	Méthodologie	99
5.1.1	Objectif de l'étude.....	104
5.1.2	LE béton de chanvre et le choix du système de ventilation passif.....	106
5.1.3	Cas d'études	110
5.2	Simulation	116
5.2.1	Choix de l'outil de simulation et présentation du logiciel	116
5.2.2	Facteurs pertinents	117
5.2.3	Limitation.....	118
5.2.4	Hypothèses de base pour les cas d'étude	118
5.2.5	Conditions aux limites	119
CHAPITRE 6 RÉSULTAT ET DISCUSSION		121
6.1	Résultats de la simulation du cas d'étude de la ville de Terrebonne	121
6.1.1	Configuration 1	121
6.1.2	Configuration 2	126
6.1.3	Configuration 3	128
6.1.4	Configuration 4	130
6.2	Scénario optimal pour la ville de Terrebonne.....	132
6.3	Résultats de la simulation du cas d'étude de la ville de Batna	135
6.3.1	Configuration 1	135
6.3.2	Configuration 2	137
6.3.3	Configuration 3	141
6.3.4	Configuration 4	143
6.4	Scénario optimal pour la ville de Batna.....	145
6.5	Synthèse	148
CONCLUSION		150

RECOMMANDATIONS	152
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	154

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Organisation des contenus sur le thème de l'énergie tiré du ministère de l'Énergie et des mines (2009).....
	27
Tableau 1.2	Énergie grise et émissions de dioxyde de carbone de différents matériaux de construction tiré de Arnaud & André (2010, p.16)
	35
Tableau 4.1	Coefficients d'échange conjonctif pour la simulation tiré de Berghout (2019, p.148)
	95
Tableau 4.2	Les propriétés thermo physiques des matériaux cas de Biskra tiré de Berghout (2019, p.119)
	95
Tableau 4.3	Résultats de la simulation du bâtiment de Biskra obtenue par Open Studio 1.8 tiré de Berghout (2019, p.96)
	96
Tableau 5.1	Illustre les configurations à étudier cas de l'Algérie.....
	102
Tableau 5.2	Illustre les configurations à étudier cas du Canada
	102
Tableau 5.3	Les propriétés thermophysiques des matériaux de construction utilisés dans le bâtiment standard cas de la ville de Batna.....
	114
Tableau 5.4	Les caractéristiques d'une enveloppe de bâtiment à faible consommation énergétique selon les zones tiré de Maref (2020)
	114
Tableau 6.1	Tableau du ratio énergétique des différents scénarios de.....
	134
Tableau 6.2	Tableau du ratio énergétique des différents scénarios des configurations du bâtiment standard cas de Batna
	147

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 0.1	Illustrer synthèse du travail objet de la recherche.....	8
Figure 1.1	Enveloppe du bâtiment comme une barrière	10
Figure 1.2	Les composants de l'enveloppe du bâtiment type unifamilial de.....	11
Figure 1.3	Un assemblage de mur constitué de couches homogènes	15
Figure 1.4	Sollicitation extérieure que subit l'enveloppe d'un bâtiment	19
Figure 1.5	Un écran pare-pluie est une protection de	21
Figure 1.6	Contrôle de la chaleur, de l'air et de la vapeur avec.....	22
Figure 1.7	Demande d'énergie des bâtiments résidentiels.....	23
Figure 1.8	Demande d'énergie des bâtiments résidentiels au	23
Figure 1.9	Émission de GES du secteur résidentiel, par scénario Canada AIA : Amélioration continue du rendement énergétique, Défi 2030 MSQ : Maintien du statu quo ou maintien à l'état actuel sans prise de décision EA : Écologisation accélérée tiré de Simard (2009, p.26).....	24
Figure 1.10	Illustrer programme et codes énergétiques vers la performance.....	25
Figure 1.11	Illustrer un bâtiment Net Zéro est un qui produit autant d'énergie qu'il en consomme annuellement prêt tiré de Maref (2020).....	26
Figure 1.12	Illustrer installation du colombage métallique.....	31
Figure 1.13	Illustrer exemple typique de béton armé.....	32
Figure 1.14	Illustrer composition d'une enveloppe à ossature de bois	36
Figure 1.15	Exemple de murs à ossature de bois avec parement extérieur en.....	37
Figure 1.16	Exemple de murs en structure métallique tirée de la firme d'architecture 2Architectures	39

Figure 1.17	Plantes de chanvre (a) et la composition de la tige de chanvre (b) tiré.....	41
Figure 1.18	Tige de chanvre (a), micrographie d'une coupe d'une tige de	42
Figure 1.19	Vue au microscope électrique à balayage MEB de la porosité.....	42
Figure 1.20	Différents matériaux issus du chanvre tirée de Kabore (2020, p.35)	43
Figure 1.21	Valeur d'énergie grise pour les matériaux couramment.....	44
Figure 2.1	Illustre l'habitat troglodytique à Matmata en Tunisie	50
Figure 2.2	Illustre du schéma de l'igloo esquimau montrant sa conception intérieure et sa réaction vis-à-vis des vents tiré de Atek (2012, p.51)	54
Figure 2.3	Illustre détail d'un mur à moellons	55
Figure 2.4	Illustre les variations de pression d'air qui sont causées	57
Figure 2.5	Illustre intégration des systèmes de rafraîchissements	59
Figure 2.6	Illustre réalisation vernaculaire en paroi poreuse,.....	61
Figure 2.7	Illustre réalisation vernaculaire maison avec.....	61
Figure 2.8	Illustre réalisation contemporaine avec la paroi poreuse cas.....	62
Figure 2.9	Illustre réalisation contemporaine avec la paroi poreuse cas.....	63
Figure 2.10	Illustre réalisation vernaculaire avec mur végétal, habitation	64
Figure 2.11	Illustre réalisation contemporaine avec un mur.....	65
Figure 2.12	Illustre réalisation vernaculaire avec des	66
Figure 2.13	Illustre réalisation contemporaine avec des galeries extérieures	67
Figure 2.14	Illustre réalisation vernaculaire avec	68
Figure 2.15	Illustre réalisation vernaculaire.....	68
Figure 2.16	Illustre réalisation contemporaine avec espace.....	69
Figure 2.17	Illustre réalisation vernaculaire dans le village.....	70
Figure 2.18	Illustre réalisation contemporaine, maison pour personnes.....	71

Figure 2.19	Illustre la 30 st Marie Axe Norman Foster Londres Source : Norman Foster, www.lankaart, org : article_35281124.html	72
Figure 2.20	Illustre maquette montrant le décalage	72
Figure 2.21	Illustre simulation d'un essai en soufflerie à partir.....	73
Figure 2.22	Illustre un bâtiment administratif contemporain incorporant des cheminées d'aération, stratégie issue du savoir-faire vernaculaire (cas de l'Iran) source : S. Salah, vers une primauté de l'architecture, transformation de l'existant et enjeux environnementaux	74
Figure 2.23	Correspondance du bâtiment administratif avec un cheminé d'aération, technique inspiré des Bagdir en Iran (savoir-faire vernaculaire) tirée de Boulfekhar (2011, P.50)	74
Figure 3.1	Cote EnerGuide de 0 à 100 selon les caractéristiques de	79
Figure 3.2	Illustre les huit zones climatiques de l'Amérique.....	85
Figure 3.3	Illustre la classification du climat en Amérique	86
Figure 3.4	Illustre la classification du climat en Amérique du	87
Figure 3.5	Illustre la classification du climat en Amérique du Nord selon l'indice d'humidité tirée de Maref (2020).....	88
Figure 3.6	Les zones climatiques d'été et d'hiver en Algérie tirée d'ENAG (1993)	91
Figure 4.1	Résultats de la simulation du bâtiment de Biskra obtenue par Open Studio 2.7 (configuration de la voûte consommation en électricité)	97
Figure 4.2	Résultats de la simulation du bâtiment de Biskra obtenue par Open Studio 2.7 (configuration de la voûte consommation en gaz)	97
Figure 5.1	Illustre les compositions des murs et toits cas du bâtiment situé à Batna région des Aurès en Algérie tiré d'Atelier des recherches architecturales	100
Figure 5.2	Illustre les compositions des murs et toits cas du bâtiment situé à Terrebonne, Canada tirée de 2Architectures	101
Figure 5.3	Récapitulation	104

Figure 5.4	Illustre la conductivité thermique des matériaux de construction	107
Figure 5.5	Illustre la maquette du projet de la mosquée	109
Figure 5.6	Illustre coupe du principe ventilatoire du projet.....	109
Figure 5.7	La maquette, le bâtiment objet d'étude cas de.....	111
Figure 5.8	La maquette, le bâtiment objet d'étude cas de la ville de Batna,.....	111
Figure 5.9	Vue extérieure stylisée et schéma du bâtiment standard	112
Figure 5.10	Vue extérieure stylisée et schéma du bâtiment.....	113
Figure 5.11	Illustre extrait du plan (logement type) mécanique ventilation du cas d'étude de Terrebonne tirée de la firme 2Architectures.....	115
Figure 5.12	Illustre la codification des conduits de ventilation mécanique,.....	116
Figure 6.1	Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec une enveloppe contenant du béton de chanvre à l'extérieur de la cavité murale.....	122
Figure 6.2	Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec une enveloppe contenant du béton de chanvre à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité murale	124
Figure 6.3	Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec système de ventilation passif par action de cheminée (intégration de la mezzanine dans la cage d'escalier).....	127
Figure 6.4	Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec système de ventilation passif par action de cheminée et par effet combustible.....	129
Figure 6.5	Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec mezzanine, les cheminés d'aération et le béton de chanvre dans un système de mur.....	131
Figure 6.6	Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard	

	et bâtiment avec un système d'enveloppe contenant du béton de chanvre cas de la ville de Batna	136
Figure 6.7	Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec système de ventilation passif par action de cheminée (intégration de la mezzanine dans les logements du dernier niveau)	138
Figure 6.8	Graphe comparatif des charges mensuelles en Énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec système de ventilation passif par action de cheminée (intégration de la mezzanine dans la cage d'escalier du bâtiment)	140
Figure 6.9	Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec système de ventilation passif par action de cheminée et par effet combustible.....	142
Figure 6.10	Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec mezzanine, les cheminés d'aération et le béton de chanvre dans un système de mur	144

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Certaines notions ne figurent pas dans la liste ci-dessous du fait qu'elles sont définies directement dans le texte.

ADEME	Agence de l'Environnement et de Maîtrise de l'Énergie
ASHREA	American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers
ARPE	Association Régionale pour la Promotion de l'Écoconstruction
CSB	Construction sans Bois
CCQ	Code de Construction du Québec
CNRC	Conseil National de Recherche du Canada
COP	Conférence internationale sur le Climat
CSTB	Centre scientifique et technique du Bâtiment
EPS	Polystyrène expansé
GES	Émission des Gaz à Effet de Serre
ISO	Organisation internationale de Normalisation
RNcan	Ressources naturelles canadiennes
IRIS	Institut de Relation internationale et stratégique
REENB	Règlementation énergétique pour les Nouveaux Bâtiments
SCHL	Société canadienne d'Hypothèque et Logement

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

a	Diffusivité thermique (m^2/s)
C	Chaleur massique ($\text{J}/[\text{kg. K}]$)
d	Distance (m)
d_p	Diamètre des pores (m)
D_φ	Coefficient de conduction ($\text{g}/[\text{m. h. mm Hg}]$)
R	Résistance thermique ($\text{m}^2 \text{K/W}$)
T	Temps (s ou en h)
T	Température ($^\circ\text{C}$)
V	Volume (m^3)
W	Teneur en eau (kg/m^3)
ΔT	Variation de la température ($^\circ\text{C}$)

Unité de masse

MteqCO ₂	Millions de tonnes équivalentes dioxyde de carbone
Ha	Hectare
KgeqCO ₂	Kilogramme équivalent dioxyde de carbone
Teq	Tonne équivalente

Unité de base

m	Mètre
mm	Millimètre

Unité d'air

m^2	Mètre carré
$\pi 2$	Pieds carré

Unités calorifiques

$^{\circ}C$	Degré Celsius
K	Kelvin

Unités de puissance

W	Watt
J	Joule

Unités d'énergie, de travail et de chaleur

Ca	Calorie (chaleur)
BTU	British Thermal Unit (chaleur)
kJ	kilo Joule (chaleur)
Wh	Wattheure (énergie)
KWh	Kilowattheure (énergie)

INTRODUCTION

Notre société d'aujourd'hui a pris conscience de la croissance grandissante des progrès technologiques et l'impact de ces technologies sur notre environnement. Elle se rend compte également que les choix d'aujourd'hui tel que les matériaux de construction non renouvelable et les systèmes actifs sont déterminés par l'économie et la technologie, qui rendent notre terre plus fragile. La première conférence internationale sur l'environnement tenue à Stockholm en 1972 était un symbole de cette prise de conscience. Dans ce contexte mondial, une nécessité de changer notre modèle de développement et d'introduire de nouveaux modèles de régulation s'impose, tout en considérant pleinement le facteur humain et en faisant à des choix rationnels à moyen et long terme pour une architecture avec un faible impact environnemental.

Dans l'industrie de la construction, les contraintes énergétiques sont des facteurs qui obligent désormais l'ensemble de la communauté internationale à reconstruire ces modèles de développement afin de les repositionner comme un modèle de développement plus écologique et durable. Cette logique réside dans l'alignement des besoins sociaux et humains avec un meilleur partage du progrès économique et un meilleur respect de l'équilibre écologique. C'est ainsi que les générations futures vont bénéficier d'un environnement de qualité qui va le préserver pour longtemps.

Il est primordial d'améliorer la conception des bâtiments et leurs composants et de réussir une nouvelle transition énergétique qui est de plus en plus nécessaire. De ce point de vue, l'objectif principal de cette étude de recherche est de minimiser l'utilisation d'énergie non renouvelable en économisant l'énergie de manière passive afin de réduire l'impact négatif sur l'environnement et les coûts d'investissement et d'exploitation. Le concepteur, l'architecte ou l'ingénieur doit d'abord utiliser le potentiel passif pour réduire les coûts énergétiques du chauffage, de la climatisation et de l'éclairage.

Partout dans le monde ainsi qu'au Canada, les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont causées par des activités humaines. C'est pourquoi, de nos jours, le secteur du bâtiment consomme environ le tiers de la consommation totale d'énergie dans le monde et il est

responsable d'une partie des émissions de dioxyde de carbone (Rais et al, 2019).

En Amérique du Nord, les bâtisses consomment presque un tiers de consommation totale d'énergie soit 31 %, ainsi que 76 % du total de l'énergie produite par les centrales électriques est utilisé pour alimenter les bâtiments (Environmental Cooperation Council, 2008). La demande d'énergie représente plus de 35 % des émissions totales de dioxyde de carbone du continent africain. On constate qu'en Amérique du Nord le secteur de construction est parmi les trois plus grands principaux émetteurs de GES après le transport et l'industrie (Environmental Cooperation Council, 2008).

En Afrique, les bâtiments consomment 80 % de l'énergie totale du pays, et plus de 67 % de celle-ci est utilisée pour l'approvisionnement en électricité (François, Radanne et Diaz, 2012). L'Algérie est confrontée à d'énormes contraintes climatiques et doit adopter une attitude stricte vis-à-vis des questions énergétiques. L'industrie de la construction résidentielle traverse une crise perçante et son rendement énergétique est souvent négligé par les concepteurs. Dans les quarante années d'indépendance de 1962 à 2002, la volonté de construire en masse rapide a fait privilégier le modèle de l'habitat collectif. Ce modèle entraîne d'énormes dépenses énergétiques, vu que les paramètres sensibles aux facteurs climatiques ne sont pas respectés. Le prototype développé par l'Algérie en matière de logements a été marqué par une demande excessive, d'où l'anticipation de la quantité au profit de la qualité (Berghout, 2012). De plus, l'Algérie est un pays sous-développé, et notant qu'un citoyen de la classe moyenne à un revenu faible, ceci l'empêche de se fournir des moyens technologiques modernes. Ces conditions lui imposent le recours aux solutions classiques, et la mise en œuvre des méthodes technologiques se contente uniquement aux projets de grande envergure. Il faut également souligner que les différents acteurs des bâtiments manquaient de compréhension de ces approches énergétiques.

Les professionnels, décideurs et chercheurs réfléchissent à des alternatives à long terme face à ces statistiques déplorables afin d'optimiser la performance énergétique des bâtiments ce qui permet de réduire les émissions de GES (gaz à effet de serre) issues du milieu de la construction. Les matériaux d'isolation couramment utilisés dans les bâtiments contemporains sont majoritairement constitués de matières combustibles, fossiles et

épuisables, ce qui pose le problème du réemploi en fin de cycle. De plus, les ressources naturelles induites par la transformation des sociétés sont limitées, entraînant à différentes échelles une pénurie étendue de matériaux de construction fréquemment utilisés (Désaunay Cécile & Jouvenel François, 2014). La plupart des matériaux dont la fabrication pollue fortement l'eau, l'air et la terre sont des matériaux classiques (Désaunay Cécile & Jouvenel François, 2014). La demande contenue des matériaux choisis écologiquement, renvoie à la réflexion d'utiliser des technologies rentables, respectueuses de l'environnement à travers la modernisation des techniques traditionnelles en construisant avec des matériaux disponibles localement. Le choix des matériaux de construction biosourcés à base d'agrodéchet sans risque pour les occupants, les ressources naturelles et pour ceux qui les fabriquent permet de contribuer à la réalisation de bâtiments moins énergivores. De ce fait, il s'avère nécessaire d'étudier l'impact énergétique de ces matériaux afin d'évaluer leurs capacités à réduire les besoins en chauffage et en climatisation des bâtiments résidentiels. De plus, un riche héritage patrimonial des connaissances vernaculaire confirme l'existence d'un calepin référentiel de mesures et techniques relatives aux stratégies de chauffage et de ventilations passives. L'intégration des mesures vernaculaires dans la conception des bâtiments résidentiels peut contribuer à une économie d'énergie utilisée dans la climatisation et le chauffage. Ces constructions vernaculaires étaient conçues pour assurer le confort humain d'une manière passive permettant de réaliser des économies d'énergie tout en réduisant les conséquences néfastes sur l'environnement (Mitra & Sanaz, 2014). De ce fait, Kemajou et Mba (2011), attestent qu'il est équitable d'opter pour des méthodes de refroidissements passifs pour un meilleur confort humain. Un tel choix permet de ne pas consommer trop d'énergie, ce qui minimisera le recours aux systèmes actifs, de ce fait, minimiser le recours aux énergies fossiles (Saljoughinejad & Sharifabad, 2015). Face à ces constats, notre intérêt est d'améliorer les conceptions en optimisant la performance énergétique des bâtiments résidentiels au Canada et en Algérie par des solutions vernaculaires en utilisant des matériaux d'isolation écologique combinée à des systèmes de ventilations passifs. Ce qui permet d'offrir un équilibre entre une enveloppe à haut rendement énergétique (résistante aux mouvements de chaleur) et une ventilation naturelle satisfaisante. Cette dernière peut

constituer une alternative aux systèmes de ventilation mécanique surtout dans le contexte canadien.

Les objectifs de l'étude

Objectif principal

Dans cette optique de développement durable, l'objectif principal de cette recherche est d'étudier la performance énergétique de deux systèmes passifs seuls ou en combinaison intégrés dans la conception des bâtiments résidentiels au Canada et en Algérie. Ces systèmes sont : une enveloppe de bâtiment avec une isolation en béton de chanvre et une stratégie de ventilation passive par action de cheminée. Il s'agit d'une alternative de construction écoénergétique à travers l'apport du vernaculaire dans la construction contemporaine par l'intégration de matériaux nouveaux biosourcés et aussi par l'incorporation des stratégies de ventilation passives. Ce qui permet de réduire le recours aux systèmes de ventilation mécanique qui coûte trop cher. L'étude s'intéresse à la compréhension du comportement énergétique du béton de chanvre dans un système de mur seul ou en complément d'une ventilation passive à l'intérieur du bâtiment. Cette dernière est assurée par les espaces vides tels que la mezzanine et les cheminées d'aération. Il est à signaler que dans notre étude l'énergie ne sera pas perçue comme une simple quantité de KWH, mais plutôt elle sera appréhendée selon une série de critères environnementaux. De ce fait, un chainage sera réalisé entre la revue de littérature et la partie expérimentale afin d'assurer une évaluation pertinente du béton de chanvre (bilan global énergie-environnement). L'étude est réalisée dans deux pays, le Canada et L'Algérie. L'Algérie possède un climat varié dû à la vaste superficie du pays, un climat méditerranéen au nord, et un climat désertique, chaud et semi-aride pour le reste, c'est le cas pour la ville de Batna située dans la région des Aurès. Elle se trouve au sud-est d'Alger capital d'Algérie. Les deux choix se sont portés sur l'Amérique et l'Afrique, car ce sont des continents producteurs de chanvre. « L'Afrique est le premier producteur mondial de chanvre » (ONUDC, 2007). « L'Afrique à elle seule représentait 25 % de la production mondiale de feuilles de chanvre et l'ensemble du continent américain

représentait 46 % de la production mondiale de cannabis en 2005 » (ONUDC, 2007 ; Youssef, 2017). L'Algérie a prévu un plan de relance économique et des perspectives prometteuses pour une économie de croissance. De ce fait la cultive du chanvre peut devenir un investissement permettant d'augmenter les exportations hors hydrocarbure qui est l'autre défi de l'économie algérienne. Cependant, l'utilisation du chanvre dans un système d'enveloppe est pratiquement absente au Canada et même en Algérie.

De façon plus spécifique, les objectifs de cette recherche sont repartis comme suite :

1. Étudier la faisabilité d'adopter des systèmes de murs contenant une isolation en béton de chanvre seul ou en complément d'une stratégie de ventilation passive à l'intérieur du bâtiment. Et ceci dans le contexte canadien toute en prenant en considération les codes des bâtiments résidentiels du Québec en vigueur ;
2. Évaluer la faisabilité d'intégrer le béton de chanvre dans un système d'enveloppe avec une stratégie de ventilation passive dans les nouveaux bâtiments résidentiels à Batna en Algérie ;
3. Analyser l'impact de construire un nouveau bâtiment avec une enveloppe contenant du béton de chanvre et avec un système de ventilation passif sur l'estimation énergétique pour la région de l'Aurès et la région de Terrebonne ;
4. Comparer les résultats des divers scénarios avec les résultats du bâtiment de référence (construction typique de l'Algérie) pour opter sur le choix qui convient le mieux à la région de l'Aurès en Algérie ;
5. Comparer les résultats des divers scénarios avec les résultats du bâtiment de référence (contenant les systèmes de ventilation mécanique couramment utilisés) pour la région de Terrebonne au Québec et identifier les possibilités de réduction de coûts énergétique ;

6. Enrichir la littérature scientifique dans ce domaine pour deux contextes différents.

De plus ce travail permet de simplifier l'information aux concepteurs praticiens qui conçoivent dans deux milieux contrastés le climat semi-aride et le climat froid.

Organisation du manuscrit

Ce travail est structuré en deux parties qui seront détaillées en six chapitres comme suit :

La première partie décrit toute la partie théorique de l'enveloppe du bâtiment, du savoir-faire vernaculaire et des codes de construction canadienne et algérienne. Elle est développée sous forme de trois chapitres. Ces derniers contiennent des informations qui s'appuient principalement sur les différentes recherches bibliographiques relatives au thème de l'optimisation énergétique des bâtiments. Le premier chapitre décrit divers phénomènes physiques de l'enveloppe du bâtiment vis-à-vis le climat, et leurs impacts sur les différents systèmes de mur ainsi que les conséquences de l'enveloppe du bâtiment sur l'efficacité énergétique et les matériaux qui restreignent l'émission du GES comme les matériaux à base de chanvre. Il passera également en revue la notion d'économie d'énergie de même que l'analyse d'évolution des consommations énergétiques dans l'industrie de la construction au Canada et en Algérie. Compte au deuxième chapitre, il a été détaillé au profit de différents éco techniques vernaculaires utilisés dans la conception des bâtiments en plus d'un aperçu sur l'apport du savoir-faire vernaculaire dans la construction contemporaine. Le troisième chapitre est consacré aux exigences des normes, réglementations et codes énergétiques établis par le Québec, le Canada ainsi que l'Algérie pour le secteur des bâtiments.

Quant à la deuxième partie, elle représente une vérification des cas d'étude à travers des simulations numériques. Le logiciel Energy Plus™ disponible gratuitement a été utilisé dans cette étude. Le quatrième chapitre s'approfondit sur la vérification du logiciel Energy Plus™ par le biais de plusieurs tests et simulations. Le chapitre 5 présente la méthodologie et la simulation numérique des cas d'étude et le chapitre 6 énonce les résultats et les discussions.

Finalement, une conclusion viendra illustrer et synthétiser les résultats obtenus dans cette recherche en proposant des perspectives et des recommandations pour des recherches futures.

Cette recherche contribue d'une part, à enrichir la littérature scientifique, et servira comme support pédagogique pour les divers acteurs dans ce domaine. D'autre part, cette étude apporte une amélioration de la construction d'une manière durable à travers l'intégration de nouvelles technologies dans les tendances et mode de conception contemporaine.

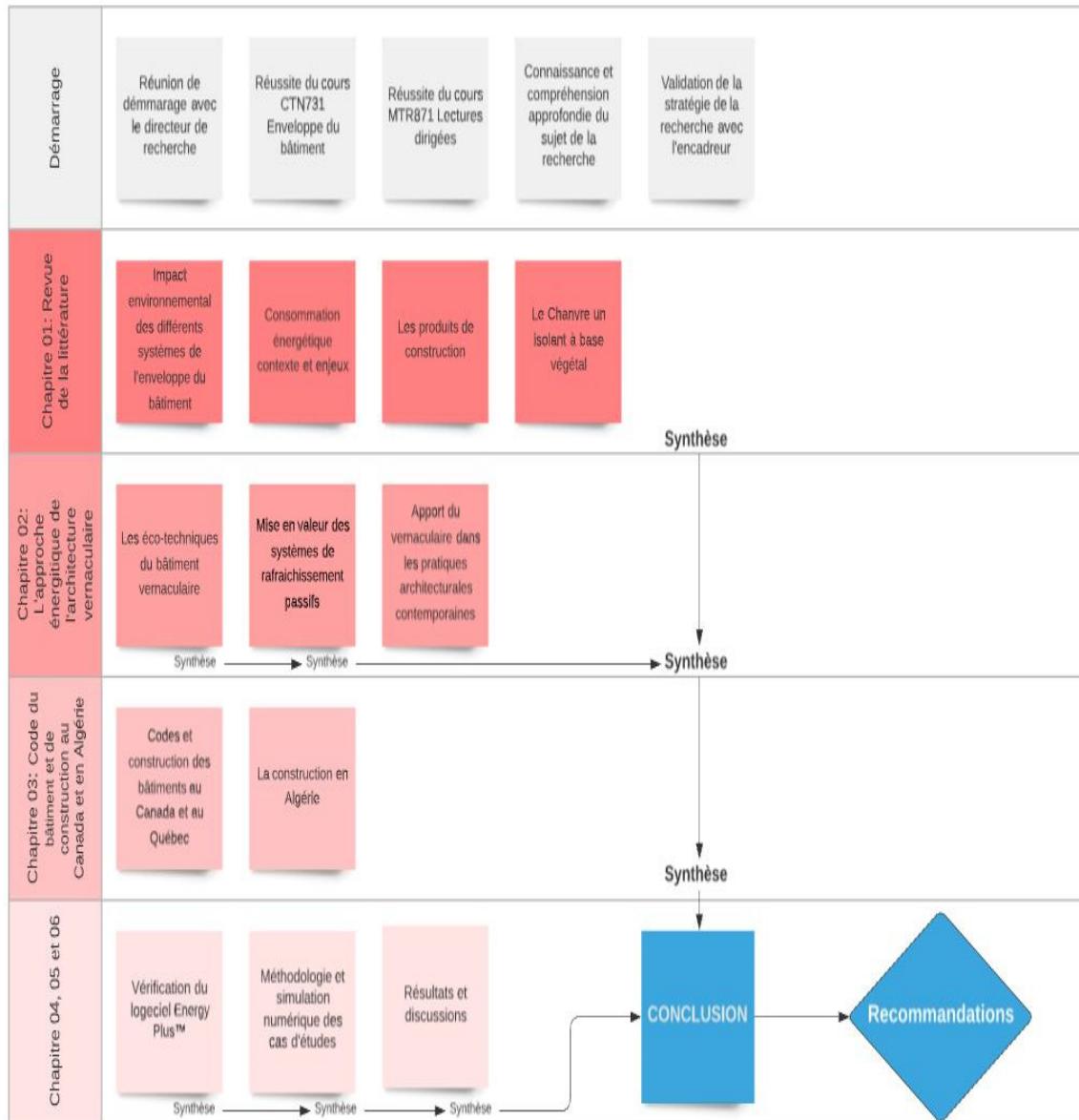


Figure 0.1 Illustré synthèse du travail objet de la recherche

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, une revue bibliographique non exhaustive est d'abord exposée. Cette dernière vise à étudier les divers concepts liés à l'enveloppe du bâtiment à travers l'identification des divers phénomènes physiques vis-à-vis le climat et leurs impacts sur les différents systèmes de l'enveloppe du bâtiment ainsi que les agents destructeurs de l'enveloppe du bâtiment. De plus, une partie de la revue traite des exemples concrets d'études précédentes qui analysent la consommation énergétique des bâtiments ainsi que les opportunités propres au cas du Canada et de l'Algérie. Nous développons également un état de l'art sur les produits de construction (notamment le béton de chanvre) ainsi que les méthodologies constructives et les systèmes de construction couramment utilisés.

1.1 Impact environnemental des différents systèmes de l'enveloppe du bâtiment

Le bâtiment constitue un lieu intermédiaire qui doit être testé avec des conditions extérieures (climatologiques) et avec des conditions intérieures. Ces conditions ou paramètres sont la température extérieure, la pression au sol, la pluie, l'humidité, le vent, les échanges de rayonnement solaire avec le bâtiment, la chaleur, le bruit, les tornades, et les tempêtes de verglas (Hauglustaine & Simon, 2006 ; kuznik, david, johannes, & roux, 2011). L'enveloppe du bâtiment agit comme un séparateur entre l'environnement extérieur et l'environnement intérieur, ces derniers doivent notamment pouvoir résister à des pressions et répondre au confort intérieur sans affecter les besoins énergétiques de la bâtie. Ces exigences créent un cadre très vaste permettant d'établir des échanges entre le bâtiment et son environnement, conduisant ainsi à la nécessité de prendre des décisions pour améliorer les composants de l'enveloppe du bâtiment.

1.1.1 Définition et généralités

« Une véritable conception de bâtiment suppose la connaissance de tout ce qui concerne les échanges thermiques à travers les parois que constituent leurs enveloppes » (Fernandez et Lavigne, 2009, p. 123). De ce point de vue, on déduit que l'enveloppe du bâtiment est l'un des composants les plus importants qui peuvent réduire la demande d'énergie ainsi que les émissions de dioxyde de carbone qui en découlent. Elle permet d'isoler l'environnement intérieur de ce qui l'entoure tout en maintenant une ambiance confortable à l'occupant, empêchant ainsi la chaleur de se dissiper de l'intérieur vers l'extérieur en hiver et de se pénétrer vers l'intérieur pendant la saison estivale. Il faut considérer que toutes les parties de l'enveloppe du bâtiment, qu'elles soient au-dessus ou sous le niveau du sol, forment ensemble un système complexe qui implique trois composantes intimement liées :

- L'environnement extérieur ;
- L'enveloppe du bâtiment ;
- L'environnement intérieur.

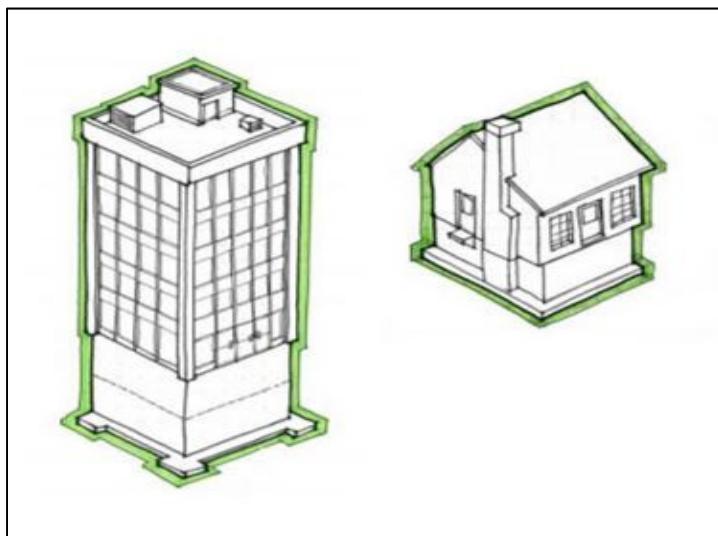


Figure 1.1 Enveloppe du bâtiment comme une barrière Protectrice tirée du cours de Maref (2020)

Les composants de l'enveloppe du bâtiment diffèrent d'une région à une autre et se réfèrent à plusieurs facteurs comme les matériaux présents localement, les traditions et le climat, etc.

En général les composants de l'enveloppe sont :

- Structure ;
- Enveloppe horizontale : toit et sol ;
- Enveloppe verticale : mur et fondation.

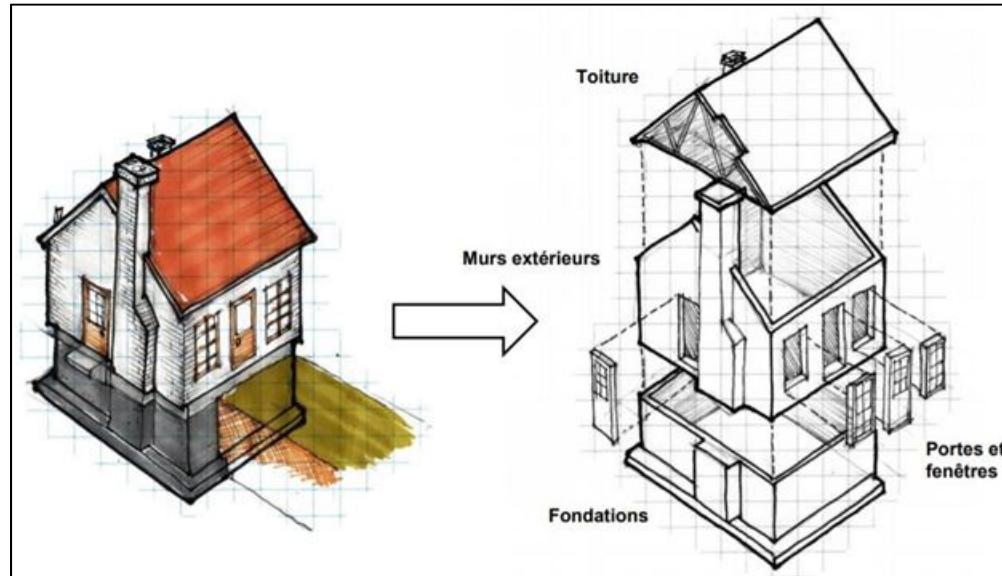


Figure 1.2 Les composants de l'enveloppe du bâtiment type unifamilial de Faible hauteur tirée du cours de Maref (2020)

L'enveloppe du bâtiment qui est une frontière assurant la transition entre deux milieux contrastés doit pouvoir résoudre la migration de vapeur d'eau causée par la différence de pression causée par le mouvement de l'air (infiltrations ou exfiltrations). Le matériau isolant de l'enveloppe du bâtiment est la clé de son fonctionnement normal. Par conséquent, la performance du bâtiment, entre autres facteurs, doit également être liée au choix des matériaux d'isolation pour son enceinte, pour une meilleure minimisation des ponts thermiques et l'étanchéité à l'air.

1.1.2 L'enveloppe du bâtiment et son rôle de modulateur thermique

La notion du bien être thermique est plus large que celle de confort thermique. Au-delà de ce dernier qui correspond à l'absence de sensation physique désagréable, le bien être thermique fait intervenir des facteurs culturels et psychologiques. Le corps humain se maintient à 37 °C environ par un apport de calories provenant des aliments, et par un ensemble de mécanismes qui régulent ses échanges thermiques avec son environnement (Oliva, 2001). Dans un bâtiment ces échanges thermiques se font autour de son enveloppe, se produisant tous en même temps et ils jouent un rôle important dans l'équilibre thermique d'un bâtiment. De ce fait, il est nécessaire de connaître les trois modes de transfert de chaleur qui sont :

- Convection : la chaleur se transmet lorsqu'un fluide en mouvement (eau, air) transporte la chaleur d'un endroit à un autre ;
- Rayonnement : la chaleur se propage par les ondes ultraviolettes, infrarouges ou par la lumière visible ;
- Conduction : Le mouvement de chaleur par conduction est un échange d'énergie direct entre deux corps en contact qui ne sont pas à la même température. Le mouvement de chaleur par conduction est proportionnel à la conductivité du matériau et au différentiel de température entre les deux surfaces du matériau.

Les principes de la thermodynamique démontrent que l'énergie calorifique ne disparaît jamais. Elle ne fait que se déplacer ou se transformer vers une autre forme d'énergie. Le flux thermique qui s'établit à travers l'enveloppe du bâtiment entre l'environnement intérieur et extérieur respecte toujours le principe du plus chaud qui perd de l'énergie et le plus froid qui en gagne (Oliva, 2007). En d'autres termes, le froid n'existe pas et c'est ainsi que le soleil chauffe la terre. Dans un système de mur ou d'enveloppe, l'isolation empêche la chaleur de partir en suivant le chemin qu'elle connaît. C'est évident en hiver. En été, elle empêche la chaleur extérieure d'envahir l'intérieur, en suivant les mêmes chemins en sens inverse (Oliva, 2007). La barrière placée sur ces chemins, c'est l'isolation. Cette dernière contrôle ce qu'on appelle les modes de déperdition thermique qui sont :

Les déperditions surfaciques : Ce sont les déperditions à travers les parois, qu'elles soient opaques (murs, toitures, etc.) ou vitrées. Elles sont particulièrement fortes à travers les vitrages, plus difficiles à isoler que les parois opaques. Les déperditions surfaciques représentent jusqu'à 60 % de l'ensemble;

Les déperditions par les ponts thermiques : Les ponts thermiques sont les zones de passage des calories, principalement aux jonctions des parois entre elles. Selon les techniques constructives et les systèmes d'isolation mis en œuvre, elles peuvent varier de 5 à 25 % de l'ensemble, cette proportion croissant avec la réduction des déperditions surfaciques ;

Les déperditions par renouvellement d'air : Elles comprennent la ventilation, indispensable à la salubrité de l'air intérieur, mais aussi les infiltrations non souhaitées et non contrôlées (étanchéité des huisseries, conduits de fumées, etc.) qui augmentent avec la vitesse du vent (Oliva, 2007).

« Le rôle de l'isolation est d'interposer entre l'intérieur et l'extérieur une barrière au passage des calories au moyen de matériaux ayant une capacité de conduction la plus faible possible » (Oliva, 2007).

L'évaluation de la qualité d'un système de mur ou d'une enveloppe de bâtiment attache une grande importance à la détermination de l'épaisseur des matériaux qui les constituent ainsi que leurs propriétés thermophysiques. Selon (Lavigne, Brejon et Fernandez) « on comprend déjà que le confort des édifices dépend des matériaux qui les constituent » (Lavigne, Brejon et Fernandez, 1994, p. 33). La caractérisation thermophysique agit directement sur le bien être thermique des occupants du bâtiment.

1.1.2.1 Les propriétés thermophysiques des matériaux de construction

Les propriétés thermiques des matériaux de construction doivent être connues pour orienter le choix de leurs utilisations. Les matériaux possèdent plusieurs propriétés thermiques parmi eux nous distinguons :

- La conductivité et la conductance (mouvement de chaleur)

La « conductivité » (k) est une propriété physique du matériau qui consiste en sa capacité de permettre plus ou moins facilement le mouvement de chaleur. La conductivité est définie par la quantité de chaleur qui traverse une couche d'un mètre d'épaisseur d'un matériau,

pour une différence de température d'un kelvin (K) et pendant une seconde(s). Le coefficient de conductivité (symbolisé par k) est exprimé en watt par mètre par kelvin, soit W/m•K.

La « conductance » (C_{si}) correspond à la conductivité d'un matériau (k) pour une épaisseur spécifique (L) et est exprimée en W/m² •K.

$$k = C_{si} \times L \quad (1.1)$$

C_{si} : La conductance

L : L'épaisseur spécifique

➤ La résistance thermique

Dans le domaine de la construction, on réfère souvent au concept de la résistance thermique (valeur RSI) qui est exprimée en m² •K/W. Cette dernière est la capacité d'un corps à s'opposer au transfert de la chaleur.

$$RSI = \frac{1}{C_{si}} \quad (1.2)$$

Même si c'est le système métrique (SI) qui est utilisé au Canada, les valeurs données pour les matériaux de construction en Amérique du Nord sont encore souvent en unités du système impérial, dans lequel la « Valeur R » est exprimée en : ft² •°F•hr/Btu. La conversion de la valeur R en RSI et vice-versa se fait par les formules suivantes :

$$R = RSI \times 5,678 \quad (1.3)$$

$$RSI = R \div 5,678 \quad (1.4)$$

Pour calculer la résistance thermique totale d'un assemblage constitué de couches homogènes en séquence, il suffit d'additionner les résistances thermiques individuelles des matériaux c'est ce qu'on appelle la résistance « nominale ».

Si les couches successives d'un mur ne sont pas homogènes, on constate que la résistance thermique serait différente selon qu'on la calcule vis-à-vis du colombage ou vis-à-vis l'isolant. De ce fait, il est capital de calculer une valeur RSI « effective » qui tient compte des effets des éléments tels que l'ossature du mur (colombages) voir figure 1.3.

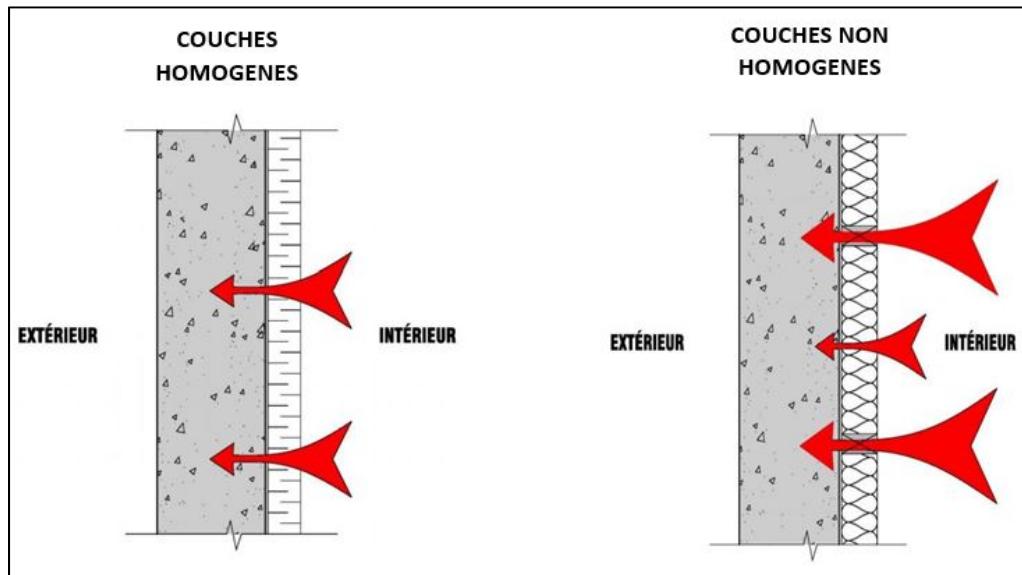


Figure 1.3 Un assemblage de mur constitué de couches homogènes et non homogènes tiré de Maref (2020)

Une valeur RSI effective est calculée sur la base de la résistance thermique totale de chacune des trajectoires et de la proportion qu'elles occupent par rapport à l'aire totale de la portion d'assemblage considérée (Maref, 2020). Dans un système d'enveloppe, tous les matériaux ont une valeur de résistance thermique. Plus cette dernière est élevée, plus le matériau résiste à l'écoulement de la chaleur. La valeur RSI effective se calcule avec la formule suivante :

$$RSI_{\text{eff}} = \frac{100}{((\% \text{ air avec ossature}/RSI_{\text{tot ossature}}) + (\% \text{ air sans cavitée}/RSI_{\text{tot cavitée}}))} \quad (1.5)$$

➤ Coefficient de transmission de chaleur « U »

On réfère aussi souvent à un coefficient de transmission de chaleur « U » plutôt qu'une Valeur RSI. Ce coefficient indique la quantité de chaleur qui traverse un mètre carré de surface d'un assemblage d'une épaisseur particulière en une seconde, lorsque la différence de température de l'air entre les deux côtés de la surface est d'un kelvin.

Elle est donc équivalente à la conductance C_{si} . On utilise le plus souvent le coefficient « U » pour exprimer la conductance globale d'un assemblage comportant des matériaux différents et des éléments d'ossature.

Le coefficient U est exprimé en watt par mètre carré par kelvin ($U = \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), soit l'inverse de la résistance thermique « RSI ». Aux États-Unis, la Valeur « U » est exprimée en $\text{Btu/hr}\cdot\text{ft}^2 \cdot {}^\circ\text{F}$.

Le coefficient de transmission de chaleur se calcule par la formule suivante :

$$U = 1/RSI \quad (1.6)$$

➤ L'inertie thermique ou masse thermique

La capacité de stockage thermique des matériaux détermine leurs inerties. Les matériaux emmagasineront la chaleur du soleil pendant la journée. Pendant la nuit, alors qu'il n'y a plus de source de chaleur et qu'il fait plus froid, les matériaux réémettront dans le bâtiment la chaleur qu'ils auront accumulée. Le temps que va mettre la chaleur pour pénétrer à l'intérieur de la bâtie correspond au déphasage. L'inertie thermique appelée aussi masse thermique peut servir à la fois d'apport « passif » de chauffage solaire et de climatisation. Elle est l'un des outils principaux de l'architecture bioclimatique.

➤ La diffusivité thermique des matériaux

La diffusivité thermique (α en m^2/s) décrit la rapidité d'un déplacement des calories à travers la masse d'un matériau. Plus la diffusivité est faible, plus la chaleur met du temps à traverser la composition du mur extérieur.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (1.7)$$

➤ L'effusivité

L'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe les calories. L'effusivité caractérise le chaud (faible effusivité thermique) ou la sensation de froid (grande effusivité thermique) des matériaux en contact avec leur environnement extérieur ou intérieur.

$$E = \sqrt{\lambda p C} \quad (1.8)$$

➤ La chaleur spécifique

C'est la capacité d'un matériau à emmagasiner la chaleur par rapport à son poids. Elle est définie par la quantité de chaleur à apporter à 1 kg du matériau pour éléver sa température de 1 °C. Elle s'établit selon la relation suivante pour M = 1 kg :

$$C = \frac{Q}{M \cdot \Delta T} \quad (1.9)$$

C : représente la chaleur spécifique du matériau (kJ/Kg. °k) ;

Q : représente la quantité de chaleur (kJ) ;

M : représente la masse (kg) ;

ΔT : représente l'accroissement de température (°k).

➤ La densité ou masse volumique

La masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. En règle générale, plus le matériau est lourd, plus sa capacité thermique augmente. Cette dernière est le produit de la chaleur spécifique par la densité du matériau. Elle s'exprime en kilojoules par m³ et par °C (kJ/m³.°C).

➤ Le flux de chaleur surfacique

Le flux de chaleur traversant un système de mur s'établit par la relation suivante :

$$\Phi = H * \Delta T \quad (2.0)$$

Φ : flux thermique (W) ;

H : conductance pour un ensemble (W/°k) ;

ΔT : accroissement de température (°k).

Où

$$\text{Avec : } \varphi = u * \Delta T \quad (2.1)$$

φ : densité de flux (W/m²) ;

u : conductance pour une unité de surface (W/m². °k) ;

ΔT : accroissement de température (°k).

1.1.3 Enjeux climatiques et son impact sur l'enveloppe du bâtiment

Le climat est un facteur capital qui influe sur le choix des matériaux pour l'enveloppe du bâtiment ainsi que l'architecture de la construction et de son implantation (Figure 1.4). Des

paramètres tels que la typologie, la distribution des espaces, le dimensionnement des ouvertures, le traitement d'enveloppe, l'emplacement et la variation de l'orientation sont à prendre en considération dans la conception du bâtiment et ceci en s'adaptant au potentiel climatique local. Ce dernier est le principal facteur sur lequel se base le concepteur pour établir un lien entre les décisions et les impacts énergétiques (Schlueter & Thesseling, 2009).

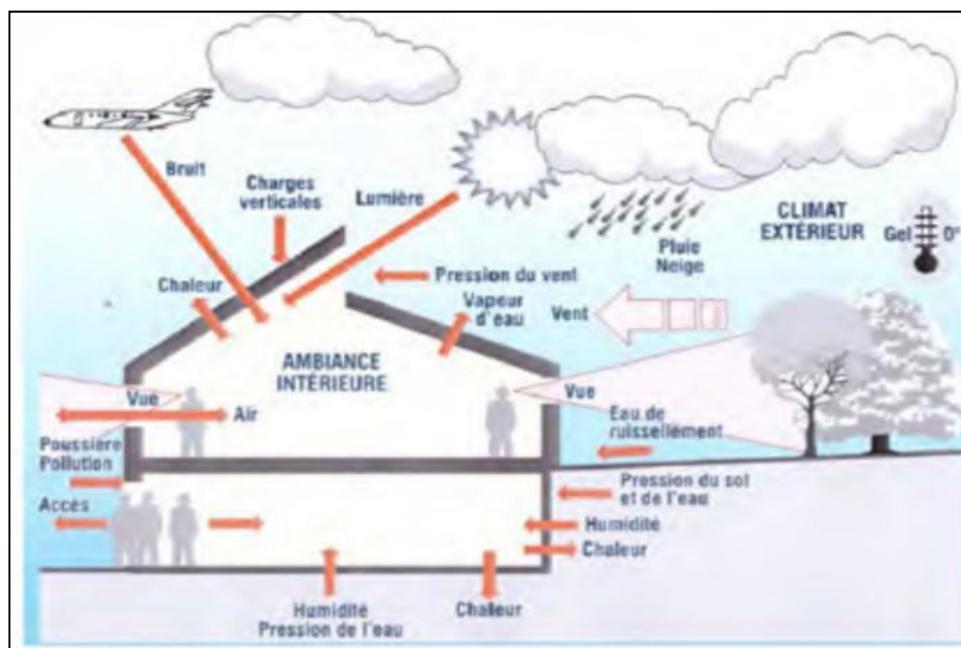


Figure 1.4 Sollicitation extérieure que subit l'enveloppe d'un bâtiment
tiré de Bernard Sesolis (2015)

« La sévérité du climat influence la consommation d'énergie en chauffage et en refroidissement. De plus, les matériaux utilisés pour la conception de l'enveloppe du bâtiment jouent un rôle abondant dans l'absorption, le stockage et la distribution de l'énergie réfléchis par le rayonnement solaire » (Hauglustaine et al., 2006). « Les composants extérieurs de l'enveloppe subissent l'effet de la pluie, de la neige et de l'humidité extérieure (voir Figure 1.5), qui forment la première et la deuxième ligne de défense. Ces effets combinés au manque d'étanchéité de l'enveloppe exposent les panneaux structuraux, comme l'OSB (Panneau à copeaux orientés) et le contreplaqué au risque de condensation interstitielle et de dégradation comme la moisissure » (Maref W., 2011, 2015a, 2015 b,

2018). La présence d'eau dans les matériaux de l'enveloppe sensibles à l'humidité est la principale cause de détérioration du bâtiment. Les matériaux exposés aux conditions extérieures doivent être choisis et installés de façon à pouvoir y résister tout au long de leur durée de vie utile. La résistance à la pluie et aux intempéries est plutôt reliée à l'application de stratégies générales visant à éliminer ou à minimiser une des conditions nécessaires à la pénétration de la pluie.

Les conditions favorisant la pénétration de la pluie sont :

- La présence d'eau à la surface de l'assemblage ;
- Un orifice par lequel l'eau peut s'infiltrer ;
- Une force pour faire pénétrer l'eau à travers les orifices.

Pour ce faire, il existe plusieurs mesures et stratégies pour minimiser la fréquence, la quantité et la durée d'exposition à l'eau des divers composants du système de mur :

- Déviation : mesures de conception et de construction prises en vue d'empêcher l'eau d'atteindre la surface du bâtiment.
- Drainage : vise à minimiser la durée d'exposition des matériaux en évitant l'accumulation d'eau dans le mur.
- Assèchement : vise principalement la réduction du temps d'exposition des matériaux à l'humidité en lui permettant de s'évacuer hors de l'enveloppe du bâtiment.
- Protection des matériaux sur le chantier : l'humidité présente dans les matériaux au moment de leur mise en œuvre peut conduire à de sérieux problèmes.

Chacune des stratégies utilisées n'éliminera pas à elle seule toute l'eau pouvant atteindre la surface d'un l'assemblage. Il est impossible d'éviter complètement que de l'eau n'atteigne la surface d'un bâtiment par contre, l'utilisation des stratégies combinées peut permettre de contrôler la « charge » sur l'enveloppe de façon significative. Cependant, d'autres approches de la gestion d'eau doivent être installées comme les pares-intempéries constituant ainsi une deuxième ligne de défense. Le revêtement extérieur, la cavité d'air ainsi que le pare-

intempéries sont des éléments constituants un écran pare-pluie. Ce dernier est composé essentiellement de :

- Un pare-air continu ;
- Une lame d'air ventilée à l'extérieur ;
- Une membrane de protection contre l'humidité ;
- Moyens d'écoulement ;
- Une compartimentation de la cavité.

Les écrans pare-pluie dans un système d'enveloppe permettent d'éliminer la force motrice qui favoriserait la pénétration de l'eau dans l'assemblage de mur extérieur à travers l'élimination de la différence de pression d'air de part et d'autre du parement.

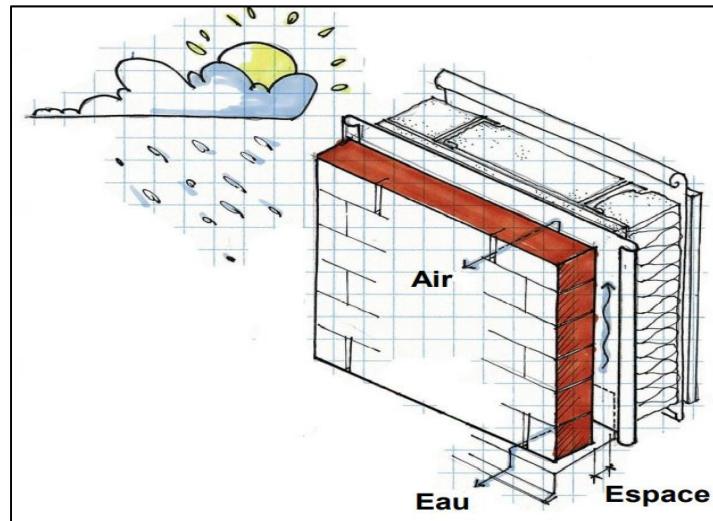


Figure 1.5 Un écran pare-pluie est une protection de l'enveloppe du bâtiment contre l'eau, la neige et les intempéries tirée de Maref (2020)

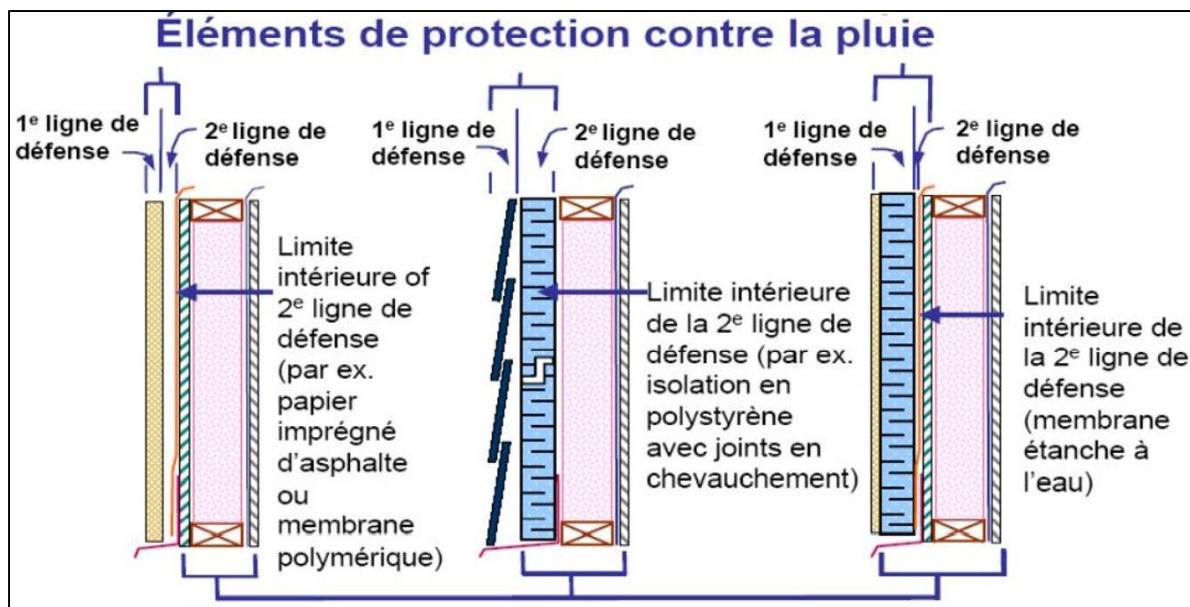


Figure 1.6 Contrôle de la chaleur, de l'air et de la vapeur avec des éléments structuraux et non structuraux tirée de Maref (2020)

1.2 Consommation énergétique contexte et enjeux

Le phénomène des émissions de gaz à effet de serre (GES) est un sujet d'actualité auquel toute la planète se penche afin de le réduire par des actions plus ou moins concrètes. Les immeubles, les entreprises connexes et leur environnement émettent une grosse quantité de (GES) gaz à effet de serre, utilisent énormément de ressources naturelles et consomment énormément d'énergie. (Sozer, 2010). « Le secteur de la construction est le troisième émetteur de GES après l'industrie et le transport » (Ressources naturelles Canada, 2016). « Le secteur résidentiel est responsable d'une grande partie de la consommation d'énergie dans le monde » (Pacheco, Ordóñez, & Martínez, 2012). « Au Canada en général, la demande en chauffage des bâtiments résidentiels représentait 62 % de la consommation d'énergie totale en 2013 » (Ressources naturelles Canada, 2016-2017 ; Whitmore & Pineau, 2018). « Illustrés par la Figure 1.7, en 2015 au Québec la demande d'énergie dans les bâtiments est de 31 % de la consommation d'énergie totale dont 19 % sont destinées au bâtiment résidentiel voir figure 1.8 a. Et en 2014, 64 % de la consommation totale d'énergie des

bâtiments résidentiels est pour le chauffage à lui seul voir figure 1.8 b » (ressource Naturelle Canada, 2017).

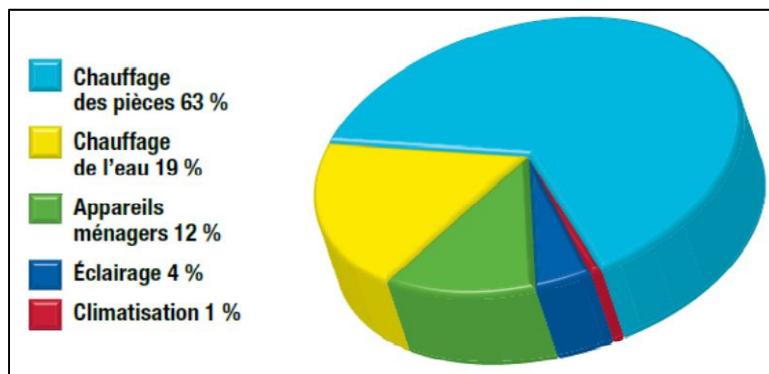


Figure 1.7 Demande d'énergie des bâtiments résidentiels au Canada 2013 tiré de Al Fayad & Maref et Awad (2021)

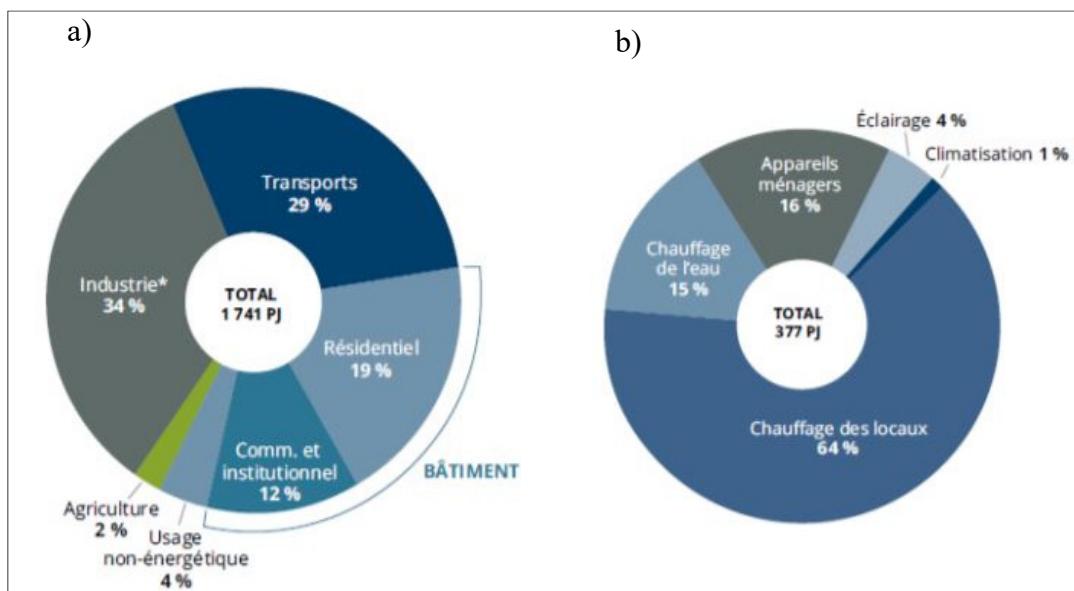


Figure 1.8 Demande d'énergie des bâtiments résidentiels au Québec tirée de Whitmore & Pineau (2018, p.25 & 34)

Au fil des années, les principaux changements démographiques et leurs conséquences sur les modes de vie de notre société ont favorisé une demande excessive des systèmes de chauffage et de climatisation. « En 2050, la population du Québec sera d'un peu plus de

9,8 millions d'habitants et en 2061 elle dépassera les 10 millions d'habitants » (Institut de la statistique du Québec, 2014). Aujourd'hui, le nombre de constructions à usage d'habitation ne cesse d'augmenter. Causé essentiellement par le contexte de la croissance démographique, ce phénomène a affecté indirectement les sources émettrices de GES et les besoins énergétiques. « En 2011, les émissions de GES représentaient au total 700 Mteq. CO₂ et en 2013, 716 Mteq. CO₂ soit 16 Mteq CO₂ de plus en 2 ans au Canada » (Environnement et Changement climatiques Canada, 2018). « Et 46 Mteq.CO₂ sont attribuées à l'émission de GES des bâtiments résidentiels en 2011 et 44 Mteq.CO₂ en 2013, soit une réduction de 2 Mteq.CO₂ en 2 ans » (Environnement et Changement climatiques Canada, 2018). « La demande en chauffage des locaux résidentiels représente 61,1 % de la consommation totale résidentielle et la climatisation 1,5 % en 2011, tandis qu'en 2013, le chauffage représente 63 % et la climatisation 1 %, soit une augmentation de 1,9 % pour le chauffage et une réduction de 0,5 % pour la climatisation » (Politique énergétique 2011-2025). La Figure 1.9 représente les émissions de gaz à effet de serre des constructions à usage d'habitation par scénario allant de 2005 à 2030.

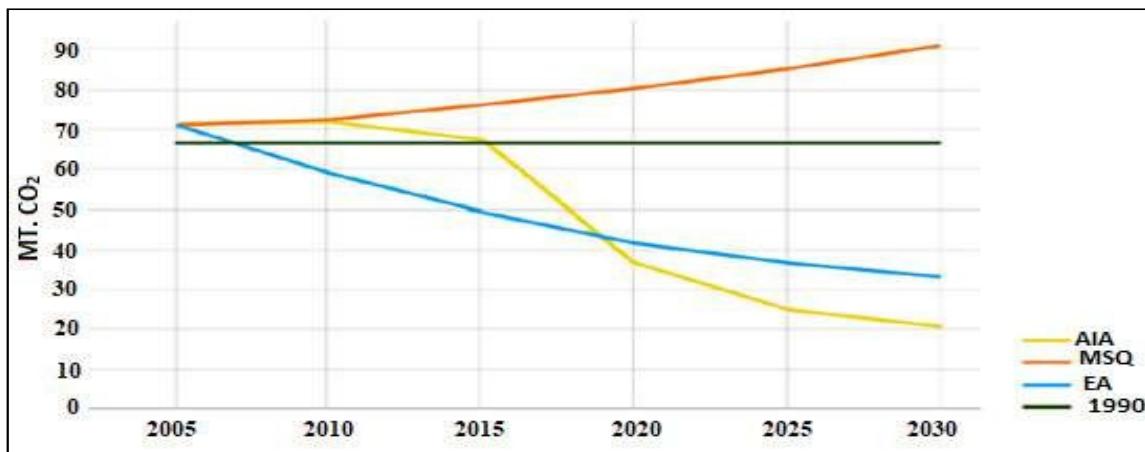


Figure 1.9 Émission de GES du secteur résidentiel, par scénario Canada
AIA : Amélioration continue du rendement énergétique, Défi 2030
MSQ : Maintien du statu quo ou maintien à l'état actuel sans prise de décision
EA : Ecologisation accélérée tiré de Simard (2009, p.26)

Afin d'arriver aux objectifs environnementaux et économiques fixés par le Canada en matière de besoins énergétiques, il est nécessaire d'intégrer des pratiques, des politiques et

des comportements propices à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments afin de réaliser un virage vers une démarche plus sensible à la composante environnementale. « Les gouvernements fédéraux, provinciaux et territoriaux travailleront ensemble dans le but d'être en mesure d'exiger dès 2019 l'étiquetage de la consommation énergétique des bâtiments. L'étiquetage fournira aux consommateurs et aux entreprises des renseignements transparents sur le rendement énergétique » (Maref, 2020). De plus une nouvelle politique a été adoptée visant à optimiser les nouvelles constructions et améliorer les bâtiments existants à travers un processus qui mène vers la performance Net Zéro d'ici 2030 (voir Figures 1.10 et 1.11).

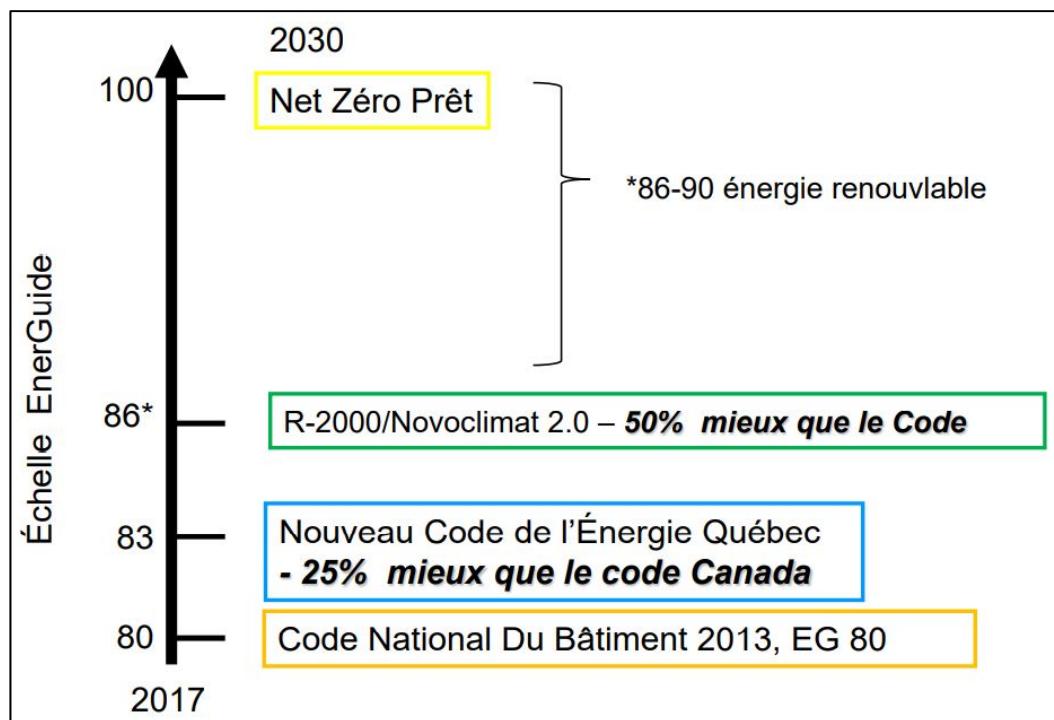


Figure 1.10 Illustré programme et codes énergétiques vers la performance Net Zéro pour les petits bâtiments tiré de Maref (2020)

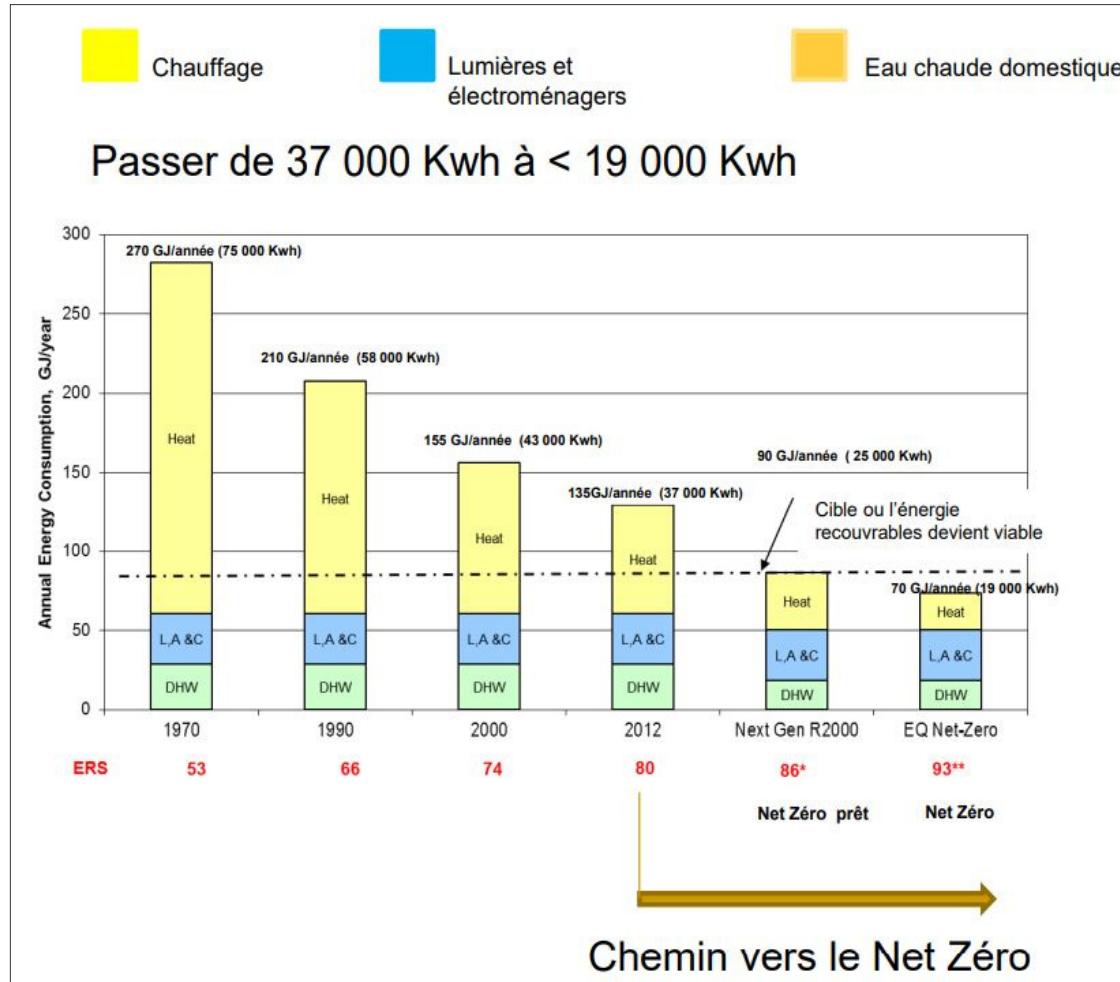


Figure 1.11 Illustré un bâtiment Net Zéro est un qui produit autant d'énergie qu'il en consomme annuellement prêt tirée de Maref (2020)

En 1995, la consommation énergétique de l'Algérie était de 25,3 MTEP, l'intrusion de produits gaziers était plus importante et la quantité disponible dans le bilan des ressources était plus importante. En termes de consommation finale, les secteurs des constructions à usage d'habitation et du tertiaire dominent (45,7 %), suivis du secteur des transports (27,8 %), puis de l'industrie (26,8 %) (Berghout, 2012). « La part de la consommation finale représente près de 62 % de la consommation nationale » (ministère de l'Énergie et des Minéraux, 2009) citée (Berghout, 2012). Entre 2000 et 2007, le taux de croissance annuel moyen de la consommation d'énergie en Algérie était d'environ 6,32 %. Au final, l'intensité énergétique atteint 6 TEP/MDA, soit 0,411 TEP pour 1 000 USD de PIB, soit le double de

celle des pays de l'OCDE (Berghout, 2012). « L'économie algérienne consomme deux fois plus de valeur ajoutée qu'elle crée la même unité, et l'intensité énergétique primaire est de 3,82 TEP/MDA, soit 0,27 TEP/1 000 USD » (ministère de l'Énergie et des Ressources minérales, 2009) cité Berghout (2012).

Tableau 1.1 Organisation des contenus sur le thème de l'énergie tiré du ministère de l'Énergie et des mines (2009)

Consommation finale par secteur d'activité (10³ TEP)	2006		2007		2008		2009	
	KTEP	(%)	KTEP	(%)	KTEP	(%)	KTEP	(%)
Industrie et BTP	6507	25.3	6779	24.60	7130	24.60	7380	24.00
Transport	6035	23.5	6450	23.40	9384	32.40	10264	33.40
Ménages et Autres	13173	51.2	14308	52.00	12442	43.00	13063	42.50
TOTAL	25715	100.00	27537	100.00	28956	100.00	30707	100.00

De 2008 à 2009, la consommation finale est passée de 29 à 30,7 MTEP, soit une croissance de 6 %. Par secteur d'activité. L'analyse du tableau est présentée comme suit :

Secteurs industrie et BTP ont connu une hausse de 3,5 %, pour atteindre 7,4 MTEP en 2009 ;

Secteur transports a connu une croissance de 0,9 % soit 10,3 MTEP en 2009 contre 9,4 MTEP en 2008 ;

Secteurs ménages et autres ont augmenté de 5,0 %, soit de 12,4 MTEP en 2008 à 13,1 MTEP en 2009. (Berghout, 2012).

Dans le secteur résidentiel, la consommation finale a atteint 6,5 millions de TEP, la consommation énergétique moyenne par habitant était de 0,581 TEP/personne et la consommation énergétique annuelle moyenne des logements était de 1,048 TEP. La consommation du secteur résidentiel électrique a atteint 770 KTEP. C'est 33 % de la consommation électrique totale. Et les produits gazeux atteignent 436 KTEP, représentant 70 % de la consommation totale de produits gazeux. Le secteur résidentiel est donc « le plus gros consommateur d'électricité du pays » (ministère de l'Énergie et des Mines, 2009).

En étudiant ces constats, la forte consommation de gaz naturel et d'électricité dans les ménages peut être principalement attribuée à l'usage intensif du chauffage et de la

climatisation dans les deux périodes critiques de la saison, l'été et l'hiver. Il convient de mentionner que l'engagement de l'Algérie à l'égard de l'énergie renouvelable représente 0,006 % du bilan de production national. Par conséquent, diverses solutions passives sont nécessaires pour adopter les bons gestes permettant de réduire la consommation d'énergie.

La politique énergétique nationale en Algérie recommande vivement l'ajout des actions de l'énergie renouvelable. « L'objectif est d'atteindre une contribution de l'ordre de 18 % dans le bilan de production électrique pour l'horizon 2030 à travers les filières photovoltaïques, thermique solaire et éolienne » (ministère de l'Énergie et des Mines, 2009) citée par Berghout (2012).

De ce qui précède, et tel que mentionné par (Liuzzi, Sanarica, & Stefanizzi, 2017 ; Rahim, Douzane, Le, & Langlet, 2016) « intégrer les matériaux biosourcés dans la construction représente une solution pour contribuer à la réduction des émissions des gaz à effet de serre ». La force de ces matériaux provient de ce que nous essayons de réduire à savoir les émissions de gaz à effet de serre (GES). À titre d'exemple, le béton de chanvre qui est un excellent régulateur thermique est l'un des matériaux présentant de nombreux avantages écologiques et économiques s'il est intégré dans un système d'enveloppe. Et peut être utilisé dans les pays à climat humide dont le Canada et les pays à climat semi-aride comme l'Algérie.

1.3 Les produits de construction

Le choix des matériaux a beaucoup d'influence sur le bilan écologique global. En effet, « la fabrication des produits et la construction sont ponctuelles, alors que les flux d'énergie, d'eau et de déchets se cumulent sur toute la durée de vie du bâtiment. Ceci est a fortiori vrai pour les bâtiments existants, encore plus consommateurs d'énergie » (Peuportier, 2008). La consommation d'énergie totale de l'industrie des matériaux de construction est estimée à 3 millions de TEP (Peuportier, 2008). De ce fait, la contribution des matériaux de construction est un paramètre non négligeable dans le bilan environnemental global et un

compromis doit être trouvé (toute en considérant les éléments contradictoires lors du choix du matériau) entre les performances souhaitées, les fonctionnalités des produits et leurs avantages esthétiques, la durabilité, la non-toxicité, l'utilisation de matière recyclée, recyclable, renouvelable ou de matériaux dont la production et la mise en œuvre sont peu polluantes. En supposant qu'aucun matériau ne puisse répondre à toutes ces conditions à la fois, une sélection par ordre de priorité des critères mentionnés est plus que nécessaire afin de maîtriser l'économie des matériaux et préserver ainsi les ressources.

La science des matériaux repose essentiellement sur la connaissance des comportements mécaniques et les propriétés physiques, sur cette base l'ingénieur qui conçoit l'ouvrage peut mieux prédire la rétroaction des matériaux lorsqu'ils sont soumis aux charges mortes et vives. Les principales propriétés et comportements à considérer pour les familles de matériaux couramment utilisés pour composer l'enveloppe du bâtiment sont :

- Les propriétés physiques : Incluent les propriétés hygrothermiques dont entre autres, la conductivité thermique, la perméabilité à la vapeur d'eau et à l'air, la dilatation thermique, etc. ;
- Les propriétés mécaniques : Les matériaux doivent être en mesure de résister aux charges mortes et vives (les charges de neige et de pluie, la pression de l'air et du vent et les impacts) auxquelles ils seront soumis ;
- Les agents de détérioration : Ils incluent l'eau/l'humidité, le soleil et la chaleur de même que des agents chimiques avec lesquels les matériaux pourraient être en contact. En fonction de leurs propriétés physiques et chimiques, tous les matériaux ne sont pas affectés de la même façon par ces facteurs ;
- La comptabilité ;
- La durabilité : Certains matériaux sont inertes et résisteront généralement bien avec le temps, d'autres sont de nature organique et se décomposeront ;
- Le comportement au feu ;

- Les impacts environnementaux : Les principales considérations environnementales sont le contenu de matière recyclée, la provenance, les déchets générés, l'exploitation des ressources et les matériaux faits à partir de matière non renouvelable ;
- Les effets sur la qualité de l'air ;
- Les propriétés acoustiques ;
- Les coûts à long terme : Dans la plupart des projets, les coûts sont au centre des préoccupations du chargé de projet. Il ne faut pas seulement considérer le coût initial, mais le coût sur tout le cycle de vie des matériaux et du bâtiment pour un meilleur bénéfice.

Il existe une grande variété de systèmes et de matériaux qui inclut principalement le béton, l'acier, le bois, les produits d'isolation, etc. L'acier est un métal composé entre autres de fer et de carbone. L'acier est résistant en compression, mais particulièrement en tension. Grâce à sa résistance, l'acier est un matériau de construction aux multiples avantages utilisé entre autres comme élément structural, matériau de protection et de finition. Selon les aciers, la teneur en carbone est comprise entre environ 0,005 % et 1,5 % en masse. Elle monte très rarement jusqu'à 2 %. Cette dernière rend l'acier plus fragile, ce qui ne convient pas aux différentes étapes d'une construction. La résistance ultime de l'acier est d'environ 400 à 500 MPa (58-72,5 KSI). C'est aussi un matériau ductile, qui cède ou se déforme avant rupture. Par rapport aux structures en béton similaires en cours de construction, son poids relativement léger et sa facilité de travail de construction lui confèrent plus de rapidité de construction (Groupe technique skyciv, 2019).

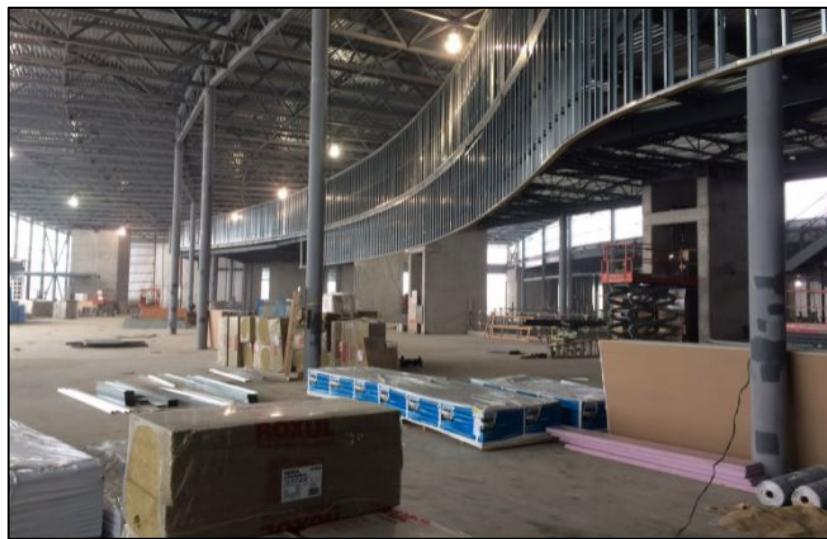


Figure 1.12 Illustration de l'installation du collobage métallique
(Groupe technique SKYCIV cloud engineering software logiciel
d'analyse structurelle, 13 février 2019)

Le béton est un matériau de construction obtenu grâce à un mélange de granulats, de sable, de ciment et d'eau ayant la consistance d'une pâte lors de sa mise en place et qui durcit ensuite par action chimique (l'hydratation) (Maref, 2020). Le béton est un des matériaux de construction les plus polyvalents et les plus utilisés au monde. Il offre des possibilités quasi illimitées pour la construction.

Le béton est issu d'un mélange de :

- Ciment Portland : fabriqué principalement à l'aide de deux matières premières : du calcaire (chaux, gypse) et de la matière argileuse ;
- Eau : L'eau dans le mélange de béton a un double rôle : l'hydratation de la poudre de ciment et la facilitation de la mise en œuvre (ouvrabilité) du béton ;
- Granulats les granulats sont généralement divisés en deux groupes : les fins (le sable) et les gros (du gravier ou autre type de pierre concassée). Ils sont ajoutés au mélange du béton pour donner des propriétés spécifiques telles la résistance mécanique, la texture et l'apparence ;

- Aire et adjuvant contribuent à améliorer la résistance du béton aux cycles de gel/dégel. Ajouter pour modifier les propriétés. Par exemple : adjuvants entraîneurs d'air, plastifiants (facilitant la coulée) ou encore accélérateurs ou retardateurs de prise.



Figure 1.13 Illustré exemple typique de béton armé
(Groupe technique SKYCIV cloud engineering software logiciel
d'analyse structurelle, 13 février 2019)

Le bois est un matériau noble, naturel d'origine végétale. Disponible en abondance, il est écologique, récupérable et renouvelable à condition qu'on ne coupe pas les arbres plus rapidement qu'ils ne poussent. Dans l'industrie de la construction, le bois ne cesse de surprendre par sa polyvalence, sa résistance et sa durabilité. Il est l'un des matériaux les plus communément utilisés en construction en Amérique du Nord. On distingue deux grandes familles de bois, soit le bois provenant des arbres feuillus, communément appelé « bois franc » parce qu'il est plus dense, et le bois provenant de résineux, nommé « bois tendre ». Le volume de bois est beaucoup plus léger que le béton et l'acier, il est simple d'utilisation et adaptable sur le terrain, le bâtiment en ossature de bois le plus haut de la planète compte 18 étages. Le code du bâtiment du Canada permet la construction en structure de bois pour 6 étages et moins. Cependant, le Canada a prévu dans le code de

2020 une nouvelle autorisation permettant de construire des immeubles en ossature de bois allant jusqu'à 12 étages. Le bois présente également l'avantage d'être un très bon isolant thermique, grâce à sa capacité de réduire le pontage thermique contrairement aux produits tels que le béton et l'acier.

Chaque matériau a ses propres avantages et inconvénients et du point de vue écologique le bois est plus efficace que le béton et l'acier. Le bois est une ressource renouvelable, à condition qu'on ne coupe pas les arbres plus rapidement qu'ils ne poussent. D'après l'analyse de cycle de vie qui est une méthode d'évaluation rigoureuse, pour déterminer l'ensemble des ressources et l'énergie nécessaire à la fabrication d'un produit donné, le bois à moins d'impact environnemental. Les produits en bois sont beaucoup moins négatifs sur l'environnement. Selon (Pajchrowski, Noskowiak, Lewandowska, & Strykowski, 2014), les bâtisses construites en bois sont moins énergivores qu'aux ceux en béton ou en acier. De ce qui précède, on déduit que le matériau du bois dans l'industrie de la construction restera pertinent pour les décennies à venir.

Il existe certains matériaux conçus spécialement pour résister à l'écoulement de la chaleur nommés les matériaux isolants. Ces derniers « doivent avoir la capacité de résister aux fortes températures, à l'humidité, aux animaux et aux micro-organismes » (Oliva, 2007). Le rôle d'une isolation est d'interposer entre l'intérieur et l'extérieur une barrière au passage du flux thermique au moyen de matériaux dont la conductivité thermique est la plus faible possible. On distingue trois groupes d'isolants : ceux à base végétale, ceux à base minérale et ceux à base de plastique alvéolaire. Aussi, il existe plusieurs types d'isolant qui sont définis comme suit :

- Vrac ;
- Matelas ;
- Panneaux rigides ;
- Panneaux semi-rigides ;

➤ Giclés.

Le Tableau 1.6 démontre les émissions de (GES) des matériaux utilisés dans l'industrie de la construction en valeurs. Contrairement à d'autres matériaux à valeurs positives, les valeurs des matériaux en bois et à ces formes sont négatives. La valeur négative obtenue à partir de l'analyse du cycle de vie du matériau liée aux émissions de CO₂ indique que le matériau contribue à réduire les émissions du (GES) (Evrard Arnaud & De Herde André, 2010). Alors que la valeur positive contribue au haussement de ces émissions. L'énergie grise est l'énergie totale nécessaire à un matériau depuis l'extraction de sa matière première jusqu'à son recyclage, en passant par l'activité du transport et de transformation. De plus, « Les émissions de CO₂ associées sont l'ensemble des rejets de dioxyde de carbone dans l'atmosphère due à la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et à la gestion de fin de vie de ces matériaux » (Evrard Arnaud & De Herde André, 2010 ; Niyigena, 2016b). De ce fait, les constats montrent que les isolants et les métaux contiennent de l'énergie et des émissions élevées de dioxyde de carbone et vu le contexte du réchauffement climatique qui est un enjeu extrêmement important, il est donc primordial de diminuer progressivement la production des matériaux ayant un impact négatif sur l'environnement.

Tableau 1.2 Énergie grise et émissions de dioxyde de carbone de différents matériaux de construction tiré de Arnaud & André (2010, p.16)

		Masse volumique [kg/m ³]	Energie grise [MJ/kg]	Emission de CO ₂ [kg CO ₂ /kg]
BETON	bloc creux	1200	0,91	0,14
	blocs lourd et semi-lourd	2000-2400	0,8	0,13
	charges élevées	2400	1,2	0,15
	dalle de sol/semelle filante	2400	0,8	0,13
	hourdis	1400	0,8	0,13
	béton cellulaire autoclavé	600	4,3	0,48
	béton léger argile expansée	1200	5,2	0,38
METAUX	béton maigre	2000	0,4	0,05
	acier-beaucoup d'alliage	7850	102,4	6
	acier- peu d'alliage	7850	32,4	1,8
	acier d'armature (100% recyclé)	7850	13,3	1,8
	aluminium-tôle	2700	116,1	7,18
	aluminium (100% recyclé)	2700	19,5	1,08
	cuivre- tôle	890	103	5,48
AUTRES MINERAUX	zinc-tôle	7150	84,5	4,93
	brique pleine	800-1000	5,2	0,38
	brique creuse	650	5,2	0,38
	pierre naturelle européenne/locale	2400-2800	0,3	0,01
ISOLANT	verre plat	2500	12,9	0,98
	cellulose-matelas souples	70	21,2	1,61
	cellulose-flocon	30	4,6	0,23
	laine de roche	60-130	22,7	1,6
	laine de verre	20-110	33,8	1,56
	perlite expansée	135-165	10,4	0,52
	polystyrène expansé (EPS)	15-30	120,4	4,01
	polystyrène extrudé (XPS)	15-20	108,4	3,73
BOIS ET DERIVES	polyuréthane (PUR)	40	106,5	13,7
	verre cellulaire	120-150	22,9	1,26
	MDF	750-800	39,5	-1,27
	OSB	500	45,8	-1,25
	panneaux de particules tendres	180	41	-0,09
AUTRES	bois lamelle colle	500	32,8	-1,26
	bois massif feuillu européen	800	40,3	-1,65
	bois massif résineux européen	600	31,4	-1,63
	étanchéité bitumineuse	1100	51,8	1,16
	linoléum	1200	60,8	0,37
	plaque de fibroplatre	1200	5,28	0,27
	plaque de platre cartonnée	900	5,8	0,22
	PVC-étanchéité	1200	22,2	2,19
	PVC-feuille	1500	86,9	3,91
	tapis plein synthétique	300	84,5	4,05
	viny	1500	86,9	3,91

1.3.1 La méthodologie constructive à ossature de bois et en acier

Afin d'améliorer les grands principes relatifs à la durabilité et le bon fonctionnement des systèmes d'enveloppe en bois ou en métal dans les pays froids et semi-arides, il est important de bien concevoir les plans critiques à savoir les éléments d'étanchéité constituant le mur extérieur tel que les pare-air, pare eau et pare-vapeur ainsi que d'assurer leurs continuités sur l'ensemble du système de mur. Un pare-air permet de contrôler les infiltrations ou exfiltrations d'air à travers la cavité d'enveloppe quand celle-ci est soumise à une différence de pression d'air. Cependant, le rôle du pare-vapeur est de contrôler la diffusion causée par une différence d'humidité de part et d'autre de la cavité, son emplacement donc doit être du côté chaud de l'isolant pour une meilleure performance surtout par rapport à la température de rosée. En plus de leur détermination de l'apparence visuelle du bâtiment, les revêtements extérieurs en aluminium, brique ou en parement de bois sont la première ligne de défense de l'enveloppe du bâtiment contre les intempéries et les pluies battantes (Frenette, 2009).

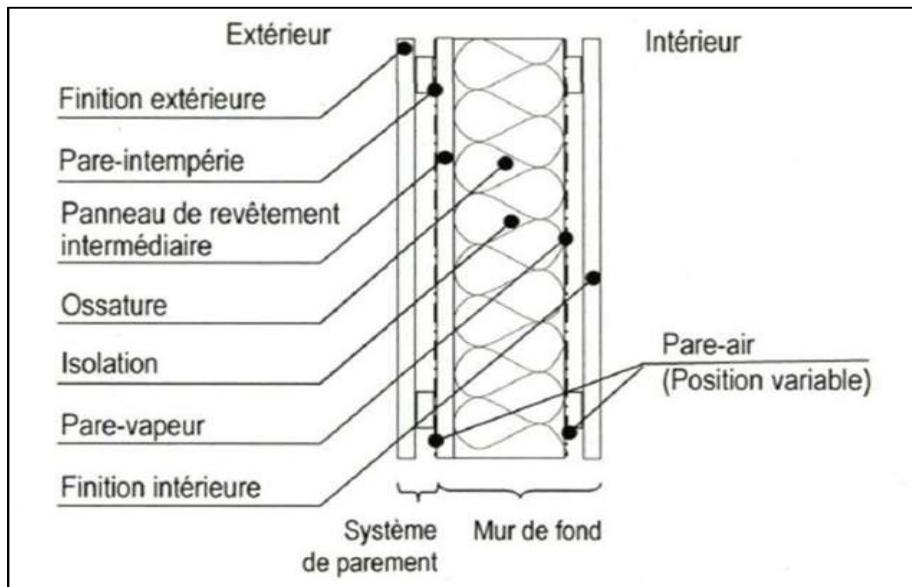


Figure 1.14 Illustration de la composition d'une enveloppe à ossature de bois
tiré de Frenette (2009, p.24)

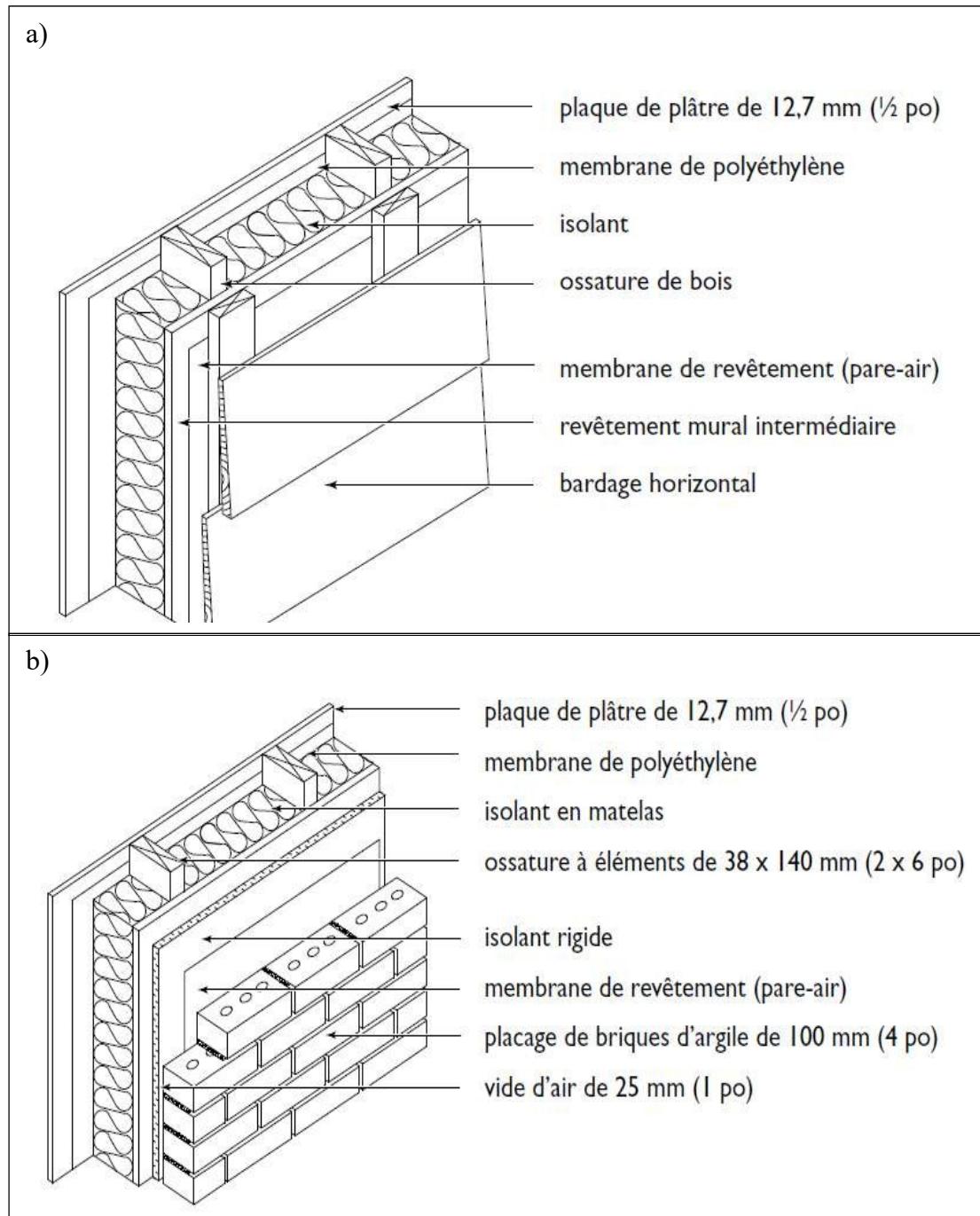


Figure 1.15 Exemple de murs à ossature de bois avec parement extérieur en brique et en vinyle tiré de SCHL (2013, p.79-80)

Le revêtement mural extérieur ou le manteau de la bâisse doit être choisi en prenant en considération les conditions climatiques de la région dans laquelle se trouve le bâtiment implanté. Vu son importance, il constitue la couche supérieure de l'enveloppe du bâtiment celle qui a pour rôle de résister aux diverses charges externes (conditions climatiques) empêchant ainsi la dégradation des murs. D'une manière générale, les différents types de revêtements extérieurs couramment utilisés dans l'industrie de la construction sont : le parement de vinyle, parement d'aluminium, parement de bois, panneaux de fibres de bois (cannexel), panneau de fibrociment, parement de brique, brique sans mortier, enduits acryliques et la suretouch ou pierre architecturale. Pour la finition intérieure, la plupart des designers optent sur des feuilles de gypse (5/8 pouce ou ½ pouce) parfois de type coupe-feu ou x pour répondre aux exigences des codes en vigueur surtout quand il s'agit d'un mur porteur. La lame d'air dans l'enveloppe du bâtiment qui est un espace vide créé entre deux matériaux favorise l'évacuation de l'eau passant à travers les parements extérieurs. De plus, elle sert à ventiler l'air sec pour limiter les risques de condensation. L'isolant qui est une barrière thermique est utilisé pour améliorer la résistance thermique (R, RSI) de l'enveloppe et de ce fait, assurer le confort des occupants. Elle occupe un volume significatif dans le système d'enveloppe (partie horizontale et partie verticale). Chaque composant du système de mur extérieur joue un rôle indispensable dans l'étanchéité à l'air, l'eau et la vapeur d'eau et au comportement thermique et énergétique de l'enveloppe du bâtiment.

Quant aux murs extérieurs en colombage d'acier l'isolation et la méthodologie de construction se font également de la même manière que l'ossature en bois (voir Figure 1.16).

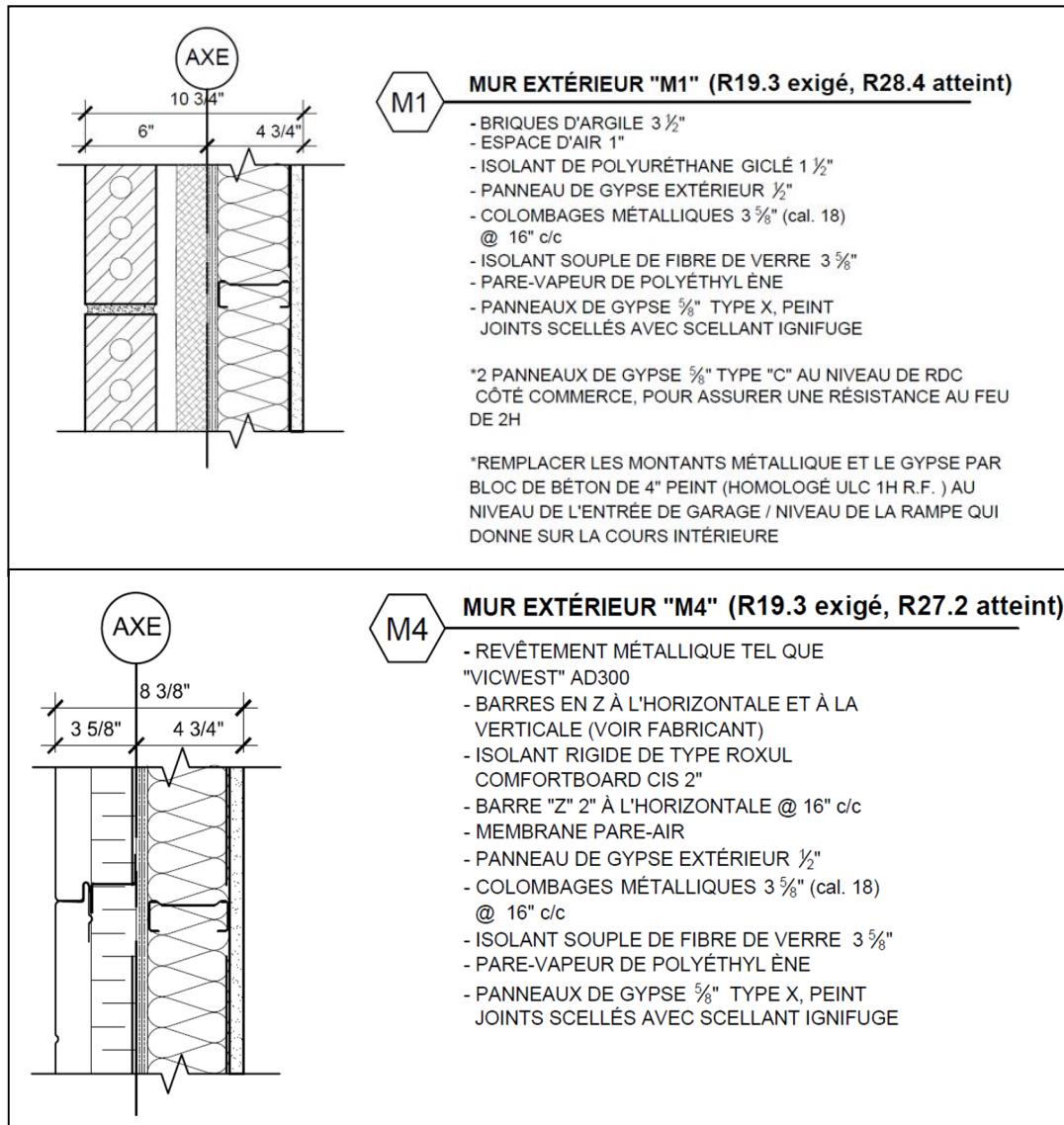


Figure 1.16 Exemple de murs en structure métallique tiré de la firme d'architecture 2Architectures

1.4 Le Chanvre un isolant à base végétal

Le chanvre textile (*Cannabis sativa*) est une plante annuelle cultivée depuis l'arrivée des Celtes en Europe. Cette herbe a été utilisée dans la production de vêtements, les cordages, le béton de chanvre et de nombreux usages techniques (fabrication de papier, d'huile pour l'industrie) ou l'alimentation humaine et animale, etc. (Pierre Oliva, 2007). « Dans le

bâtimennt les traces de son utilisation ancienne sont rares à part dans quelques torchis, car les qualités de durabilité et de sa résistance de cette matière première étaient tel qu'on la destinait en priorité à des usages à plus forte valeur ajoutée » (Pierre Oliva, 2007). « Le chanvre est devenu un matériau de construction et un isolant en France à la fin des années 1980 et possède de nombreuses qualités environnementales. S'inspirant du procédé d'imprégnation par les silicates des granulats de bois, un maçon italien, M. Rasetti, eut l'idée de soumettre au même traitement les particules issues de la partie centrale de la tige (la chènevotte) qui sont entourées par les fibres longues (la filasse), et qui étaient jusqu'alors considérées comme un sous-produit, faiblement valorisé comme litière pour les animaux » (Pierre Oliva, 2007). « Actuellement, la France est le plus gros producteur de chanvre en Europe avec 65 000 tonnes de paille pour une surface cultivée de l'ordre de 8000 hectares. » (Youssef, 2017). S'agissant d'un bon isolant écologique aux multiples usages, le chanvre se place de plus en plus dans le premier ordre de l'industrie de la construction durable.

1.4.1 Présentation et utilisations en granules de chènevotte

La transformation du chanvre se fait à travers plusieurs étapes. La première étape consiste essentiellement en un fauchage des tiges matures puis le découpage de celles-ci en longueur de 40 cm environ. Cette paille de chanvre est déposée en tas, de faibles hauteurs généralement, sur toute la longueur du champ c'est ce qu'on appelle la récolte (Oliva, 2007). La deuxième étape consiste au rouissage sur champ, ce dernier est indispensable et permet d'optimiser la performance et la qualité du produit. Le rouissage contribue à l'élimination des pectines de la plante qui est préjudiciable à la conservation de la fibre. Au final, le matériau est décompressé puis conduit vers le défibreur mécanique par soufflage d'air. Ce dernier permet de séparer les tiges de chanvre en deux produits principaux :

- La fibre, située en périphérie de la tige ;

➤ La chènevotte.

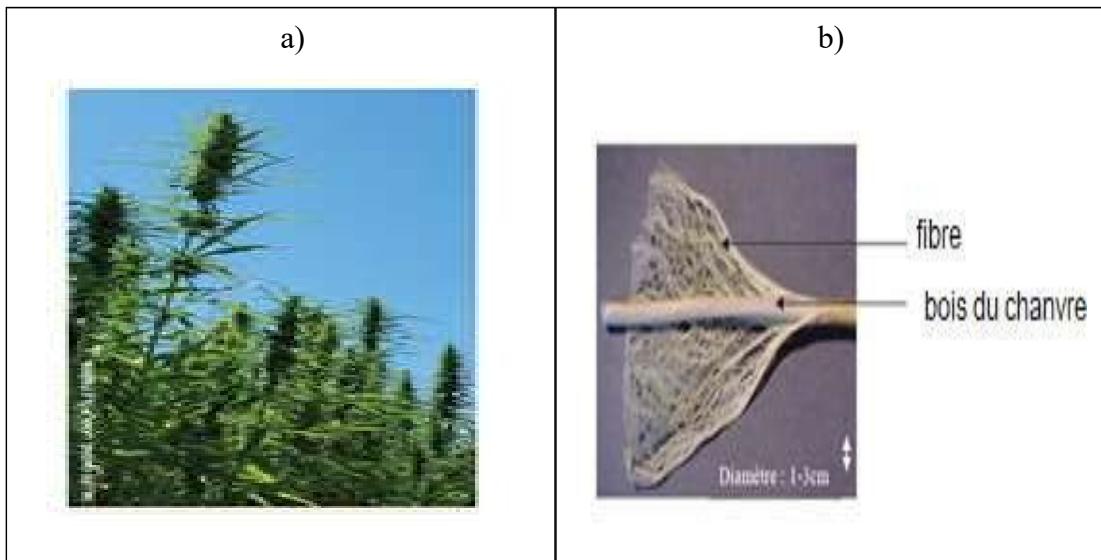


Figure 1.17 Plantes de chanvre (a) et la composition de la tige de chanvre (b) tiré de Chabot (2010, p.02) et de Chamoin (2013, p.17) ; citée Kabore (2020)

Généralement, les fibres sont encadrées pour obtenir une laine de chanvre avec une très bonne qualité d’isolation. Quant aux chènevottes du chanvre, elles sont d’abord dissociées de la poussière et des graines, puis défibrées mécaniquement en paillettes de 5 à 15 mm de long.

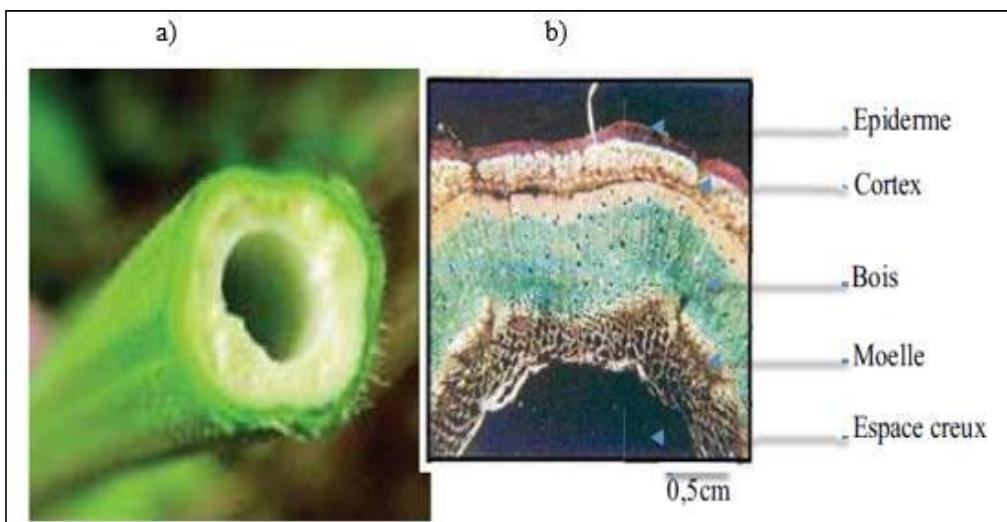


Figure 1.18 Tige de chanvre (a), micrographie d'une coupe d'une tige de chanvre (b) tiré de Niyigena (2016, p.24)

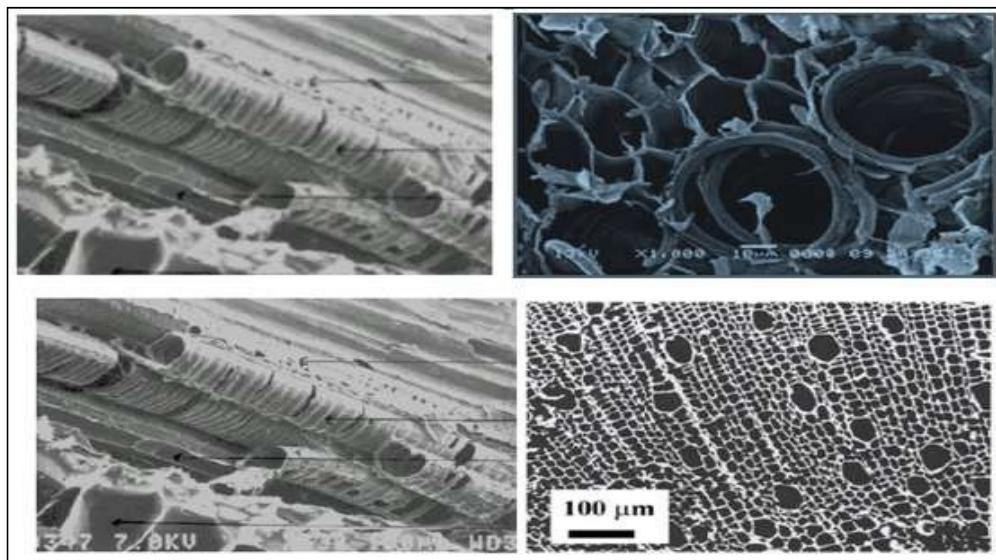


Figure 1.19 Vue au microscope électrique à balayage MEB de la porosité de la tige du chanvre tiré de Chamoin (2013, p.27)

Pour la réalisation de l'enduit murale, la chènevotte est mélangée avec de l'eau et de la chaux, des mortiers et du béton de chanvre (voir Figure 1.21), mais pour remplir les combles ou les cloisons il doit être en vrac.

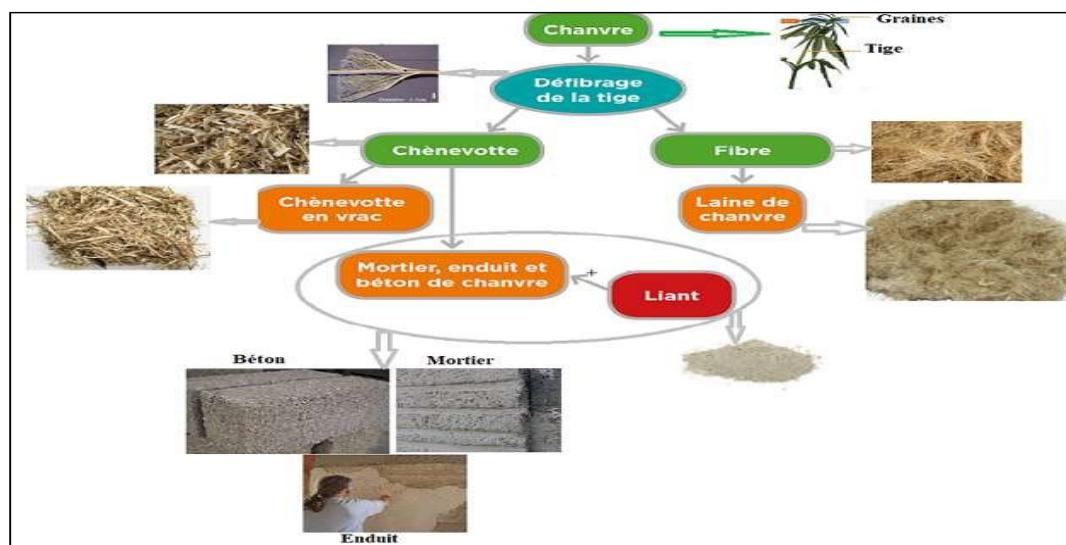


Figure 1.20 Différents matériaux issus du chanvre tirée de Kabore (2020, p.35)

1.4.2 Le béton de chanvre un matériau d'isolation écologique

Les matériaux isolants issus du chanvre sont sans doute classés parmi les meilleurs du point de vue technique, économique et écologique. Les avantages de leurs utilisations en construction reposent sur leurs faibles performances et leur faible conductivité thermique. De ce fait, une forte résistance thermique, ce qui leur confère de bonnes propriétés isolantes. Le matériau offre des solutions pour la rénovation des anciens bâtiments et pour la réalisation de nouveaux bâtiments. C'est extrêmement efficace, respectueux de l'environnement, régulateur thermique et un véritable fixateur de CO₂.

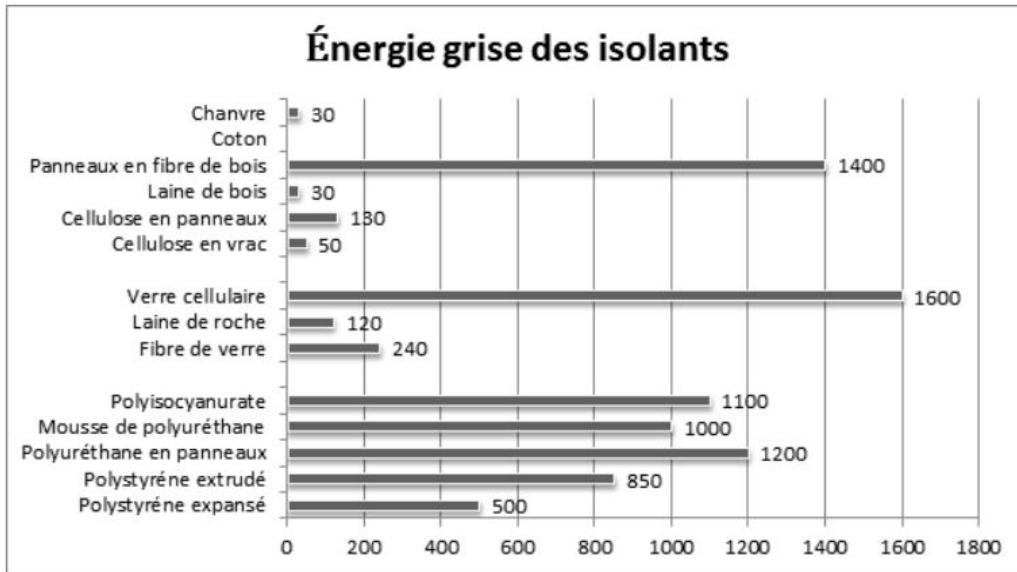


Figure 1.21 Valeur d'énergie grise pour les matériaux couramment utilisés dans le bâtiment tiré de Niyigena (2016, p.21)

À titre de comparaison, le béton de chanvre gagne en popularité comparée aux autres matériaux en raison des économies d'énergie qu'il permet de réaliser, que ce soit à des fins de fabrication ou de construction (énergie grise). En analysant, les constats illustrés dans la Figure 1.22, pour ce qui est de l'énergie grise de l'isolant de chanvre, elle n'est que de 50 kWh/m³, alors que celle de la laine de roche et de verre est beaucoup plus élevée, soit de 150 kWh/m³ et 250 kWh/m³ respectivement. Dans l'industrie de la construction, le béton de chanvre est un matériau qui est sur la voie de devenir plus accessible, notamment sous forme d'isolant (un remplissage) vu qu'il n'est pas considéré comme un matériau porteur.

Pour une étude énergétique paramétrique, la connaissance des propriétés physiques du béton de chanvre est fondamentale. « Le chanvre est un excellent isolant thermique et il est aussi insonorisant, très résistant et très durable. Le chanvre se pétrifie et prévient les infiltrations d'eau, de vent, de moisissures (antifongique), de bactéries (antiseptique) et même de rongeurs et d'insectes » (ARPE, 2012 ; Bayol, 2016 ; Chabot, 2010). Toujours selon (ARPE, 2012 ; Bayol, 2016 ; Chabot, 2010), « le béton de chanvre présente une

performance d’isolation phonique excellente et une admirable inertie thermique ainsi que des qualités de régulateur hygrométrique très remarquables selon le type d’utilisation ». En termes de réduction des émissions des GES, « un hectare de chanvre peut utiliser 15 tonnes de CO₂ avant d’arriver à maturité. » (Tran L. Anh Dung, 2010). « L’analyse de cycle de vie du béton de chanvre montre qu’il est capable d’emmagasiner ou de capter entre 14 kgeq CO₂ et 35 kgeq CO₂ par mètre carré de murs sur 100 ans. » (Gauthier, 2018 ; Gourlay & Arnaud, 2011 ; Popovic, 2015 ; Rahim, Douzane, le, promis, & Langlet, 2016 ; Véringa, 2015). « La contribution d’un bâtiment à ossature de bois isolé par le béton de chanvre à la réduction de CO₂ est environ 71 %, avec 41 % pour le béton de chanvre et 30 % pour l’ossature de bois. » (Boisyvon, 2015).

« Effectivement, cette plante stocke 20 tonnes de Carbone pour 100 m² de construction, soit 138 kg de CO₂ pour 1 tonne de béton de chanvre, ce qui le situe parmi les meilleurs matériaux, respectueux de l’environnement » (Pittau et al., 2018).

Les impacts environnementaux d’un mur de 1 m² de surface sur 26 cm d’épaisseur en béton de chanvre ont été évalués afin de faire une analyse du cycle de vie (ACV) mentionné dans les travaux de (Tran L. Anh Dung, 2010). « Il en ressort que 1 m² de mur en béton et mortier de chanvre absorbe 75,7 kg de CO₂ équivalent et en émet 40,2 kg soit un bilan favorable de 35,5 kg de CO₂ équivalent. » (Tran L. Anh Dung, 2010). « L’impact du béton de chanvre sur le changement climatique est de l’ordre de -0,35 kg CO₂eq. /UF/an. » (Tran L. Anh Dung, 2010). « Le béton de chanvre construit comme un isolant pour les bâtiments à ossature de bois augmente le taux de captation du CO₂ de ces murs. » (Marc Chabot, 2010).

De plus, « Les murs en béton de chanvre présentent une capacité tampon d’humidité excellente, qui les aide à réguler l’humidité relative à l’intérieur du bâtiment selon le protocole Nordest » (Rahim, Douzane, Le, promis, et al., 2016). « Les bâtiments construits en béton de chanvre sont résistants à la fissuration, la moisissure et à la fissuration provoquée par la tension souvent produite dans les régions sismiques. » (Chabot, 2010 ; Latif, Ciupala, Tucker, Wijeyesekera, & Newport, 2015 ; Pronovost, 2017). « Ils sont plus solides et donnent

un meilleur confort thermique que ceux du béton ordinaire.» (Boisyvon, 2015 ; Barclay, Holcroft, & Shea, 2014 ; écohabitation, s.d ; Shea et al., 2012).

Les bâtiments construits avec le béton de chanvre incarnent l'idéal de l'habitation écologique : confortable, durable et adaptée au climat. Cependant, il n'y a pas de réglementation thermique et d'étiquettes pour contrôler l'utilisation du chanvre dans les codes du bâtiment. De plus, il y a peu d'études sur ses performances en fonction du climat canadien et algérien, de sorte qu'il n'est pas reconnu comme un matériau de construction. Telles que le Canada et l'Algérie respectivement, peu d'entreprises se sont engagées à intégrer des matériaux de chanvre dans les bâtiments. Par conséquent, des recherches sont nécessaires pour confirmer la possibilité d'être incorporé dans le bâtiment que ce soit dans le contexte algérien ou canadien et ceci conformément aux codes et réglementations énergétiques des bâtiments en vigueur.

Le chanvre est un matériau isolant de qualité et il a également une bonne résistance au feu. Une étude démontre qu'après être resté dans une flamme de 650 °C pendant quatre heures, le mur de chanvre n'a montré aucun signe de combustion, et la température de l'autre surface du mur n'a augmenté que de 2 °C. Le chanvre est également d'une bonne masse thermique. En fait, le mur de chanvre peut s'adapter presque intuitivement aux changements de température et même d'humidité. Ainsi, le recours aux équipements actifs tel que : un déshumidificateur, climatiseur ou humidificateur n'est pas requis (ARPE, 2012 ; Bayol, 2016 ; Chabot, 2010).

1.5 Synthèse

Le choix des matériaux de construction est très complexe, car plusieurs paramètres sont souvent contradictoires. Les matériaux à base de fibres ont peu d'impact sur l'environnement, une faible consommation d'énergie, biodégradable, renouvelable et abondante. Les matériaux issus de produits agricoles (isolant en chanvre) peuvent limiter l'utilisation des matériaux qui ne répond pas aux critères de la qualité environnementale (non renouvelable) et de ce fait limiter les émissions de gaz à effet de serre.

En plus du bois utilisé dans la construction nord-américaine, d'autres matériaux naturels aux caractéristiques importantes peuvent également être utilisés pour compléter le bois. De plus, la modernisation de la méthodologie constructive en Algérie conformément à la qualité environnementale en intégrant des matériaux écologiques n'a pas encore été prise en considération et le béton de chanvre peut constituer une sérieuse alternative.

Pour intégrer une telle proposition dans le système de mur du bâtiment résidentiel canadien et algérien, une étude du comportement énergétique du béton de chanvre s'impose, et ceci en fonction du climat caractérisant les deux régions. Pour ce faire, un logiciel de simulation comme Energy-Plus permet d'avoir des résultats stricts sur l'évaluation des performances énergétiques et hygrothermiques de l'enveloppe du bâtiment en intégrant la physique appropriée.

CHAPITRE 2

L'APPROCHE ÉNERGÉTIQUE DE L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE

« La construction vernaculaire peut se constituer comme modèle pour assister la conception environnementale des bâtiments » (Boulfekhar, 2011).

Dans ce chapitre, un corpus théorique lié à la conception du bâtiment traditionnel et à la performance énergétique et thermique des procédés utilisés dans le langage vernaculaire est présenté. Cette réflexion est aujourd’hui ignorée, laissant ainsi la place à des systèmes complexes qui coûtent cher. Nous exposons également des exemples pour illustrer la contribution des éco-techniques vernaculaire dans la construction contemporaine.

2.1 Les éco-techniques du bâtiment vernaculaire

Il est bien connu que les stratégies passives appliquées dans les bâtiments traditionnels répondent de manière satisfaisante aux exigences climatiques et réussissent à fournir un bien être acceptable aux occupants avec un minimum d'énergie consommée. De ce point de vue, il est intéressant d'évaluer quantitativement l'efficacité des stratégies et techniques vernaculaires en vue de les intégrer dans le bâtiment contemporain pour améliorer son rendement énergétique. « La construction vernaculaire est le moyen traditionnel et naturel par lequel les communautés créent leur habitat. C'est un processus en évolution nécessitant des changements et une adaptation constante en réponse aux contraintes sociales et environnementales. Partout dans le monde, l'uniformisation économique, culturelle et architecturale menace la survie de cette tradition » (Bisson, 2007).

Pierre Frey définit le vernaculaire comme des « démarches qui tendent à agencer de manière optimale les ressources et les matériaux disponibles en abondance, gratuitement ou à très bas prix, y compris la plus importante d'entre elles : la force de travail » (Frey, 2011). Les habitants employaient et utilisaient diverses caractéristiques adaptatives qui permettaient

d'assurer le confort idéal, c'est ainsi que le concept de vernaculaire est intimement lié à l'homme avec des rapports riches et complexes à la nature. D'où notre intérêt se penche sur l'évaluation de manière critique de l'architecture vernaculaire du lieu.

2.1.1 L'habitat troglodytique « le site dicte la forme »

L'habitat troglodyte est considéré comme l'une des plus anciennes architectures vernaculaires. Cet habitat recouvre l'ensemble des habitations situées dans le sol, organisées soit des cavités naturelles soit creusées par l'homme.

À Matmata en Tunisie, les habitations sont construites autour d'un puits central de 10 mètres environ avec les pièces organisées autour, et parfois sur deux niveaux. À l'intérieur du patio, la stratification de l'air frais diminue la température de l'air ambiant. Aussi, les vents poussiéreux n'altèrent pas le microclimat de ces habitations (voir figure 2.1). Il va de fait que ce type d'habitat troglodyte est réservé aux zones de climat aride. (Liébard et De Herde, 2004)

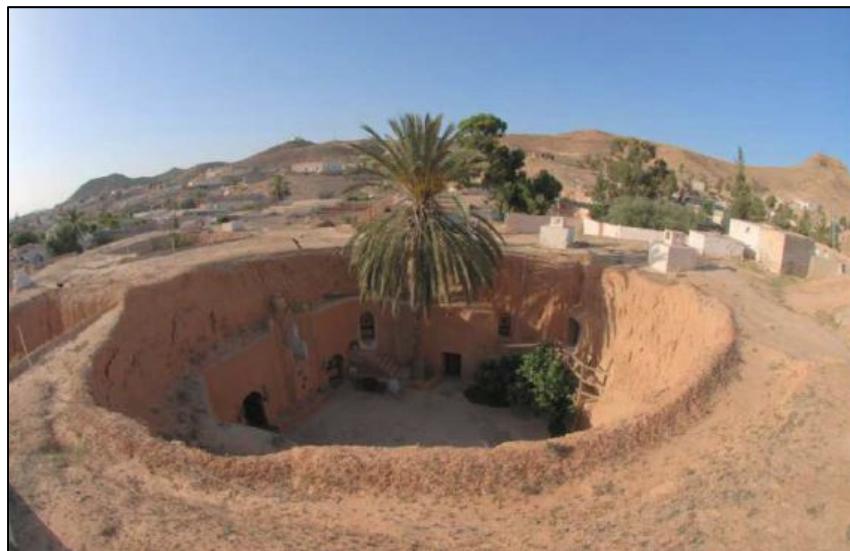


Figure 2.1 Illustré l'habitat troglodytique à Matmata en Tunisie tiré de l'annuaire de l'Afrique du Nord, production et pratiques de l'espace habité

« De nombreuses maisons traditionnelles en Indre-et-Loire sont de type semi-troglodytique. Dans les falaises qui surplombent la rive nord de la Loire, à Rochecorbon, des grottes creusées dans un sol semi-dur et bien sec font office d'annexes ou de séjours-cuisines. Un couloir vitré les relie généralement au reste de la maison. La stabilité thermique de ces pièces et l'absence d'humidité en fait de très bonnes réserves à vin ou à légumes et, éventuellement, un lieu de retraite accueillant lors des grandes chaleurs » (Liébard et De Herde, 2004).

2.1.2 Le zonage thermique

La distribution des espaces intérieurs est parmi les paramètres de conception conditionnant l'efficacité énergétique des bâtiments. Dans les maisons vernaculaires, les espaces sont répartis en différentes zones créant ainsi différentes atmosphères thermiques, plus appropriées à leurs utilisations. Une judicieuse organisation fonctionnelle permet de repartir et de conserver au mieux la chaleur à l'intérieur du bâtiment. Toujours en se basant sur l'architecture vernaculaire, nous citons à titre d'exemple les espaces tampons qui font office de barrière contre le froid au Nord ou la chaleur au Sud. Les espaces tampons ont un rôle passif, comme une couche isolante supplémentaire.

Le principe du zonage, permet de cohabiter harmonieusement un espace selon son utilisation « une pièce peu utilisée ou une chambre sera moins chauffée (température de consigne de 18°C) qu'un séjour ou une salle de bains (20 °C à 22 °C). Ce principe de cloisonnement peut se compléter par l'adjonction d'espaces tampons protecteurs tels que rangements et débarras, adossés côté nord de l'habitation. Dans les constructions vernaculaires à toiture inclinée, le grenier peut aussi devenir un espace protecteur des conditions climatiques extérieures » (Liébard et De Herde, 2004).

Les percements exploratoires effectués dans les maisons traditionnelles pour les murs orientés Côte-Nord ont démontré que l'emplacement de l'isolant est entre les espaces de vie et les zones tampons plutôt qu'au niveau du système de l'enveloppe du bâtiment, le but était d'exclure les espaces tampons du volume chauffé. (Liébard et De Herde, 2004)

Côté Sud, un îlot de rafraîchissement (Jardin agricole) peut également servir de tampon en protégeant le système de mur exposé au soleil du sud, l'îlot de rafraîchissement permet à l'enveloppe du bâtiment d'être plus résiliente face à la canicule climatique. Le nouveau microclimat mis en place rend l'atmosphère entourant la maison plus fraîche en plus de son rôle culturel et social. L'adjonction du vestibule à l'entrée principale d'une maison peut compléter la gamme des espaces protecteurs. En plus de son rôle de transition entre les espaces de vie et l'extérieur, l'avantage énergétique du sas d'entrée n'est pas évident. Selon (Liébard et De Herde, 2004) ce concept permet de réduire l'engouffrement d'air frais à chaque ouverture de la porte. De ce fait, il est nécessaire de bien concevoir les espaces tampons afin d'en réduire au maximum les impacts tant d'un point de vue énergétique que fonctionnel et du confort thermique.

2.1.2.1 Le nomadisme

Le zonage soulève des questions sur la relation entre les occupants et les rythmes climatiques. Il a réintroduit les nomades saisonniers, car certaines zones thermiques du bâtiment peuvent être habitables dans la saison chaude, mais pas pendant la saison froide et vice versa. « Le nomadisme c'est le déplacement des habitants à l'intérieur du bâtiment que ce soit vers les pièces les plus chaudes ou les pièces les plus froides. Le nomadisme peut être quotidien ou de saison. Il s'agit dans les deux cas d'une recherche de confort. » (Liébard et De Herde, 2004). Pendant l'été, les occupants passent la plus grande partie de la journée au rez-de-chaussée et au sous-sol. Tandis que, durant les hivers froids les niveaux supérieurs sont utilisés comme solarium. Ce concept existe par exemple à Samarra en Irak et aussi dans d'autres maisons traditionnelles à Bagdad, où le sous-sol et le rez-de-chaussée sont plus humides et moins ensoleillés (occupation en été) que les étages supérieurs (occupation en hiver). (Liébard et De Herde, 2004)

2.1.3 La forme du volume

Le coefficient de forme ou la compacité est un critère d'évaluation thermique très répandu dans l'architecture vernaculaire. La compacité mesure le rapport de la surface de l'enveloppe

déperditive au volume habitable (m^2/m^3) et elle varie selon le volume, la taille et le mode de contact de l'enveloppe. (Liébard et De Herde, 2004). Ce principe permet d'évaluer les volumes construits du point de vue thermique et énergétique en plus de leurs interactions (les volumes construits) avec les conditions climatiques extérieures. L'architecture vernaculaire à toujours cherché à optimiser le rapport surface/volume notamment par la privilégiations de la mitoyenneté ce qui permet de réduire les surfaces exposées au soleil comme le cas de Ghardaïa et la Casbah d'Alger en Algérie. L'utilisation de la compacité dans la ville Ghardaïa ainsi que dans la Casbah d'Alger se traduit par la lecture du tissu urbain (le potentiel introverti), un tissu dense et compact. Les maisons sont accolées les unes aux autres, ce qui limite les ouvertures sur l'extérieur ainsi que les surfaces exposées permettant d'obtenir un confort thermique satisfaisant et de ce fait réduire le bilan énergétique global.

2.1.3.1 L'igloo

Cet exemple vernaculaire de l'igloo est très pertinent dans la mesure où il s'agit d'un exercice complet qui démontre l'application de la compacité dans un lieu climatique rude. L'intérêt à la forme sphérique par l'homme ancien vise à économiser les matériaux et l'énergie en réduisant l'enveloppe du bâtiment.

« Les Esquimaux inventèrent l'igloo, remarquable demi-sphère faite de blocs de neige, dans un site très rude avec comme matériau uniquement la glace, qu'ils ont confectionné en blocs d'une part, et d'autre part ont utilisé son inertie thermique, en optant pour la forme demie sphérique, forme aérodynamique qui offre une excellente résistance à la pression des vents » (Atek, 2012)

« La résistance d'un dôme est supérieure à celle de presque toutes les autres formes de Structure » (Salvadori, 2009).

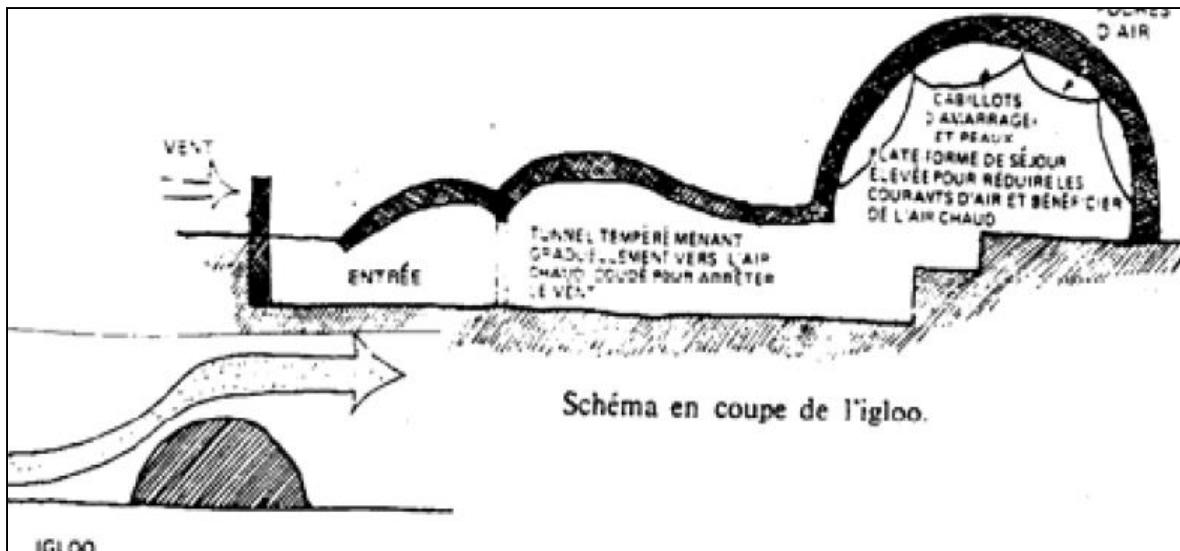


Figure 2.2 Illustration du schéma de l'igloo esquimaux montrant sa conception intérieure et sa réaction vis-à-vis des vents tiré de Atek (2012, p.51)

2.1.4 L'espace central (cour intérieure, patio) et galerie

Appelé aussi « wüst el daâr » dans le Maghreb et le moyen orient, l'espace central est un dispositif qui possède une forme géométrique généralement simple (rectangulaire ou carrée), sans toiture située au centre du bâtiment. Il permet l'aération et l'éclairage des espaces jouxtant la cour. En plus de sa fonction énergétique, l'espace central est « le cœur de la vie communautaire, et le lieu de passage obligé de la maison. Il incarne l'intimité absolue du foyer » (Atek, 2012). Le patio centré est toujours renforcé par une structure qui est nommée la galerie. Cette dernière sert de transition entre la cour intérieure et les espaces couverts du bâtiment. La galerie protège également les espaces voisins à la cour centrale de la pluie, la neige et d'un éventuel soleil excessif en été. (Liébard et De Herde, 2004)

2.1.5 Matériaux et technique de mise en œuvre

Dans l'architecture traditionnelle, le choix des matériaux est local et naturel, et le système constructif va être celui transmis de génération en génération, un savoir-faire hérité. Dans ce

cas de médina, le matériau est la brique pleine utilisée en chainages horizontaux répétitifs, et les murs sont en moellons hourdés (Atif, 2009).

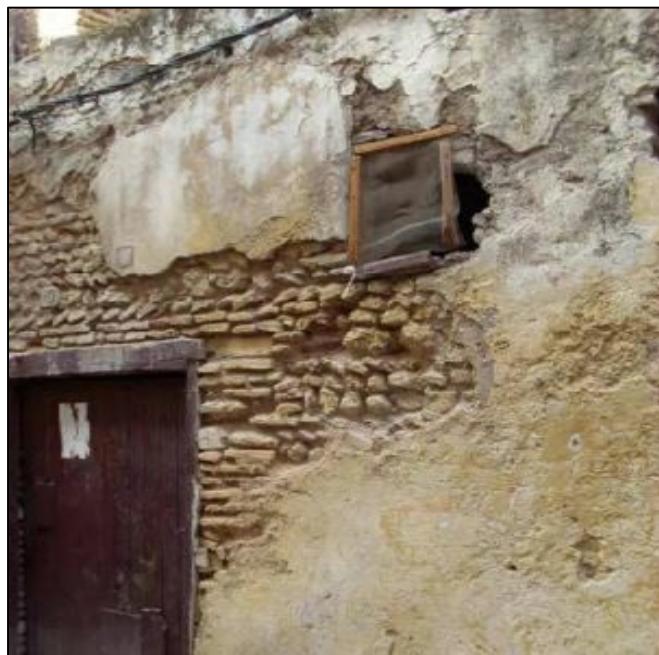


Figure 2.3 Illustré détail d'un mur à moellons
tiré de Atif (2009, p.116)

2.1.6 Synthèse

Les écotechniques du bâtiment vernaculaire peuvent ajuster ou contrôler les paramètres climatiques afin de réduire leur agressivité. On accorde peu d'attention à la conception traditionnelle qui est simple, appropriée, facile à intégrer et qui peut devenir une alternative méthodologique. Ces techniques tirés de la construction vernaculaire ont prouvé leurs efficacités dans le passé et peuvent être améliorées et ajustées en fonction des besoins de la vie moderne d'aujourd'hui tout en s'intégrant à l'architecture contemporaine.

L'utilisation des écotechniques du bâtiment vernaculaire (toute en les adaptant aux modes de vie actuelle) permet de réduire l'utilisation excessive d'énergies non renouvelables tout en garantissant la haute qualité environnementale des bâtiments.

2.2 Mise en valeur des systèmes de rafraîchissement passifs

La ventilation naturelle permet de renouveler l'air vicié par de l'air frais et sain, elle participe aussi au confort thermique du corps en lui prélevant de la chaleur, par évaporation de sueur. Aussi, la ventilation permet le refroidissement de la masse interne des bâtiments dans certaines conditions de climat chaud. Elle permet d'évacuer la chaleur cumulée pendant la journée afin d'atténuer l'inconfort des occupants lors des périodes les plus chaudes de l'année. En paraphrasant (Liébard et De Herde, 2004), la ventilation naturelle est provoquée par une différence de température ou de pression entre les façades d'un bâtiment. De ce fait, les mouvements d'air peuvent se produire entre deux environnements se trouvant de part et d'autre de l'enveloppe du bâtiment. Le différentiel de pression d'air est la force motrice qui fera que l'air tendra à se déplacer d'un endroit à l'autre (Maref, 2020).

Alors que les conditions de température et d'humidité relative de part et d'autre de l'enveloppe varient relativement lentement, les pressions d'air peuvent varier extrêmement rapidement. Ces variations de pression d'air peuvent être induites entre autres par :

- L'effet du vent ;
- L'effet de cheminée ;
- L'effet de la combustion ;
- Les variations de la ventilation créée par un système mécanique.

La figure 2.4 illustre les variations de pression d'air qui sont causées par effet de vent, effet de cheminée et effet combustible.

Pour illustrer notre intérêt qui se penche sur l'intégration des stratégies de ventilation passive dans les bâtiments contemporains, nous analyserons dans la suite des exemples de l'architecture vernaculaire qui proposent spontanément des typologies d'habitat adaptées aux différents climats, utilisant des systèmes de ventilation passive permettant de répondre au besoin de renouvellement d'air.

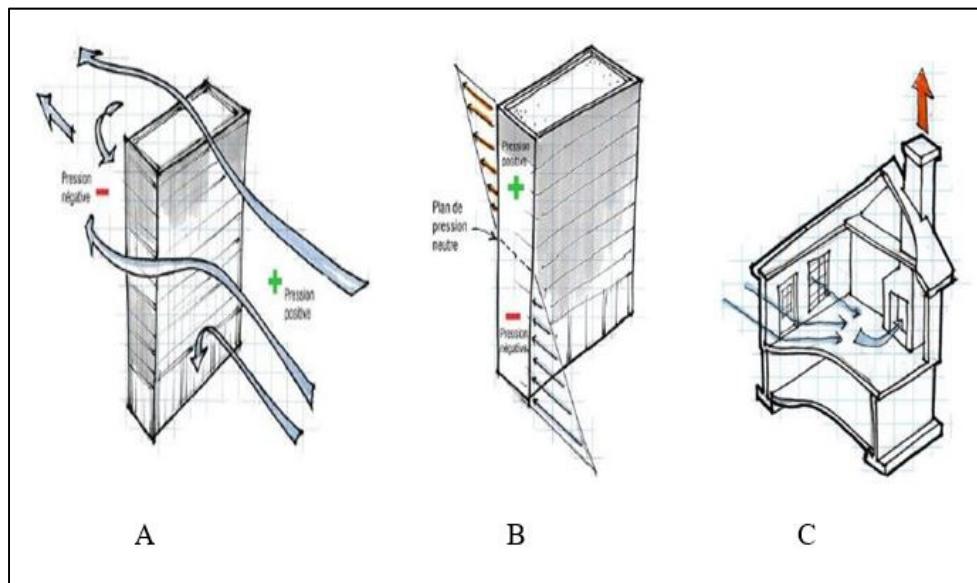


Figure 2.4 Illustré les variations de pression d'air qui sont causées par : l'effet de vent (A), l'effet de cheminée (B) et l'effet combustible (C) tiré de Maref (2020)

2.2.1 Le « mouscharabieh »

Ce dispositif est répandu dans l'architecture vernaculaire des pays méditerranéens, il consiste en un grillage en bois précieux par sa décoration et les bois tourné, une sorte de dentelle de bois, laquelle permet une meilleure vue sur la longueur de la rue, soit de sa largeur. Le Mouscharabieh est un type d'ouverture intéressant, il permet la ventilation naturelle de l'espace intérieur, dans la mesure où le panneau extérieur, généralement en bois, est poreux. Le dispositif est complété par une série de jarres en terre poreuses face à la fenêtre, ce qui permettra de rafraîchir le flux d'air grâce à l'évaporation de l'eau de celles-ci (Izard, 2011). L'air extérieur pénétrant par le bas de l'ouverture se réchauffera, puis sera évacué par le haut de cette même ouverture. La conception du bâtiment dépendra de la stratégie de ventilation. L'organisation des espaces intérieurs dépend du positionnement des dispositifs de ventilation naturelle.

2.2.2 Le malkef, ou les capteurs à vent

Le malkef est un dispositif de rafraîchissement d'air dans l'habitat traditionnel (un type de cheminée d'aération). C'est un conduit vertical qui permet l'amenée d'air, situé en haut de la toiture du bâtiment. « Durant la journée (lorsque la température intérieure est inférieure à la température extérieure), l'acheminement de l'air extérieur avec une température plus élevée au travers du conduit de cheminée permet le rafraîchissement de l'air par l'enveloppe du bâtiment » (Liébard et De Herde, 2004). L'air intérieur se réchauffant est évacué par les fenêtres. Durant la nuit, si la température de l'air extérieur est basse, le sens des écoulements d'air est inversé. L'air frais pénètre dans les espaces intérieurs par les fenêtres et est évacué par la cheminée.

2.2.3 Les tours à vent

Un autre exemple de cheminée d'aération est la tour à vent. Elle est utilisée depuis l'antiquité en Égypte. Elle est orientée vers le nord, avec parfois une ouverture supplémentaire vers l'ouest. Les tours à vent sont de sections plus réduites que celles des « Malkafs » et représentent un modèle architectural très courant. Le cheminé d'aération consiste en une ouverture munie d'un conduit en bois, en métal ou en brique, inclinée à 45 degrés vers le vent dominant. « Cette ouverture reçoit le vent qui s'engouffre dans le conduit, expulsant l'air chaud accumulé dans le patio, traversé auparavant les pièces avoisinantes » (Bencherif Chouache, 2007). Le fonctionnement des tours à vent est basé essentiellement sur l'utilisation de dépressions entre l'intérieur et l'extérieur des maisons. En plus, l'air extérieur capté par les tours est plus frais et moins chargé de poussières que l'air au niveau du sol. Fréquentées en Irak et Iran, elles sont appelées « bagdir ou batinj ».

La Figure 2.5 montre la faisabilité d'intégrer une combinaison de différents systèmes de rafraîchissement passifs dans les maisons traditionnelles. La ventilation passive repose sur le principe du tirage thermique (l'air chaud qui monte) et peut être réalisée par diverses alternatives méthodologiques.

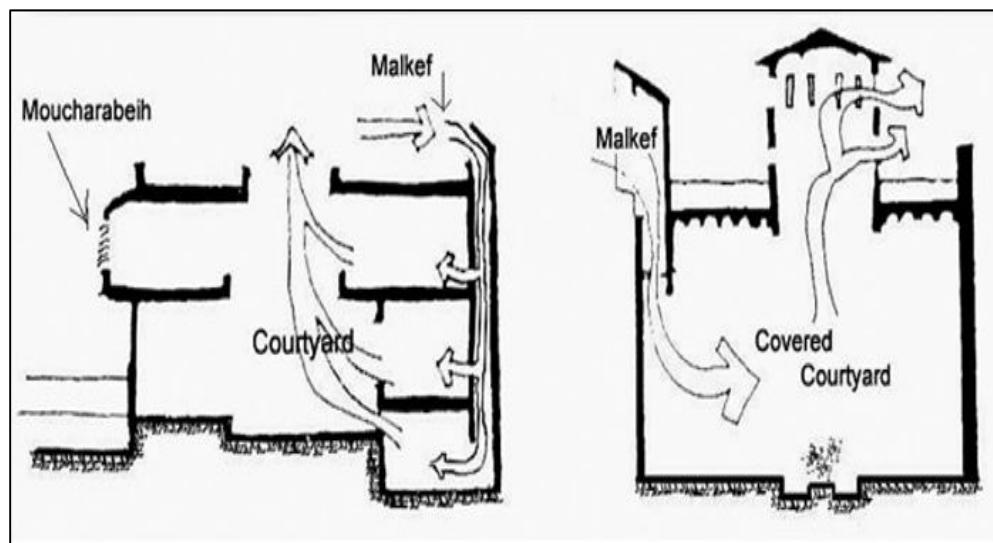


Figure 2.5 Illustre intégration des systèmes de rafraîchissements passifs dans l’architecture vernaculaire tiré de Atek (2012, P.58)

2.2.4 Synthèse

Cette section a présenté un résumé de la revue de littérature liée aux systèmes et stratégies de ventilation passive issue principalement du savoir-faire vernaculaire. Le principe de la ventilation passive se traduit essentiellement par le tirage thermique et la prise en charge du mouvement d’air lors de la phase d’esquisse du projet (processus décisionnel) est un facteur déterminant. Le choix de la conception en mezzanine en plus de l’incorporation des cheminées d’aération sous forme de conduit contribue à une bonne ventilation naturelle par effet de cheminée.

Le mécanisme d’intégration des systèmes et stratégies de ventilation passive dans la conception du bâtiment résidentiel contemporain peut devenir une alternative aux systèmes de ventilation mécanique et permet d’amortir l’impact négatif de ces derniers sur le bilan énergétique global.

2.3 Apport du vernaculaire dans les pratiques architecturales contemporaines

La pensée contemporaine, fondée sur la responsabilité envers l'environnement et sa relation directe avec l'homme, s'efforce de minimiser la dispersion de la consommation d'énergie. Dans cette section, des éco-Modèles seront définis à travers un problème récurrent, une solution et des contraintes. Ils sont répertoriés dans trois réalisations vernaculaires au minimum. Pour chaque éco modèle, nous allons définir l'élément initiateur qui a conduit à la définition finale. Nous allons aussi accompagner chaque éco modèle de quelques réalisations contemporaines ayant adapté la même technique afin de pouvoir apprécier l'apport du vernaculaire dans l'architecture contemporaine. Les définitions proposées ont été faites en s'alignant sur le modèle conventionnel de définition. Elles se détachent de ce fait volontairement du contexte vernaculaire.

2.3.1 Les parois poreuses « effet de moucharabieh »

La ventilation naturelle est un enjeu majeur dans les climats chauds et humides, l'encyclopédie de l'architecture vernaculaire traite ce sujet et répertorie plusieurs techniques à cet effet. De nos jours pour ventiler et rafraîchir l'air ambiant nous avons recours à des installations coûteuses qui consomment beaucoup d'énergie. C'est pour pallier à ce genre de problème qu'il serait intéressant d'étudier des solutions architecturales ancestrales simples et qui ne nécessitent aucune énergie. Les murs et façades perforés présents dans les régions tropicales ainsi que dans les régions arides filtrent la lumière tout en laissant passer l'air. Le mouvement d'air provoqué dans les espaces rafraîchit lors de grandes chaleurs et assainit une atmosphère chargée d'humidité.



Figure 2.6 Illustré réalisation vernaculaire en paroi poreuse,
maison en roseau (Irak), Maison Peul (Sénégal)
tiré de Atif (2011, P.31)



Figure 2.7 Illustré réalisation vernaculaire maison avec
Moucharabieh et paroi poreuse (Tunisie)
tiré de Atek (2012, P.45)

Dans les régions chaudes et humides, on a souvent recours à un système de climatisation pour pallier aux grandes chaleurs et à la sensation d'humidité. Ce type d'installation est coûteux, difficile à entretenir et frugal en énergie. Toutefois, la paroi poreuse est une paroi perméable à l'air, elle permet de ventiler et de rafraîchir naturellement un espace sujet à l'humidité et à la chaleur. Le mouvement d'air provoqué permet de chasser l'air chaud qui est remplacé par de l'air frais, il permet aussi de provoquer l'évaporation de l'humidité et de donner une sensation de fraîcheur. Son inconvénient est le fait qu'elle est constituée de petites ouvertures, la poussière s'y accumule rapidement, son entretien peut être difficile et il faut qu'elle soit accessible afin d'assurer un nettoyage régulier.

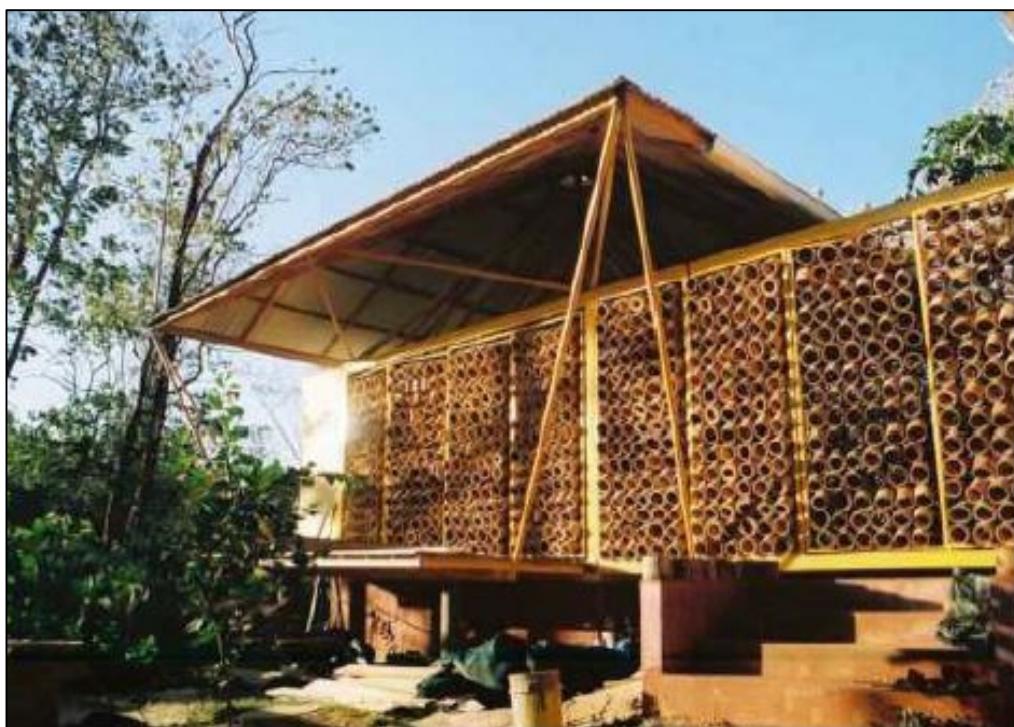


Figure 2.8 Illustration contemporaine avec la paroi poreuse cas du Bamboo House (Costa Rica), 2009 tiré de Boulfekhar (2011, P.32)

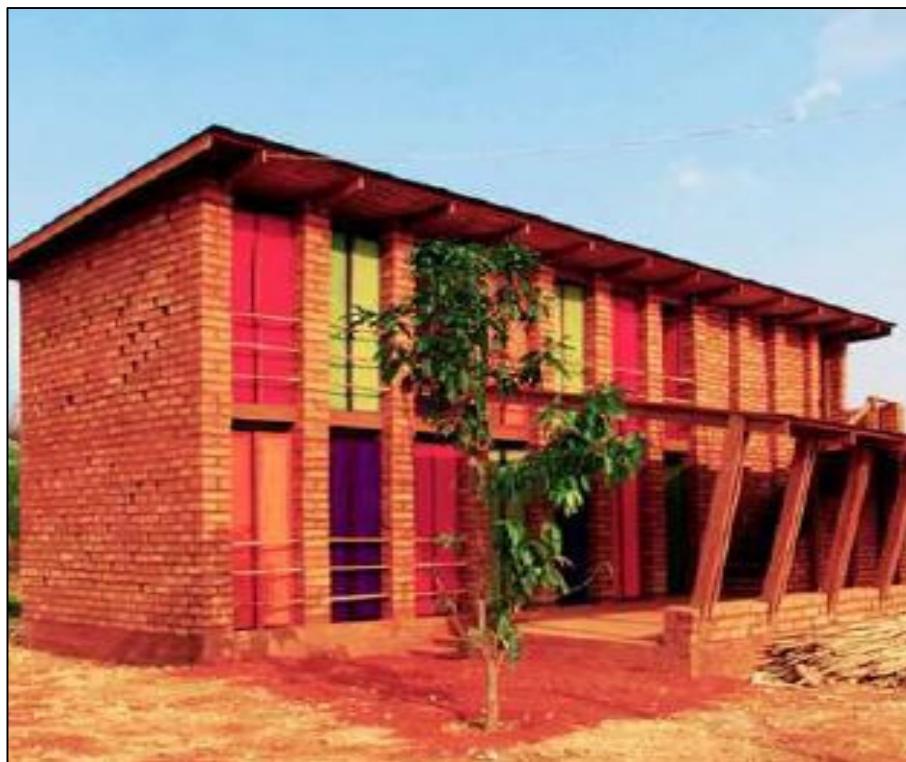


Figure 2.9 Illustration contemporaine avec la paroi poreuse cas du Tyin Tegnestue (Cambodge), 2011
tiré de Boulfekhar (2011, P.32)

2.3.2 Les murs végétaux

La question d'isolation contre le froid et le chaud est une des préoccupations majeures dans l'architecture vernaculaire. On n'a constaté que l'usage de végétaux tel que le chaume soit fréquent pour constituer une couche isolante qui recouvre une partie ou l'ensemble d'une construction. La réflexion a été initiée suite à la consultation de l'ouvrage « architecture de lumière » puis de celui de Rudofsky qui a encore plus conforté le raisonnement établi. Avec un même dispositif, on arrive à répondre à deux contextes très différents. Même si les toitures végétales sont plus fréquentes que les façades ou murs végétaux, nous avons préféré l'appellation de « paroi végétale » pour être le plus génériques possible.

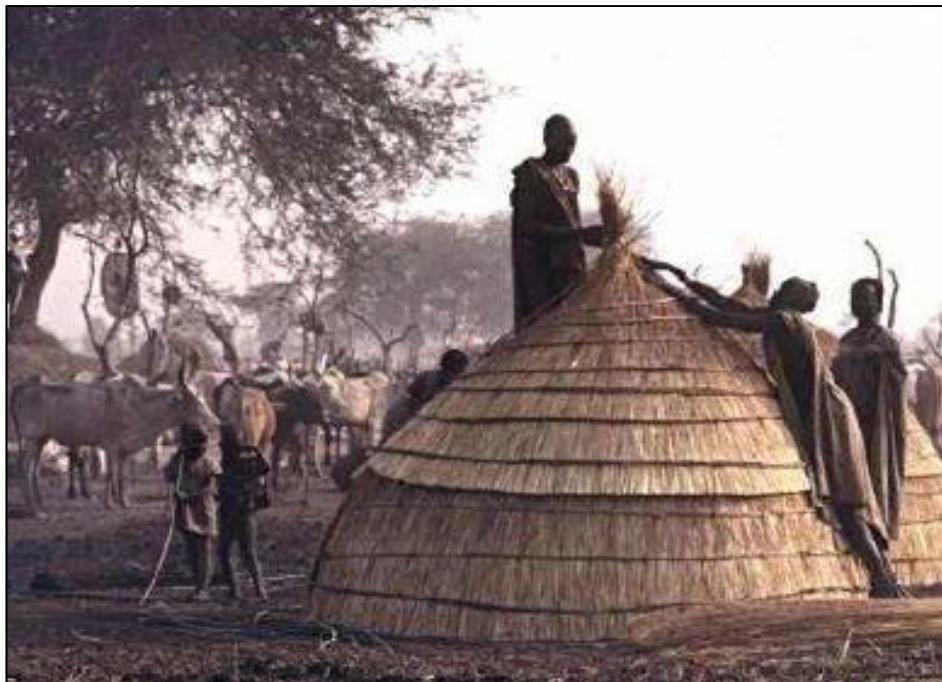


Figure 2.10 Illustration vernaculaire avec mur végétal, habitation en chaume (Kenya). Tiré de Atif (2009, P.33)

La réglementation actuelle encourage l'isolation des bâtiments par l'extérieur, l'installation de matériaux isolants usinés génère de la pollution et nécessite par ailleurs des revêtements de finition souvent coûteux. La paroi végétale est un isolant naturel non usiné constitué de végétaux séchés pouvant être compactés ou tressés et qui ne nécessite aucune finition lorsqu'il est posé sur les parois extérieures du bâtiment. Cependant, la mise en œuvre de ce type de dispositif est assez délicate et requiert un savoir-faire et une rigueur lors de la pose pour éviter tout problème d'infiltration d'eau. Aussi, les risques d'incendie sont à prévoir, il est donc indispensable de prendre en considération ce paramètre dès les phases préliminaires du projet tout en prenant en considération également les risques d'apparition de mousse ou autres organismes pouvant favoriser la détérioration du dispositif, donc une maintenance régulière est à privilégier.



Figure 2.11 Illustration contemporaine avec un mur végétal, maison individuelle (Zoetermeer, Pays-Bas)
tiré de Salah (2010, P.35)

2.3.3 Les galeries extérieures

Les arcades sont souvent employées lorsque des bâtiments s'organisent autour ou à proximité d'un espace public. Ce dispositif peut aussi exister dans des maisons individuelles autour d'une cour intérieure ou au niveau d'un porche d'entrée. Se protéger du soleil ou de la pluie a conduit à une réponse commune à deux types de climats pourtant opposés. Le terme « arcades » généralement utilisé renvoie à la forme des demi-cercles qu'on rencontre souvent, afin de cibler essentiellement l'abri généré par ces « arcades » et pour éviter de faire l'amalgame nous avons préféré le terme « galerie extérieure », le terme extérieur permet de bien comprendre qu'il ne s'agit pas d'un souterrain.

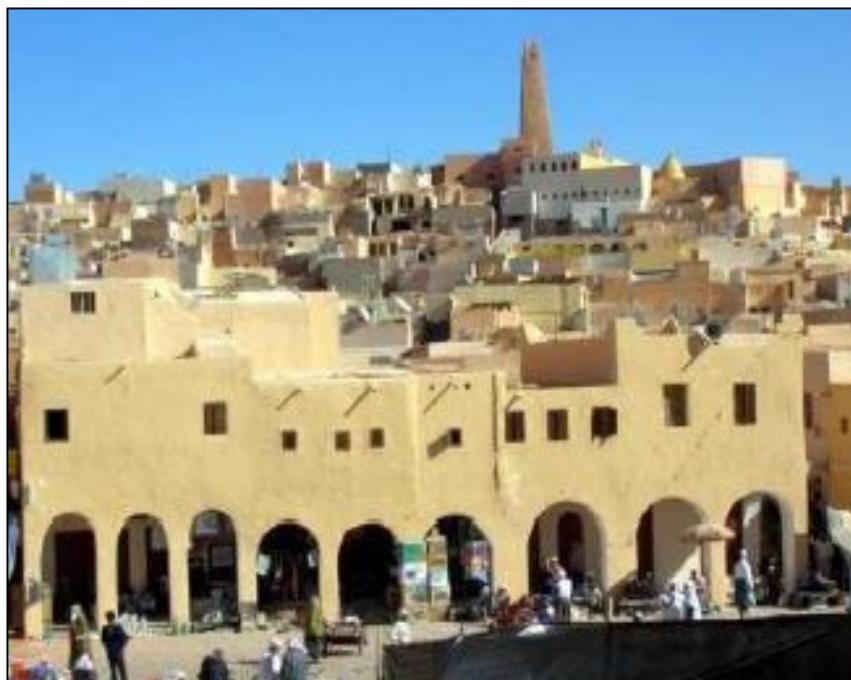


Figure 2.12 Illustration vernaculaire avec des galeries extérieures (place du marché, Ghardaïa, Algérie)

« En zone urbaine, le rez-de-chaussée des bâtiments accueille souvent des commerces et services qui se trouvent exposés aux intempéries, au soleil, à la pollution et aux nuisances sonores. De plus, la galerie extérieure abrite les trottoirs attenants aux bâtiments des diverses nuisances, elle constitue un masque solaire et protégé de la pluie et de la neige » (Boulefekhar, 2011). Elle trouve sa place près d'espaces publics majeurs ainsi que dans des habitations individuelles ou groupées autour d'une cour intérieure ou en façade. Toutefois, dans un souci de respect des règlements d'urbanisme, essentiellement en zone urbaine ce dispositif n'est pas toujours admis (alignement de façade, recul...).

La galerie extérieure cible essentiellement le confort visuel, le confort hygrothermique et le confort acoustique.



Figure 2.13 Illustré réalisation contemporaine avec des galeries extérieures (église Portalegre, Portugal) tiré de Sylvie (2011)

2.3.4 L'espace central, la cour intérieure ou le patio

C'est en consultant le livre « le M'Zab une leçon d'architecture » que l'identification du dispositif a été faite. Intégré dans une région du désert algérien (Ghardaïa), la « chbika » est une ouverture de taille moyenne en terrasse qui apporte de la lumière et permet la ventilation des espaces de vie. Elle est accompagnée d'une grille stressée qui sert de filtre au rayon du soleil. Dans cette région, les ouvertures en façade sont déconseillées, on préfère avoir recours à ce dispositif qui évite les surchauffes et permet la ventilation naturelle des espaces. D'autres régions utilisent le même principe qui prend des formes différentes, mais dont la portée reste inchangée. Ce système répond certes à des climats chauds, mais permet aussi de se protéger du froid, les yourtes mongoles en sont l'exemple. Réduire au maximum les ouvertures pour éviter les déperditions thermiques a conduit à cette réponse minimaliste qui permet d'offrir un apport suffisant de lumière tout en permettant le renouvellement de l'air. La première définition proposée était « prise d'air et de lumière zénithale », trop longue elle s'est vite réduite à une appellation plus efficace « L'espace central ».

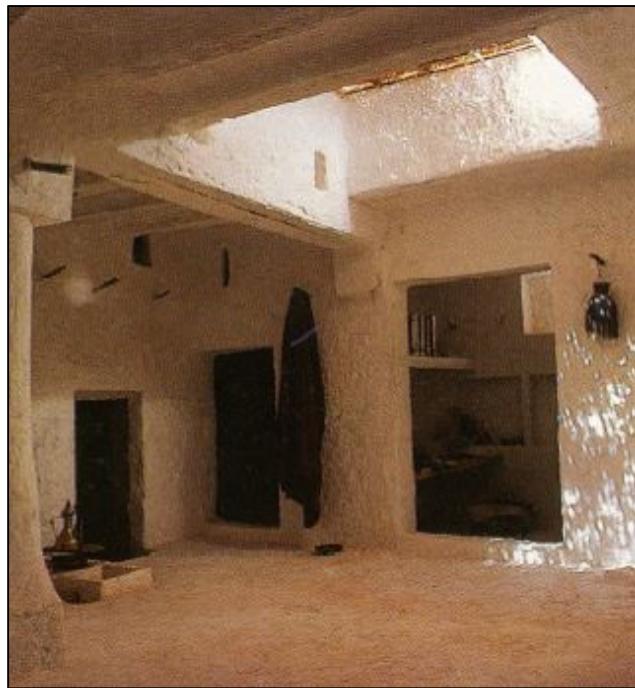


Figure 2.14 Illustré réalisation vernaculaire avec espace central (maison individuelle à Ghardaïa, Algérie)

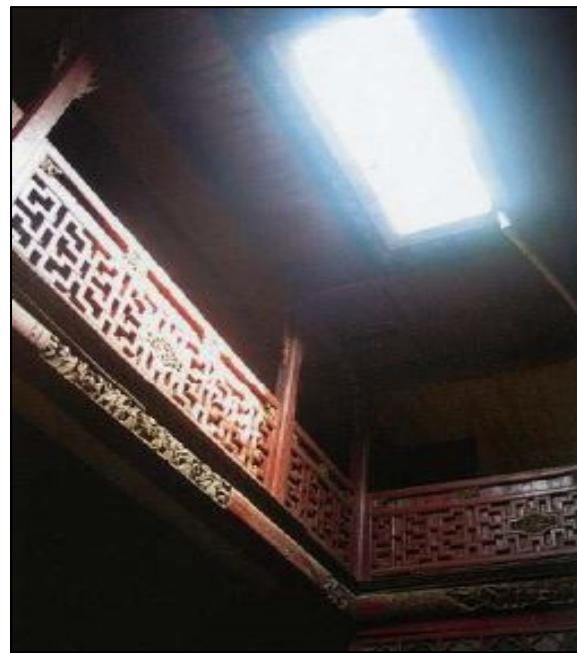


Figure 2.15 Illustré réalisation vernaculaire avec espace central en Chine

Dans les régions très froides ou très chaudes, les ouvertures en façade provoquent d'importantes déperditions thermiques auxquelles il faut souvent pallier en utilisant plus de chauffage ou plus de climatisation ce qui génère une consommation d'énergie conséquente. Vu cette contrainte, l'espace central permet d'assurer l'éclairage et la ventilation des espaces et il permet également de réduire les ouvertures en façade et ainsi d'amoindrir considérablement les déperditions thermiques. Malgré que du point de vue fonctionnel et conceptuel, ce dispositif n'est pas toujours compatible à toutes les situations de conception et n'est pas toujours admis.

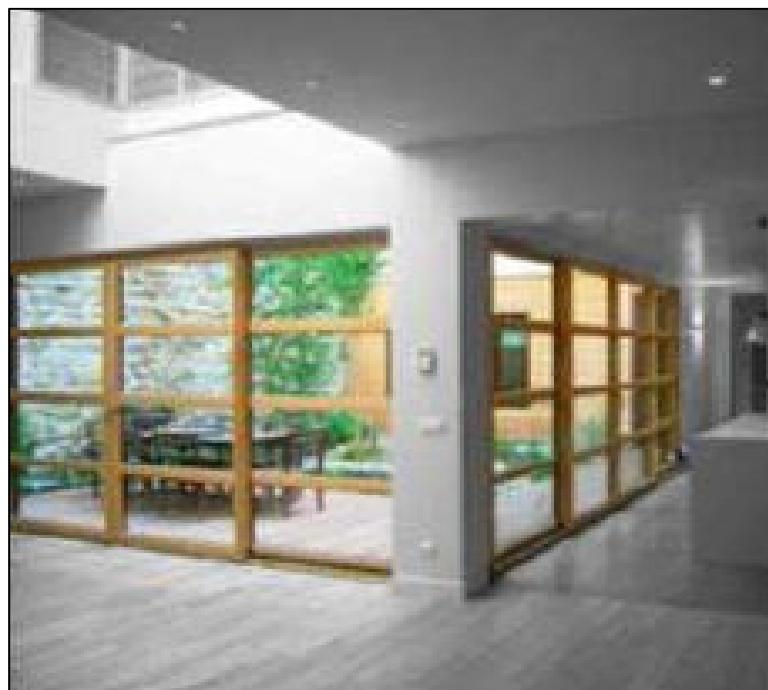


Figure 2.16 Illustré réalisation contemporaine avec espace central (maison individuelle) au Maroc

2.3.5 La paroi réfléchissante

Dans l'ouvrage «Architecture de lumière», la majorité des réalisations qui y sont répertoriées sont de couleur blanche, cette particularité a constitué le point de départ de notre questionnement. L'usage de matériaux de couleur claire en toiture et en façades est une solution vernaculaire très efficace et d'une grande simplicité pour pallier aux importantes

surchauffes qui surgissent dans les régions où le rayonnement solaire est important. L'architecture vernaculaire méditerranéenne en est la principale représentante.



Figure 2.17 Illustration vernaculaire dans le village d'Oia île de Santorin, Grèce tiré de Sylvie (2011)

Dans les régions chaudes et méditerranéennes, les toitures et façades exposées au soleil ont tendance à cumuler de la chaleur et la restituer aux espaces intérieurs générant des surchauffes importantes durant les saisons chaudes. Ceci engendre une utilisation accrue de systèmes de climatisation. Le choix des revêtements extérieurs des bâtiments peut jouer un rôle important dans la diminution des surchauffes d'été, les matériaux et les couleurs s'ils sont bien choisis, ils permettent d'importantes économies d'énergie. Toutefois, en région très froide, ce type de parois ne permet pas de profiter du rayonnement solaire pour contribuer au chauffage des bâtiments, ce système est donc intéressant dans les climats chauds et méditerranéens où l'hiver est plus clément.



Figure 2.18 Illustré réalisation contemporaine, maison pour personnes âgées au Portugal tiré de Boulfekhar (2011, P.40)

2.3.6 Autres réalisations contenant une configuration de ventilation passive

Notre axe de recherche s'intéresse à l'évaluation énergétique de deux systèmes passifs à savoir une enveloppe de bâtiment contenant du béton de chanvre (comme isolant) et une stratégie de ventilation passive liée à l'effet de cheminée et à l'effet combustible. Dans les anciens bâtiments, la ventilation se faisait de façon naturelle permettant d'assurer un confort satisfaisant, mais aussi une évacuation des polluants de façon permanente. De ce fait, nous envisageons d'évaluer l'impact d'intégrer un système de ventilation passif dans un bâtiment résidentiel contemporain sur le rendement énergétique global. Dans cette section, nous présentons quelques bâtiments contemporains contenant une configuration de ventilation passive issue du savoir-faire vernaculaire.

2.3.6.1 La tour 30 st Mary axe

Appelé aussi la SWISS RE la tour est située au centre-ville de Londres (Figure 2.19). Cet exemple de tour durable illustre comment utiliser des études de cas pour minimiser

l'énergie : stratégie de ventilation naturelle à travers une technique de superposition sur différents niveaux de plans d'étage, formant une rotation en spirale au centre du bâtiment. Cette dernière, assure une ventilation naturelle de tous les espaces par effet de cheminée ce qui constitue une alternative sérieuse aux systèmes de ventilation mécaniques.



Figure 2.19 Illustre la 30 st Marie Axe Norman Foster Londres Source : Norman Foster, [www.lankaart.org : article_35281124.html](http://www.lankaart.org/article_35281124.html)



Figure 2.20 Illustre maquette montrant le décalage des niveaux source : Architecture Steel Stahl Acier 21, Swiss Re

Norman Foster architecte concepteur du projet affirme avoir développé « une architecture écologique, la première du genre à Londres, qui sans doute, par son indiscutable qualité, sera une référence dans la génération émergente des immeubles de grande hauteur » (Norman, 2008). La figure 2.21 illustre des essais de simulation d'une maquette numérique.

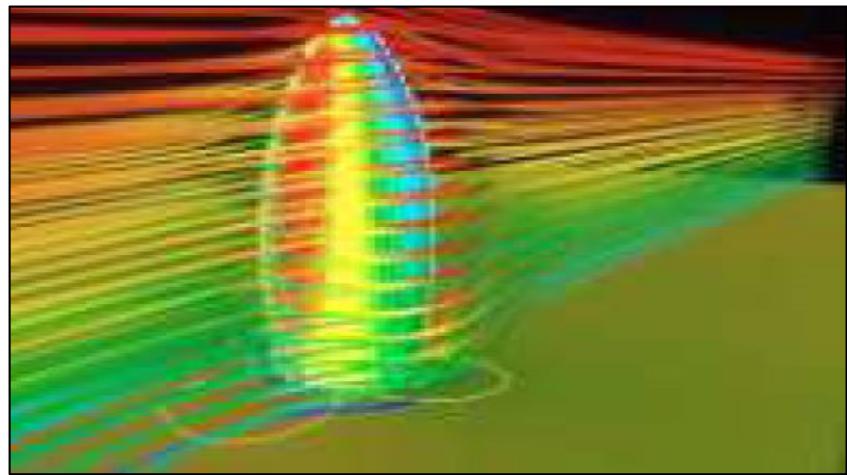


Figure 2.21 Illustration simulation d'un essai en soufflerie à partir d'une maquette numérique source : Architecture Steel Stahl Acier 21, Swiss Re

2.3.6.2 Exemple d'immeuble administratif

Toujours inspirés des écotechniques de l'architecture vernaculaire, nous porterons notre regard sur un exemple de bâtiment contemporain de bureaux administratifs, dont la ventilation est naturelle et elle est établie par l'action de cheminées et par effet combustible à travers des conduits d'aérations ressortant sur la toiture, jouant ainsi le rôle de cheminée d'aération.

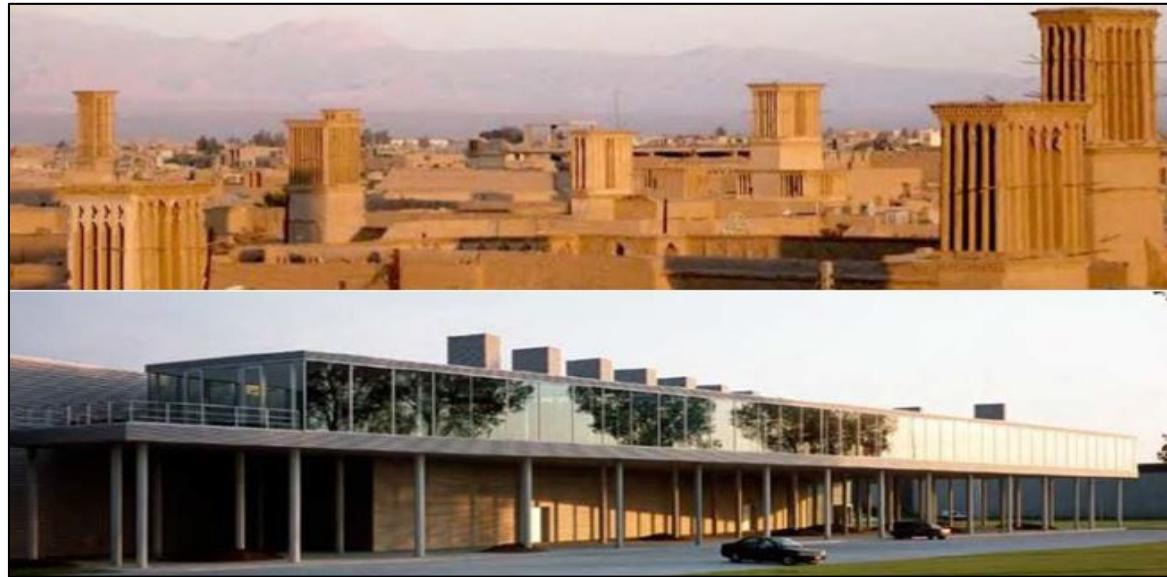


Figure 2.22 Illustré un bâtiment administratif contemporain incorporant des cheminées d'aération, stratégie issue du savoir-faire vernaculaire (cas de l'Iran) source : S. Salah, vers une primauté de l'architecture, transformation de l'existant et enjeux environnementaux

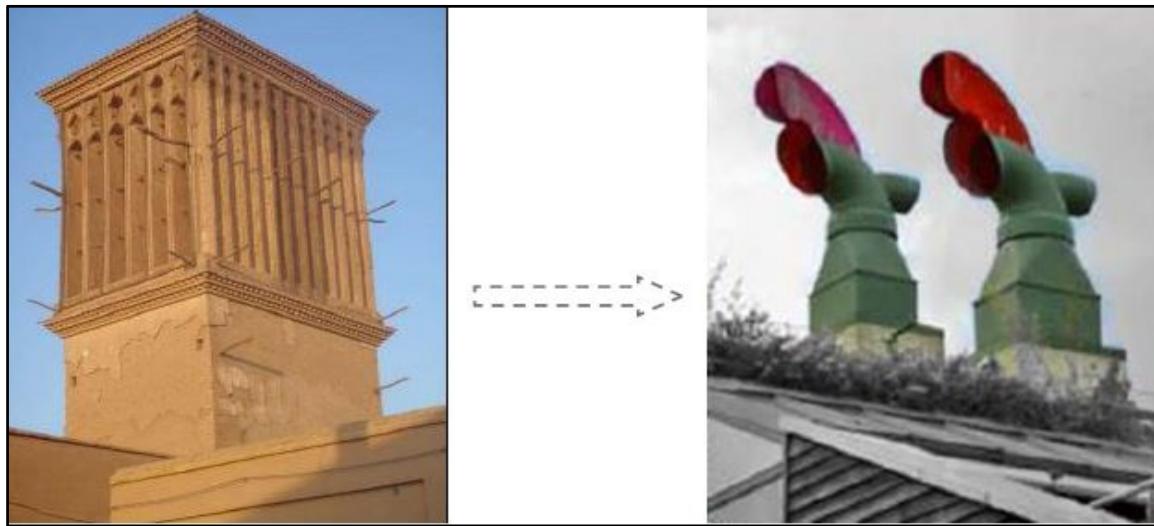


Figure 2.23 Correspondance du bâtiment administratif avec un cheminé d'aération, technique inspiré des Bagdir en Iran (savoir-faire vernaculaire) tiré de Boulfekhar (2011, P.50)

2.3.7 Synthèse

Ce chapitre est dédié à la compréhension des connaissances vernaculaires. L'architecture vernaculaire représente une bibliothèque de stratégies et techniques liées à la consommation d'énergie et au confort thermique propre à un pays, une région. L'architecture vernaculaire fait preuve, quels que soient la période et le lieu de construction, d'une approche intuitive des notions d'efficacité énergétique et du respect du lieu. Elle représente tout un savoir-faire acquis grâce à une expérience séculaire, transmise de génération en génération.

Cependant, actuellement le problème est de préserver et de tirer avantage ce savoir-faire qui existe et qui peut être transféré et croisé avec d'autres expériences (répondant au besoin de la société moderne) pour développer des constructions économies en énergie. Ainsi, pour illustrer ce point de vue, nous avons analysé plusieurs exemples d'architecture contemporaine, lesquels se sont inspirés du savoir-faire vernaculaire toute en s'adaptant au mode de vie d'aujourd'hui.

Un exemple de réinterprétation des systèmes de ventilation passifs pour une meilleure ventilation naturelle est évoqué afin d'appuyer notre réflexion sur l'intégration des stratégies de ventilation passives dans le bâtiment résidentiel. Nous pensons qu'en adoptant les mêmes systèmes utilisés dans les bâtiments vernaculaires liés aux matériaux biosourcés tels que le béton de chanvre ainsi qu'à la climatisation passive, l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels peut être améliorée.

CHAPITRE 3

CODE DU BÂTIMENT ET DE CONSTRUCTION AU CANADA ET EN ALGÉRIE

Dans chaque pays, les divers codes de construction et les réglementations municipales énumèrent les exigences minimums nécessaires afin qu'un bâtiment résidentiel, industriel ou commercial soit construit en toute sécurité. Au Canada, la conception des bâtiments est en fonction de ces exigences. Chaque province et territoire ont leurs propres lois et règlements de construction pour respecter les conditions climatiques et géographiques. L'Algérie possède ce qu'on appelle le journal officiel de la République algérienne qui définit les règles générales d'aménagement, d'urbanisme et de construction. Cependant, la plupart des nouvelles constructions ne prennent pas en considération le référentiel technique et réglementaire de la construction.

3.1 Code et construction des bâtiments au Canada et au Québec

Les codes ou règlements du bâtiment permettent aux municipalités de contrôler la qualité, la durabilité et la sécurité des structures des bâtiments en contrôlant la nature des matériaux autorisés et la manière dont ils sont assemblés. Le rôle de la réglementation de la construction est de garantir que les bâtiments sont protégés contre les dangers suivants :

- La transformation en eau d'un excès d'humidité sur les murs ;
- Intégration des murs coupe-feu en cas d'incendie ;
- Les nuisances sonores.

3.1.1 Le code national du bâtiment

Le Code national du Bâtiment sert de référence de base pour les professionnels de la construction au Canada. Il permet de s'assurer que les occupants bénéficieront d'un endroit sain et sécuritaire pour vivre.

Pour répondre aux exigences environnementales fixées par le gouvernement en matière de construction, les constructeurs peuvent ensuite s'inspirer des différentes mesures proposées par des labels ou des programmes de construction.

3.1.2 Le code national de l'énergie du bâtiment

Le Code national de l'énergie pour le Bâtiment a été élaboré en 1997. Il présente les exigences qui portent sur l'enveloppe des bâtiments construits au Canada. L'enveloppe du bâtiment est définie dans ce Code comme « ensemble des composants qui isolent l'espace climatisé de l'espace non climatisé, de l'air extérieur ou du sol, ou qui isolent des espaces climatisés destinés à être maintenus à des températures différentant par plus de 10 °C dans les conditions de calcul » (CNRC.2011). Il impose aussi des mesures en ce qui concerne les systèmes de chauffage et de ventilation, le chauffage de l'eau sanitaire, l'éclairage et l'énergie électrique. Le Code s'adresse aussi bien aux bâtiments neufs que ceux rénovés, car il propose aussi des méthodes de remplacement de l'enveloppe du bâtiment. Il énonce des exigences en matière d'efficacité énergétique pour la construction des bâtiments neufs. Les bâtiments sont ensuite validés par Ressources naturelles Canada comme étant conformes au Code national de l'énergie pour le bâtiment si le bâtiment soumis permet une économie de 25 % de la consommation en énergie par rapport à un bâtiment de référence. Le bâtiment de référence est conçu selon les normes du Code national de l'énergie pour les bâtiments et selon les règles de Ressources naturelles Canada (Logiciel EE4. 2008).

3.1.3 Les normes et certifications au canada

Le développement durable s'installe dans l'industrie de la construction à travers des normes et des certifications qui permettent de quantifier l'impact environnemental des bâtiments en prenant en compte l'impact des matériaux, des équipements ou des technologies installés.

Ces certifications permettent d'évaluer les performances d'un bâtiment et de les comparer. Ces normes et labels sont importants dans la phase de conception, car elles permettent de choisir des mesures d'efficacités énergétiques adaptées et performantes dans le but de

développer la construction de bâtiments durables (Société d'hypothèque et de logement. 2011). Ci-dessous, les normes les plus utilisées dans la construction.

3.1.3.1 Cotation EnerGuide

La cotation ÉnerGuide a été mise au point par Ressources naturelles Canada (RNCan). Cette notation permet d'évaluer le rendement énergétique des maisons individuelles en attribuant une note entre 0 et 100. La note minimale est attribuée à une maison qui consomme beaucoup d'énergie tandis que la note maximale est attribuée à un logement qui consomme très peu d'énergie (comme les bâtiments à consommation nette zéro). Grâce à cette notation, il est alors plus facile de comparer les maisons d'un point de vue énergétique. La Figure 3.1 représente la cote typique d'un système de cote ÉnerGuide en fonction des caractéristiques des maisons.

Caractéristiques de la maison	Cote typique du système de cote ÉnerGuide (SCE)
Maison existante non rénovée	de 0 à 50
Maison existante rénovée	de 51 à 65
Maison existante ayant fait l'objet de rénovations écoénergétiques	de 66 à 74
Maison neuve bâtie sous les normes du code du bâtiment sans exigences énergétiques.	de 70 à 76
Maison neuve construite selon le code du bâtiment avec exigences énergétiques	de 77 à 80
Maison neuve écoénergétique	de 81 à 85
Maison neuve hautement écoénergétique	de 86 à 99
Maison nette zéro (l'énergie achetée et l'énergie produite à l'aide de sources renouvelables sont égales)	100

Figure 3.1 Cote EnerGuide de 0 à 100 selon les caractéristiques de la maison tirée de Ressources naturelles Canada
[Échelle de cotes Energuide de 0 à 100]

La cotation ÉnerGuide est notamment utilisée par d'autres programmes de certification comme la norme R-2000 ou le programme ENERGY STAR. La cotation ÉnerGuide ne concerne pas uniquement les maisons, mais aussi les équipements électroménagers, les systèmes de chauffage, de climatisation et de ventilation ainsi que les véhicules. D'après le Règlement sur l'efficacité énergétique du Canada, les appareils électriques neufs fabriqués au Canada ou importés doivent porter une étiquette ÉnerGuide qui renseigne sur sa consommation et son efficacité énergétique (Société d'hypothèque et de logement. 2011).

3.1.3.2 Eco Logo

Le programme de certification Eco Logo a été mis en place par le gouvernement du Canada en 1988. Il permet d'évaluer l'impact environnemental de produits ou de services. Ceux qui portent cette certification répondent à des normes environnementales strictes puisque le processus requiert une analyse de cycle de vie du produit ou du service concerné (Société d'hypothèque et de logement. 2011).

3.1.3.3 Energy Star

Le programme d'étiquetage ENERGY STAR a été lancé au Canada en 2001. Il concerne tous les produits qui peuvent agir sur la performance énergétique d'un bâtiment comme les électroménagers, les systèmes de chauffage, de climatisation et de ventilation, l'éclairage, les portes, les fenêtres... L'étiquetage ENERGY STAR est un programme mondial et il a été adopté par de nombreux pays à travers le monde comme les États-Unis, l'Australie, les pays de l'Union européenne, le Japon, la Nouvelle-Zélande et Taiwan (Société d'hypothèque et de logement. 2011). Le programme ENERGY STAR concerne aussi les logements, en particulier les maisons neuves. Il a été lancé pour encourager les mesures éco énergétiques qui permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre dues aux bâtiments. Les objectifs fixés par le programme permettent d'obtenir une cote ÉnerGuide d'environ 80. Pour atteindre cet objectif, les bâtiments neufs certifiés par ce programme sont mieux isolés, mieux ventilés et ont une meilleure étanchéité à l'air. De plus, ils sont équipés de fenêtres

plus performantes et d'appareils de chauffage et de climatisation plus efficaces. Une maison neuve certifiée ENERGY STAR consomme en moyenne 20 % moins d'énergie qu'une maison construite selon le Code national du Bâtiment (ENERGY STAR pour les maisons neuves.2016).

3.1.3.4 Norme R-2000

La norme R-2000 a été mise au point par Ressources naturelles Canada pour étiqueter les maisons neuves dans le but d'évaluer leurs performances énergétiques. La norme R-2000 fixe des objectifs précis au niveau des performances techniques d'un bâtiment comme la consommation d'énergie, de ventilation, de conservation de l'eau, de qualité de l'air, de renouvellement d'air (inférieur à 1,5 par heure à 50 pascals) et de protection de l'environnement. Les exigences de la norme R-2000 portent sur des objectifs de conception et laissent les constructeurs choisir eux-mêmes les technologies pour atteindre ces objectifs. On estime qu'un bâtiment qui répond aux exigences de cette norme correspond à une notation EnerGuide de 86 soit une performance énergétique très élevée (Société d'hypothèque et de logement. 2011). Il est important de noter que cette norme s'applique seulement aux bâtiments résidentiels, que ce soit des maisons individuelles ou des immeubles résidentiels à logements multiples. Les bâtiments qui respectent cette norme sont reconnus comme étant les plus performants parmi les bâtiments éco énergétiques. La norme R-2000 est régulièrement mise à jour et la version la plus récente a été mise en place en juillet 2012. Les maisons construites selon cette nouvelle norme satisferont aux exigences d'efficacité énergétique qui ont augmenté de 50 % comparativement à la version précédente de la norme (Maisons R-2000.2016).

3.1.3.5 EnviroHome

Le programme national EnviroHome a été lancé en 1994 par l'Association canadienne des constructeurs d'habitations (ACCH) et TD Canada Trust. Son objectif est d'encourager les maisons R-2000 et ne concerne que les constructeurs qui sont membres de l'ACCH. EnviroHome instaure des mesures pour gérer les eaux pluviales, protéger la faune et la flore,

procurer au bâtiment un ombrage naturel et réduire au minimum les besoins en eau de l'aménagement paysager. De plus, pour être certifié par le programme EnviroHome, le bâtiment doit inclure un plan de gestion des déchets et éventuellement des sources d'énergies renouvelables. Le programme de certification comprend aussi des exigences en matière de gestion de projet comme la gestion du chantier, les plans d'affaire et de promotion ainsi que le soutien de l'association locale des constructeurs d'habitation (Société d'hypothèque et de logement. 2011).

3.1.3.6 LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

Le label LEED Canada a été créé en 2009 par le Conseil du bâtiment durable du Canada (CBDC). Il concerne les logements comme les maisons individuelles et les petits collectifs d'habitation de trois étages et moins. Le label LEED est attribué dès la phase de conception du bâtiment. Il existe une certification argent, or ou platine en fonction des performances de la maison dans plusieurs catégories comme l'aménagement écologique des sites, la gestion efficace de l'eau, l'énergie et l'atmosphère de la maison, les matériaux et les ressources utilisés, la qualité des environnements intérieurs, l'emplacement du bâtiment, la sensibilisation et la formation effectuée auprès des utilisateurs, les innovations apportées et les méthodes de conception. Quel que soit le niveau de certification des bâtiments LEED, la cote ÉnerGuide de tels bâtiments est au minimum de 76, mais jusqu'à maintenant, les bâtiments qui ont reçu la certification LEED avaient en moyenne une cote de 86 (Société d'hypothèque et de logement. 2011).

3.1.3.7 Normes Passivhaus

Passivhaus est une norme allemande qui signifie en français « maison passive ». La démarche de la maison passive est surtout répandue en Europe même si la première maison passive a été construite en 1977 à Régina dans la province canadienne de la Saskatchewan. Bien que la Saskatchewan Conservation House ait été construite au Canada, le pays ne s'est pas beaucoup investi les années suivantes pour développer ce label. En effet cette maison a

permis des avancés en termes de construction et pourtant ils n'ont pas été repris dans les Codes du bâtiment ultérieurs (Canadian Passive House Institute.). Cette norme s'applique aux bâtiments neufs que ce soient des logements, des bâtiments institutionnels ou des bâtiments commerciaux. Pour répondre à cette norme, l'occupation d'un bâtiment doit engendrer une faible consommation d'énergie. Pour cela des efforts sont faits sur l'isolation et l'étanchéité de l'enveloppe, en maximisant les gains solaires passifs et avec des équipements de chauffage et de ventilations simples pour consommer le moins d'énergie possible. Isoler l'enveloppe du bâtiment passe par l'isolation du toit, des murs et des fondations ce qui permet de réduire les pertes énergétiques. Elles sont aussi réduites par une haute étanchéité à l'air en limitant les ponts thermiques ce qui permet d'éviter les pertes de chaleur. La chaleur perdue dans la ventilation de l'air peut être récupérée par des ventilateurs récupérateurs de chaleur.

Une fois que le bâtiment est correctement isolé, les apports d'énergie permettent de compenser la consommation en chauffage. Pour cela, une réflexion est nécessaire lors de la phase de conception pour que l'emplacement du bâtiment, sa forme, son orientation, l'emplacement de ses fenêtres et sa masse thermique maximisent les gains solaires passifs. Les bâtiments Passivhaus reposent donc sur une isolation maximale combinée à une efficacité énergétique optimale. (Maison solaire passive contre maison nette zéro : le match.2012) Une maison passive doit répondre à certaines exigences pour être certifiée. Son taux d'étanchéité à l'air doit être inférieur à 0,6 renouvellement d'air par heure à 50 pascals, sa charge de chauffage annuelle doit être inférieure ou égale à 15 kWh/m², sa consommation annuelle d'énergie primaire doit être inférieure ou égale à 120 Wh/m² et la surchauffe en été doit être limitée à moins de 10 % (Société d'hypothèque et de logement. 2011).

3.1.3.8 Builtgreen

Builtgreen est une initiative lancée en Alberta en 2003 qui propose un étiquetage pour les maisons neuves et rénovées. Ce programme est basé sur la norme R-2000 combinée au programme Builtgreen Colorado. Pour obtenir ce label, une maison doit être évaluée sur

plusieurs critères : l'efficacité énergétique, la qualité de l'air intérieur, l'utilisation des ressources et l'impact du bâtiment sur l'environnement. Pour évaluer l'efficacité énergétique de la maison, le programme se base sur la cote ÉnerGuide. La certification Builtgreen bronze requiert une cote de 72, la certification argent requiert une cote de 75, la certification or requiert une cote de 77 et enfin la certification platine requiert une cote de 82 (Société d'hypothèque et de logement. 2011).

3.1.3.9 Novo climat

Le programme Novo climat a été mis en place au Québec dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments neufs et en particulier des bâtiments résidentiels. Ce programme est géré par le Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques. Il est similaire aux exigences du programme ENERGY STAR mais comprend aussi des exigences en matière de qualité de l'air intérieur. Les objectifs peuvent être atteints grâce à une isolation thermique performante, une bonne étanchéité à l'air et un système de ventilation mécanique. Les maisons certifiées par le programme Novo climat ont généralement une cote ÉnerGuide de 78 à 80 (Société d'hypothèque et de logement. 2011).

3.1.3.10 BOMA BEST

La certification BOMA BEST est un programme national lancé en 2005 par BOMA Canada. Elle permet d'évaluer la performance énergétique et environnementale des bâtiments. Le programme contient 5 niveaux de certification selon les normes exigées auxquels le bâtiment répond (certifié, bronze, argent, or et platine). Chaque catégorie recense les meilleures pratiques à adopter pour atteindre le niveau d'exigence. Les exigences portent notamment sur le bilan énergétique du bâtiment, le plan de gestion de l'énergie, les mesures de réduction d'énergie, la consommation en eau... (BOMA BEST. Février 2007) Le programme concerne certains types de bâtiments commerciaux et industriels et au niveau des bâtiments résidentiels, il ne concerne que les immeubles résidentiels à logement multiple (Boma Québec. n.d.).

3.2 Les conditions climatique et géographique

Les conditions climatiques constituent une catégorie importante de charges que subissent l'enveloppe du bâtiment et ses composantes. Les charges comprennent les paramètres suivant :

- La température ;
- Le rayonnement solaire ;
- L'humidité (vapeur, liquide, solide) ;
- Le vent.

En Amérique du Nord, Lstiburek (2005) a établi une classification selon huit zones climatiques (voir Figure 3.2) qui tient compte à la fois des températures moyennes et de la quantité de précipitation.

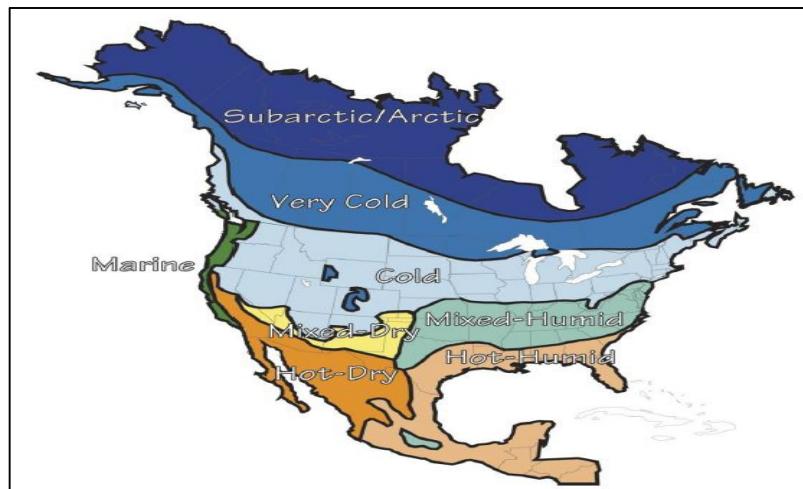


Figure 3.2 Illustré les huit zones climatiques de l'Amérique du Nord établi par Lstiburek (2005) tirée de Maref (2020)

La température est le paramètre climatique le plus souvent mentionné.

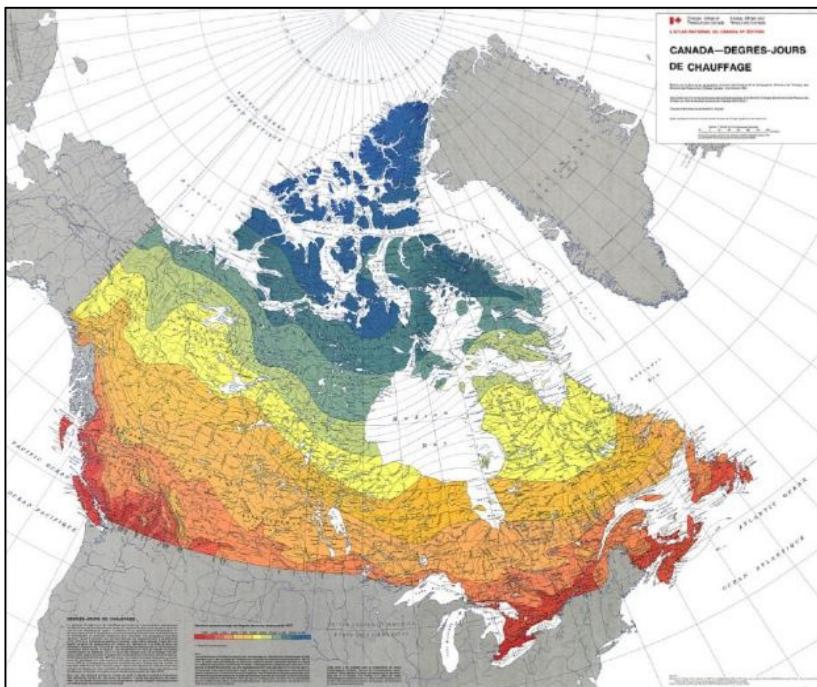


Figure 3.3 Illustré la classification du climat en Amérique du Nord selon la température tirée de Maref (2020)

Chaque degré de température quotidienne moyenne se trouvant en dessous de 18 degrés Celsius, la température de référence. On additionne cette valeur pour chaque jour de l'année pour obtenir le total annuel de degrés-jours de chauffe pour un endroit donné. On peut utiliser le même principe pour les degrés-jours de climatisation, où l'on considère le nombre de degrés au-dessus de la température de référence.

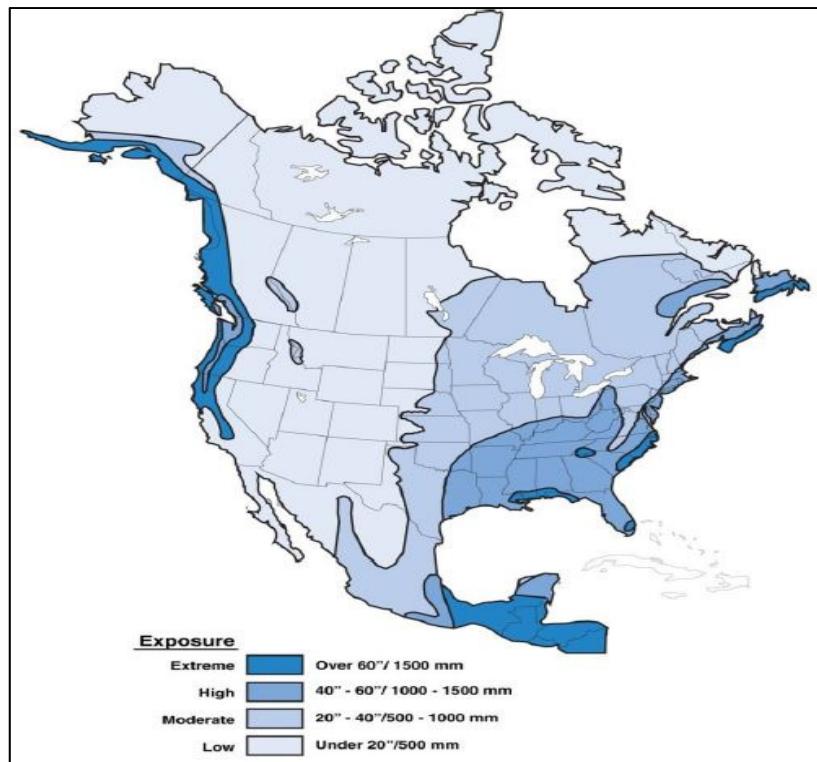


Figure 3.4 Illustré la classification du climat en Amérique du Nord selon la quantité de pluie tirée de Maref (2020)

La pluie est un des éléments contre lesquels les êtres humains cherchent à se protéger depuis toujours. Elle est aussi une cause majeure des problèmes d'enveloppe du bâtiment. La Figure 3.4 illustre la quantité moyenne annuelle de pluie pour l'Amérique du Nord selon une classification de Lstiburek (2005).

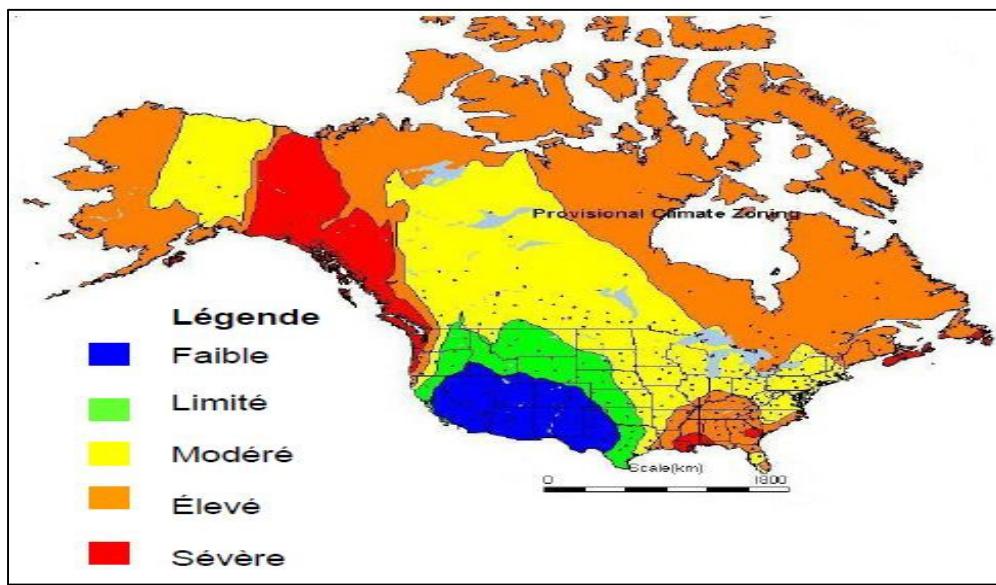


Figure 3.5 Illustré la classification du climat en Amérique du Nord selon l'indice d'humidité tirée de Maref (2020)

L'institut de recherche en construction du Conseil national de recherches du Canada a développé une classification afin de caractériser la charge d'humidité sur l'enveloppe du bâtiment. L'indice de mouillage est une fonction des précipitations de pluie. Cependant, l'indice de séchage est une fonction potentielle d'évaporation de l'humidité (Maref, 2020).

3.3 La construction en Algérie

L'Algérie est un pays de la zone subtropicale du Nord-Africain. Son climat est très différent entre les régions (Nord-Sud, Est-Ouest). «En Algérie, les codes et réglementations de construction sont gérés par les services de l'Organisme national de contrôle technique de la construction (CTC), les services de collectivités locales et d'autres organismes concernés par les aspects techniques de la construction» (ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville, 2019). Cependant, les réglementations tenant compte des conditions juridique et technique dans le domaine de la construction ne sont pas à jour avec les tendances actuelles. La plupart des bâtiments sont construits en fonction des anciennes stratégies et selon une méthodologie constructive ancienne (Benyetou, 2017).

3.3.1 Condition climatique

L'Algérie se situe sous un climat de transition, entre la zone tempérée et la zone tropicale, cette position la met sous l'influence directe du climat méditerranéen au Nord et du climat désertique au Sud. Le climat méditerranéen est situé sur la bande littorale, tandis que le climat saharien et le souffle du sirocco se manifestent plus intensément au sud du pays. Plus de 85 % de la surface totale du pays se caractérise par un climat chaud et sec. En été, l'Algérie est soumise à l'influence des hautes pressions subtropicales qui, eu égard à sa latitude, donne des temps très chauds, très secs et tempérés, mais seulement, aux bords de mer (Benyetou, 2017).

« À cette vaste étendue territoriale correspond une diversité de zones climatiques qu'on peut classer en deux grandes catégories » (Dib, 1993).

Les zones climatiques d'hiver et d'été sont :

- La zone H1 est sous l'influence de la proximité de la mer ;
- La zone H2 est sous l'influence de l'altitude ;
- La zone H3 est sous l'influence de la latitude.

En hiver, ces trois zones sont classées en fonction de l'altitude en sept sous-zones comme suit :

- Sous-zone H1a : littoral mer, altitude 500m : caractérisée par un hiver plus froid et plus long ;
- Sous-zone H2a : atlas tellien- montagne, 1 000 m < altitude < 1 500m : caractérisée par un hiver froid et un écart de température journalier important ;
- Sous-zone H2b : atlas saharien-montagne, altitude > 1 500 m : caractérisée par un hiver glacial ;
- Sous-zone H3a : présaharien, 500 m < altitude < 1 000 m : caractérisée par un hiver très froid la nuit par rapport au jour. Les écarts de température entre le jour et la nuit sont grands ;
- Sous-zone H3b : Sahara, 200 m < altitude < 500m : caractérisée par un hiver moins froid que la zone H3a avec un écart de température journalier ;

- Sous-zone H3c : Hoggar, altitude > 500 m : caractérisée par un hiver très froid identique à la zone H3a, mais qui persistent même durant la journée (Dib, 1993).

En été chaque zone possède les caractéristiques suivantes :

- La zone E1, littorale : caractérisée par un été chaud et moins humide. Un faible écart de température journalière ;
- La zone E2, les hauts plateaux- et les montagnes : caractérisée par un été plus chaud et moins humide avec un important écart de température diurne ;
- La zone E3, le pré-Sahara – tassili : caractérisée par d'été très chaud et sec, mais moins pénible qu'en zone E4 ;
- La zone E4, Le Sahara : caractérisée par d'été sec, mais plus chaud et plus sec qu'en zone E3 ;
- La zone E5, Le Tanezrouft : caractérisée par un été chaud et sec et extrêmement pénible par rapport aux zones E3 et E4 (Dib, 1993).

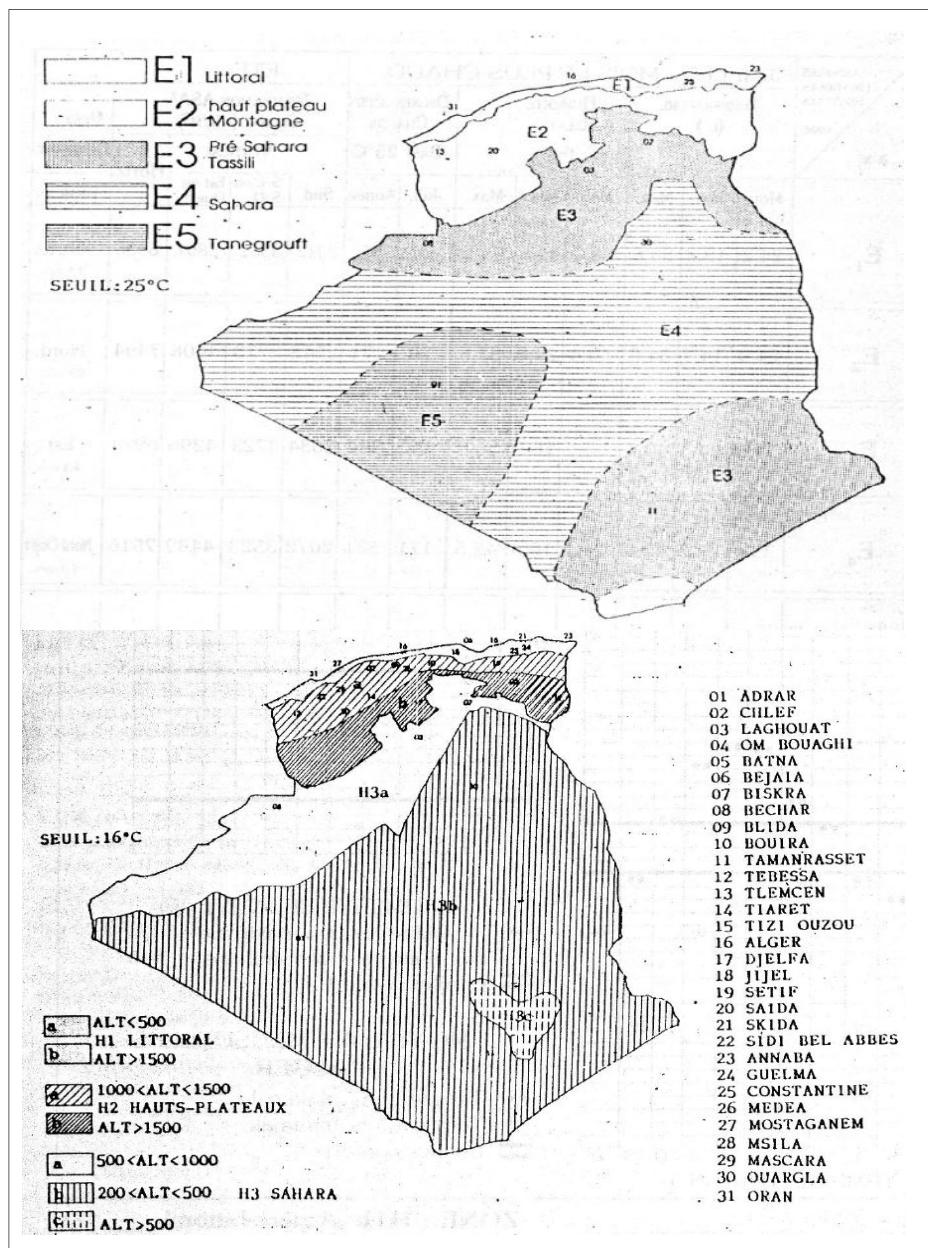


Figure 3.6 Les zones climatiques d'été et d'hiver en Algérie tirée d'ENAG (1993)

3.4 Synthèse

La construction est un domaine qui a été continuellement améliorée au fil des ans en incorporant de nouveaux matériaux dans les structures de construction et de nouveaux concepts. En Amérique du Nord, les bâtiments doivent respecter la valeur de résistance thermique R et RSI du système de mur, les règlements, les normes et les codes du bâtiment. Quant à la construction en Algérie, c'est un domaine qui nécessite une réflexion approfondie. Pour ce faire, l'apprentissage et la formation sont nécessaires. Les règlements standards pour chaque type de bâtiment doivent être mis à jour et établis conformément aux normes canadiennes. De plus, les infractions aux règles d'urbanisme et de construction commis par le citoyen algérien sont restées sans sanctions. De ce fait, les services concernés doivent s'assurer de la diffusion et de l'application des règles technique.

CHAPITRE 4

VALIDATION DE LA PROGRAMMATION DU LOGICIEL ENERGY PLUS

L'objectif principal visé par ce chapitre est de vérifier la programmation du logiciel Energy plus ainsi que le plug-in Open studio 2.7. Pour l'exécution de cela, nous avons utilisé la modélisation énergétique de l'auteur Berghout (2019) effectuée avec la version d'Open studio 1,8. La validation du modèle programmé est basée sur les données de recherche de Berghout (2019). Tous comme la version 1.8, Open studio 2.7 permet d'entrer toutes les données spécifiques du bâtiment à modéliser. À la suite de la programmation, les résultats obtenus seront comparés aux résultats de la version Open studio 1.8 utilisée par Berghout (2019). Cette étude a été choisie, car elle dispose des données complètes nécessaires pour refaire la simulation énergétique du bâtiment utilisé par l'auteur. Par conséquent, les hypothèses et les conditions aux limites utilisées dans l'étude de Berghout (2019) sont énumérées en dessous. Cette investigation nous permet d'entamer notre étude paramétrique en toute sérénité concernant le choix du modèle Open studio 2.7.

4.1 Hypothèse de la simulation Berghout, 2019

- Simulations énergétiques réalisées sur une année typique représentant le climat de la région de Biskra ;
- Le comportement énergétique annuel du bâtiment objet d'étude a été simulé par le modèle 189.1-2009-CZ1-Office ;
- Pas d'influence de la température dans la fixation d'humidité ;
- Il n'y a pas de relation unique entre la teneur en eau et l'humidité relative ;
- Le bâtiment a été divisé en trois zones thermiques ;
- Les simulations se composent d'un calcul horaire dynamique de la consommation énergétique de chaque zone ;

- Les simulations sont réalisées avec des espaces de type 189.1-2009-Office-PrintRoom-CZ1-3 ;
- Le jeu de construction par défaut choisi est le modèle le 189.1-2009-CZ5-Office ;
- La programmation par défaut utilisé est le modèle 189.1-2009-office-BreakRoom-CZ1-3 Schedule Set ;
- Le calendrier du thermostat de refroidissement a été simulé avec le modèle Large Office ClgSetup ;
- Le calendrier du thermostat de chauffage a été simulé avec le modèle Large Office HtgSetup ;
- Le rapport Open Studio a été généré avec le gabarit Annual End Use Breakdown.

4.2 Conditions aux limites

Pour le climat extérieur, le fichier météorologique de la ville de Biskra a été introduit dans Open Studio 2.7 pour pouvoir effectuer la simulation. Les conditions aux limites utilisées par (Berghout, 2019) et aussi utilisées dans le logiciel Open Studio 2.7 pour la simulation sont énumérées comme suite :

- Point de consigne de chauffage : 20°C ;
- Point de consigne de refroidissement : 26°C ;
- Gain de chaleur sensible pour les personnes : 70 W person-1 ;
- Gain de chaleur latente des personnes : 45 W person-1 ;
- Taux de renouvellement d'air (volume par heure) : 0,5 m³. H-1 ;
- Orientation nord-sud pour le bâtiment de Berghout, 2019 afin d'optimiser la performance énergétique par rapport aux rayonnements solaires ;
- Bâtiment moyen avec 15m de hauteur ;
- Revêtements de surface en peinture blanche réfléchissante ;
- Période de simulation sur une année typique (1er janvier 2012 – 31 décembre 2012) ;
- Les paramètres non cités sont pris par défaut par Berghout, 2019 donc par Open studio 2,7.

4.3 Configurations d'assemblage des murs pour la vérification cas de Berghout, 2019 ville de Biskra

Les Tableaux 4.2 et 4.3 présentent la composition des murs ainsi que les propriétés thermo physiques des matériaux établis par (Berghout, 2019) dans ses travaux. Cette même composition est utilisée pour la simulation avec Open Studio 2,7.

Tableau 4.2 Les propriétés thermo physiques des matériaux cas de Biskra tiré de Berghout (2019, p.119)

Materials	Thermal capacity (kJ / kg K)	The thermal conductivity (W / m.K)	Density (kg / m³)
Mortar	0.84	1.15	2000
Hollow-core slab	0.65	0.96	1300
Reinforced concrete	0.92	1.75	2300
coating	1.00	0.35	1500
Air blade	1.22	0.02	1.204
Brick	0.94	0.65	1.099

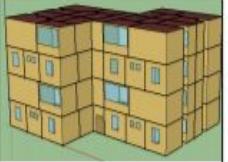
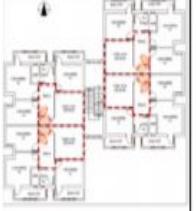
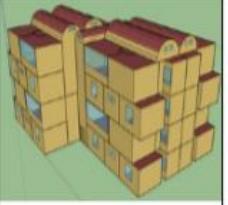
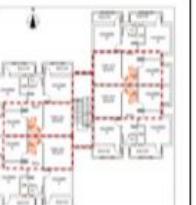
Tableau 4.1 Coefficients d'échange conjonctif pour la simulation tiré de Berghout (2019, p.148)

Low floor, element		Vertical wall		Glazed wall		Intermediate floor, element		High floor, element	
Interior 1.0	Exterior 1.3	Interior 1.1	Exterior 5.6	Interior 1.9	Exterior 3.6	Ceiling 1.0	Closet 0.9	Interior 1.0	Exterior 2.4

4.4 Vérifications des résultats Open Studio 2,7 à ceux de Berghout, 2019

Lorsque nous observons les chiffres obtenus par Open Studio 2.7 à la même période de simulation que Berghout, 2019, on constate qu'ils sont identiques, et il n'y a aucune différence entre les résultats obtenus par la simulation Open Studio 1.8 (Berghout, 2019) et Open Studio 2.7. Le Tableau 4.3 ainsi que les Figures 4.1 et 4.2 montrent les résultats de la simulation du bâtiment de Biskra obtenue par Open Studio 1.8 (Berghout, 2019) et Open Studio 2.7.

Tableau 4.3 Résultats de la simulation du bâtiment de Biskra obtenue par Open Studio 1.8 tirée de Berghout (2019, p.96)

Nom du dispositif	Représentation sur le modèle a,b	Refroidissement		Chauffage		% de réduction du ratio énergétique par rapport au bâtiment STANDARD	Observations
		kWh/an	kW (peak)	kWh/an	kW (peak)		
Bâtiment standard type 1		391 591.19	40 251.95	1 818.62	415.94	Bâtiment Standard	/
Mezzanine		391 591.19	32 39.65	1 691.6	380.11	20.04	L'action d'intégration en combinaison de mezzanine avec l'ambiance thermique à l'intérieur du bâtiment a permis de réaliser un changement, pris séparément pour solutionner la problématique énergétique.
Voûte		361 491.09	37 225.40	1 692.95	386.47	10.46	La notion d'opportunité de la voûte a été introduite. Elle est déterminée à partir de l'analyse bioclimatique de la ville Biskra. L'intégration de cette voûte a permis d'améliorer en plus la performance énergétique de ce bâtiment étudié par rapport au bâtiment standard soit sur le plan de besoin en refroidissement, soit sur le plan de besoin en chauffage.
Combinaison Mezzanine / Voûte		309 943.15	32 426.52	1 560.06	353.30	20.84	L'action d'associer la mezzanine à la voûte a permis de déterminer l'effet de cette combinaison de mezzanine/voûte. Cette dernière association a diminué les besoins de chauffage et de climatisation et a amélioré le confort thermique.

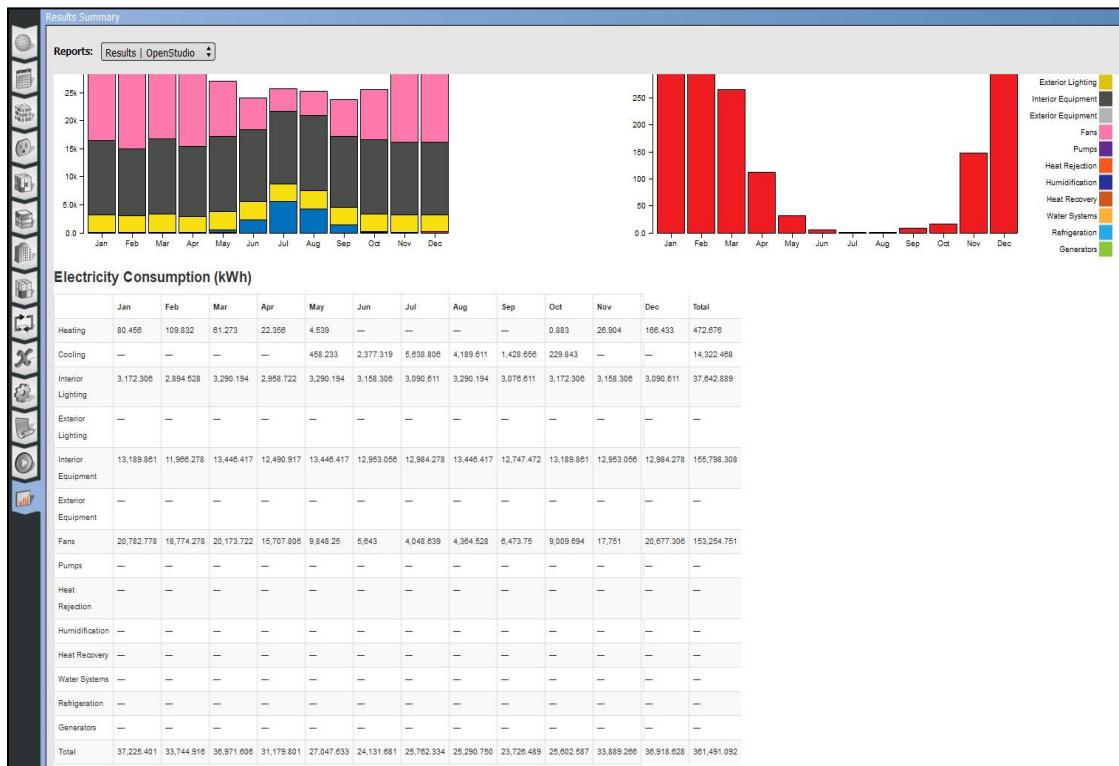


Figure 4.1 Résultats de la simulation du bâtiment de Biskra obtenue par Open Studio 2.7 (configuration de la voûte consommation en électricité)

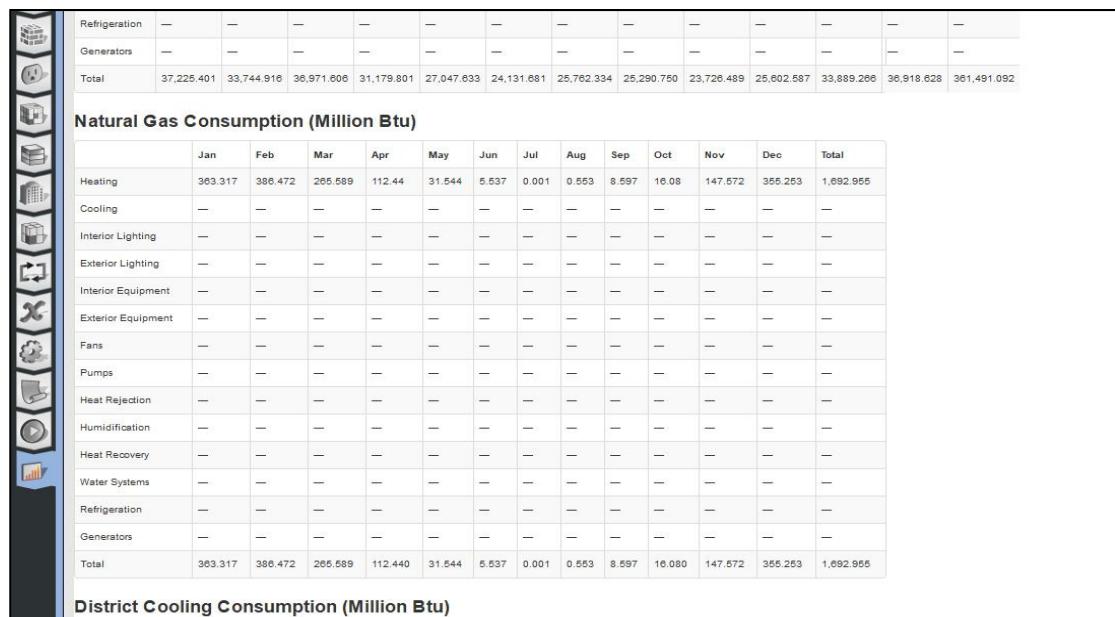


Figure 4.2 Résultats de la simulation du bâtiment de Biskra obtenue par Open Studio 2.7 (configuration de la voûte consommation en gaz)

4.5 Synthèse

L'étude Berghout 2019 a accordé une attention particulière à l'optimisation de la performance énergétique du bâtiment résidentiel dans les régions arides et semi-arides. La méthodologie adoptée reflète les pratiques de construction locales à travers ses caractéristiques inhérentes au climat, qui peut être une stratégie d'économie d'énergie et qui apporte une contribution importante. Il ressort de cette étude que d'un point de vue énergétique, l'architecture vernaculaire et traditionnelle apporte des solutions, si les méthodes de connaissances vernaculaires sont bien combinées.

À l'issue de la validation de la programmation du plug-in Open studio 2.7 à travers la comparaison effectuée avec les caractéristiques de la modélisation énergétique de Berghout (2019) version Open studio 1.8, les hypothèses, les règles de modélisation ainsi que les conditions aux limites à utilisées dans l'étude objet de cette recherche sont déterminés.

Le chapitre suivant énoncera une analyse par ordinateur (sous l'outil Open studio 2.7) de la consommation d'énergie globale de deux bâtiments résidentiels situés dans deux régions contrastées, Terrebonne, au Canada et Batna, en Algérie. Le calcul énergétique s'effectuera en fonction des données spécifiques entrées pour chaque bâtiment tel que : la surface, la composition et l'orientation des systèmes de murs, les équipements et les systèmes mécaniques. Ces données seront associées à un fichier météorologique choisi selon la position géographique du bâtiment objet de l'étude.

CHAPITRE 5

MÉTHODOLOGIE ET SIMULATION NUMÉRIQUE DES CAS D'ÉTUDE

Ce chapitre fera l'objet d'une approche théorique basée sur la simulation numérique pour étudier les performances énergétiques de deux systèmes passifs à savoir une enveloppe de bâtiment contenant du béton de chanvre et une stratégie de ventilation passive. De ce fait, la méthodologie de recherche, l'objectif de l'étude, les différentes caractéristiques du béton de chanvre et du système de ventilation passif, les cas d'études et le processus de la simulation sont présentés. Notre étude permet de vérifier la possibilité d'intégrer des isolants biosourcés tels que le béton de chanvre dans un système de mur seul ou en complément d'une stratégie de ventilation passive dans le bâtiment (par action de cheminée et par effet combustible). Et ceci en Amérique du Nord et en Afrique du Nord plus précisément au Canada et en Algérie.

5.1 Méthodologie

La méthodologie optée est basée principalement sur le processus de la recherche opérationnelle dite classique : revue de littérature, synthèses, hypothèses, investigation, expérimentation, résultats, comparaisons, conclusion et recommandations. Elle nous permet d'évaluer la possibilité d'adopter des enveloppes contenant du béton de chanvre seul ou en complément d'un système de ventilation passif dans le bâtiment. À la suite d'une telle étude paramétrique, le concepteur peut alors opter sur des solutions traitant des enveloppes pour bâtiments à haut rendement énergétique, de la ventilation pour immeubles résidentiels à haut rendement énergétique. La simulation consiste à étudier dix configurations pour l'ensemble des deux villes choisies. C'est-à-dire quatre (5) configurations pour la ville de Terrebonne et quatre (5) configurations pour la ville de Batna en plus d'une configuration STANDARD (bâtiment référence) pour chaque ville. Le calcul de simulation se réalise sur une année typique (du 01/01/2018 au 01/01/2019), ce qui permet d'avoir des valeurs stables à la fin de la simulation et des résultats cohérents. Les données spécifiques des deux bâtiments modélisés telles que la composition, l'orientation ainsi que les propriétés thermo physiques

du système d'enveloppe, le type d'occupation, les équipements, les systèmes mécaniques, les limites et les conditions initial sont entrés dans le logiciel sous forme de big data. Ces derniers, sont associés à un fichier météorologique présentant la position géographique de Terrebonne, au Canada et Batna, en Algérie, puis on est en mesure de lancer les calculs de la consommation énergétique des deux bâtiments pour la période étudiée.

Les Figures 5.1 et 5.2 illustrent la composition typique du système d'enveloppe conçu pour la ville de Batna et de Terrebonne.

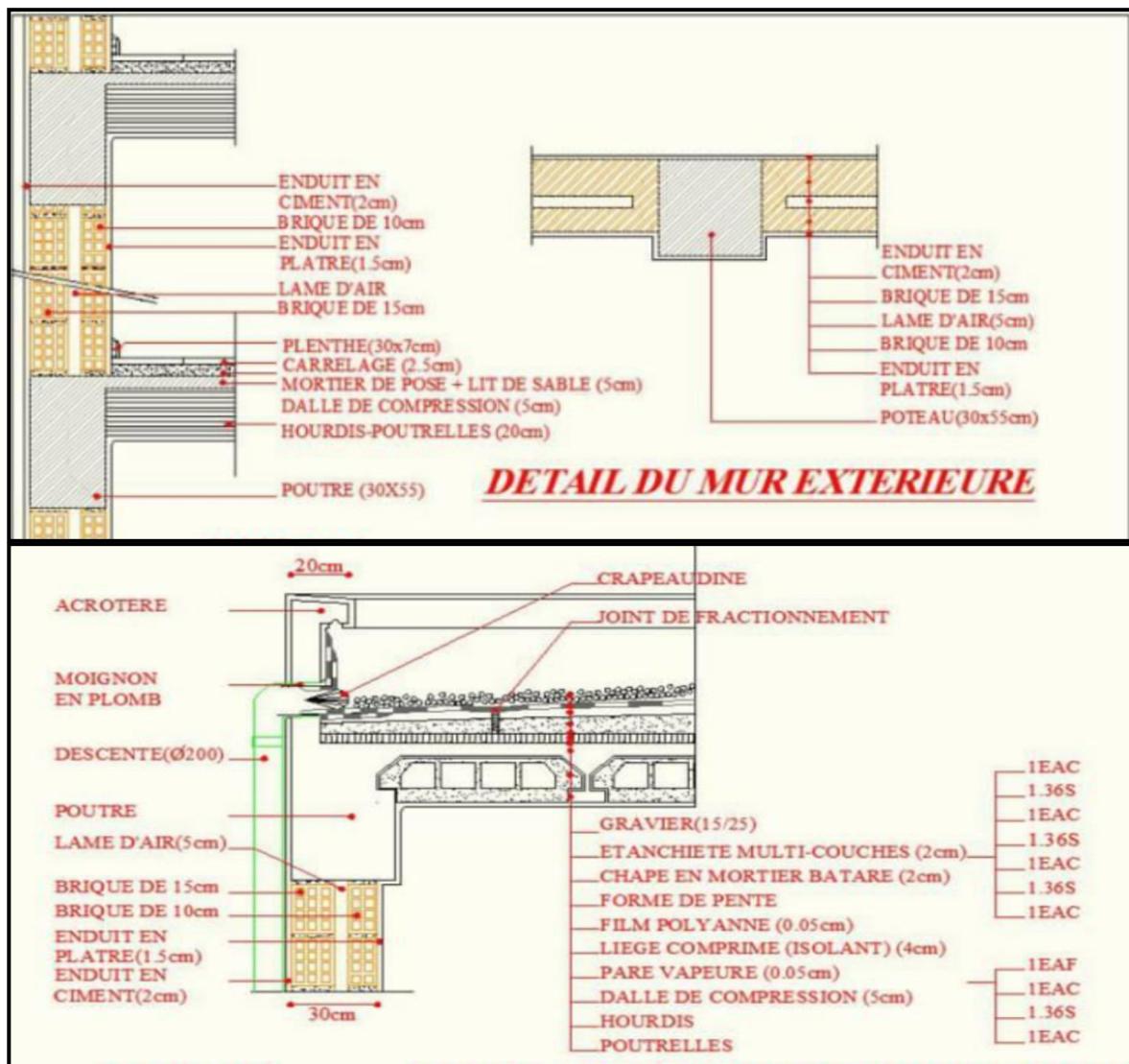


Figure 5.1 Illustrer les compositions des murs et toits cas du bâtiment situé à Batna région des Aurès en Algérie tiré d'Atelier des recherches architecturales

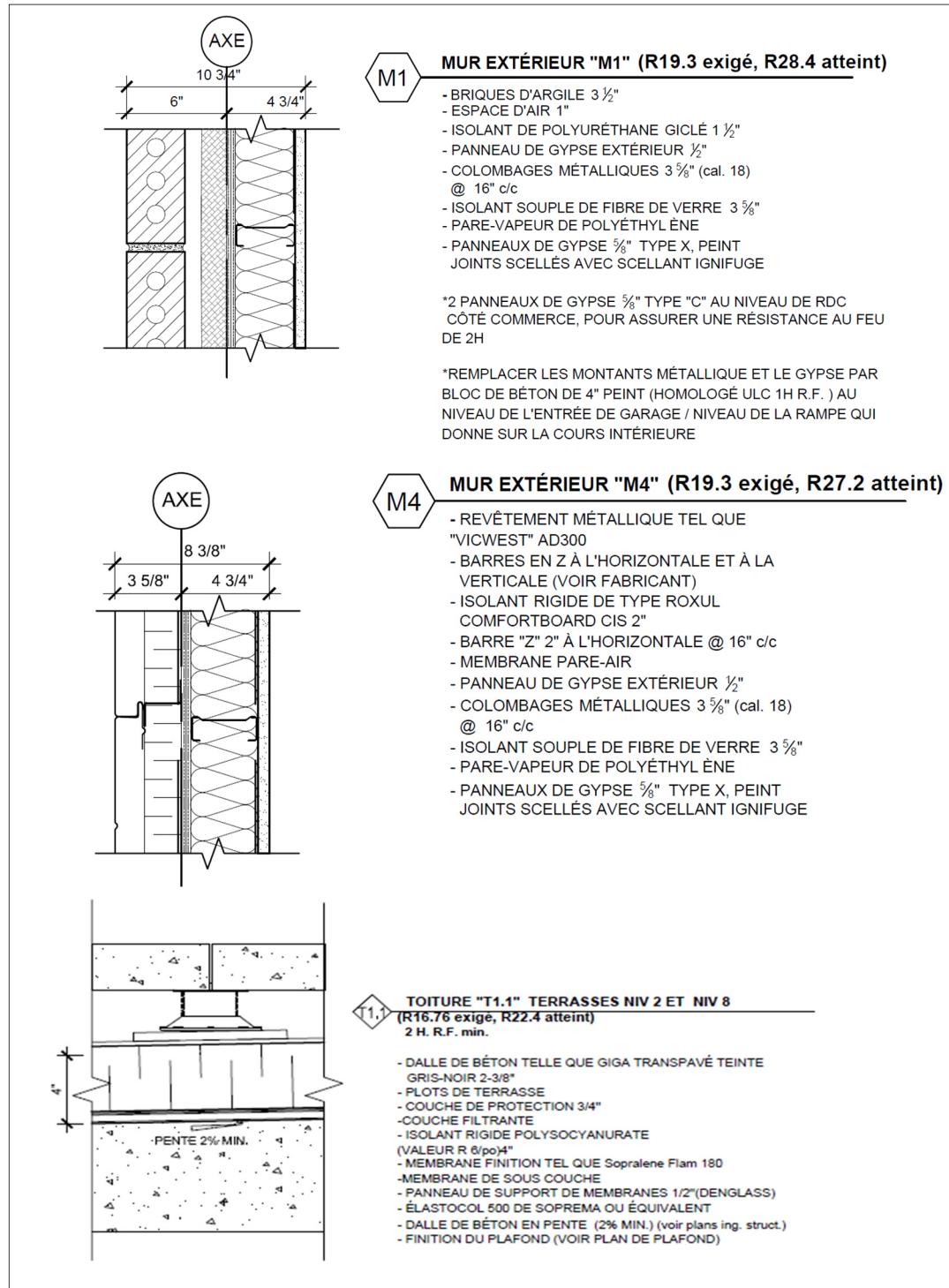


Figure 5.2 Illustré les compositions des murs et toits cas du bâtiment situé à Terrebonne, Canada tirée de 2Architectures

Cette modélisation énergétique nous permettra d'analyser le comportement énergétique d'une enveloppe de bâtiment contenant du béton de chanvre avec un système de ventilation passif dans le bâtiment et ceci dans une approche réelle en fonction des conditions climatiques locales. La modélisation sert aussi à comparer la performance énergétique des configurations proposées à la configuration dite « STANDARD ». Cette dernière, étant un bâtiment virtuel ayant les caractéristiques de la construction typique de Terrebonne, au Canada et de Batna, en Algérie. Les scénarios de simulation sont présentés au tableau 5.1 et au tableau 5.2.

Tableau 5.1 Illustrer les configurations à étudier cas de l'Algérie

Configurations N°	Béton de chanvre	Mezzanine	Cheminées d'aération
(STANDARD ALGÉRIE)	NON	NON	NON
# 1 (BÉTON DE CHANVRE)	OUI	NON	NON
# 2-a et 2-b (VENTILATION PASSIVE PAR ACTION DE CHEMINÉE)	NON	OUI	NON
# 3 (VENTILATION PASSIVE PAR EFFET DE CHEMINÉE ET PAR EFFET COMBUSTIBLE)	NON	OUI	OUI
# 4 (VENTILATION PASSIVE PAR EFFET DE CHEMINÉE ET PAR EFFET COMBUSTIBLE + BÉTON DE CHANVRE)	OUI	OUI	OUI

Tableau 5.2 Illustrer les configurations à étudier cas du Canada

Configurations N°	Béton de chanvre	Mezzanine	Cheminées d'aération
(STANDARD CANADA, et compris le système de ventilation mécanique couramment utilisée)	NON	NON	NON
# 1-a et 1-b (BÉTON DE CHANVRE)	OUI	NON	NON
# 2 (VENTILATION PASSIVE PAR EFFET DE CHEMINÉE)	NON	OUI	NON
# 3 (VENTILATION PASSIVE PAR EFFET DE CHEMINÉE ET PAR EFFET COMBUSTIBLE)	NON	OUI	OUI
# 4 (VENTILATION PASSIVE PAR EFFET DE CHEMINÉE ET PAR EFFET COMBUSTIBLE + BÉTON DE CHANVRE)	OUI	OUI	OUI

La simulation énergétique de chaque scénario présenté ci-dessus est choisie selon une approche de conception optimisée pour un mode de réalisation traditionnel. Le caractère séquentiel de notre simulation énergétique est préconisé pour ce type d'étude. La modélisation énergétique de l'étude objet de la recherche est structurée en trois phases comme suit :

- Phase 01 : Ici il est question d'optimiser l'enveloppe du bâtiment à travers l'intégration du béton de chanvre dans le système de mur ;
- Phase 02 : Cette phase consiste à optimiser les mesures d'efficacité énergétique liées à la ventilation (proposition de la mezzanine et des cheminées d'aération) ;
- Phase 03 : Cette phase finale sert à évaluer les conséquences de la combinaison des phases précédentes. Il sera donc possible d'évaluer les économies énergétiques à anticiper ainsi que la rentabilité des mesures présentées dans la phase 01 et 02.

À travers cette modélisation énergétique, nous visons à déterminer les murs qui ont une excellente capacité de régulation de température (résistant au flux de chaleur) tout en assurant une ventilation naturelle permanente à l'intérieur du bâtiment ce qui constitue une sérieuse alternative aux systèmes de ventilation actifs surtout dans le contexte canadien. Les résultats du système d'enveloppe contenant du béton de chanvre et du système de ventilations passives proposées seront comparés aux résultats du bâtiment typique du marché (canadien et algérien) avec les mêmes rayonnements solaires incidents sur l'enveloppe du bâtiment. Dans le contenu de cette étude, les résultats des charges en climatisation et en refroidissement des deux villes sont présentés et discutés. Cette étude permettra de tirer les paramètres optimaux sensibles à la composante énergétique des bâtiments résidentiels et ainsi, faire analyser en dernier lieu la possibilité d'adopter ces paramètres pour tels types de construction à usage résidentielle de la ville de Batna et de Terrebonne toute en respectant les exigences des codes de bâtiments établis pour les deux pays à savoir le Canada et l'Algérie.

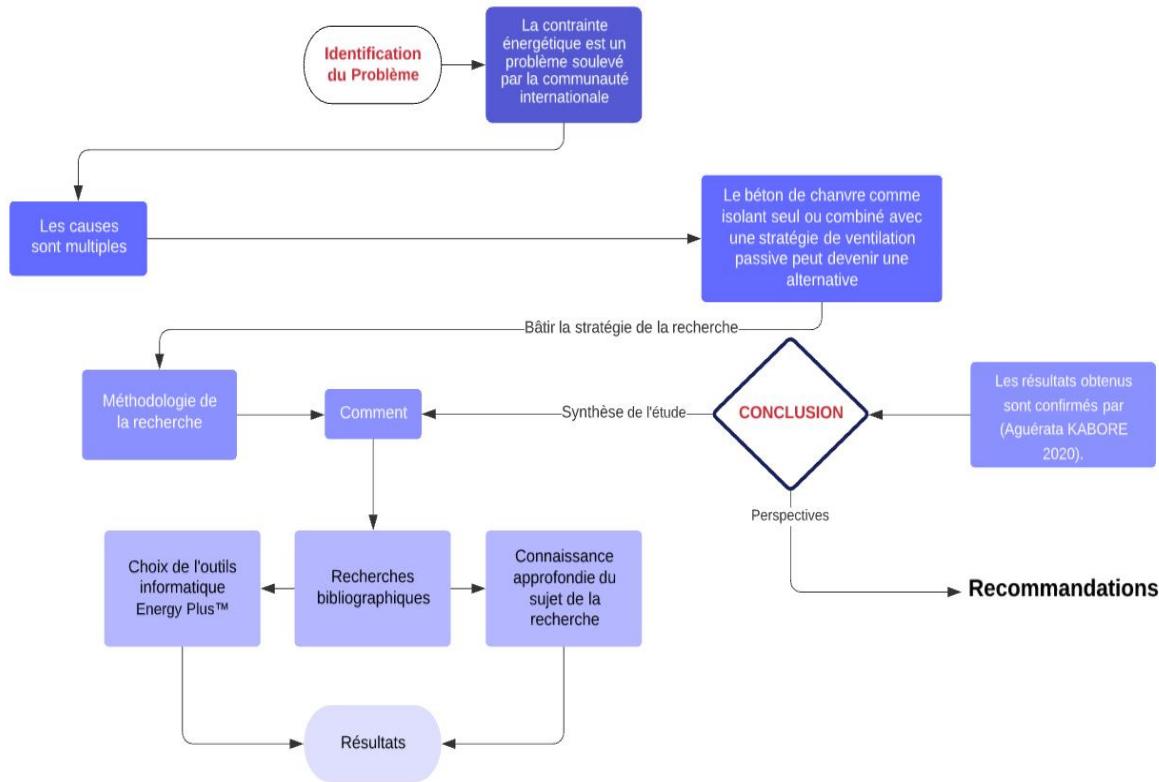


Figure 5.3 Récapitulation

5.1.1 Objectif de l'étude

Le but principal de cette étude est d'évaluer l'action d'intégrer des isolants biosourcés tels que le béton de chanvre dans un système d'enveloppe seul ou en complément d'une stratégie de ventilation passive par effet de cheminée. Ceci à Terrebonne, au Canada et Batna en Algérie. Étant un matériau écologique ayant un haut potentiel de développement économique pour l'avenir, l'utilisation du béton de chanvre contribue d'une part à réaliser des enveloppes de bâtiment à haut rendement énergétique d'autre part à restreindre les émissions des GES. De plus, l'évaluation de l'impact d'incorporer un système de ventilation passif dans la conception des bâtiments résidentiels nous permet de vérifier s'il peut se constituer comme une alternative aux systèmes mécaniques utilisés dans les bâtiments résidentiels et qui coûtent chère surtout pour le contexte canadien. Cette étude paramétrique s'inscrit dans une

démarche de développement durable. En effet, la modélisation énergétique effectuée dans cette recherche prévoit des calculs de transfert thermique à travers le système d'enveloppe du bâtiment, le matériau ayant la plus faible conductivité thermique est le béton de chanvre. La proposition de la ventilation passive dans le bâtiment se traduit par l'incorporation de la mezzanine et des cheminées d'aération selon diverses méthodes conceptuelles (voir figure 5.4) qui sont :

- Mezzanine dans un espace tampon tel que la cage d'escalier (contribution de l'effet de cheminée) ;
- Mezzanine prévu dans la conception des logements du dernier niveau (contribution de l'effet de cheminée) ;
- Des cheminées d'aération sous forme de gaine ayant une superficie semblable à une garde-robe et répartie dans tous les logements et ceci à travers tous les niveaux.

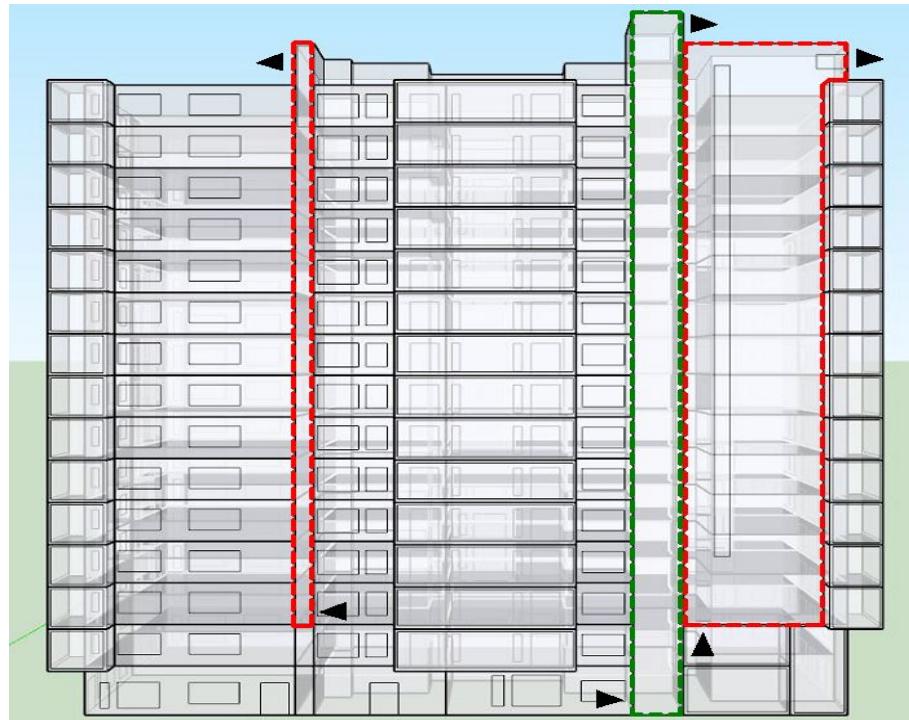


Figure 5.4 Illustré la coupe du principe ventilatoire développé dans le cas d'étude de Terrebonne

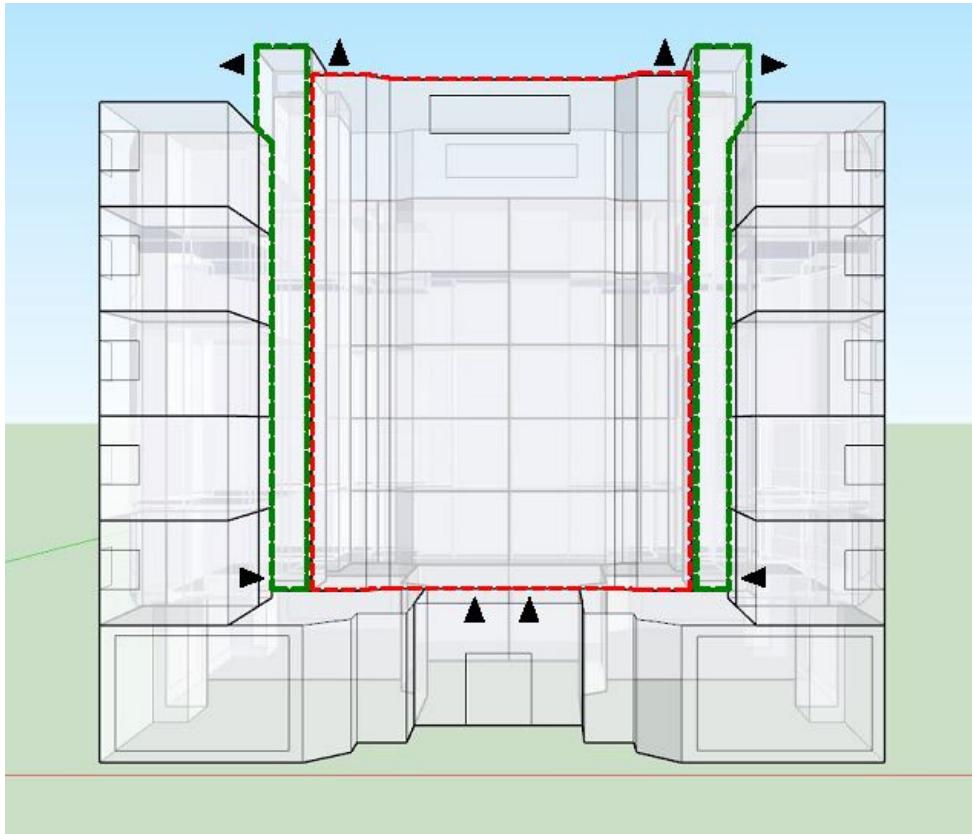


Figure 5.5 Illustré la coupe du principe ventilatoire développé dans le cas d'étude de Batna

Les calculs énergétiques se font à l'aide du logiciel Open Studio 2.7. Dans cette étude, le béton de chanvre utilisé a été formulé par (Samri, 2008) pour le contexte algérien et (Dhakal, 2017) pour le contexte Canadien. Ces deux types de béton de chanvre ont été utilisés par l'étude de Kabore (2020).

5.1.2 Le béton de chanvre et le choix du système de ventilation passif

Le chanvre peut avoir de multiples applications dans un bâtiment. S'agissant d'une validation et d'une vérification, notre étude s'inspire du travail réalisé par Kabore (2020) pour ce qui concerne le choix d'une enveloppe contenant du béton de chanvre. L'étude de Kabore (2020) utilise les bétons de chanvre formulés par (Samri, 2008) et par (Dhakal, 2017). Ces deux bétons de chanvre sont utilisés dans les différents systèmes de murs de notre étude. À cet

effet, la Figure 5.4 illustre la conductivité thermique du béton de chanvre et des matériaux de construction utilisée généralement dans le bâtiment standard au Canada et même en Algérie. En nous basant sur la conductivité thermique, nous constatons que le béton de chanvre présente une excellente qualité de régulation de la chaleur ce qui constitue une alternative biosourcée aux produits standard.

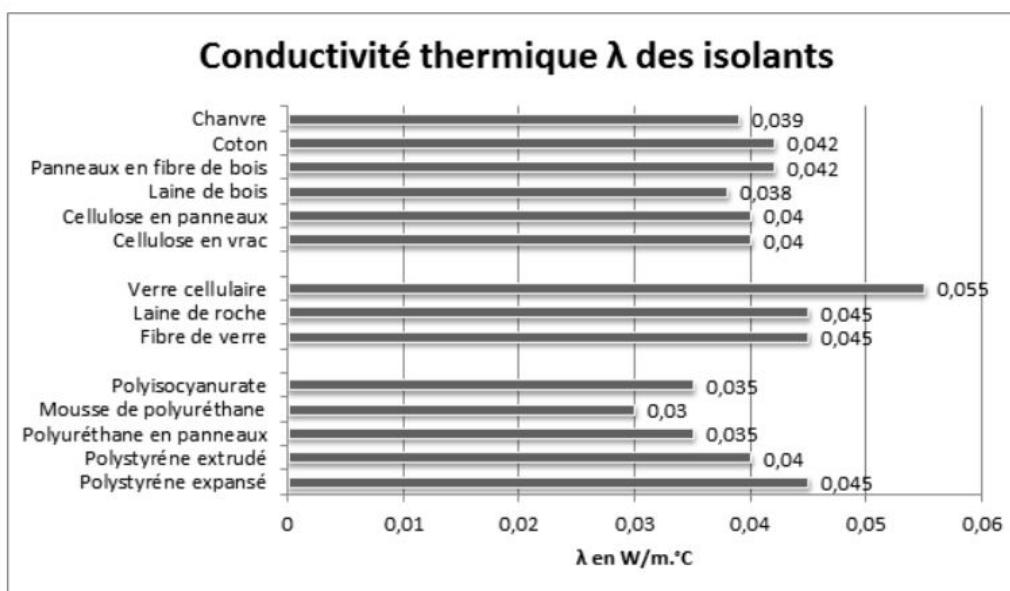


Figure 5.6 Illustré la conductivité thermique des matériaux de construction utilisés dans le bâtiment STANDARD cas de Terrebonne et de Batna tirée de Kabore (2020)

5.1.2.1 Choix du type de ventilation passive

La ventilation passive (naturelle) est basée sur un principe physique simple selon lequel l'air chaud, plus léger que l'air froid, monte et génère un tirage thermique. L'avantage de la ventilation passive est qu'elle ne repose sur aucun système mécanique. Aujourd'hui, la ventilation passive tend à être moins communément privilégiée laissant place à la ventilation mécanique. Cette dernière se focalise sur la performance de l'échange d'air dans le bâtiment à travers l'utilisation des équipements mécaniques qui consomment beaucoup d'énergie, de plus, leurs maintenances et pannes peuvent coûter plus cher à long terme. Dans notre étude, nous proposons aux concepteurs praticiens un modèle de bâtiment résidentiel construit avec un système de mur contenant un matériau sain toute en privilégiant une approche de

ventilation plus naturelle afin de diminuer l'usage de l'échangeur d'air mécanique. Pour viser plus de performance énergétique dans les bâtiments résidentiels, il est nécessaire d'intégrer à sa conception des stratégies de ventilation passive (naturelles) complémentaire au système mécanique, exigé aujourd'hui par le code du bâtiment québécois contrairement au code de construction algérien.

À cette fin, la mezzanine et les cheminées d'aération permettent de s'offrir une sérieuse alternative de ventilation naturelle en vue de réduire les besoins énergétiques du bâtiment résidentiel. La mezzanine qui peut s'intégrer dans une multitude d'espaces favorise l'action de l'effet de cheminée. Cependant, le cheminé d'aération qui est un dispositif utilisé principalement dans l'architecture vernaculaire favorise l'action de l'effet combustible.

D'un point de vue pratique, et comme vu dans la revue de littérature de l'architecture vernaculaire, les espaces tampons peuvent se constituer comme une source d'économie d'énergie. De ce fait, une cage d'escalier peut contribuer considérablement à l'amélioration de la ventilation naturelle dans les bâtiments résidentiels. Une deuxième façon d'intégrer la mezzanine dans les bâtiments résidentiels c'est en prenant de la hauteur grâce aux logements du dernier niveau du bâtiment. Dans ce cas, la mezzanine se définit comme la zone nuit du logement. De même, la cheminée d'aération qui possède une superficie équivalente à une garde-robe peut être intégrée très facilement dans la composante des logements. La cheminée d'aération peut se constituer comme un conduit d'extraction intensive pour tous les logements du bâtiment.

Il est à signaler que ces pratiques proposées respectent en totalité les exigences du code de la construction algérienne ainsi que le code du bâtiment du Québec. Ce dernier, exigeant des séparations coupe-feu (pour la résistance au feu) chose que nous avons prévu dans la modélisation énergétique de divers scénarios du bâtiment de Terrebonne.

La stratégie de ventilation passive proposée dans notre étude s'inspire du projet de la mosquée d'Ibrahim El Khalil conçu par l'architecte Ahmed Lotfi Rejeb. Ce dernier

mentionne que « grâce aux lois de la thermodynamique, le volume de la mosquée est né spontanément créant ainsi une atmosphère naturelle. Le minaret assume la fonction de cheminée d'air chaud dans la mosquée et assure par la même occasion la dépollution du lieu » (Rejeb, 2017).

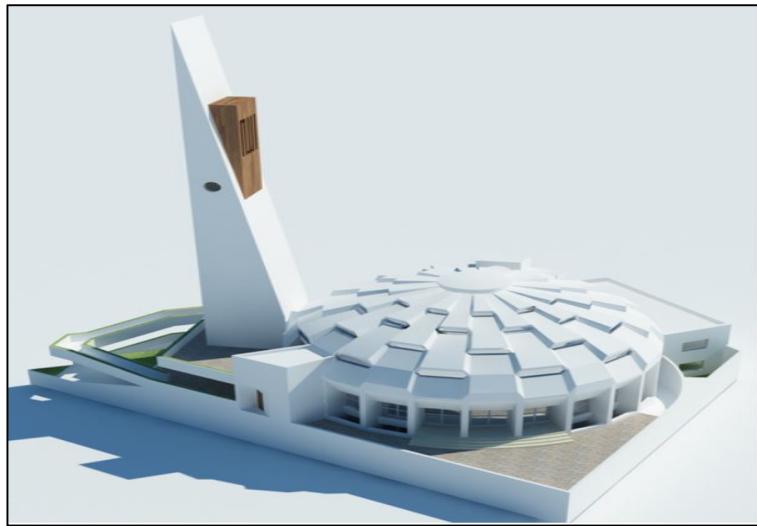


Figure 5.7 Illustre la maquette du projet de la mosquée Ibrahim El Khalil tirée de la firme d'architecture studioarchi

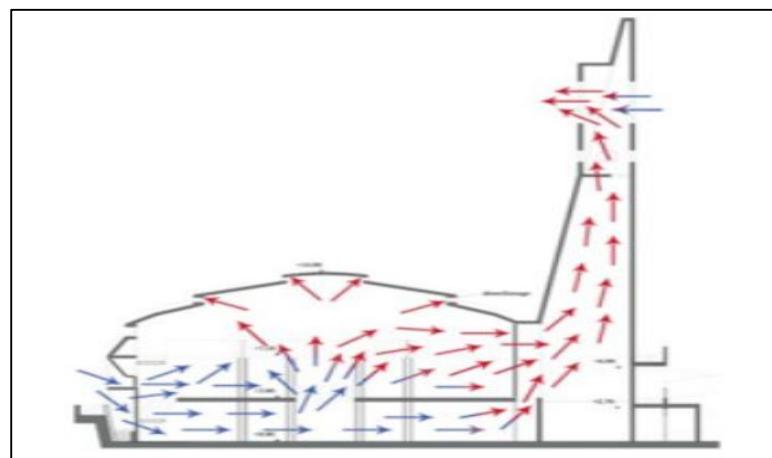


Figure 5.8 Illustre coupe du principe ventilatoire du projet de la mosquée Ibrahim El Khalil tirée de la firme d'architecture studioarchi

La Figure 5.5 illustre le principe ventilatoire du projet de la mosquée Ibrahim El Khalil conçu par l'architecte Ahmed Lotfi Rejeb. Le vide créé entre le RDC et le 2e niveau formant une

mezzanine qui laisse passer l'air froid (infiltré par la cour anglaise) aux niveaux supérieurs par action de cheminée. De plus, le minaret qui joue le rôle d'une cheminée d'aération permet de siffler et d'exfiltrer l'air chaud par effet de cheminée. L'air chaud sera ensuite évacué par les ouvertures placées en haut du minaret. Ce même principe peut être appliqué dans un bâtiment résidentiel en prévoyons des vides verticaux (mezzanine à l'échelle du bâtiment) dans la conception de la cage d'escalier toute en incorporant des cheminées d'aération de petite superficie dans la composante de chaque logement à travers tous les niveaux du bâtiment. Les appentis de la cage d'escalier et de la cheminée d'aération peuvent être d'une hauteur considérable et ceci pour maximiser l'action de l'effet de cheminée.

5.1.3 Cas d'études

Les deux bâtiments choisis ont été modélisés à l'aide de SketchUp. Ce programme offre même une grande variété d'options de conception et de rendu traditionnels. Cela permet d'intégrer les écotechniques vernaculaires dans l'objet de conception du bâtiment cas d'étude et de les évaluer par la suite avec le plug-in Open studio 2.7 et d'éditer si nécessaire les règles de modélisation du bâtiment, les zones thermiques, les propriétés thermophysiques des matériaux, l'orientation et de manipuler les différentes entrées dont l'objectif final est de lancer la simulation pour les calculs énergétiques en fonction des règles de modélisation énergétique.

5.1.3.1 Sélection des bâtiments d'étude

La conception architecturale du bâtiment de l'étude s'inspire d'une typologie du type de bâtiment le plus répandu sur le territoire de la ville de Batna, en Algérie et Terrebonne, au Canada. Pour la ville de Batna, le bâtiment objet de l'étude s'agit d'un concours d'architecture lancé par la société GEPIM. Pour la ville de Terrebonne, le bâtiment choisi est un projet résidentiel lancé par un promoteur privé comme le montre les Figures 5.4 et 5.5. Pour la ville de Batna, le bâtiment objet de l'étude s'agit d'un concours d'architecture lancé par la société GEPIM. Pour la ville de Terrebonne, le bâtiment choisi est un projet résidentiel lancé par un promoteur privé voir figures 5.6 et 5.7.



Figure 5.9 La maquette, le bâtiment objet d'étude cas de la ville de Terrebonne, Canada tirée de 2Architectures



Figure 5.10 La maquette, le bâtiment objet d'étude cas de la ville de Batna, Algérie tirée d'Atelier des Recherches architecturales (AAR)

Les deux bâtiments étudiés sont :

- Un Bâtiment pour une promotion immobilière avec une superficie de 326 m², il est situé à Batna, région des Aurès (au sud d'Alger), le bâtiment est implanté sur l'axe Nord/Sud et se compose de cinq étages avec quatre façades ;
- Un projet résidentiel avec une superficie de 280 m², il est situé à Terrebonne sur le Chemin de Gascon, c'est une tour de 127 unités avec 15 niveaux dotée également de quatre façades et implantée sur l'axe Nord/Sud.



Figure 5.11 Vue extérieure stylisée et schéma du bâtiment standard

modélisé à l'aide de SketchUp cas de la ville de Terrebonne

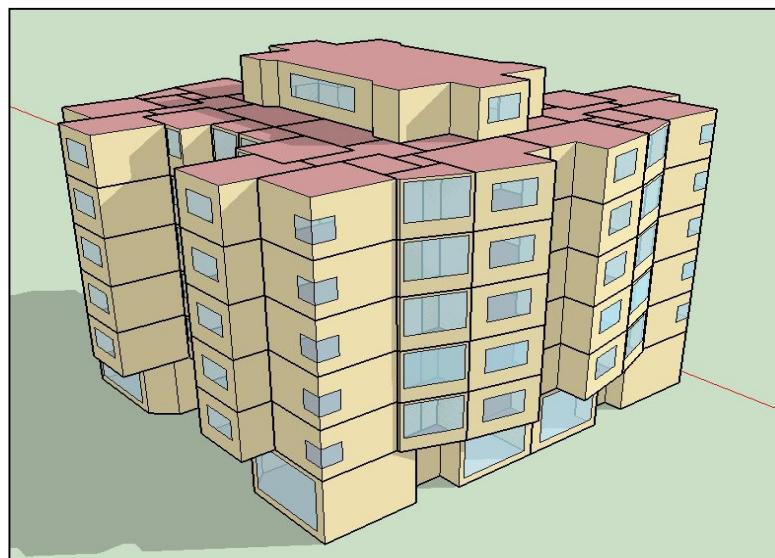


Figure 5.12 Vue extérieure stylisée et schéma du bâtiment STANDARD modélisé à l'aide de SketchUp cas de la ville de Batna

Les performances énergétiques des différentes solutions de conception étudiées sont évaluées par rapport à la configuration standard du bâtiment pour les deux villes. Les murs extérieurs du cas d'étude de la ville de Batna sont composés de 2cm d'enduit de ciment, 15cm de brique, 5cm de lame d'air, 10cm de brique et 1.5cm d'enduit en plâtre. Les murs intérieurs sont composés de 2cm de mortier sur chaque côté de brique de 8cm. Le toit est constitué de parpaings de 16 cm et d'une dalle en béton armé de 5 cm en plus de l'ensemble de l'étanchéité et la forme de pente (tel que illustré dans la Figure 5.1). Ces éléments correspondent aux matériaux de construction les plus utilisés dans les bâtiments contemporains en Algérie plus précisément à Batna.

Tableau 5.3 Les propriétés thermophysiques des matériaux de construction utilisés dans le bâtiment standard cas de la ville de Batna

Matériaux	Capacité thermique (kJ / kg K)	La conductivité thermique (W / m.K)	Densité (kg / mt)
Mortier	0.84	1.15	2000
Dalle à âme creuse	0.65	0.96	1300
Béton armé	0.92	1.75	2300
revêtement	1.00	0.35	1500
Lame d'air	1.22	0.02	1.204
Brique	0.94	0.65	1.099

Le tableau 5.4 présente le règlement sur l'économie de l'énergie dans les nouveaux bâtiments du Québec. Dans notre recherche, la configuration standard du cas d'étude de la ville Terrebonne contient les mêmes caractéristiques présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5.4 Les caractéristiques d'une enveloppe de bâtiment à faible consommation énergétique selon les zones tirée de Maref (2020)

Élément de bâtiment	Zones											
	A		B		C		D		E		F	
	RSI	(R)	RSI	(R)	RSI	(R)	RSI	(R)	RSI	(R)	RSI	(R)
Toit ou plafond	5,3	30,1	5,6	31,8	6,0	34,1	6,3	35,8	6,8	38,6	7,1	40,3
Mur extérieur	3,4	19,3	3,6	20,4	3,8	21,6	4,0	22,7	4,2	23,8	4,5	25,6
Mur de fondation	2,2	12,5	2,2	12,5	2,2	12,5	2,2	12,5	2,2	12,5	2,2	12,5

Montréal: Zone A

Québec: Zone B

5.1.3.2 Systèmes mécaniques des bâtiments d'étude

Dans le contexte algérien, la conception du bâtiment d'étude ne prévoit pas de système de ventilation mécanique. En effet, la ventilation dans les bâtiments résidentiels en Algérie se fait de façon naturelle, le code de la construction n'exige aucune obligation pour les systèmes de ventilation mécanique. De plus, la majorité des bâtiments résidentiels sont occupés par la classe moyenne de la société, ceci l'empêche de se fournir des systèmes technologiques modernes. Cependant, le bâtiment d'étude situé à Terrebonne, au Canada répond aux clauses du code de bâtiment en matière de système mécanique. La conception de la mécanique du

bâtiment est établie par la firme de génie-conseil ÉQUIPE SP (voir Figure 5.11) et elle a été approuvée par les organismes responsables d'appliquer le code du bâtiment dans la région de Terrebonne.

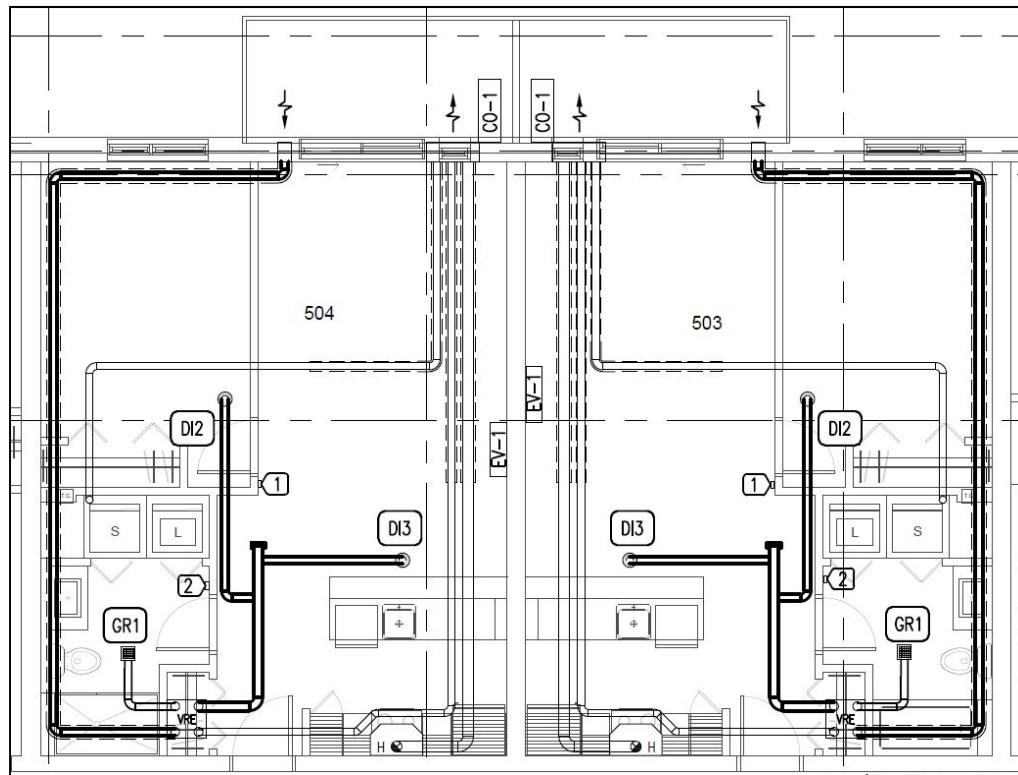


Figure 5.13 Illustré extrait du plan (logement type) mécanique ventilation du cas d'étude de Terrebonne tirée de la firme 2Architectures

Comme mentionné dans les devis, tous les conduits de ventilation d'air du logement illustrés dans la Figure 5.11 sont situés à l'intérieur du faux plafond. La conception de ventilation mécanique prévoit les indications suivantes :

- Les conduits d'apport d'air frais des logements auront 4 pouces de diamètre;
- Les connexions des échangeurs d'air auront 5 pouces;
- Les conduits d'alimentation des échangeurs d'air auront 5 pouces, isolés 2 pouces sur toute la longueur;
- Les conduits de retour des salles de bain auront 5 pouces;

- Les conduits d'évacuation des échangeurs d'air auront 5 pouces, isolés thermiquement de 1 pouce sur 15 pieds avant l'extérieur;
- Les conduits d'évacuation des hottes de cuisine auront 6 pouces, isolés thermiquement de 1 pouce sur 15 pieds avant l'extérieur;
- Les conduits d'évacuation des sécheuses auront 4 pouces, isolés thermiquement de 1 pouce sur 15 pieds avant l'extérieur;
- Les conduits d'évacuation des ventilateurs de salle de bain auront 4 pouces, isolés thermiquement de 1 pouce sur 15 pieds avant l'extérieur;
- Les échangeurs d'air ainsi que les évaporateurs sont installés dans les garde-robés de logement. Pour les corridors du bâtiment des gaines mécaniques est prévu sur tous les niveaux du bâtiment.

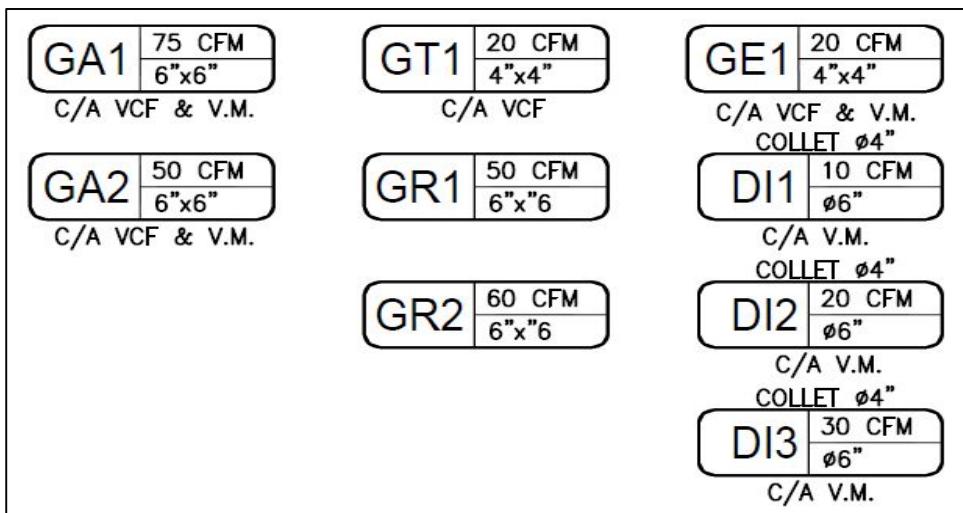


Figure 5.14 Illustré la codification des conduits de ventilation mécanique, cas d'étude de Terrebonne tirée de la firme 2Architectures

5.2 Simulation

5.2.1 Choix de l'outil de simulation et présentation du logiciel

Pour évaluer le rendement énergétique des paramètres proposés, Energy Plus™ a été choisi pour simuler les diverses configurations. C'est un logiciel gratuit qui a été fondé par le département américain de l'énergie (DOE). EnergyPlus™ est un programme de simulation énergétique offrant une étendue de fonctionnalités, il est utilisé par les ingénieurs, les

architectes et les chercheurs pour calculer les besoins énergétiques de chauffage, de climatisation, de ventilation, d'éclairage et les charges de consommation d'eau dans les bâtiments.

Les différentes fonctionnalités d'Energy Plus sont les suivantes :

- Différentes sources de chauffage et conditionnement des zones du bâtiment ;
- Évaluation des effets radiants et convectifs et calculs de confort thermique et de condensation ;
- Définition des zones et des temps d'occupation par l'utilisateur ;
- Choix de modèles de fenestration avancés et la possibilité d'inclure des stores contrôlables ;
- Calcul de l'éclairage naturel pour l'analyse du confort et des commandes d'éclairage ;
- Différentes stratégies de contrôle de l'éclairage disponibles ;
- Choix d'un grand nombre de solutions de chauffage, de ventilation et de climatisation;
- Élaboration de rapports d'analyse détaillés et paramétrables.

5.2.2 Facteurs pertinents

Les deux bâtiments objet de l'étude sont modélisés dans différentes zones. En premier lieu, une analyse modale à chaque zone a été effectuée, ensuite une association de toutes les zones a été appliquée. Cette méthode peut réduire le temps de calcul dans le processus de simulation. Le pas de temps pour simuler un bâtiment peut être compris entre 1 heure et 24 heures. Le calcul de notre modèle est réalisé annuellement, mensuellement, quotidiennement et durant toutes les heures, en utilisant la base de données météo de la ville étudiée. À la fin des calculs, les besoins en chauffage et climatisation de chaque zone du bâtiment sont présentés dans divers graphes. Ensuite, nous avons utilisé le format Microsoft Excel Sheets pour mettre les données dans un fichier texte. Ce fichier est ensuite utilisé pour visualiser et analyser les performances du bâtiment dans son environnement. La simulation d'analyse repose sur certaines hypothèses, qui, pour les applications présentées ci-dessous, sont les suivantes :

- Le transfert de chaleur par conduction ainsi que les effets de stockage calorifiques à travers l'enveloppe et dans la masse du bâtiment ;
- Les gains dus aux appareils, aux occupants, aux lumières électriques ;
- L'ombrage dû aux parois transparentes et opaques ;
- Les effets du rayonnement solaire de courte longueur d'onde et les rayons reçus par les surfaces exposées et internes ;
- Les radiations de longueur d'ondes échangées entre les surfaces externes, la voûte céleste et l'environnement ;
- Les effets de l'humidité.

5.2.3 Limitation

Cette étude purement académique donne uniquement une idée théorique sur l'impact d'intégrer le béton de chanvre dans un système d'enveloppe du bâtiment seul ou en complément d'une stratégie de ventilation passive et ceci dans deux climats contrastés pour deux villes différentes. Aucune étude de laboratoire n'a été réalisée pour caractériser le béton de chanvre dans le contexte canadien et algérien et les simulations ne sont pas validées expérimentalement. Il est à mentionner que ce travail a été inspiré de l'étude de Kabore (2020) pour le matériau du béton de chanvre. Ceci dit que la plupart des données du béton de chanvre ont été collectées de cette recherche.

5.2.4 Hypothèses de base pour les cas d'étude

Les hypothèses prises en compte pour la simulation sont les suivantes :

- Il n'y a pas infiltrations d'eau dans les murs, sauf celle due à une forte pluie battante ;
- Les simulations montrent que l'étanchéité à l'air est bien réalisée et qu'il n'y a aucune convection entre l'isolant et le mur ni de transport convectif d'humidité du local vers l'extérieur.

5.2.5 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont fixées en fonction du climat intérieur et extérieur de la ville de Terrebonne et de Batna. La ville de Terrebonne possède un fichier Weather Data dans la base de données Energy Plus™. Ce fichier climatique a été utilisé. Quant aux données climatiques de la ville de Batna, un fichier Weather Data a été généré à l'aide des données climatiques obtenues par l'aéroport national Mostepha Ben Boulaid de Batna. Ces données contiennent des données climatiques relevées en chaque 10 minutes. Les conditions aux limites utilisées dans le logiciel Open Studio 2.7 pour la simulation sont énumérées comme suit :

- Point de consigne de chauffage : 20°C ;
- Point de consigne de refroidissement : 26°C ;
- Gain de chaleur sensible pour les personnes : 70 w. person-1 ;
- Gain de chaleur latente des personnes : 45 w. person-1 ;
- Taux de renouvellement d'air (volume par heure) : 1 m³. H-1 ;
- Orientation nord-sud pour les bâtiments des deux villes ;
- Bâtiment de 15m de hauteur pour la ville de Batna et 36m de hauteur pour la ville de Montréal ;
- Revêtements de surface en peinture blanche réfléchissante pour la ville de Batna et couleurs sombres absorbantes pour la ville de Montréal ;
- Période de simulation sur une année typique (1er janvier 2012 - 31décembre 2012).

CHAPITRE 6

RÉSULTAT ET DISCUSSION

Nous présentons ci-dessous les résultats de la simulation des cas d'étude des deux villes présentées au chapitre 5 sous forme de graphes des charges mensuelles et annuelles de refroidissement et de chauffage. Le rendement énergétique des systèmes de murs en béton de chanvre et du système de ventilation passif, sera comparé au rendement énergétique des murs et à la conception des constructions standards pour la ville de Terrebonne, au Canada et les murs ainsi que la conception des constructions typiques pour la ville de Batna, en Algérie. Une discussion est alors faite sur l'impact d'intégrer le béton de chanvre dans le système d'enveloppe en complément d'une stratégie de ventilation passive dans le bâtiment du point de vue énergétique.

6.1 Résultats de la simulation du cas d'étude de la ville de Terrebonne

Les paramètres simulés dans cette partie sont la configuration des constructions typiques pour la ville de Terrebonne, le béton de chanvre comme barrière isolante dans le système d'enveloppe, la mezzanine au niveau de la cage d'escalier qui contribue à l'action de l'effet de cheminée et la cheminée d'aération incorporée dans les logements qui contribue également à l'effet de cheminée. Nous analyserons les impacts des paramètres intégrés sur les besoins en refroidissement et en chauffage pour chaque combinaison de ces paramètres.

6.1.1 Configuration 1

6.1.1.1 Analyse des besoins en énergie pour la climatisation et le chauffage pour un système d'enveloppe contenant du béton de chanvre à l'extérieur de la cavité murale (a)

La Figure 6.1 illustre une comparaison des charges mensuelles de climatisation/chauffage pour un bâtiment avec la configuration 1 (a), qui intègre le béton de chanvre comme barrière isolante de 2 pouces, située à l'extérieur de la cavité murale du système d'enveloppe du

bâtiment STANDARD (elle remplace l'uréthane giclé). Nous constatons à travers l'analyse des résultats de la simulation de la configuration 01 que :

- La construction typique pour la ville de Terrebonne offre une consommation annuelle en matière de climatisation de 117 508 kWh et 2 387 814 kWh en matière de chauffage ;
- L'intégration du béton de chanvre dans le système d'enveloppe et ceci à l'extérieur de la cavité murale offre les mêmes résultats à savoir 117 511 kWh pour la climatisation et 2 387 663 kWh pour le chauffage.

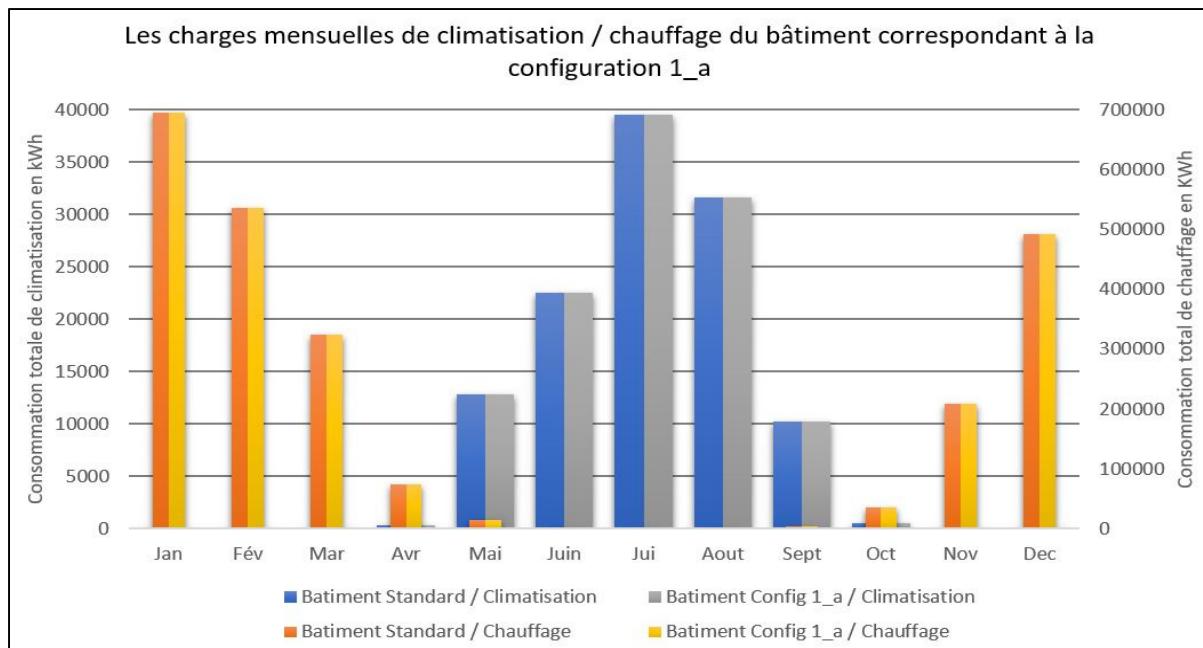


Figure 6.1 Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec une enveloppe contenant du béton de chanvre à l'extérieur de la cavité murale

Les résultats de la simulation mensuelle de ce bâtiment de configuration 1 (a) qui intègre le béton de chanvre comme barrière isolante de 2 pouces, située à l'extérieur de la cavité murale du système d'enveloppe du bâtiment STANDARD montrent que les besoins en énergie de climatisation pendant la saison chaude, de mai à septembre, vont de 12 796 kWh à 39 516 kWh et que les besoins en chauffage pendant la saison froide, d'octobre à avril, vont de 35

879 kWh à 695 692 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 117 508 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 2 360 814 kWh. Les résultats de la simulation pour les besoins en énergie de refroidissement pendant la saison chaude du bâtiment STANDARD varient entre 12 796 kWh et 39 516 kWh, et les besoins en énergie de chauffage du bâtiment STANDARD pendant la saison froide varient entre 35 879 kWh et 695 692 kWh. La charge annuelle totale du bâtiment STANDARD en climatisation est de 117 508 kWh et la charge annuelle totale en chauffage est de 2 360 814 kWh. L'intégration du béton de chanvre dans le système de mur du bâtiment STANDARD offre la même résistance thermique que l'uréthane giclé qui est utilisé à l'extérieur de la cavité murale dans la construction typique à Terrebonne. La capacité du béton de chanvre à ralentir les transferts de chaleur est équivalente à l'uréthane giclé ce qui signifie qu'ils possèdent le même déphase thermique. Cela explique que le ratio énergétique du bâtiment résultant de la configuration 1 (a) est identique à celui du bâtiment STANDARD. À cette fin, pour une évaluation pertinente du béton de chanvre la prise en compte de la composante énergie-environnement est plus que nécessaire. De ce point de vue, l'énergie n'est plus perçue comme une simple quantité de KWH, mais elle peut être appréhendée selon une série de critères environnementaux. On déduit alors, que le béton de chanvre constitue une réponse possible en vue d'améliorer la performance de l'enveloppe du bâtiment au Canada parce que :

- Il offre un déphase thermique équivalent à l'uréthane giclé. Ce qui constitue un résultat dans la satisfaction ;
- En se basant sur la revue de littérature, le principal avantage du béton de chanvre est le respect de l'environnement contrairement aux produits d'isolation standard.

Nous évaluons dans la section suivante l'impact d'intégrer le béton de chanvre dans un système de mur et ceci à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité murale.

6.1.1.2 Analyse des besoins en énergie pour la climatisation et le chauffage pour un système d'enveloppe contenant du béton de chanvre à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité murale (b)

La Figure 6.2 illustre une comparaison des charges mensuelles de climatisation/chauffage pour un bâtiment avec la configuration 1 (b), qui intègre le béton de chanvre comme barrière isolante de 2 pouces à l'extérieur de la cavité murale, et de 6 pouces à l'intérieur de la cavité murale du système d'enveloppe du bâtiment STANDARD. Nous constatons à travers l'analyse des résultats de la simulation de la configuration 01 que :

- La construction typique pour la ville de Terrebonne offre une consommation annuelle en matière de climatisation de 117 508 kWh et 2 387 814 kWh en matière de chauffage ;
- L'intégration du béton de chanvre comme isolant dans le système d'enveloppe à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité murale permet de garder les mêmes résultats pour les besoins en climatisation à savoir 117 511 kWh et démunie légèrement les besoins en chauffage qui atteint 2 387 663 kWh.

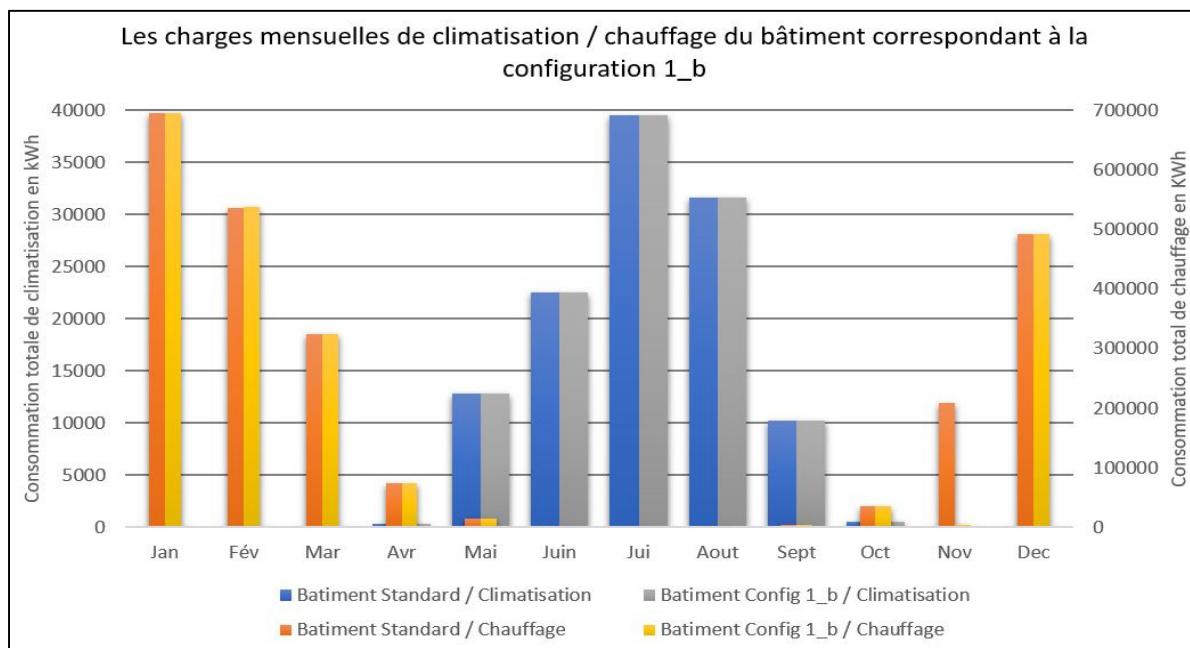


Figure 6.2 Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec une enveloppe contenant du béton de chanvre à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité murale

Les résultats de la simulation mensuelle de ce bâtiment de configuration 1 (b) montrent que les besoins en énergie de climatisation pendant la saison chaude, de mai à septembre, vont de 12 795 kWh à 39 516 kWh et que les besoins en chauffage pendant la saison froide, d'octobre à avril, vont de 35 742 kWh à 695 597 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 117 511 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 2 387 663 kWh. Les résultats de la simulation pour les besoins en énergie de refroidissement pendant la saison chaude du bâtiment STANDARD varient entre 12 796 kWh et 39 516 kWh, et les besoins en énergie de chauffage du bâtiment STANDARD pendant la saison froide varient entre 35 879 kWh et 695 692 kWh. La charge annuelle totale du bâtiment STANDARD en climatisation est de 117 508 kWh et la charge annuelle totale en chauffage est de 2 360 814 kWh. L'intégration du béton de chanvre dans le système de mur du bâtiment STANDARD et ceci à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité murale permet d'améliorer légèrement la résistance aux flux de chaleur qui traverse le système de mur du bâtiment, rendant les températures intérieures plus stables. De ce fait, une enveloppe de bâtiment contenant du béton de chanvre offre un rendement énergétique identique à un système de mur avec la laine de verre et l'uréthane giclé utilisés généralement dans la construction typique au Québec. Cela explique que le ratio énergétique du bâtiment résultant de la configuration 1 (b) qui est de 0 %. Tel que mentionné dans la configuration 1 (a), le béton de chanvre constitue une réponse possible en vue d'améliorer la performance de l'enveloppe du bâtiment. Le chainage réalisé entre la revue de littérature présentée dans cette recherche (la prise en compte des aspects non liée à l'énergie) et la simulation énergétique effectuée a permis d'évaluer pertinemment le choix du béton de chanvre en tant que matériau. De ce fait, en se basant sur une analyse globale énergie-environnement; l'intégration du béton de chanvre offre une meilleure assurance au client d'avoir une enveloppe de bâtiment plus performante surtout parce qu'il est écologique et durable dans le temps comparé à la laine de verre et à l'uréthane giclé.

6.1.2 Configuration 2

6.1.2.1 Analyse des besoins en énergie pour la climatisation et le chauffage

La Figure 6.3 illustre une comparaison des charges mensuelles de climatisation/chauffage pour un bâtiment avec la configuration 2, qui intègre la mezzanine dans la cage d'escalier comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée dans le bâtiment STANDARD. Il est à signaler que le code du bâtiment du Québec exige une séparation coupe-feu ayant un degré de résistance au feu d'au moins 1 heure. Pour ce faire, notre modélisation prévoit un sas entre l'escalier et le corridor dans chaque niveau. De plus, le principe ventilatoire proposé est assuré par des ouvertures situées en haut et en bas de la cage d'escalier du bâtiment. Cette vision permet d'intégrer le principe de ventilation passif en exploitant l'espace tampon de la cage d'escalier toute en respectant les exigences relatives au code du bâtiment du Canada.

L'observation du graphe ci-dessous montre globalement que :

- La construction typique pour la ville de Terrebonne offre une consommation annuelle en matière de climatisation de 117 508 kWh et 2 387 814 kWh en matière de chauffage ;
- L'intégration de la mezzanine comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée augmente la quantité des besoins annuels en chauffage qui atteint 2 527 528 kWh et démunit la quantité des besoins annuelle en climatisation qui atteint 100 055 kWh.

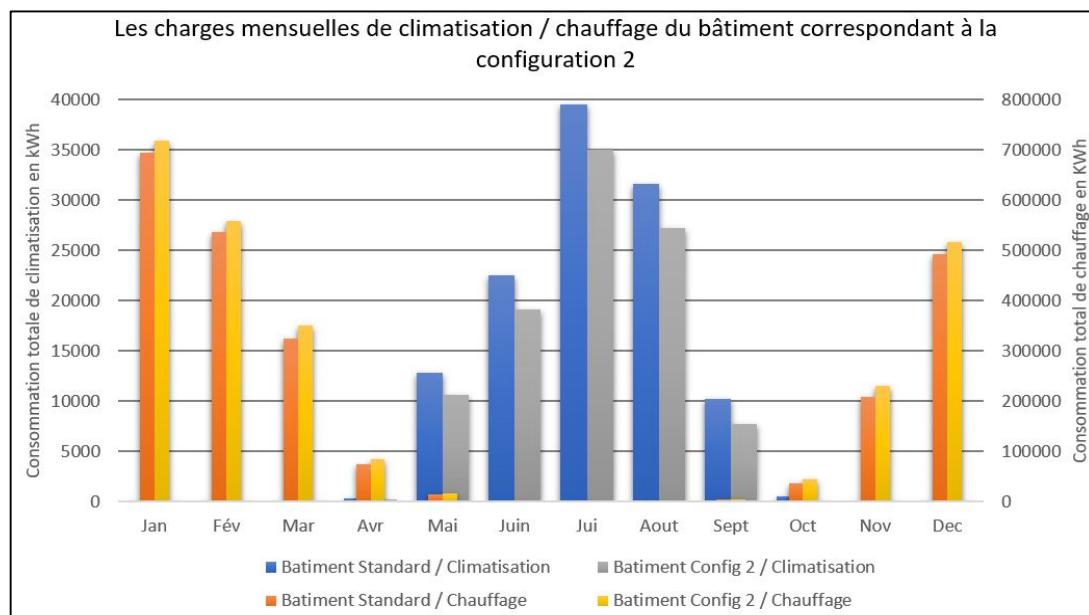


Figure 6.3 Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec système de ventilation passif par action de cheminée (intégration de la mezzanine dans la cage d'escalier)

Les résultats de la simulation mensuelle montrent que les besoins en énergie de climatisation du bâtiment de la configuration 2 pendant la saison chaude, de mai à septembre, varient entre 10 664 kWh et 35 004 kWh et que ses besoins en chauffage pendant la saison froide, d'octobre à avril, varient entre 43 676 kWh et 719 514 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 100 055 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 2 527 528 kWh. Pour le bâtiment STANDARD, les résultats de la simulation pour les besoins en énergie de refroidissement pendant la saison chaude du bâtiment STANDARD varient entre 12 796 kWh et 39 516 kWh, et les besoins en énergie de chauffage du bâtiment STANDARD pendant la saison froide varient entre 35 879 kWh et 695 692 kWh. La charge annuelle totale du bâtiment STANDARD en climatisation est de 117 508 kWh et la charge annuelle totale en chauffage est de 2 360 814 kWh. Le ratio énergétique du bâtiment résultant de la configuration 2 est de : + 4.88%. Soit une augmentation du ratio énergétique par rapport au bâtiment STANDARD.

L'intégration de la mezzanine dans la configuration du bâtiment STANDARD contribue à maintenir une température intérieure stable en été toute en réduisant les besoins énergétiques de climatisation. Toutefois en hiver, les besoins en chauffage augmentent et la température intérieure est moins stable ceci est due au grand vide créé par la mezzanine dans la composante de la cage d'escalier. La chaleur va direct en partie haut et chauffe peu le bas. Il est clair qu'une réduction significative des besoins énergétiques en climatisation est obtenue en mettant en œuvre la configuration 2. Cette économie est due au mouvement d'air provoqué par l'intégration de la mezzanine qui favorise le mouvement d'air entre les différents espaces du bâtiment, cependant on aperçoit que cette intégration de la mezzanine dans le bâtiment de référence crée un grand volume non adapté au climat en hiver. L'élévation du vide créé par la mezzanine favorise la distribution de l'air dans le bâtiment, créant ainsi un espace où l'air circule pour récupérer la chaleur accumulée par convection, un processus qui contribue à refroidir le bâtiment en été tout en ayant des conséquences négatives sur l'échauffement du bâtiment en hiver. Cette amélioration de la ventilation et du renouvellement d'air abaisse la température ambiante dans les espaces pendant les mois les plus chauds et augmente les besoins en chauffage pendant les mois les plus froids. Si la configuration 2 a permis de réduire les besoins énergétiques en climatisation, cette contribution reste inférieure à l'objectif fourni par la recherche pour un climat froid de la ville de Terrebonne. La configuration 2 peut encore être enrichie d'une série de stratégies et de paramètres conçus pour être compatibles avec ce type de climat. Leur combinaison sera évaluée pour améliorer au mieux la ventilation passive des bâtiments résidentiels au Québec.

6.1.3 Configuration 3

6.1.3.1 Analyse des besoins en énergie pour la climatisation et le chauffage

La Figure 6.4 illustre une comparaison des charges mensuelles de climatisation/chauffage pour un bâtiment avec la configuration 3, qui intègre la mezzanine dans la cage d'escalier du bâtiment STANDARD comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée et les cheminés d'aération dans la conception des logements du bâtiment STANDARD comme stratégie de ventilation passive par effet de cheminée. Comme mentionné dans la

configuration 2 notre modélisation répond à l'exigence du code du bâtiment canadien en ce qui concerne les degrés de résistance au feu.

L'analyse des résultats de simulation de la configuration décrite ci-dessus montre que :

- La construction typique pour la ville de Terrebonne offre une consommation annuelle en matière de climatisation de 117 508 kWh et 2 387 814 kWh en matière de chauffage ;
- L'intégration de la mezzanine et des cheminés d'aération dans le bâtiment STANDARD comme stratégie de ventilation passive par effet de cheminée augmente la quantité des besoins annuels en chauffage qui atteint 2 551 980 kWh et démunie la quantité des besoins annuels en climatisation qui atteint 98 135 kWh.

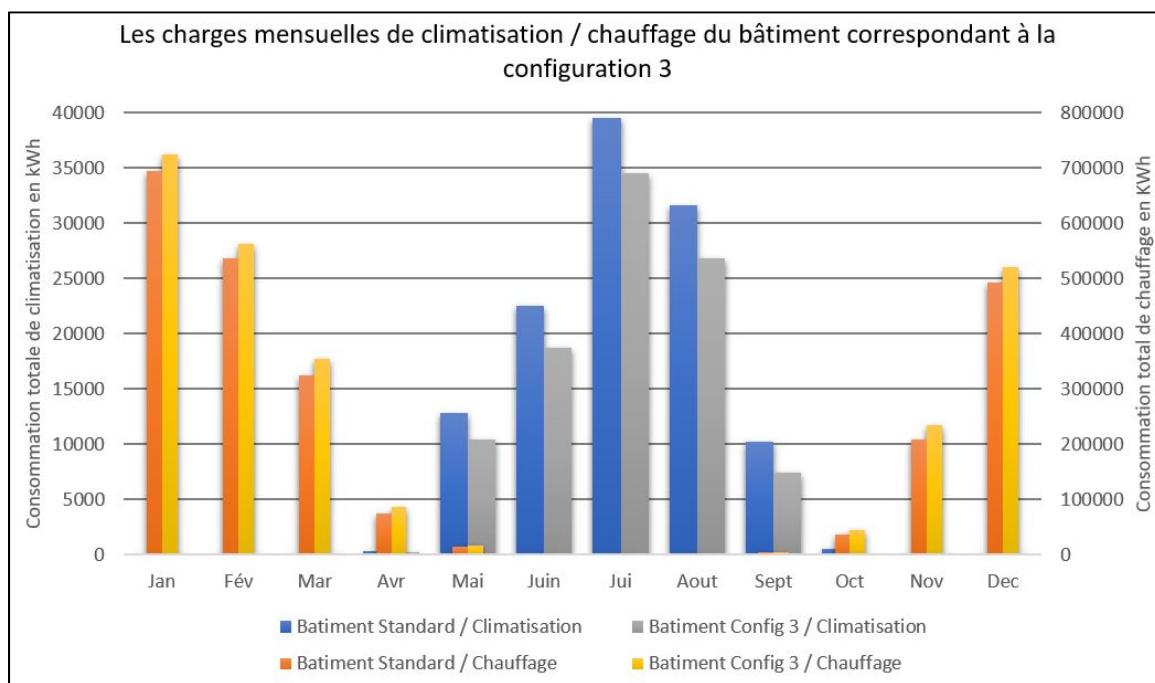


Figure 6.4 Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec système de ventilation passif par action de cheminée et par effet combustible

Les résultats de la simulation mensuelle montrent que les besoins en énergie de climatisation de ce bâtiment de configuration 3 pendant la saison chaude, de mai à septembre, varient entre

10 421 kWh et 34 501 kWh et indiquent que les besoins en chauffage pendant la saison froide, d'octobre à avril, varient entre 45 045 kWh et 724 273 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 98 135 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 2 551 980 kWh. À titre de comparaison pour le bâtiment STANDARD, les résultats de la simulation pour les besoins en énergie de refroidissement pendant la saison chaude du bâtiment STANDARD varient entre 12 796 kWh et 39 516 kWh, et les besoins en énergie de chauffage du bâtiment STANDARD pendant la saison froide varient entre 35 879 kWh et 695 692 kWh. La charge annuelle totale du bâtiment STANDARD en climatisation est de 117 508 kWh et la charge annuelle totale en chauffage est de 2 360 814 kWh. La combinaison de l'intégration de la mezzanine et des cheminés d'aération, telle que décrite dans l'étude de cas, se traduit par la réalisation d'économies d'énergie supplémentaires en réduisant le besoin de refroidissement tout en augmentant le besoin de chauffage. La simulation montre que l'intégration de la mezzanine a un effet positif sur l'ambiance thermique à l'intérieur du bâtiment en combinaison avec les cheminés d'aération durant les périodes chaudes. Cependant, cette association a un impact négatif durant les périodes froides. Ceci explique que le ratio énergétique du bâtiment issu de la configuration 3 est de : + 5,77 %. Soit une augmentation du ratio énergétique du bâtiment par rapport au bâtiment STANDARD. Comme mentionné dans la configuration 2, en hiver la chaleur va direct en partie haut et chauffe peu le bas. De ce fait, la configuration 3 reste inférieure à l'objectif de la recherche et peut encore être enrichie (pour un contexte de climat froid) pour voir quelle serait la meilleure solution pour organiser une circulation d'air efficace pendant la période froide de l'année.

6.1.4 Configuration 4

6.1.4.1 Analyse des besoins en énergie pour la climatisation et le chauffage

La Figure 6.4 illustre une comparaison des charges mensuelles de climatisation/chauffage pour un bâtiment avec la configuration 4, qui intègre la mezzanine dans la cage d'escalier du bâtiment STANDARD comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée, les cheminées d'aération dans la conception des logements du bâtiment STANDARD comme

stratégie de ventilation passive par effet de cheminée ainsi que le béton de chanvre comme barrière isolante à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité murale du système de mur du bâtiment STANDARD. L'analyse des résultats présentés dans le graphe ci-dessous montre globalement que :

- La construction typique pour la ville de Terrebonne offre une consommation annuelle en matière de climatisation de 117 508 kWh et 2 387 814 kWh en matière de chauffage ;
- L'action d'associer la mezzanine, les cheminés d'aération ainsi que le béton de chanvre dans le système de mur augmente la quantité des besoins annuels en chauffage qui atteint 2 552 117 kWh et démunit la quantité des besoins annuelle en climatisation qui atteint 98 134 kWh.

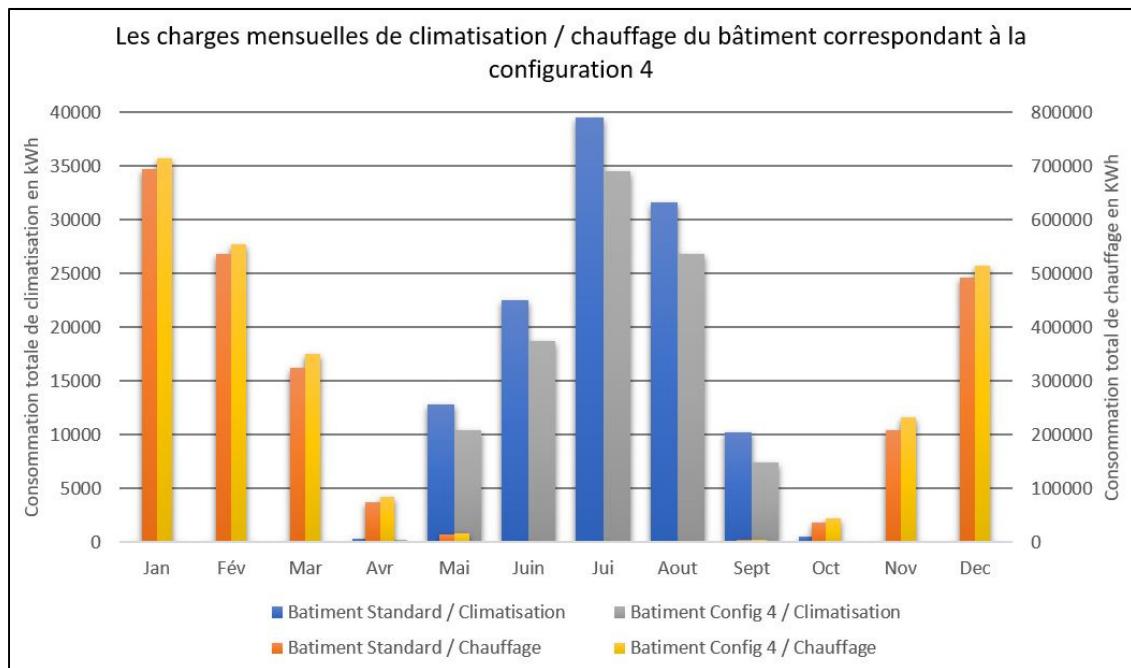


Figure 6.5 Groupe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec mezzanine, les cheminés d'aération et le béton de chanvre dans un système de mur

Les résultats de la simulation mensuelle montrent que les besoins en énergie de climatisation de ce bâtiment de configuration 4 pendant la saison chaude, de mai à septembre, varient entre 10 420 kWh et 34 500 kWh et indiquent que les besoins en chauffage pendant la saison froide, d'octobre à avril, varient entre 45 025 kWh et 724 527 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 98 134 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 2 552 117 kWh. Par ailleurs les résultats de la simulation pour les besoins en énergie de refroidissement pendant la saison chaude du bâtiment STANDARD varient entre 12 796 kWh et 39 516 kWh, et les besoins en énergie de chauffage du bâtiment STANDARD pendant la saison froide varient entre 35 879 kWh et 695 692 kWh. La charge annuelle totale du bâtiment STANDARD en climatisation est de 117 508 kWh et la charge annuelle totale en chauffage est de 2 360 814 kWh. Comme décrit dans l'étude de cas en, l'intégration à la fois de la mezzanine, de la cheminée d'aération et du béton de chanvre dans le système de mur correspond à une action anticipée qui a généré un résultat dans la satisfaction des besoins de confort en termes de climatisation. La valorisation du béton de chanvre, de la mezzanine et de la cheminée d'aération, permet de déterminer l'impact de cette intégration en combinaison avec le rendement énergétique. D'après les résultats présentés dans la Figure 6.5, les configurations qui combinent le béton de chanvre, la mezzanine et la cheminée d'aération sont celles qui contribuent le plus à la réduction des besoins énergétiques en climatisation. Toutefois, cette action contribue à la plus grande augmentation des besoins énergétiques en chauffage ce qui conduit à un effet négatif sur le coût énergétique global. Ceci explique que le ratio énergétique du bâtiment résultant de la configuration 4 est de : + 5.78%. Soit une augmentation du ratio énergétique du bâtiment par rapport au bâtiment STANDARD.

6.2 Scénario optimal pour la ville de Terrebonne

Le processus d'optimisation énergétique du bâtiment objet de l'étude dans cette recherche met en relation le béton de chanvre et le système de ventilation passif par action de cheminée. Ce processus de conception permet d'intégrer les paramètres énergétiques mentionnés ci-dessus dans la conception d'un bâtiment résidentiel à la ville de Terrebonne, ce qui permet de minimiser le recours aux systèmes actif. L'évolution des outils de

simulation a permis l'intégration des composants énergétiques, rendant possible la synthèse de grandes quantités d'informations.

De ce fait, les résultats de la simulation sont illustrés par le Tableau 6.1. Le ratio énergétique des différents scénarios montre que la configuration la plus favorable pour la ville de Terrebonne est celle où nous avons intégré le béton de chanvre dans le système de mur et ceci à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité murale. Le béton de chanvre offre une résistance aux flux de chaleur légèrement améliorée comparés à la laine de verre et à l'uréthane giclé utilisés généralement dans la construction typique au Canada. Cette intégration de l'isolant biosourcé à savoir le béton de chanvre offre une meilleure assurance aux clients quant aux choix d'un système de mur plus performant. Le béton de chanvre offre un rendement énergétique identique aux isolants standards et son impact environnemental est limité comparé à la laine de verre et à l'uréthane giclé. Pour une évaluation pertinente du choix de béton de chanvre, l'énergie ne sera pas perçue comme une simple quantité de KWH, mais plutôt elle sera appréhendée selon une série de critères environnementaux. Du point de vue bilan global énergie-environnement, l'ajout du béton de chanvre permet de garantir à la fois :

- Un bilan énergétique légèrement amélioré par rapport à la construction typique du Québec;
- Une meilleure qualité environnementale comparée à la laine de verre et à l'uréthane giclé.

La combinaison mezzanine et cheminée d'aération contribue à la plus grande augmentation des besoins énergétiques en chauffage. Cela est dû au climat de la ville de Terrebonne qui nécessite des espaces compacts et fermés surtout pour la longue période d'hiver. À cette fin, la configuration optimale et celle qui s'adapte le mieux au climat local et qui répond au mieux aux critères énergétiques et environnementaux c'est la configuration 1_b qui intègre le béton de chanvre dans le système de mur du bâtiment STANDARD, et ceci à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité murale.

Tableau 6.1 Tableau du ratio énergétique des différents scénarios de configurations du bâtiment standard cas de Terrebonne

Nom du scénario	Représentation sous le modèle de SketchUp	Besoins en chauffage (KWh/an)	Besoins en Climatisation (KWh/an)	Taux % du ratio énergétique par rapport au bâtiment STANDARS
Bâtiment STANDARD		2 387 814	117 508	Consommation typique des bâtiments résidentiels au Canada
#1_a Intégration du béton de chanvre dans le système de mur et ceci à l'extérieur de la cavité murale		2 387 814	117 508	0%
#1_b Intégration du béton de chanvre dans le système de mur et ceci à l'extérieur et à l'intérieur de la cavité murale		2 387 663	117 511	0%
#2 Incorporation du système de ventilation passif (mezzanine) par action de cheminée		2 527 528	100 055	+4.88%
#3 Incorporation du système de ventilation passif (mezzanine et les cheminées d'aération) par action de cheminée		2 551 980	98 135	+5.77%
#4 L'action d'associer le béton de chanvre dans le système de mur à l'intérieur et l'extérieur de la cavité murale ainsi que le système de ventilation passif (mezzanine et les cheminées d'aération) par action de cheminée		2 552 117	98 134	+5.78%

6.3 Résultats de la simulation du cas d'étude de la ville de Batna

Les paramètres simulés dans cette partie sont la configuration des constructions typiques pour la ville de Batna, le béton de chanvre comme barrière isolante dans le système de mur, l'intégration de la mezzanine au niveau de la cage d'escalier et dans les logements du dernier niveau ce qui contribue à l'action de l'effet de cheminée et le cheminé d'aération incorporée dans tous les logements contribuant également à l'effet de cheminée. Nous analyserons les impacts des paramètres intégrés sur les besoins en refroidissement et en chauffage pour chaque combinaison de ces paramètres.

6.3.1 Configuration 1

6.3.1.1 Analyse des besoins en énergie pour la climatisation et le chauffage

La Figure 6.6 illustre une comparaison des charges mensuelles de climatisation/chauffage pour un bâtiment avec la configuration 1, qui intègre le béton de chanvre comme barrière isolante de 5 cm (à la place du polystyrène) dans le système de mur du bâtiment STANDARD. Nous constatons à travers l'analyse des résultats de la simulation de la configuration 1 que :

- La construction typique pour la ville de Batna offre une consommation annuelle en matière de climatisation de 67 758 kWh et 4 586 kWh en matière de chauffage ;
- L'intégration du béton de chanvre dans le système de mur augmente la quantité des besoins annuels en climatisation qui atteint 67 883 kWh et démunit légèrement la quantité des besoins annuelle en chauffage qui atteint 4 577 kWh.

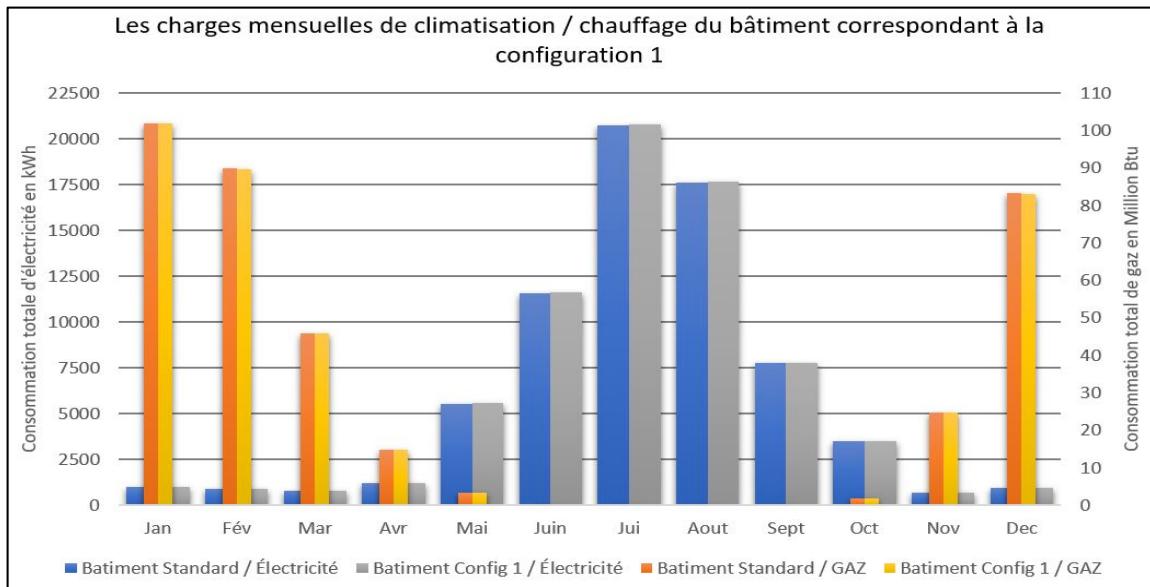


Figure 6.6 Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec un système d'enveloppe contenant du béton de chanvre cas de la ville de Batna

Les résultats de la simulation mensuelle de ce bâtiment de configuration 1 montrent que les besoins en énergie de climatisation pendant la saison chaude, de mai à octobre, vont de 3 480 kWh à 20 804 kWh, et que les besoins en chauffage pendant la saison froide, de novembre à avril, vont de 327 kWh à 1 008 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 67 883 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 4 577 kWh. Les résultats de la simulation pour les besoins en énergie de refroidissement pendant la saison chaude du bâtiment STANDARD varient entre 3 471 kWh et 20 773 kWh, et les besoins en énergie de chauffage du bâtiment STANDARD pendant la saison froide varient entre 331 kWh et 999 kWh. La charge annuelle totale du bâtiment STANDARD en climatisation est de 67 758 kWh et la charge annuelle totale en chauffage est de 4 586 kWh. L'intégration du béton de chanvre dans le système de mur du bâtiment STANDARD augmente légèrement le phénomène de transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment, rendant les températures intérieures moins stables pendant la période estivale. Toutefois, le béton de chanvre permet d'améliorer légèrement le transfert de chaleur pendant la période froide. Dans cette optique, l'intégration du béton de chanvre contribue à une augmentation légère du

bilan énergétique global du bâtiment objet de l'étude. Cela explique que le ratio énergétique du bâtiment résultant de la configuration 1 qui est de + 0.16 % est relativement supérieur à celui du bâtiment standard. Si la configuration 1 a permis de réduire légèrement les besoins énergétiques en climatisation, cette contribution reste inférieure à l'objectif fourni par la recherche. Cela s'explique par le fait que d'avoir une bonne enveloppe ne suffit pas pour réaliser un bâtiment à haut rendement énergétique. De ce fait, nous évaluons dans les sections suivantes l'impact de concevoir un bâtiment avec la combinaison de deux paramètres qui sont :

- Un système de ventilation passif;
- Un système d'enveloppe contenant du béton de chanvre.

6.3.2 Configuration 2

6.3.2.1 Analyse des besoins en énergie pour la climatisation et le chauffage pour l'incorporation de la mezzanine (action de l'effet de cheminée) dans les logements du dernier niveau (a)

La Figure 6.7 illustre une comparaison des charges mensuelles de climatisation/chauffage pour un bâtiment avec la configuration 2_a, qui intègre la mezzanine comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée dans les logements du dernier niveau du bâtiment STANDARD. Nous observons à travers le graphe ci-dessous que :

- La construction typique pour la ville de Batna offre une consommation annuelle en matière de climatisation de 67 758 kWh et 4 586 kWh en matière de chauffage ;

- L'intégration de la mezzanine comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée dans les logements du dernier niveau permet de réduire la quantité des besoins annuels en climatisation qui atteint 66 774 kWh et démunie également la quantité des besoins annuels en chauffage qui atteint 4 517 kWh.

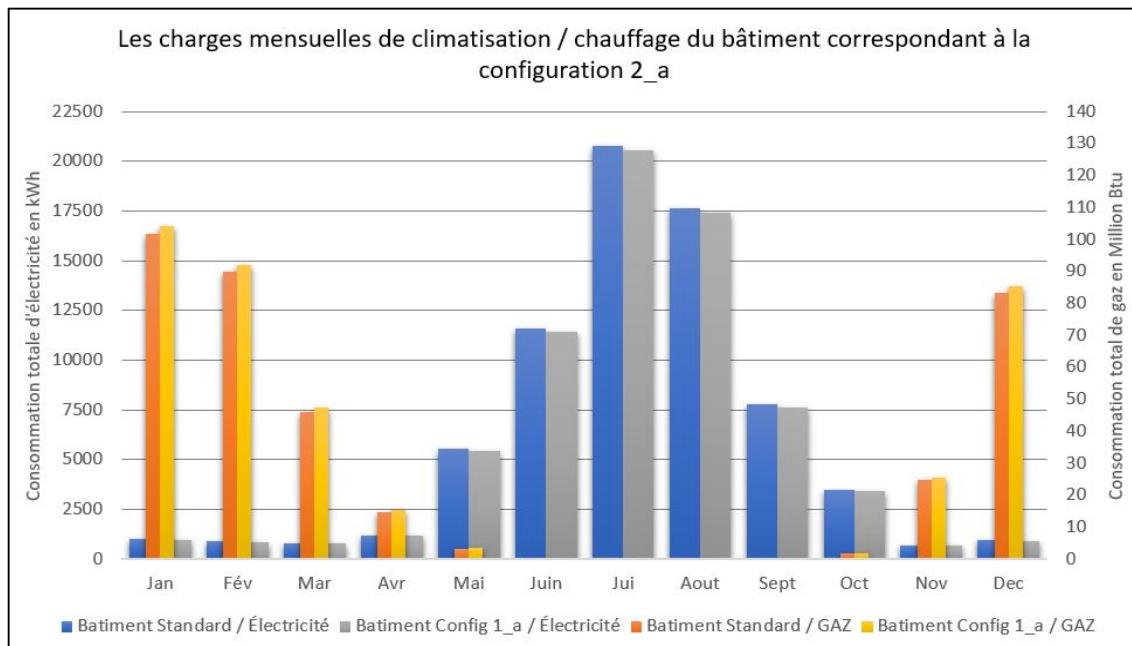


Figure 6.7 Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec système de ventilation passif par action de cheminée (intégration de la mezzanine dans les logements du dernier niveau)

Les résultats de la simulation mensuelle montrent que les besoins en énergie de climatisation du bâtiment de la configuration 2_a pendant la saison chaude, de mai à octobre, varient entre 3 388 kWh et 20 536 kWh et que ses besoins en chauffage pendant la saison froide, de novembre à avril, varient entre 381 kWh et 977 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 66 774 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 4 517 kWh. Pour le bâtiment STANDARD, les résultats de la simulation des besoins en énergie de refroidissement pendant la saison chaude varient de 3 471 kWh et 20 773 kWh et les besoins en chauffage pendant la saison froide varient entre 331 kWh et 999 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 67 758 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de

4 586 kWh pour le bâtiment STANDARD. Le ratio énergétique du bâtiment résultant de la configuration 2_a est de : - 1.46 %. Soit une réduction du ratio énergétique du bâtiment par rapport au bâtiment STANDARD. Il est clair qu'une réduction des charges thermiques est obtenue en mettant en œuvre la configuration 2_a. Cette économie est due au mouvement d'air provoqué par l'intégration de la mezzanine dans les logements du dernier niveau ce qui favorise le transfert de chaleur entre les différents espaces du bâtiment par action de cheminée, appelé aussi échange d'énergie thermique ou tirage thermique. La configuration 2_a peut encore être enrichie d'une série de stratégies pour plus d'économie, nous évaluons dans la section suivante l'impact d'intégrer la mezzanine dans une grande partie du bâtiment celle de la cage d'escalier située au centre de la bâisse pour améliorer au mieux la ventilation passive des bâtiments résidentiels.

6.3.2.2 Analyse des besoins en énergie pour la climatisation et le chauffage pour l'incorporation de la mezzanine (action de l'effet de cheminée) dans les logements du dernier niveau (b)

La Figure 6.8 illustre une comparaison des charges mensuelles de climatisation/chauffage pour un bâtiment avec la configuration 2_b, qui intègre la mezzanine dans la cage d'escalier comme stratégie de ventilation passive dans le bâtiment STANDARD. Nous observons à travers le graphe ci-dessous que :

- La construction typique pour la ville de Batna offre une consommation annuelle en matière de climatisation de 67 758 kWh et 4 586 kWh en matière de chauffage ;
- L'intégration de la mezzanine comme stratégie de ventilation passive permet de réduire la quantité des besoins annuels en climatisation qui atteint 51 841 kWh et démunit également la quantité des besoins annuelle en chauffage qui atteint 4 253 kWh.

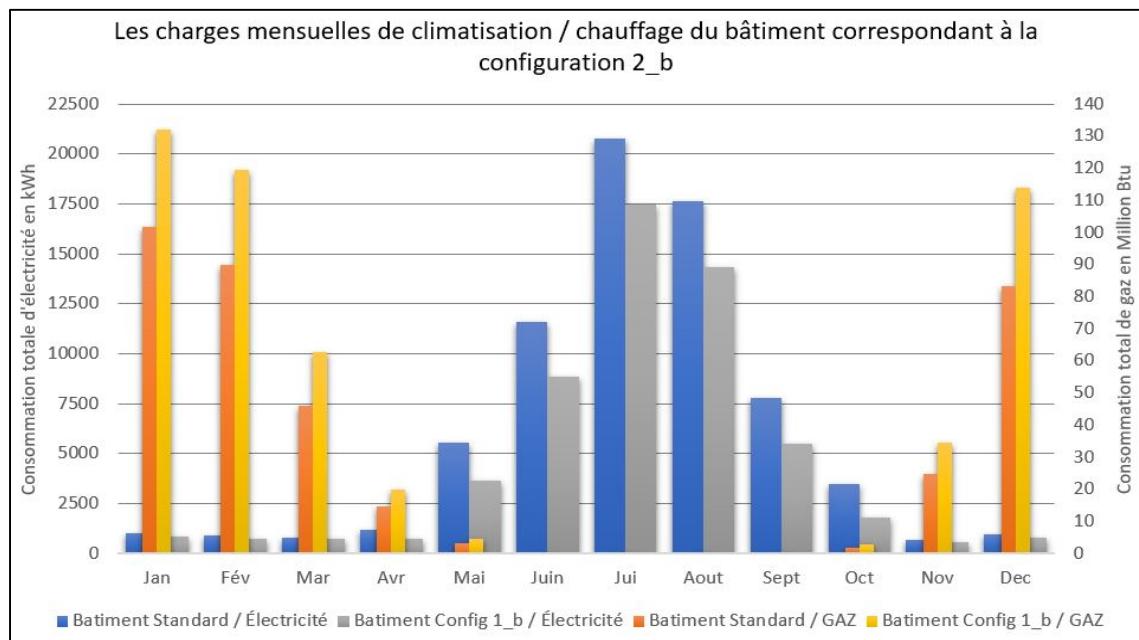


Figure 6.8 Graphe comparatif des charges mensuelles en Énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec système de ventilation passif par action de cheminée (intégration de la mezzanine dans la cage d'escalier du bâtiment)

Les résultats de la simulation mensuelle montrent que les besoins en énergie de climatisation du bâtiment de la configuration 2_b pendant la saison chaude, de mai à octobre, varient entre 1 744 kWh et 17 479 kWh et que ses besoins en chauffage pendant la saison froide, de novembre à avril, varient entre 383 kWh et 832 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 51 841 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 4 253 kWh. Pour le bâtiment STANDARD, les résultats de la simulation des besoins en énergie de refroidissement pendant la saison chaude varient de 3 471 kWh et 20 773 kWh et les besoins en chauffage pendant la saison froide varient entre 331 kWh et 999 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 67 758 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 4 586 kWh pour le bâtiment STANDARD. Le ratio énergétique du bâtiment résultant de la configuration 2_b est de : - 22.46%. Soit une réduction du ratio énergétique du bâtiment par rapport au bâtiment STANDARD. Il est clair qu'une réduction significative des charges thermiques est obtenue en mettant en œuvre la configuration 2_b.

Cette économie est due au mouvement d'air provoqué par l'intégration de la mezzanine dans la cage d'escalier du bâtiment ce qui favorise le transfert de chaleur entre les différents espaces du bâtiment, appelé échange d'énergie thermique ou tirage thermique. Les trois modes fondamentaux de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et le rayonnement. Il est possible d'avoir un transfert de chaleur via plus d'un mode. La direction du transfert de chaleur est toujours d'un espace à température plus élevée vers un espace à température plus basse.

Le cycle de ce transfert thermique s'arrête dans ce bâtiment lorsque les besoins en énergie pour le chauffage en hiver et la climatisation en été sont assurés, ce qui permet de maintenir une température intérieure ambiante et acceptable. L'ajout de la mezzanine dans la cage d'escalier comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée permet clairement de réaliser des économies d'énergie.

6.3.3 Configuration 3

6.3.3.1 Analyse des besoins en énergie pour la climatisation et le chauffage

La Figure 6.9 illustre une comparaison des charges mensuelles de climatisation/chauffage pour un bâtiment avec la configuration 3, qui intègre la mezzanine dans la cage d'escalier du bâtiment STANDARD comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée et les cheminées d'aération dans la conception des logements du bâtiment STANDARD comme stratégie de ventilation passive par effet de cheminée. Les graphes présentés ci-dessous montrent que :

- La construction typique pour la ville de Batna offre une consommation annuelle en matière de climatisation de 67 758 kWh et 4 586 kWh en matière de chauffage ;

- L'intégration de la mezzanine et des cheminées d'aération dans le bâtiment STANDARD comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée permet de réduire la quantité des besoins annuels en climatisation qui atteint 50 857 kWh et démunie également la quantité des besoins annuels en chauffage qui atteint 4 185 kWh.

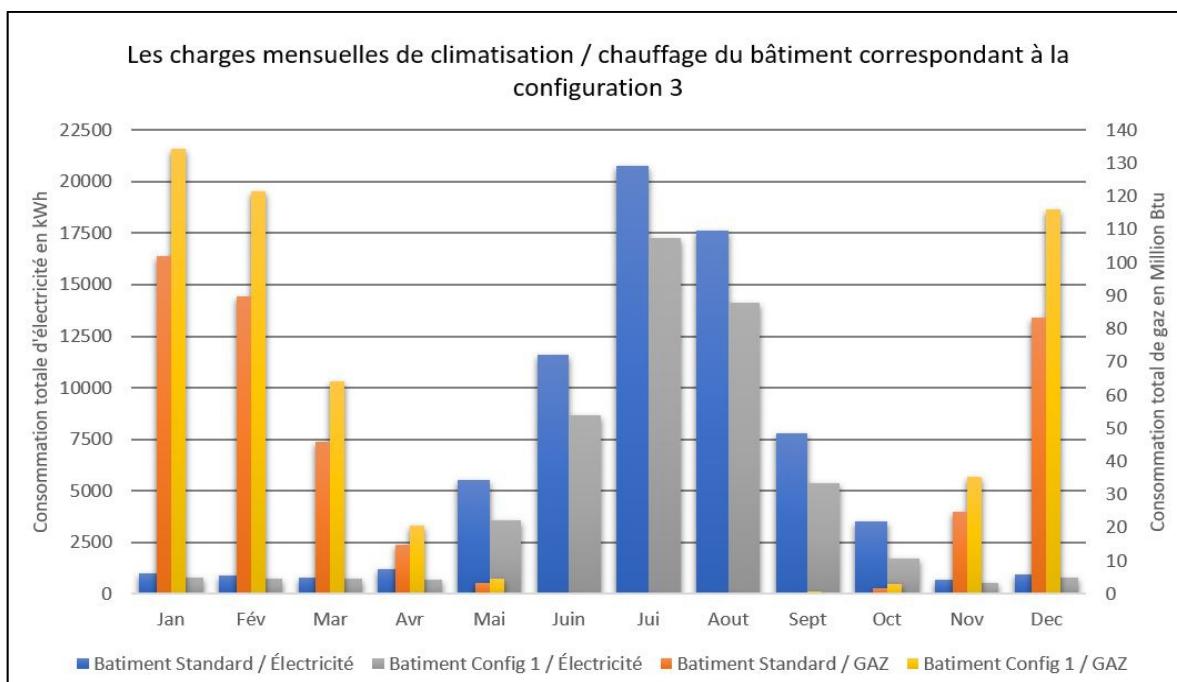


Figure 6.9 Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec système de ventilation passif par action de cheminée et par effet combustible

Les résultats de la simulation mensuelle montrent que les besoins en énergie de climatisation de ce bâtiment de configuration 3 pendant la saison chaude, de mai à octobre, varient entre 1 662 kWh et 17 242 kWh et indiquent que les besoins en chauffage pendant la saison froide, de novembre à avril, varient entre 385 kWh et 809 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 50 857 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 4 185 kWh. À titre de comparaison, la simulation des besoins en énergie de refroidissement pendant la saison chaude pour le bâtiment STANDARD varie entre 3 471 kWh et 20 773 kWh, et les besoins en chauffage pendant la saison froide, varie entre 331 kWh et 999 kWh. La charge

annuelle totale de climatisation du bâtiment STANDARD est de 67 758 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 4 586 kWh. La combinaison de l'intégration de la mezzanine et des cheminées d'aération, comme décrit dans l'étude de cas, se traduit par la réalisation d'économies d'énergie supplémentaires en réduisant le besoin de refroidissement et de chauffage. Cette association de la mezzanine et des cheminées d'aération repose sur l'adoption absolue de solutions vernaculaires dans la construction contemporaine en abordant les questions de l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels tels que vus dans la revue de littérature.

Cette intégration permet une plus grande ventilation naturelle dans les espaces intérieurs, rendant les températures intérieures plus ambiantes pendant la période estivale. De plus, cette configuration favorise également un transfert de chaleur plus efficace entre les différents espaces du bâtiment pendant la période hivernale. Ceci explique que le ratio énergétique du bâtiment issu de la configuration 3 est de : - 23.91%. Soit une réduction du ratio énergétique du bâtiment par rapport au bâtiment STANDARD. La combinaison de la mezzanine et des cheminés d'aération constitue une réponse possible aux problèmes de ventilation dans les bâtiments résidentiels. L'ajout d'une telle stratégie de ventilation passive permet clairement de réaliser des économies d'énergie et de minimiser le recours aux systèmes de ventilations actif.

6.3.4 Configuration 4

6.3.4.1 Analyse des besoins en énergie pour la climatisation et le chauffage

La Figure 6.10 illustre une comparaison des charges mensuelles de climatisation/chauffage pour un bâtiment avec la configuration 4, qui intègre la mezzanine dans la cage d'escalier du bâtiment STANDARD comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée, les cheminées d'aération dans la conception des logements du bâtiment STANDARD comme stratégie de ventilation passive par effet de cheminée ainsi que le béton de chanvre comme barrière isolante dans le système de mur du bâtiment STANDARD. Nous observons à travers le graphe ci-dessous que :

- La construction typique pour la ville de Batna offre une consommation annuelle en matière de climatisation de 67 758 kWh et 4 586 kWh en matière de chauffage ;
- L'action d'associée la mezzanine, les cheminées d'aération ainsi que le béton de chanvre dans le système de mur permet de réduire la quantité des besoins annuels en chauffage qui atteint 4 183 kWh et démunie également d'une manière significatif la quantité des besoins annuels en climatisation qui atteint 50 756 kWh.

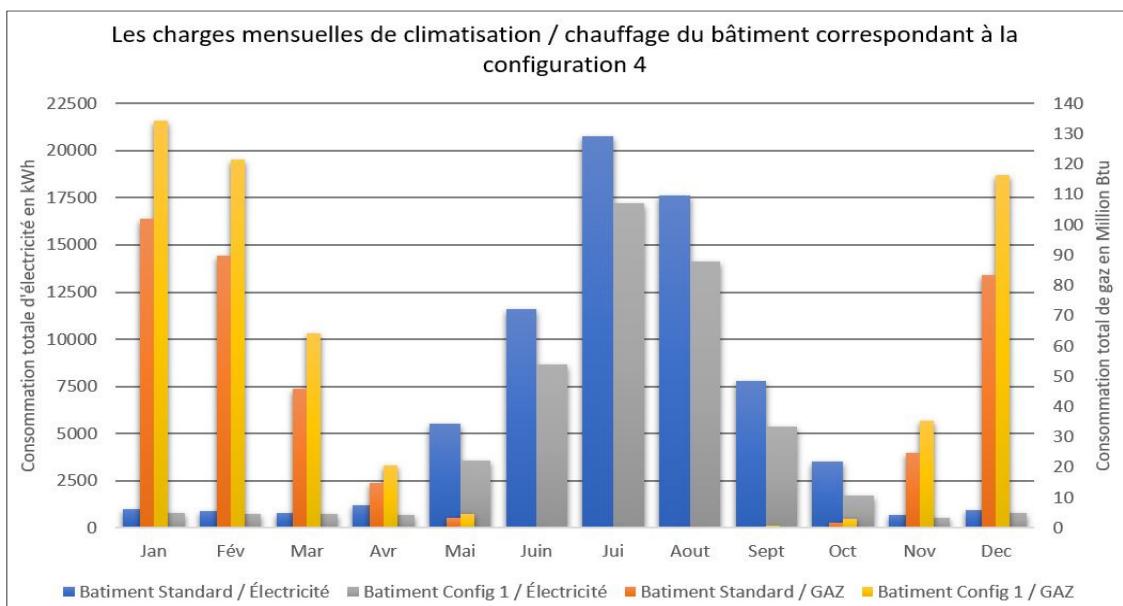


Figure 6.10 Graphe comparatif des charges mensuelles en énergie de consommation en climatisation/chauffage entre bâtiment standard et bâtiment avec mezzanine, les cheminés d'aération et le béton de chanvre dans un système de mur

Les résultats de la simulation mensuelle montrent que les besoins en énergie de climatisation de ce bâtiment de configuration 4 pendant la saison chaude, de mai à octobre, varient entre 1 656 kWh et 17 216 kWh et indiquent que les besoins en chauffage pendant la saison froide, de novembre à avril, varient entre 385 kWh et 809 kWh. La charge annuelle totale pour la climatisation est de 50 756 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 4 183 kWh. Parallèlement, la simulation des besoins en énergie de refroidissement pendant la saison chaude pour le bâtiment STANDARD varie entre 3 471 kWh et 20 773 kWh, et les besoins

en chauffage pendant la saison froide, varie entre 331 kWh et 999 kWh. La charge annuelle totale de climatisation du bâtiment STANDARD est de 67 758 kWh et la charge annuelle totale de chauffage est de 4 586 kWh. Le ratio énergétique du bâtiment résultant de la configuration 4 est de -24,05%. Il s'agit donc d'une réduction du ratio énergétique du bâtiment de la configuration 4 par rapport à celui du bâtiment standard. Cette configuration a un impact positif tant sur la période de refroidissement que sur la période de chauffage. L'action d'associer l'intégration du béton de chanvre dans le système de mur avec les systèmes de ventilation passif donne l'avantage d'allier enveloppe performante et qualité d'air intérieur très satisfaisante. Il est à signaler que l'enveloppe performante dans notre cas d'étude se traduit à travers l'approche énergétique et environnementale (revue de littérature) c'est-à-dire une approche globale et multidisciplinaire. Au-delà du rendement énergétique, l'utilisation du béton de chanvre permet de répondre aux enjeux d'impacts environnementaux.

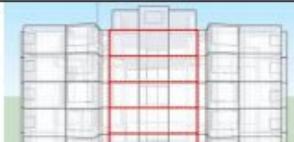
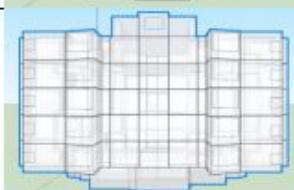
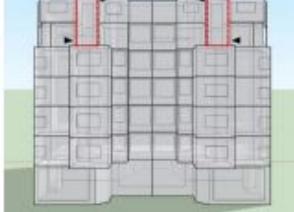
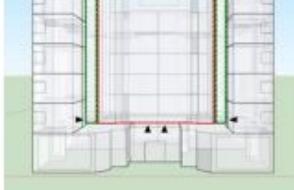
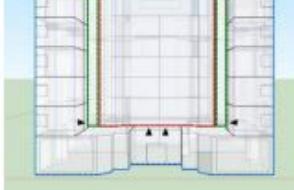
6.4 Scénario optimal pour la ville de Batna

Le processus de réduction de la consommation énergétique du bâtiment objet de l'étude dans cette recherche met en relation le béton de chanvre et une stratégie de ventilation passive par action de cheminée. Ce processus de conception permet d'intégrer les paramètres énergétiques mentionnés ci-dessus dans la conception d'un bâtiment résidentiel à la ville de Batna, ce qui permet de minimiser le recours aux systèmes actifs.

Les résultats de la simulation sont illustrés dans le tableau 6.2. Le ratio énergétique des différents scénarios montre que la configuration la plus favorable pour la ville de Batna est celle où nous avons intégré le béton de chanvre dans le système de mur en complément d'un système de ventilation passif par action de cheminée et par effet combustible dans le bâtiment. Une enveloppe de bâtiment contenant du béton de chanvre résiste bien aux flux de chaleur et son impact devient positif s'il elle est associée à une stratégie de ventilation passive permettant un renouvellement d'air continu. Cette combinaison du béton de chanvre dans le système d'enveloppe du bâtiment et de la stratégie de ventilation passive par action

de cheminée et par effet combustible offre l'avantage d'allier enveloppe performante et renouvellement d'air satisfaisant. Ce qui constitue une réponse possible aux problèmes énergétiques en Algérie. À titre de comparaison, la configuration 4 permet clairement de réaliser des économies d'énergie comparée aux autres configurations toute en assurant un meilleur choix de matériau du point de vue écologique. Ceci permet une meilleure durabilité de l'enveloppe du bâtiment comparé au mur avec du polystyrène expansé utilisée généralement dans les bâtiments résidentiels en Algérie. De ce fait, la configuration optimale et celle qui s'adapte le plus au climat local c'est la configuration 4.

Tableau 6.2 Tableau du ratio énergétique des différents scénarios des configurations du bâtiment standard cas de Batna

Nom du scénario	Représentation sous le modèle de SketchUp	Besoins en chauffage (KWh/an)	Besoins en Climatisation (KWh/an)	Taux % du ratio énergétique par rapport au bâtiment STANDARS
Bâtiment STANDARD		4 586	67 758	Consommation typique des bâtiments résidentiels en Algérie
#1 Intégration du béton de chanvre dans le système de mur		4 577	67 883	0%
#2_a Incorporation du système de ventilation passif (mezzanine) par action de cheminée et ceci dans les logements du dernier niveau		4 517	66 774	-1,46%
#2_b Incorporation du système de ventilation passif (mezzanine) par action de cheminée et ceci dans la cage d'escalier		4 253	51 841	-22,46%
#3 Incorporation du système de ventilation passif (mezzanine et cheminées d'aération) par action de cheminée		4 185	50 857	-23,91%
#4 L'action d'associer le béton de chanvre et le système de ventilation passif (mezzanine et cheminées d'aération) par action de cheminée		4 183	50 756	-24,05%

6.5 Synthèse

Chacune des cinq configurations intégrant des paramètres, seuls ou en combinaison, a permis d'éclaircir leurs impacts sur la performance énergétique des bâtiments résidentiels pour la ville de Terrebonne au Canada et Batna en Algérie. Au Canada, le matériau du béton de chanvre possède une capacité importante à réguler la température de l'ambiance intérieure d'un bâtiment. Ceci validera l'hypothèse de la recherche de Kabore (2020). Le système de ventilation passif par action de cheminée en l'occurrence la mezzanine et les cheminées d'aération contribuent à un impact mitigé sur les besoins en chauffage contrairement aux besoins en refroidissement. À cet effet, la ville de Terrebonne possède un climat froid avec une période hivernale plus importante que la période estivale, on déduit alors que l'intégration de la mezzanine et des cheminées d'aération semble ne pas répondre au problème d'énergie des bâtiments résidentiels dans la ville de Terrebonne. Pour donner suite aux différentes simulations effectuées dans la ville de Batna, le béton de chanvre en tant qu'isolant est une option beaucoup plus intéressante que le polystyrène expansé. Intégrer le béton de chanvre dans l'industrie de la construction algérienne contribue à la réduction de la consommation énergétique des bâtiments résidentiels s'il est associé d'une stratégie de ventilation passive. Par conséquent, intégrer le béton de chanvre seul contribue à une augmentation relative de la consommation énergétique. Le système de ventilation passif par action de cheminée en l'occurrence la mezzanine et les cheminées d'aération ont permis clairement d'améliorer les performances énergétiques. La mezzanine qui contribue à l'action de l'effet de cheminée a un impact positif sur le rendement énergétique et lorsque les cheminées d'aération étaient incorporées les économies réalisées étaient supérieures à la simple incorporation de la mezzanine. Ce qui révèle que les cheminées d'aération ont un impact sur la mezzanine et que le comportement de la stratégie de ventilation passive proposée devient un stimulus pour le système d'enveloppe du bâtiment contenant du béton de chanvre permettant ainsi d'assurer une enveloppe performante allier à une circulation d'air efficace. Vu que c'est une simulation numérique basée sur de différentes hypothèses, il est évident que les résultats présentés ne sont pas rigoureusement exacts, surtout avec le manque de certaines données climatiques pour les deux villes. Pour obtenir des résultats plus

réalistes, il est exigé de faire une étude expérimentale pour pouvoir comparer ces résultats aux résultats obtenus par simulation numérique.

Est-ce que les objectifs sont atteints ?

Objectif principal :

Évaluation de la performance énergétique de deux systèmes passifs seuls ou en combinaison intégrés dans la conception des bâtiments résidentiels au Canada et en Algérie. Ces systèmes sont : une enveloppe de bâtiment contenant une isolation en béton de chanvre et une stratégie de ventilation passive (mezzanine, cheminées d'aération) par action de cheminée. 

Objectifs secondaires :

- Étudier la faisabilité d'adopter une stratégie de ventilation passive et des systèmes d'enveloppe contenant du béton de chanvre, dans la réalisation des nouveaux bâtiments résidentiels.

Cas de la ville de Terrebonne. 

- Étudier la faisabilité d'adopter une stratégie de ventilation passive complémentaire à des systèmes d'enveloppe contenant du béton de chanvre, dans la réalisation des nouveaux bâtiments résidentiels,

Cas de la ville de Batna. 

CONCLUSION

Cette recherche s'inscrit dans la problématique générale du développement durable qui a pour cible l'économie des énergies non renouvelables. Nous nous intéressons plus précisément à la question d'optimisation de la conception des bâtiments résidentiels du point de vue énergétique dans deux régions avec deux climats contrastés à savoir la ville de Terrebonne, au Canada et la ville de Batna, en Algérie. Cette question est liée à une préoccupation majeure à savoir quel enseignement nous pouvons acquérir du langage vernaculaire dans la pratique architecturale contemporaine.

Ce travail a donc pour objectif la proposition d'une stratégie de solutions passive à adopter pour assurer des économies d'énergie dans le secteur résidentiel au Canada et en Algérie. Afin de comprendre le comportement du béton de chanvre et des systèmes de ventilation passif, leurs applications dans les bâtiments, leurs qualités inhérentes d'adaptation au climat, de comprendre la réflexion sur la pratique de l'architecture vernaculaire, une revue de littérature approfondie a été réalisée.

Pour l'étude paramétrique de Terrebonne, une simulation avec le logiciel Energy Plus™ a montré que le béton de chanvre crée une atmosphère saine dans le bâtiment. Du point de vue de la régulation de la température, c'est un bon isolant. Le béton de chanvre permet d'ajuster la température intérieure pendant les périodes froides et chaudes de l'année, l'utilisation du béton de chanvre dans les bâtiments présente un grand avantage pour offrir un bon confort aux occupants. De plus, la revue de littérature démontre que le béton de chanvre est un matériau écologique respectueux de l'environnement contrairement aux produits d'isolation standard. Cependant, l'intégration de la mezzanine et des cheminées d'aération comme stratégie de ventilation passive par action de cheminée et effet combustible créent un grand volume non adapté au climat en hiver. Favorisant la distribution de l'air dans le bâtiment, créant un espace où l'air circule pour récupérer la chaleur accumulée par convection, un processus qui contribue à refroidir le bâtiment en été tout en ayant des conséquences

négatives sur le chauffage du bâtiment en hiver. Cette contribution reste inférieure à l'objectif fourni par la recherche pour un climat froid de la ville de Terrebonne.

Pour l'étude paramétrique de la ville de Batna, la simulation avec le logiciel Energy Plus™ a démontré que la mise en œuvre de la combinaison des systèmes passifs proposés a permis de maximiser les économies d'énergie tout en assurant le confort thermique des occupants. L'intégration du béton de chanvre dans les systèmes de murs typiques de la construction en Algérie permet d'améliorer les performances énergétiques s'il est associé d'une incorporation d'un système de ventilation passif. La mezzanine et les cheminées d'aération ont un impact sur le béton de chanvre, chaque étape de l'intégration, l'incorporation des paramètres passifs dans le bâtiment objet de l'étude est une amélioration pertinente. Une action qui permet aux bétons de chanvre, à la mezzanine et aux cheminées d'aération de se constituer en groupe ce qui révèle que le comportement de la mezzanine et des cheminées d'aération devient un stimulus pour le béton de chanvre.

En bref, les écotechniques traditionnelles et vernaculaires semblent être une alternative prometteuse à l'architecture algérienne et canadienne. Cependant, il existe certains paramètres non maîtrisés notamment les données climatiques sur l'indice des nuages, le rayonnement solaire direct et le manque d'une étude expérimentale. De ce fait, les calculs de simulation réalisée se concentrent uniquement sur le comportement énergétique de la mezzanine, des cheminées d'aération et du béton de chanvre pour vérifier leurs performances dans la régulation de la température ambiante intérieure pour le cas de l'Algérie et du Canada.

RECOMMANDATIONS

Pour compléter cette recherche, une étude expérimentale est essentielle pour valider la simulation numérique avant d'affirmer la performance énergétique du béton de chanvre en combinaison avec la mezzanine et les cheminées d'aération par action de cheminée et par effet combustible dans le contexte canadien et algérien. De plus, il est aussi nécessaire d'étudier les caractéristiques mécaniques et physiques du béton de chanvre dans les conditions climatiques canadiennes et algériennes pour que ce travail soit achevé.

En plus des études expérimentales proposées, des études sur les matériaux biosourcés tels que : papier journal, grignon, sciure, résidus d'olives, paille, etc. existant en Algérie sont nécessaires afin de valoriser ces matériaux dans le domaine de la construction et d'analyser en premier lieu leurs performances mécaniques avant de poursuivre avec une évaluation énergétique.

Des études de cycle de vie sont également nécessaires pour quantifier la quantité de CO₂ stockée par mètre carré de mur dans une enveloppe contenant du béton de chanvre en prenant en considération l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.

De plus, un travail important devra être réalisé pour évaluer de façon significative l'utilité de l'architecture vernaculaire dans l'aide à l'écoconception des bâtiments résidentiels. De ce fait, il faudrait envisager des tests complémentaires par paramètre, dispositif, par climat ou par région, on pourrait imaginer d'entreprendre des recherches plus spécifiques. Un travail de recherche pourrait par exemple se consacrer à une seule région, ou à un seul type de ventilation passive comme par exemple les tours à vent et les Malkef afin d'explorer toutes les possibilités existantes. Une rigueur est nécessaire afin de ne pas s'égarer dans le champ très vaste de l'architecture vernaculaire.

En bref, l'exploitation du béton de chanvre comme matériau en Algérie peut fortement répondre à la crise économique qui sévit depuis ces dernières années, suite à la chute libre des revenus de l'exploitation du pétrole et du gaz en raison de la diminution des prix et de la demande mondiale. Le béton de chanvre peut contribuer à une progression des exportations hors hydrocarbure, si un tel investissement est bien réussi à l'échelle locale.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELSALAM, Tarek et RIHAN, Ghada Mohamed. The impact of sustainability trends on housing design identity of Arab cities. HBRC Journal, 2013, vol. 9, no 2, p. 159-172.
- Al-Sallal KA, Rahmani M (2019). Vernacular architecture in the MENA region: Review of bioclimatic strategies and analysis of case studies. In: Sayigh A (ed), Sustainable Vernacular Architecture. Cham, Switzerland: Springer.
- Abelé, C. (2009). Transfert d'humidité à travers les parois : Évaluer les risques de condensation. CSTB : le futur en construction, 74 p.
- BERGHOUT, Belkacem. Effet de l'implantation d'un bâtiment collectif sur le confort hygrothermique intérieur cas de Biskra, Algérie. 2012. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure.
- BENCHERIF, Meriama et CHAOUCHE, Salah. La maison urbaine à patio, réponse architecturale aux contraintes climatiques du milieu aride chaud. Science et changements planétaires/Sécheresse, 2013, vol. 24, no 3, p. 203-213.
- Bouklikha Abdellah.Beyettou Mohamed Abdelkader. 2017. Variation et tendances des températures et des précipitations journalières en Algérie. Université Abou Beker Belkaid Tlemcen. p20.21.22.
- Boma Québec. (n.d.) La certification BOMA BEST. Repéré à <http://www.boma-quebec.org/boma-best>.
- BOMA BEST. (Février 2007). Guide d'accompagnement BOMA BEST pour immeubles écoresponsables 3.0. Repéré à <http://bomacanada.ca/wp-content/uploads/2016/09/Guide-daccompagnement-BOMA-BEST-3.0.pdf>.
- Bayol, D. (2016). Écoconstruction -bioclimatique - le béton de chanvre vous permet un Bonus pour construire plus. Repéré à <http://db-chanvre.com/la-construction-passive/>.
- Barclay, M., Holcroft, N., & Shea, A. (2014). Methods to determine whole building hygrothermal performance of hemp-lime buildings. Building and Environment, 80, 204-212.
- Boisyvon, A. (2015). Comparatif des performances environnementales du béton et du béton de chanvre- Étude du cas de deux bâtiments d'habitation construits par Val Touraine Habitat à Nouzilly (37). 8 p. repérées à www.cerema.fr.

- Bayol, D. (2016). Écoconstruction -bioclimatique - le béton de chanvre vous permet un bonus pour construire plus. Repéré à <http://db-chanvre.com/la-construction-passive/>.
- Bocquet, H. (2013). Fiche technique _la Chènevotte. 1 p.
- Börjesson, P., & Gustavsson, L. (2000). Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. *Energy policy*, 28(9), 575-588.
- BERGHOUT, Belkacem. Intégration des aspects énergétiques et du confort ambiant passif dans la conception de l'habitat en milieu aride. 2019. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure.
- CECOBOIS. (2017). L'avantage environnemental des systèmes de construction en bois dans le contexte des changements climatiques. CECO-784_Ficheavantage_enviro_WEB, pp.8. Repéré à <https://www.cecobois.com>.
- Chamoin, J. (2013). Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation (INSA de Rennes).
- Chabot, M. (2010). Construire avec du chanvre au Québec, écologis. 5. Repéré à <https://maisonsaine.ca/wp-content/uploads/2010/01/Chanvre.pdf>.
- Cérézo, V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. Institut National des Sciences appliquées, Lyon.
- Construction and Building Materials, pp.102, 679-687. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.021>.
- Centre canadien des codes du CNRC. (2011). Le nouveau code national de l'énergie pour les bâtiments – Canada (CNEB) 2011. Repéré à <https://www.cebq.org/documents/CNEB2011.pdf>.
- Société d'hypothèque et de logement. (2011). Logements et collectivités durables. Repéré à https://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/clfihaclin/observateur/upload/Chapter_7_FR_dec21_w.pdf.
- Canadian Passive House Institute. (n.d.). Rpéré a <http://www.passivehouse.ca/first-passive-houses>.
- Cohabitation. (2012). Maison solaire passive contre maison nette zéro : le match. Repéré à <http://www.ecohabitation.com/actualite/nouvelles/maison-solaire-passive-contre-maison-nette-zero-match>.

Ciarlo, S. D., Lalande, F., & Ste-Cyr, Y. (2008). Les différents types d'isolants et leur propriété physique, Exigence Codes de l'Énergie Québec et la nouvelle R de l'isolation. pp.113.

Collet, F. (2004). Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux. Institut National des Sciences appliquées de Rennes.

DE HERDE, André et LIÉBARD, Alain. Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. 2005.

Environnement et Changement climatique Canada. (2018). Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Émissions de gaz à effet de serre. pp.24. Doit : www.canada.ca/fr/environnementchangementclimatique/services/indicateursenvironnementaux/ emissions-gaz-effet-serre.htm Politique énergétique 2011-2025.

Écohabitation. (s.d.). Découvrez les programmes résidentiels de transition énergétique Québec- écohabitation- la ressource en habitation écologique. NOVCLIMAT. Repéré à http://www.ecohabitation.com/annuaire/index.php?path=2.2.0&id_page=12.

Evrard Arnaud, & De Herde André. (2010). LE BÉTON ET LA CONSTRUCTION DURABLE, PROJET CONTEXTUALISER, LA DURABILITÉ.

Frenette, C. D. (2009). Analyse multicritère des compositions de mur à ossature légère en bois (Citeseer).

Firme d'architecture Atelier des Recherches Architecturales (AAR), Algérie.

Filion, J.-P., & Garon, J. (2013, Avril-Mai 2013). Québec-habitation : Critères et Exigences Le magazine de la construction et de la rénovation, 30(N° 2), pp.40.

Fruchard, E. (s.d.). Caractéristique du chanvre -Charpente Eddy FRUCHARD. pp.3.

Firme d'architecture 2Architectures Montréal, Qc, Canada.

Groupe technique SKYCIV cloud engineering software logiciel d'analyse structurelle .13 février .2019) repéré a <https://skyciv.com/fr/technical/commonly-used-materials-in-structural-engineering/>.

Gustavsson, L., & Sathre, R. (2006). Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. Building and Environment, pp.41 (7), 940-951.

Goverse, T., Hekkert, M. P., Groenewegen, P., Worrell, E., & Smits, R. E. (2001). Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints.

- Granier, T., & Youlou, S. (2014). Présentation du programme de l'association la Voûte Nubienne (AVN) : 15 ans de recherche et d'application au service de la filière d'un habitat adapté. pp.28.
- GROUPE ORVERT LTÉE. (2013). GROUPE ORVERT LTÉE pour une solution durable aux changements climatiques, Mémoire présenté dans le cadre de la commission sur l'avenir énergétique du Québec à Shawinigan. pp.14. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca>.
- Gauthier, G. (2018). Art Can- Construction en chanvre. Repéré à <http://maisonenchanvre.com/avantages-du-chanvre/>.
- GOURLAY, E., & ARNAUD, L. (2011). Des matières premières au béton de chanvre : optimisation des propriétés thermiques et mécaniques. 20e Congrès français de Mécanique, 28 août/2 sept. 2011-25044 Besançon, France (FR).
- Gauthier, G. (2018). Art Can- Construction en chanvre. Repéré à <http://maisonenchanvre.com/avantages-du-chanvre>.
- GONZÁLEZ-ROUCO, F., VON STORCH, H., et ZORITA, E. Deep soil temperature as proxy for surface air-temperature in a coupled model simulation of the last thousand years. Geophysical Research Letters, 2003, vol. 30, no 21.
- Givoni B (1978). L'homme, l'architecture et le climat. Paris : Éditions du moniteur.
- Hamid Dehbia. juin2012. Analyse de l'efficience productive dans les entreprises publiques algériennes cas briqueterie tuilerie de Ferha (wilaya de Tizi Ouzou). Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. p 69-75.
- HOSENUZZAMAN, Md, RAHIM, N. A., SELVARAJ, J., et al. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of Solar photovoltaic power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol. 41, p. 284-297.
- Hauglustaine, J.-M., Simon, F., Baltus, C., & Liesse, S. (2006). La conception globale de l'enveloppe et l'énergie : Guide pratique pour les architectes. Ministère de la Région wallonne, pp.102.
- Hauglustaine, J.-M., & Simon, F. (2006). La Conception Globale de l'Enveloppe et l'Énergie /Guide pratique pour les architectes. pp.102.
- IRIS, I. d. R. I. e. S., & GRIP. (2017). Rapport d'étude n° 2, Données scientifiques et scenarios climatiques. Observatoire défense et Climat, Rapport d'étude n° 2, pp.85.
- Institut de la statistique du Québec. (2014). Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2011-2061. Institut de la statistique du Québec, Édition 2014 (Québec), pp.125. doi : www.stat.gouv.qc.ca. Repéré à ISBN 978-2-550-71321-0.

Jordan Cieski. (s.d). Matériaux Biosourcés, comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre. pp.34. Repéré à <https://seminairemateriaux.files.wordpress.com/2014/06/r9-mc3a9moire.pdf>.

Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J.-J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp.15 (1), 379-391.

Liuzzi, S., Sanarica, S., & Stefanizzi, P. (2017). Use of agro-wastes in building materials in the Mediterranean area: a review. Energy Procedia, 126, 242-249.

Latif, E., Lawrence, M., Shea, A., & Walker, P. (2015). Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. Building and Environment, pp.93, 199-209.

Maref W. (2011). Impact of air leakage on hygrothermal and energy performance of buildings in North America. 13th Canadian Conference on Building Science and Technology. Workshop. (Winnipeg, Manitoba, May 10, 2011), (ORAL-1084), pp. 1-2.

Maref W. (2015a). Les risques de condensation et de moisissure dans les assemblages muraux, Partie I – Effet de la perméance de la vapeur d'eau du matériau sur la performance hygrothermique des murs, Séminaire CEBQ # 216 sur l'enveloppe du bâtiment, Montréal, Qc.

Maref W. (2015b). Les risques de condensation et de moisissure dans les assemblages muraux, Partie II – la propriété et le positionnement du matériau dans l'enveloppe du bâtiment : maisons et petits bâtiments”, Séminaire CEBQ # 216 sur l'enveloppe du bâtiment, Montréal, Qc.

Maref W. (2018). Thought on tightness``, FORMES Magazine: Thoughtful Building Envelope (une enveloppe bien pensée), FORMES Vol. 14, N 2 - 2018.

Mazhoud, B., Collet, F., Pretot, S., & Chamoin, J. (2016). Hygric and thermal properties of hemp-lime plasters. Building and Environment, pp.96, 206-216. MEDERREG Mohamed El Orabi « Fabrication des Briques en terre cuite et de Tuiles » fichons sous sectorielle. Édition 2007.

Niyigena, C. s. (2016b). Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne (Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).

OURANOS, Développement durable, Environnement et Parc Québec, 42.

Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., & Strykowski, W. (2014). Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. *Construction and Building Materials*, 52, 428-436.

Popovic, D. (s.d). Comment bâtir une maison en chanvre? Repéré à <https://www.chanvrequebec.com/blog/construction/comment-construire-en-chanvre/>.

PITTAU, Francesco, KRAUSE, Felix, LUMIA, Gabriele, et al. Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. *Building and Environment*, 2018, vol. 129, p. 117-129.

Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp.16(6), 3559-3573.

Pronovost, I. (2017). Art du chanvre, une entreprise qui conjugue beauté et respect de l'environnement. Repéré à <https://www.index-design.ca/article/art-du-chanvre-uneentreprise-qui-conjugue-beaute-et-respect-de-l-environnement>.

Régie du bâtiment du Québec. (2012). Présentation sur le règlement modifiant le code de construction pour favoriser l'efficacité énergétique/partie 11 : «Efficacité énergétique» du chapitre I - Bâtiment et code national du bâtiment- canada 2005 (modifié) : code de construction du Québec/Régie du bâtiment du Québec, 119.

Ressources naturelles Canada. (2016-2017). Cahier d'information sur l'énergie 2016-2017. Ressources naturelles Canada, p.140.

Ressources naturelles Canada. (2016). Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques. Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2014 et leur évolution depuis 1990. 32. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/2014/Inventaire1990-2014.PDF>.

Ressources naturelles Canada. (2016-2017). Cahier d'information sur l'énergie 2016-2017.

Resources, Conservation and Recycling, pp.34 (1), 53-74.

Ressource Naturelles Canada, NH17-3/2005F (ISBN 0-660-19535-6), 357. Repéré à www.schl.ca.

Rahim, M., Douzane, O., Le, A. T., Promis, G., & Langlet, T. (2016). Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete.

Ressources naturelles Canada. (2008). Logiciel EE4, Guide de modélisation. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/pdf/fichier/79059/EE4-Francais-2008-02-01.pdf>.

Ressources naturelles Canada. (n.d.). Échelle de cotes Energuide de 0 à 100. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/habitations/maisons-ameliorees/18683>.

Ressources Naturelles Canada. (2016). ENERGY STAR pour les maisons neuves. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/habitations/nouvelles-maisons/5058>.

Ressources Naturelles Canada. (2016). Maisons R-2000. Repéré à <http://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/habitations/nouvelles-maisons/5086>.

Régie du bâtiment du Québec. (2012). Présentation sur le règlement modifiant le code de construction pour favoriser l'efficacité énergétique/partie 11 : «Efficacité énergétique» du chapitre I - Bâtiment et code national du bâtiment- canada 2005 (modifié) : code de construction du Québec/Régie du bâtiment du Québec, 119.

Schlüter, A., & Thesseling, F. (2009). Building information model-based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Automation in construction*, 18(2), 153-163. doi : <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.07.003>.

Sozer, H. (2010). Improving energy efficiency through the design of the building envelope. *Building and Environment*, 45(12), 2581-2593.

Sottile, M.-F. (2011). L'influence des changements climatiques sur la qualité de l'air.

Soubeyrand, E. (2012). Adsorption et séparation de gaz en mode dynamique.

SCHL. (2013). Construction de maison à ossature de bois- Canada _ Édition révisée.

Scheifel, G., Bill, W. J., & Kemptville. (2000). La culture du chanvre industriel. Repéré à <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/00-068.htm>.

Shea, A., Lawrence, M., & Walker, P. (2012). Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building. *Construction and Building Materials*, 36, 270-275.

Samri, D. (2008). Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique. École Nationale des Travaux publics de l'État (2008-ISAL-0067), 2008.

Upton, B., Miner, R., Spinney, M., & Heath, L. S. (2008). The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States. *Biomass and Bioenergy*, 32(1), 1-10.

Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2018). État de l'énergie au Québec_ Année 2018, Chaire de gestion du secteur de l'énergie HEC MONTRÉAL. pp.56.

Youssef, A. (2017). Prise en compte des apports mécaniques du béton de chanvre pour le calcul de structure bois/béton de chanvre et métal/béton de chanvre (Lorient).