

ANALYSE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE SOLUTIONS DE CHAUFFAGE ET
D'ISOLATION APPLICABLES AUX BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS AU QUÉBEC

Par
Gabriel Parent-Leblanc

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Madame Julie Gaudette

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Décembre 2013

SOMMAIRE

Mots-clés : chauffage, isolation, impact environnemental, émission de gaz à effet de serre, énergie grise, efficacité énergétique, énergie, construction écologique, mur à double ossature, LEED

L'objectif de cet essai est d'évaluer l'impact environnemental de diverses alternatives de chauffage et d'isolation applicables aux bâtiments résidentiels du Québec. Pour se faire, des analyses comparatives ont été réalisées à l'aide de critères économiques, d'émission de gaz à effet de serre, d'énergie grise, de durabilité et d'efficacité.

Le chauffage solaire passif est la solution de chauffage ayant obtenu le meilleur pointage en raison de ses faibles émissions de gaz à effet de serre et sa durabilité (l'orientation du bâtiment vers le sud et l'isolation supérieure ont une durée de vie équivalente à celle du bâtiment). Cependant, la technique ne peut chauffer à elle seule un bâtiment, si bien qu'un autre système de chauffage doit assurer la charge de chauffage lorsqu'il y a peu ou pas de rayonnement solaire. Les solutions de chauffage basées sur la combustion de la biomasse sont alors à considérer. Les foyers de masse et les poêles à bois à haute efficacité ont récolté pratiquement le même pointage dans l'analyse si bien que les deux alternatives sont viables pour ce rôle. Il est à noter que ces appareils seront interdits sur l'Île de Montréal à partir de 2020. Les utilisateurs à cet endroit devront donc se tourner vers les plinthes électriques.

Au niveau des isolants, la paille (technique du Groupe de recherches écologiques de la Baie) récolte le meilleur pointage en raison de son faible prix, sa grande séquestration de carbone et la faible quantité d'énergie requise pour sa production. Néanmoins, la résistance thermique de cet isolant est limitée et les murs construits grâce à cette technique sont très épais. Les utilisateurs voulant construire des murs plus conventionnels devront se tourner vers la cellulose soufflée, qui affiche elle aussi un excellent bilan environnemental. Contrairement à la paille, celle-ci peut également être utilisée pour isoler la toiture, mais ces isolants ne peuvent isoler les fondations en raison de leur origine végétale et donc putrescible. L'isolant recommandé par l'analyse pour cette application est la laine minérale de roche.

L'hyper-isolation des bâtiments résidentiels, possible grâce aux murs à double ossature qui offrent un espace de 20 pouces pour l'isolant comparativement à 6 ou 8 pouces pour les murs

conventionnels, est la meilleure méthode pour réduire l'impact environnemental des bâtiments résidentiels au Québec et même dans tous les pays industrialisés. Effectivement, cette isolation supérieure est rentable à court terme, car elle permet la séquestration d'une quantité non négligeable de carbone et des économies énergétiques après seulement quelques années.

Pour remplir cet objectif, le gouvernement du Québec devra continuer à mettre à jour les normes de construction du Québec comme il l'a fait en 2012. De plus, la tendance avec laquelle l'État a investi dans les mesures visant à encourager la construction et la rénovation écologique en 2013 est encourageante et doit continuer à progresser. En attendant la venue d'une révolution verte dans le marché, des modifications à la *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme* pour intégrer l'aménagement solaire doivent être réalisées. En effet, les rues projetées et les lots vierges doivent être positionnés dans un axe « nord-sud » afin de pouvoir exploiter l'énergie gratuite et disponible du soleil.

REMERCIEMENTS

J'aimerais avant tout remercier ma famille qui m'a supporté tout le long de la maîtrise et surtout lors de la rédaction de cet essai. Sans leur soutien, je n'aurais peut-être pas pu atteindre mon but.

Au niveau professionnel, de nombreuses personnes provenant de divers milieux m'ont apporté leur aide, que ce soit par des conseils, des renseignements techniques ou des bons mots. Merci, à Sébastien Bergeron (Maison en paille à Rawdon), Démosthène Blasi (Ministère des Ressources naturelles du Québec), Emmanuel Cosgrove (Écohabitation), Hélène Dubé (ES-Cargo), André Fauteux (La maison du 21^e siècle), Jacques Fontaine (Géothermie Boréale), Julie Gaudette (JL Ecologia), Gabriel Gauthier (Artcan), Pierre Gilbert (Groupe de recherches écologiques de la Baie), Laura Hébert (JL Ecologia), Patrice Lajeunesse (Entreprises Patrice Lajeunesse), Yvon Martin (Benolec), Diane Roberge (Les foyers Mirabel), Audrey Roy-Lavallée (Maison en paille à Rawdon) et Benjamin Zizi (Écohabitation).

Je m'excuse à l'avance si j'ai oublié quelqu'un!

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. MISE EN CONTEXTE.....	3
1.1 La consommation d'énergie du secteur résidentiel	3
1.2 Le secteur de la construction résidentielle conventionnelle	5
1.3 Le secteur de la construction écologique	6
2. PRÉSENTATION DES ALTERNATIVES DE CHAUFFAGE	10
2.1 Chauffage à l'électricité	10
2.1.1 Plinthes électriques.....	11
2.1.2 Thermopompes à air.....	11
2.2 Chauffage radiant hydronique.....	13
2.3 La géothermie.....	13
2.4 Chauffage solaire	15
2.4.1 Chauffage solaire passif	16
2.4.2 Chauffage solaire thermique	17
2.5 Chauffage à partir de la biomasse	18
2.5.1 Poêle à bois à haute efficacité	19
2.5.2 Foyer de masse.....	20
3. PRÉSENTATION DES ALTERNATIVES D'ISOLATION	22
3.1 Laine minérale.....	22
3.1.1 Laine minérale de verre.....	22
3.1.2 Laine minérale de roche	23
3.2 Laine naturelle.....	24
3.3 Coton.....	24
3.4 Cellulose.....	25
3.5 Paille.....	25
3.6 Chanvre	27
3.6.1 Technique « Canalliance »	27
3.6.2 Panneaux de fibre de chanvre.....	28

4. ANALYSE COMPARATIVE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES ALTERNATIVES DE CHAUFFAGE	29
4.1 Limites	29
4.2 Critères économiques	29
4.3 Émissions de gaz à effet de serre	38
4.4 Efficacité	42
4.5 Durabilité.....	45
4.6 Résultats	47
4.7 Analyse comparative	54
5. ANALYSE COMPARATIVE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES ALTERNATIVES D'ISOLATION	59
5.1 Limites	59
5.2 Critères économiques	59
5.3 Émission de gaz à effet de serre	62
5.4 Énergie grise.....	64
5.5 Efficacité	66
5.6 Résultats	69
5.7 Analyse comparative	73
6. ANALYSE POUR D'AUTRES TYPES DE BÂTIMENTS	76
6.1 Bâtiments résidentiels hyper-isolés.....	76
6.1.1 Évaluation économique.....	77
6.1.2 Évaluation de l'émission de gaz à effet de serre et de l'énergie grise.....	79
6.1.3 Solutions de chauffage et d'isolation optimales.....	81
6.2 Immeubles à logements et condominiums	82
6.2.1 Alternatives de chauffage.....	82
6.2.2 Alternatives d'isolation	83
7. PISTES DE RÉFLEXION	84
7.1 Amélioration des normes de construction	84
7.2 Réglementation entourant l'aménagement du territoire.....	85

CONCLUSION	87
RÉFÉRENCES.....	90
BIBLIOGRAPHIE	100

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Facteurs influençant la consommation d'énergie du secteur résidentiel entre 1990 et 2009 au Canada.....	4
Figure 2.1	Cycle du transfert de chaleur d'une thermopompe	12
Figure 2.2	Principaux types d'échangeurs de chaleur utilisés dans les systèmes géothermiques	15
Figure 2.3	Positionnement du soleil dans l'hémisphère nord selon les saisons	17
Figure 2.4	Schéma illustrant le fonctionnement d'un foyer de masse.....	20
Figure 3.1	Étapes de production de laine minérale de verre et de roche.....	23
Figure 3.2	Mur construit selon la technique GREB	26
Figure 3.3	Apparence d'un mur construit à l'aide de la technique « Canalliance ».....	28
Figure 4.1	Équation illustrant la baisse du coût du bois en fonction du taux de combustion de l'appareil	37
Figure 4.2	Gains et pertes thermiques par rayonnement de fenêtres normales et à faible émissivité	43
Figure 4.3	Variation du coût économique des alternatives de chauffage pendant 50 ans	51
Figure 6.1	Consommation d'énergie et coûts attribuables aux murs hors-sol annuellement au Québec	77
Tableau 1.1	Consommation d'énergie des divers secteurs d'activité au Canada et au Québec en 2009	3
Tableau 1.2	Nombre de projets inscrits et certifiés par la certification LEED Canada pour les habitations à travers le temps.....	7
Tableau 1.3	Nombre de projets inscrits et certifiés par la certification Novoclimat à travers le temps.....	9
Tableau 2.1	Proportion des combustibles de chauffage utilisés par le Québec et le Canada en 2007	10
Tableau 2.2	Moyenne du rayonnement solaire reçu annuellement au Québec et ailleurs sur une superficie d'un mètre carré à angle optimal.....	16
Tableau 2.3	Limites d'émissions de particules fines établies par les normes de l'USEPA et de la CSA pour différents appareils.....	19

Tableau 4.1	Classement et normalisation des alternatives de chauffage selon le coût économique	48
Tableau 4.2	Classement et normalisation des alternatives de chauffage selon les émissions de gaz à effet de serre	50
Tableau 4.3	Classement et normalisation des alternatives de chauffage selon l'efficacité	52
Tableau 4.4	Classement et normalisation des alternatives de chauffage selon la durabilité.....	53
Tableau 4.6	Analyse comparative des critères d'évaluation des alternatives de chauffage.....	55
Tableau 5.1	Classement et normalisation des alternatives d'isolation selon le coût économique	69
Tableau 5.2	Classement et normalisation des alternatives d'isolation selon les émissions de gaz à effet de serre	70
Tableau 5.3	Classement et normalisation des alternatives d'isolation selon l'énergie grise	71
Tableau 5.4	Classement et normalisation des alternatives d'isolation selon l'efficacité.....	72
Tableau 5.5	Analyse comparative des critères d'évaluation des alternatives d'isolation.....	74

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

BTU	<i>British Thermal Unit</i>
CAH	Changement d'air à l'heure
CFC	Chlorofluorocarbure
°C	Degrés Celsius
CH ₄	Méthane
CO ₂	Gaz carbonique
CO ₂ é	Gaz carbonique équivalent
COP	Coefficient de performance
GES	Gaz à effet de serre
GJ	Gigajoule (10 ⁹ Joules)
GREB	Groupe de recherches écologiques de la Baie
H ₂ O	Eau
kWh	Kilowatt-heure (1 000 Wh)
Lbs	Livres
M	Mètre
MJ	Megajoule (10 ⁶ Joules)
MRC	Municipalité régionale de comté
N ₂ O	Oxyde nitreux
Pi	Pied
PJ	Pétajoule (10 ¹⁵ Joules)
PM _{2,5}	Particules en suspension dans l'air de diamètre égal ou inférieur à 2,5 micromètres
Po	Pouce
PPB	Parties par milliard
PPM	Parties par million
SAD	Schémas d'aménagement et de développement
SCHL	Société canadienne d'hypothèques et de logement
TWh	Térawatt-heure (1 000 000 000 kWh)
TJ	Térajoule (10 ¹² Joules)
W	Watt (puissance d'un système énergétique où une joule est transférée pendant une seconde)
WWF	Fond mondial pour la nature

INTRODUCTION

L'augmentation exponentielle de la population mondiale se poursuit, comme le démontre l'atteinte de sept milliards d'habitants en 2011 (PNUE, 2011a), comparativement à 4 milliards et demi en 1980 et trois milliards en 1960 (The World Bank, 2013). Or, l'empreinte écologique de l'humanité augmente de manière proportionnelle à celle de l'accroissement de la population. Ce concept représente la superficie nécessaire à la production et au traitement en fin de vie des ressources consommées par l'homme (Université Laval, 2012). Celle-ci comprend les superficies de forêt et d'océan nécessaires pour capter les émissions de GES, l'aire dédiée à l'agriculture, les étendues réservées pour les infrastructures humaines, etc. En fait, depuis le début des années 1970, l'empreinte écologique de l'humanité dépasse ce que la planète Terre peut renouveler. Le déficit augmente depuis, si bien qu'en 2008, l'empreinte écologique globale représentait 18,2 milliards d'hectares bioproductifs alors que la capacité de la terre ne s'élevait qu'à 12 milliards d'hectares. Cela représente un déficit de 52 %; il faut donc un peu plus d'un an et demi à la Terre pour régénérer les ressources consommées par l'homme (WWF, 2012).

L'ampleur et la nature de la problématique rendent la situation inquiétante. Pour éviter un réchauffement plus élevé que deux degrés Celsius, sans quoi les conséquences du changement climatique augmenteraient drastiquement (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2009), l'empreinte écologique de l'homme doit être atténuée. Cependant, cela risque d'être difficile dans un monde où l'inégalité règne : 80 % des émissions de GES est générée par 19 pays développés tandis que plus de 1,4 milliard de personnes n'ont même pas accès à un réseau électrique fiable (Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2011b). Chose certaine, les pays développés se doivent de réduire leur empreinte écologique surdimensionnée pour éviter les conséquences du réchauffement climatique et autres problématiques environnementales et sociales. Le Canada fait partie de cette catégorie, détenant la 8^e plus grande empreinte écologique par habitant en 2008, avec ses 6,43 hectares de superficie bioproductive nécessaires par personne. L'empreinte carbone d'un Canadien (3,63 hectares), qui représente la superficie de forêt nécessaire pour la séquestration du carbone émis par les activités de cette personne, est même supérieure à l'empreinte écologique totale moyenne d'un habitant de la Terre (2,70 hectares) (WWF, 2012). Il y a émission de GES pour toute forme de création d'énergie, mais plus en particulier dans le cas des hydrocarbures (pétrole, gaz naturel, mazout, propane, etc.).

Comme 65 % des dépenses énergétiques d'une résidence au Québec est consacré au chauffage (Agence de l'efficacité énergétique, s. d.), minimiser cette consommation d'énergie devient nécessaire. Pour ce faire, il existe plusieurs alternatives au niveau du chauffage, mais aussi de l'isolation qui peuvent être appliqués à des bâtiments résidentiels en construction ou existants. L'objectif du présent document est d'analyser l'impact environnemental de certaines de ces alternatives dans le but d'identifier lesquelles privilégier dépendamment du type de bâtiment.

Tout d'abord, un état de la situation au niveau de la consommation d'énergie, la construction résidentielle ainsi que la construction écologique au Québec sera présenté dans la section mise en contexte. Les alternatives choisies comme pertinentes seront ensuite présentées; leurs mécanismes et caractéristiques expliqués. Par la suite, une analyse comparative sera réalisée pour les systèmes de chauffage et les matériaux isolants. Les critères d'évaluation viseront l'aspect économique, les émissions de gaz à effet de serre, l'énergie grise, l'efficacité ainsi que la durabilité. L'identification des contraintes et des avantages de chacune des alternatives permettra d'effectuer des recommandations quant aux méthodes à utiliser pour réduire l'impact environnemental des différents types de construction.

1. MISE EN CONTEXTE

La présente section a pour but de présenter la situation actuelle dans divers domaines liés au chauffage et à l'isolation écologique. Ainsi, la consommation d'énergie, plus spécifiquement celle du secteur résidentiel, de même que le marché de la construction conventionnelle et écologique seront exposés.

1.1 La consommation d'énergie du secteur résidentiel

Entre 1990 et 2009, la consommation d'énergie au Canada a augmenté de 23 %, passant de 6 936,1 à 8 541,6 PJ. Ces données représentent la consommation d'énergie secondaire, celle consommée par les plus grands secteurs canadiens (Ministère des Ressources naturelles, 2011). L'augmentation a cependant été moins élevée au Québec (11 %), la consommation d'énergie passant de 1 478,7 à 1 634 PJ pour la même période de temps (Ministère des Ressources naturelles, s. d.a). Au Canada, en 2009, les secteurs consommant le plus d'énergie étaient, en ordre décroissant, le secteur industriel (37 % - 3 168,4 PJ), du transport (30 % - 2 576,6 PJ), résidentiel (17 % - 1 422,3 PJ) et commercial (14 % - 1 186 PJ) (Ministère des Ressources naturelles, 2011). Les données du Québec, toujours en 2009, varient faiblement : le secteur industriel (33 % - 532,5 PJ), du transport (29 % - 469,9 PJ), résidentiel (19 % - 318,7 PJ) et commercial (19 % - 315,3 PJ) (Ministère des Ressources naturelles, s. d.a). Le tout est résumé au tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Consommation d'énergie des divers secteurs d'activité au Canada et au Québec en 2009 (inspiré du Ministère des Ressources naturelles, 2011 et Ministère des Ressources naturelles, s. d.a)

	Secteurs d'activité								
	Industriel		Transport		Résidentiel		Commercial		Total
	PJ	%	PJ	%	PJ	%	PJ	%	PJ
Canada	3 168,4	37	2 576,6	30	1 422,3	17	1 186	14	8 541,6*
Québec	532,5	33	469,9	29	318,7	19	315,3	19	1 634

*Les données du Ministère des Ressources naturelles comprennent le secteur agricole, qui consommait 188 PJ (2 %) de l'énergie canadienne en 2009.

Bien que le secteur résidentiel ne soit pas le plus grand consommateur d'énergie, il est tout de même pertinent de s'y intéresser pour diminuer son empreinte environnementale. De plus, de 1990 à 2009, la consommation d'énergie de ce secteur a augmenté de 11 % (1 282,1 à 1 422,3 PJ) au Canada et de 6 % (299,8 à 318,7 PJ) au Québec (Ministère des Ressources naturelles, 2011 et Ministère des Ressources naturelles, s. d.a). Cette augmentation provient du fait que la superficie habitable moyenne a augmenté entre 1990 et 2009 de 116 à 129 m² et que le nombre de personnes par ménages a diminué de 2,8 à 2,5 pour la même période de temps au Canada. De plus, le nombre moyen d'appareils ménagers par ménage, dont certains consomment l'énergie de façon excessive, a augmenté de 15 à 21, toujours pour la même période. La tendance est illustrée à la figure 1.1.

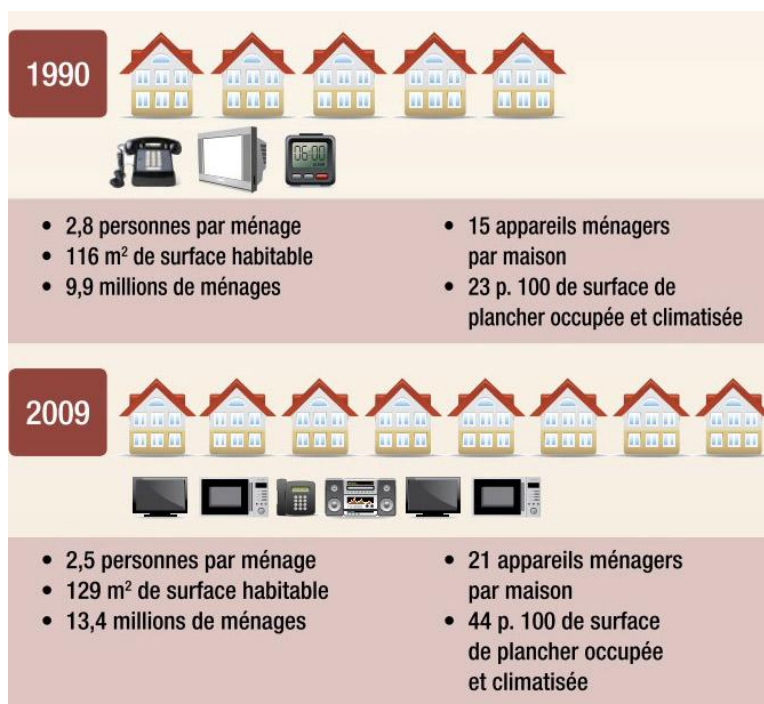


Figure 1.1 : Facteurs influençant la consommation d'énergie du secteur résidentiel entre 1990 et 2009 au Canada (tiré du Ministère des Ressources naturelles, 2011)

La température au Canada de même qu'au Québec est très basse durant l'hiver. En effet, à Montréal, les températures moyennes pour les mois de décembre à février de 1983 à 2013 ont été, respectivement, de -6,3, -10,2 et -8,4 °C (Météo Média, 2013). C'est pourquoi 80 % de l'énergie

consommée par le secteur résidentiel canadien est utilisée pour le chauffage et la climatisation (chauffage des pièces 63% (896 PJ), chauffage de l'eau 17 % (242 PJ) et climatisation 1 % (17 PJ)) (Ministère des Ressources naturelles, 2011). Appliqués à la situation énergétique québécoise, le chauffage des pièces et le chauffage de l'eau consomment respectivement 201 et 54 PJ. Si les nouveaux bâtiments résidentiels de même que ceux en rénovation utilisaient de meilleures méthodes pour le chauffage et l'isolation, force est de constater qu'une quantité non-négligeable d'énergie pourrait être économisée.

1.2 Le secteur de la construction résidentielle conventionnelle

Le marché de la construction résidentielle au Québec est depuis longtemps considéré comme un rouage important de l'économie. Cela est justifié, car ce domaine génère des milliers d'emplois et des investissements de plus de 20 milliards chaque année. L'industrie est en expansion depuis le début des années 1960, où une pénurie de logements suite à la Deuxième Guerre mondiale dictait le marché. À l'époque, 23 500 unités étaient en chantier en moyenne par année et la superficie moyenne d'une résidence était de 92,9 mètres carrés. La quantité de logements mis en chantier augmente dans les années 1970 avec en moyenne 48 230 unités. C'est à ce moment que le phénomène de l'étalement urbain débute, car environ 20 % de ces unités sont construites à l'extérieur des centres urbains de 10 000 habitants et plus. Le début des années 1980 est marqué par une récession et des taux d'intérêt très élevés, ce qui cause une baisse non-négligeable des logements mis en chantiers. Effectivement, seulement 23 492 unités ont été construites en 1982. Des politiques visant à restaurer le marché sont par la suite instaurées, si bien qu'en 1987, près de 75 000 logements sont mis en chantier. Pendant ce temps, la superficie moyenne des logements double par rapport aux années 1960, passant à 185 mètres carrés en moyenne. Les années 1990 sont marquées par l'apparition d'habitations de type « néo-manoir », ces résidences aux dimensions gigantesques de 232 mètres carrés et plus, munies de doubles garages, plusieurs salles de bains, etc. Depuis le début des années 2000, le marché est plutôt constant par rapport au nombre d'unités mises en chantier avec environ 50 000 par année. Les constructions sont également variées : maisons unifamiliales, maisons jumelées, immeubles à logements, condos, complexes pour personnes âgées, etc. Le marché de la rénovation résidentielle est également en émergence (Legault, 2011).

Cependant, il semblerait que le marché de la construction résidentielle soit près d'un ralentissement. Après une augmentation des prix de l'immobilier de 104 % depuis dix ans au Québec, les experts s'accordent sur le fait que le marché est trop inabordable pour continuer sur une telle lancée. Effectivement, Demographia, organisme publiant un classement des villes selon le coût des logements, a calculé un ratio médian de 3,6 pour les 35 centres urbains majeurs du Canada en 2012. En d'autres termes, une habitation dans ces villes coûte 3,6 fois le revenu annuel d'un ménage. De 2004 à 2012, ce ratio est passé de 3,5 à 5,1 à Montréal, ce qui place la métropole dans la catégorie « très inabordable ». Également, en 2012, le gouvernement fédéral a diminué à 25 ans la période maximale de remboursement d'emprunts hypothécaires (Sabourin, 2013). Ces éléments font en sorte que la quantité d'unités mise en chantier baissera à moyen terme vers environ 34 000 par année pour la période 2016 – 2021 (Bernier, 2013).

1.3 Le secteur de la construction écologique

Contrairement au domaine de la construction conventionnelle, la construction écologique n'a jamais connu une expansion marquée. Les premiers projets de construction écologique ont vu le jour dans les années 1970, où les premiers ajustements « verts » furent au niveau de l'efficacité énergétique. Effectivement, suite à la publication de divers écrits, dont le « Printemps silencieux » en 1962 par Rachel Carson et le rapport « Halte à la croissance » en 1972 par Le club de Rome, un accroissement de la sensibilisation du public face à l'empreinte écologique de l'humanité a eu lieu (Conseil du bâtiment durable du Canada, 2005). De même, après les chocs pétroliers de 1973 et 1978, l'efficacité énergétique est devenue une valeur de plus en plus incorporée dans plusieurs domaines, y compris la construction. La construction écologique a continué de s'installer dans les décennies 1980 et 1990, incorporant de plus en plus de solutions vertes. En effet, des enjeux tels que la consommation d'eau, la sélection de matériaux ayant une faible énergie grise (quantité d'énergie pour produire un produit), l'aménagement écologique et la qualité de l'air intérieure sont devenus importants pour bien des constructeurs. Malheureusement, dû à la nature singulière et non-centralisée de la construction écologique et de l'auto-construction, pratiquement aucune donnée sur le nombre de constructions écologiques n'est disponible (Conseil du bâtiment durable du Canada, 2005). Il est tout de même possible d'observer une tendance de plus en plus forte vers la construction écologique depuis le début des années 2000. En effet, l'intérêt des Québécois pour les deux certifications les plus populaires dans le domaine, LEED et Novoclimat, le démontre.

La certification LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), développée par le United States Green Building Council (USGBC) a vu le jour aux États-Unis en 1999. La certification s'est implantée au Canada en 2002, puis a obtenu sa propre version en 2004. Pendant ces deux années, plusieurs bâtiments commerciaux ont obtenu la certification en utilisant le système américain (Conseil du bâtiment durable du Canada, 2005). Au départ, la certification visait les bâtiments industriels et commerciaux, mais en 2009, le Conseil du bâtiment durable du Canada lance la certification LEED pour les habitations. L'organisme évalue les bâtiments inscrits selon huit critères :

1. Innovation et processus de conception
2. Emplacement et liaison
3. Aménagement écologique des sites
4. Gestion efficace de l'eau
5. Énergie et atmosphère
6. Matériaux et ressources
7. Qualité des environnements intérieurs
8. Sensibilisation et formation

Dépendamment des points récoltés en fonction du bâtiment évalué, celui-ci se verra décerner un niveau de certification allant de certifié à platine (Écohabitation, s. d.a). Depuis son lancement en 2009, la certification LEED Canada pour les habitations attire de plus en plus de constructeurs. En effet, le nombre d'habitations inscrites et certifiées par le programme ne cesse d'augmenter d'année en année. De 2009 à 2012, 6, 13, 22 et 35 projets résidentiels ont respectivement été inscrits au processus sans obtenir de certification. Pour la même période, 6, 8, 14 et 32 projets ont reçu la certification LEED. Les données de janvier à juin 2013, quant à elles, démontrent un léger ralentissement avec neuf projets inscrits et 14 certifiés, mais 52 projets étaient non-inscrits et en cours d'évaluation par Écohabitation (Écohabitation, 2013a). Il est donc aisé de constater que la certification LEED Canada pour les habitations connaît une croissance importante déjà quelques années après son lancement. La croissance du nombre de projets participants au programme est résumée dans le tableau 1.3.1.

Tableau 1.2: Nombre de projets inscrits et certifiés par la certification LEED Canada pour les habitations à travers le temps (inspiré d'Écohabitation, 2013a et du Conseil du bâtiment durable du Canada, 2013)

	2009	2010	2011	2012	2013* (janvier à juin)	Total
Inscrits	6	13	22	35	9	80
Certifiés	6	8	14	32	14	71
Total	12	21	36	67	23	159

* En juin 2013, 52 projets non-inscrits étaient en cours d'évaluation par Écohabitation.

La certification Novoclimat évalue également les habitations québécoises depuis son lancement en 2000. Le programme se concentre sur l'efficacité énergétique, si bien qu'une maison Novoclimat permet à ses occupants de réaliser au moins 25 % d'économie sur les coûts de chauffage (Ministère des Ressources naturelles, s. d.b). Cependant, en août 2012, la Régie du bâtiment du Québec a adopté le *Règlement modifiant le Code de construction pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels*. Les nouvelles normes d'isolation sont pratiquement les mêmes que ce que Novoclimat exigeait (Régie du bâtiment, 2012). En réponse à ces nouvelles normes, Novoclimat a lancé au début du mois d'octobre 2013 son programme 2.0 qui augmente les normes d'isolation des murs extérieurs et du toit à respectivement R-30 et R-61. De plus, le programme s'inspire de LEED en exigeant le respect de certaines pratiques écologiques, telles que l'utilisation du chauffage solaire passif, l'installation de bornes pour recharger les voitures électriques, la gestion efficace de l'eau, etc. (Fauteux, 2013a).

Comme la certification LEED, Novoclimat a connu une croissance marquée depuis son lancement. Effectivement, à partir de l'année 1999-2000 (1^{er} avril 1999 au 31 mars 2000) jusqu'à l'année 2011-2012 (1^{er} avril 2011 au 31 mars 2012), le nombre de projets certifiés par la certification n'a cessé d'augmenter. En comprenant les maisons unifamiliales conventionnelles et usinées de même que les immeubles à logements, le nombre de projets certifiés, toujours pour les mêmes années, a été de respectivement 1, 19, 65, 208, 394, 582, 1 020, 1 376, 2 261, 3 162, 3 204, 4 221 et 3 525. En date du 31 mars 2012, 20 038 projets étaient donc certifiés Novoclimat. S'ajoutent à cela 1 712 projets de maisons unifamiliales et 441 projets d'immeubles à logements inscrits au programme, mais

n'ayant pas été certifiés, pour un grand total de 22 191 projets (Blasi, 2013). La croissance du nombre de projets participant au programme est résumée dans le tableau 1.3.2.

Bref, la croissance enregistrée par les certifications LEED et Novoclimat indique que l'empreinte environnementale est un facteur important pour les Québécois dans le domaine de la construction résidentielle.

Tableau 1.3 : Nombre de projets inscrits et certifiés par la certification Novoclimat à travers le temps (inspiré de Blasi, 2013)

	Nombre de projets				Total
	Maisons unifamiliales conventionnelles	Maisons unifamiliales usinées	Immeubles à logement (2 à 4)	Immeubles à logement (5 et plus)	
1999 - 2000	1	0	0	0	1
2000 - 2001	19	0	0	0	19
2001 - 2002	65	0	0	0	65
2002 - 2003	140	68	0	0	208
2003 - 2004	159	235	0	0	394
2004 - 2005	201	376	0	5	582
2005 - 2006	561	414	4	41	1 020
2006 - 2007	857	459	4	56	1 376
2007 - 2008	1 533	602	62	64	2 261
2008 - 2009	1 967	935	238	22	3 162
2009 - 2010	1 952	959	228	65	3 204
2010 - 2011	2 596	1 160	372	93	4 221
2011 - 2012	2 023	1 068	317	117	3 525
TOTAL	12 074	6 276	1 225	463	20 038
Projets inscrits, mais non certifiés	1 712		441		22 191

2. PRÉSENTATION DES ALTERNATIVES DE CHAUFFAGE

La présente section présentera les différentes alternatives de chauffage retenues comme pertinentes pour diminuer l'impact environnemental des bâtiments résidentiels au Québec. Les caractéristiques propres aux technologies seront décrites de même que les statistiques reliées à leur utilisation. Les alternatives présentées sont les suivantes : chauffage à l'électricité (planches électriques et thermopompes à air), chauffage radiant hydronique, géothermie, chauffage solaire passif, chauffage solaire thermique (capteurs à eau et à air), poêle à bois à haute efficacité et foyer de masse. Tous les systèmes de chauffage utilisant des hydrocarbures (mazout, gaz, pétrole, propane, etc.) n'ont pas été retenus dans les alternatives en raison de leur bilan carbone. Effectivement, les émissions de gaz à effet de serre font partie intégrante de l'analyse comparative en section 4. Ces types de chauffages partiraient donc avec un désavantage dès le début de l'analyse.

2.1 Chauffage à l'électricité

Le Québec utilise une énergie provenant à 97 % de sources renouvelables, en majeure partie grâce aux 192 TWh d'hydroélectricité produits par année. Cet avantage influence la façon dont les Québécois se chauffent comparativement aux Canadiens. Effectivement, à titre de comparaison, en 2010, le reste du Canada n'a produit que 172 TWh d'hydroélectricité et dans son ensemble, la part des énergies renouvelables est à peine supérieure à 60 %. En 2007, alors que 77 % des ménages québécois se chauffaient grâce à l'électricité, dans l'ensemble du Canada, seulement 37 % des ménages utilisaient cette source d'énergie. C'est plutôt le gaz naturel qui chauffe le plus de ménages canadiens, grâce à son utilisation en Alberta, Saskatchewan et l'Ontario, notamment (Statistiques Canada, 2010). Le tableau 2.1 résume la situation de façon plus précise.

Tableau 2.1 : Proportion des combustibles de chauffage utilisés par le secteur résidentiel au Québec et au Canada en 2007 (inspiré de Statistiques Canada, 2010)

	Combustibles (%)				
	Électricité	Gaz naturel	Mazout	Bois	Propane
Canada	37	47	9	6	1
Québec	77	4	11	9	Négligeable

Deux alternatives retiennent l'attention : les plinthes électriques et les thermopompes, notamment à cause de leur popularité et leur efficacité.

2.1.1 Plinthes électriques

En 2007, la majorité des ménages au Québec (61 %) utilisaient des plinthes électriques pour chauffer. La situation est unique, car les plinthes électriques sont beaucoup moins utilisées à travers le Canada; 24 % des ménages canadiens l'utilisent (Statistiques Canada, 2010). Un facteur pouvant expliquer l'écart est la quantité d'hydroélectricité disponible au Québec. Le système a également plusieurs avantages : l'investissement de départ est faible, les thermostats sont réglables de façon indépendante à travers les pièces et l'installation est simple (Écohabitation, s. d.b).

Généralement, les plinthes électriques prennent l'apparence d'un caisson métallique et sont souvent placées sous les fenêtres. À l'intérieur de ces caissons, un élément chauffant (généralement un fil métallique) assure la création de chaleur grâce au phénomène de résistance électrique. Lorsque l'électricité (électrons en mouvement) traverse le matériel qui constitue l'élément chauffant, une énergie est transférée des électrons de conduction avec ceux du milieu. Cette transformation de l'électricité en chaleur est efficace à 100% (coefficient de performance de un); un kW d'électricité sera transformé en un kW de chaleur (Efficacité NB, s. d.). Les plinthes sont toujours installées près du sol pour que la chaleur remonte naturellement par convection (Écohabitation, s. d.b). Effectivement, l'air chaud monte dans une colonne d'air en raison de sa densité plus petite (les gaz prennent du volume lorsque chauffés).

2.1.2 Thermopompes à air

Les thermopompes, contrairement aux plinthes électriques, ne produisent pas de chaleur. Elles transfèrent plutôt la chaleur de l'air extérieur vers l'intérieur. À titre d'information, à - 18 °C, l'air contient encore près de 85 % de la chaleur disponible à 21 °C (Ministère des Ressources naturelles, 2004). La chaleur est absente seulement lorsque l'air atteint le zéro absolu (- 273 °C), ce qui fait en sorte que les thermopompes peuvent fonctionner dans le climat froid québécois (Ministère des Ressources naturelles, 2003a).

En fait, les thermopompes sont utilisées au Canada depuis des décennies. Celles-ci utilisent la même technologie que les réfrigérateurs et les climatiseurs. Pour amener la chaleur de l'air extérieur vers l'intérieur du ménage, les thermopompes utilisent :

« l'évaporation et la condensation d'un fluide frigorigène qu'un compresseur fait circuler entre deux serpentins. Le frigorigène est évaporé à basse pression dans l'un des serpentins, ce qui lui permet d'absorber la chaleur contenue dans l'air ambiant. Il est ensuite pompé jusqu'à l'autre serpentin, où il se condense à haute pression et libère la chaleur absorbée au début du cycle. » (Ministère des Ressources naturelles, 2004, p. 4)

Ce cycle est illustré grâce à la figure 2.1.1.

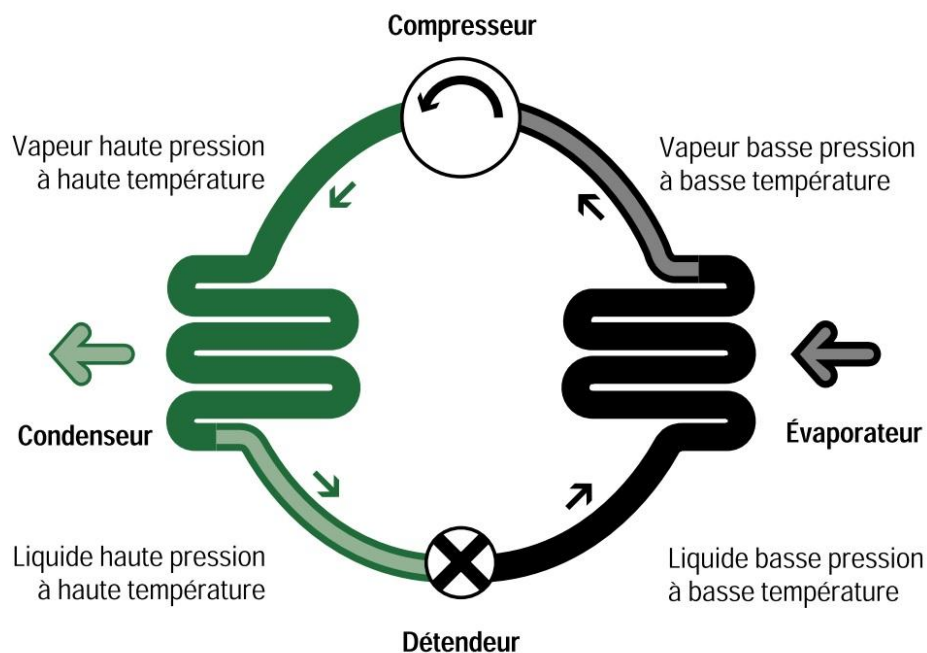


Figure 2.1 : Cycle du transfert de chaleur d'une thermopompe (tiré du Ministère des Ressources naturelles, 2004)

Il est possible d'inverser le cycle pendant l'été pour capturer la chaleur à l'intérieur du ménage et la transférer à l'extérieur, comme le ferait un climatiseur. Également, comme le transfert de chaleur est moins coûteux énergétiquement que d'en créer comme c'est le cas avec les plinthes électriques, le coefficient de performance des thermopompes est supérieur (deux à trois). Une thermopompe transformera donc un kW d'électricité en de deux à trois kW de chaleur vers un ménage

(Écohabitation, s. d.c). Plusieurs types de thermopompes existent. Certaines diffèrent par leur alimentation en énergie : électricité, gaz, mazout, etc. De même, le transfert de chaleur peut se faire de l'air extérieur ou du sol vers l'air intérieur ou vers un réservoir d'eau. Le système air-air a été retenu en fonction de sa popularité et son prix plus bas.

2.2 Chauffage radiant hydronique

Ce type de chauffage (aussi appelé plancher chauffant) repose sur le transport d'un liquide à haute température à travers un matériel ayant une haute masse thermique. Celle-ci accumule la chaleur et émet par la suite des ondes infrarouges sur les objets et parois environnantes, sans pour autant réchauffer l'air (Écohabitation, s. d.d). À titre d'information, cette méthode s'apparente à celle du soleil, qui émet lui aussi des ondes infrarouges vers la Terre (Fauteux, 2009). Plusieurs autres types de chauffage radiant existent, comme les planchers chauffants électriques, mais la présente technique a été préférée en raison de sa polyvalence. Effectivement, le liquide circulant dans le système peut être chauffé de plusieurs manières : par une chaudière, une thermopompe air-eau, le solaire thermique, etc.

Habituellement, le liquide utilisé est simplement de l'eau qui circule dans des tuyaux de polyéthylène enfouis sous quelques centimètres de ciment léger; c'est le système avec dalle au sol. Des boucles fermées peuvent être installées pour envoyer l'eau chaude seulement aux endroits nécessaires grâce à une pompe.

Ce système de plancher chauffant est réputé pour son confort, car les pieds de l'utilisateur se font directement chauffer. Contrairement aux plinthes électriques, qui distribuent la chaleur inégalement et surchauffent souvent les murs extérieurs, les planchers chauffants hydroniques émettent au bon endroit. Avec les pieds à la bonne température, les utilisateurs ne ressentent pas le besoin de surchauffer l'air ambiant et cela amène des économies d'énergies (Fauteux, 2009).

2.3 La géothermie

Ce type de système récupère l'énergie calorifique accumulée dans le sol et la transfère aux ménages. Le sol, même au Québec où le climat est froid, renferme beaucoup de chaleur : à partir de quelques

mètres de profondeur, la température du sol est pratiquement constante toute l'année de cinq à dix °C (Ministère des Ressources naturelles, s. d.c).

Trois éléments font fonctionner le tout: l'échangeur de chaleur, la pompe à chaleur et le système de distribution de chaleur. L'échangeur de chaleur consiste en un réseau de tuyaux enfouis sous terre qui a pour rôle d'accumuler l'énergie calorifique du sol grâce à un liquide caloporteur (la plupart du temps, c'est une solution antigel). Cette énergie se rend à la pompe à chaleur, qui est en fait une thermopompe. Cependant, au lieu de récupérer la chaleur dans l'air extérieur comme la thermopompe à air (voir section 2.1.2), celle-ci est puisée à partir du liquide caloporteur ayant voyagé dans le sol. Lorsque la température du liquide retombe sous celle du sol, celui-ci retourne dans l'échangeur de chaleur et le cycle recommence. Pour finir, la chaleur récupérée par la pompe à chaleur est transférée au bâtiment via le système de distribution de chaleur. Comme la technologie des thermopompes est polyvalente, il est possible de transférer la chaleur via l'air avec la ventilation ou par l'eau, grâce au système de chauffage radiant hydronique (voir section 2.2). Comme dans le cas du système de thermopompe air-air, il est possible d'inverser le cycle pour la climatisation. Dans ce cas, la pompe à chaleur récupère l'énergie calorifique présente dans le bâtiment et l'échangeur de chaleur transfère celle-ci au sol (Écohabitation, 2012a).

Plusieurs types de système sont disponibles, où l'échangeur de chaleur utilisé varie : circuit ouvert ou circuit fermé à capteurs horizontaux ou verticaux. Au lieu d'utiliser un liquide caloporteur comme les échangeurs de chaleur à circuits fermés, celui à circuit ouvert utilise directement l'eau de la nappe aquifère pour transporter la chaleur du sol (Écohabitation, s. d.e). La différence entre les deux types de circuit fermé est la position de l'échangeur dans le sol. Effectivement, les capteurs horizontaux seront installés à environ 1,8 mètre de profondeur dans le sol et requièrent une superficie de deux à trois fois la superficie du bâtiment à chauffer (Écohabitation, s. d.f). Les capteurs verticaux, quant à eux, sont installés beaucoup plus en profondeur (150 mètres) et requièrent une moins grande superficie de forage. Ce type d'échangeur de chaleur est le plus utilisé au Québec : en 2010, près de 83 % des systèmes géothermiques installés utilisaient cette technologie, probablement en raison de son meilleur coefficient de performance (Écohabitation, s. d.g). Ces trois types de systèmes sont illustrés en figure 2.3.

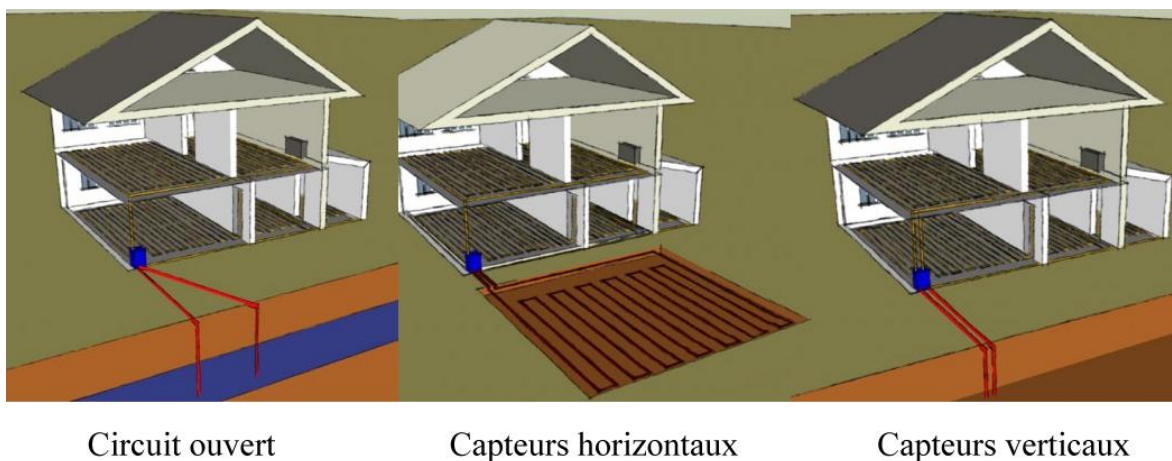


Figure 2.2 : Principaux types d'échangeurs de chaleur utilisés dans les systèmes géothermiques (inspiré d'Écohabitation, s. d.e, Écohabitation, s. d.f et Écohabitation, s. d.g)

2.4 Chauffage solaire

Toute la vie sur la planète Terre dépend de l'énergie reçue par le soleil. Effectivement, le processus de la photosynthèse, qui transforme le gaz carbonique en glucose ($6 \text{ CO}_2 + 12 \text{ H}_2\text{O} + \text{énergie} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$), est la base de la chaîne trophique (Rivoal, 2007). De même, l'énergie solaire est à la base de pratiquement toutes les formes d'énergies renouvelables : l'éolien exploite le vent qui provient des masses d'air de différentes températures, l'hydroélectricité utilise le cycle de l'eau qui dépend du soleil pour l'évaporation, etc. (Funk, 2010). Même l'énergie retirée des hydrocarbures a pour base le rayonnement solaire, car ceux-ci proviennent de l'accumulation de matière organique sous terre, couplée à une haute température et pression (Ministère des Ressources naturelles, s. d.d).

Situé à une distance de 150 millions de kilomètres de la Terre, le soleil est composé majoritairement d'hydrogène et d'hélium. Le rayonnement solaire provient de la fusion de quatre noyaux d'hydrogène pour former un noyau d'hélium. Comme la masse de ce dernier est légèrement plus petite que celle des quatre noyaux d'hydrogène, la masse restante est transformée en énergie (Matte, 2011). Cette réaction chimique transfère une quantité incroyable d'énergie à la planète : 2 850 fois la consommation mondiale d'énergie en 2011. Sur une surface horizontale, le Québec reçoit annuellement en moyenne entre neuf et 14 MJ/m^2 d'énergie solaire, dépendamment de la région.

Malgré la latitude haute du Québec, la province reçoit beaucoup d'énergie, assez pour pouvoir exploiter l'énergie solaire. Effectivement, l'Allemagne, qui est le chef de file mondial concernant l'exploitation de l'énergie solaire, reçoit approximativement 30 % de moins de rayonnement solaire annuellement que Montréal (Greenpeace, 2011). Le rayonnement solaire moyen de plusieurs villes au Québec et à travers le monde est résumé dans le tableau 2.4.

Tableau 2.2 : Moyenne du rayonnement solaire reçu annuellement au Québec et ailleurs sur une superficie d'un mètre carré à angle optimal (tiré de Funk, 2010)

Québec (kWh)		Ailleurs dans le monde (kWh)	
Québec	1 580	Barcelone	1 540
Sherbrooke	1 500	Shanghai	1 510
Hull	1 480	Berlin	1 110
Montréal	1 440		
Gaspé	1 380		
Natashquan	1 330		

L'énergie solaire peut être exploitée selon trois techniques, soit le chauffage solaire passif, le chauffage solaire thermique ainsi que l'énergie photovoltaïque. Seules les deux premières techniques sont incluses dans le présent rapport, car l'énergie photovoltaïque n'est pas une méthode de chauffage en tant que tel. Effectivement, les panneaux photovoltaïques transforment l'énergie solaire en électricité, qui peut être utilisée par la suite pour alimenter un système de chauffage.

2.4.1 Chauffage solaire passif

Le chauffage solaire passif est probablement la technique couverte par ce rapport la plus simple, du moins à intégrer dans un bâtiment en construction. Effectivement, la technique consiste simplement à laisser entrer le plus possible le rayonnement solaire et la retenir avec des matériaux ayant une forte masse thermique. En été comme en hiver, les rayons du soleil proviennent du sud. L'orientation de la maison et la disposition de la fenestration doivent donc en tenir compte pour ce type de technique (Funk, 2010). Un bâtiment respectant ceci, en plus d'être bien isolé, peut combler de 50 à 60 % de ses besoins en chaleur grâce au chauffage solaire passif (Greenpeace, 2011).

En hiver, alors que les besoins de chauffage sont élevés, le soleil s'élève à environ 25 degrés à midi (Funk, 2010). Cet angle permet à l'énergie solaire d'entrer par la fenestration et d'être emmagasinée dans la masse thermique du bâtiment (béton, céramique, brique, etc.). Une fois l'apport de chaleur absorbé pendant l'ensoleillement, les matériaux vont redistribuer celle-ci pendant la nuit (Écohabitation, s. d.h). À l'été, où la chaleur du soleil n'est pas nécessaire pour chauffer le bâtiment, celui-ci s'élève à environ 60 degrés à midi. Le bâtiment devra alors être muni d'équipement pour bloquer les rayons du soleil avant que ceux-ci parviennent à l'intérieur (auvent, avant-toit, etc.). La différence de positionnement du soleil entre les saisons est illustrée en figure 2.4.1.

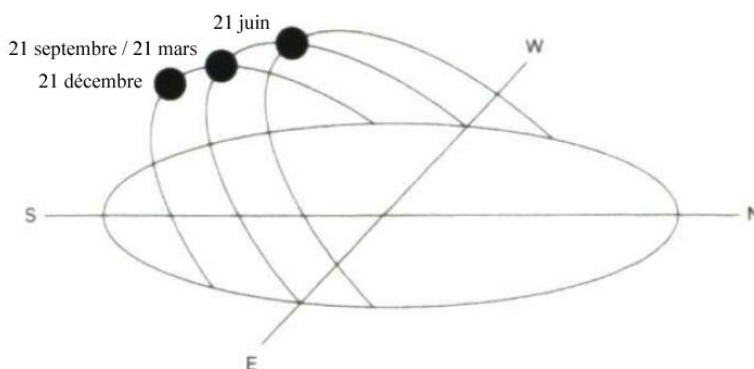


Figure 2.3 : Positionnement du soleil dans l'hémisphère nord selon les saisons (inspiré de Matte, 2011)

L'utilisation du chauffage solaire passif pour un bâtiment déjà construit est plus compliquée, mais tout de même possible. Effectivement, l'ajout d'un solarium orienté au sud peut fournir jusqu'à 34 % des besoins de chauffage d'un bâtiment résidentiel à Montréal (Greenpeace, 2011).

2.4.2 Chauffage solaire thermique

Le chauffage solaire thermique exploite la même source d'énergie, soit le rayonnement solaire. La technique utilise un capteur thermique pour capter la chaleur du soleil et la transférer à l'intérieur du

bâtiment. Comme pour les thermopompes, la chaleur peut être transférée par fluide (eau, antigel, etc.) ou par air, dépendamment du système en place ou des préférences de l'utilisateur.

Plusieurs capteurs thermiques sont disponibles sur le marché : ceux utilisant l'air pour transporter la chaleur (capteurs vitrés et plaques perforées non-vitrées) ou l'eau (capteurs plans et capteurs sous vide). Les capteurs vitrés utilisent un absorbeur (matériel foncé) pour emmagasiner la chaleur provenant du rayonnement solaire. L'absorbeur est recouvert par une couche de verre pour réduire les pertes de chaleur. Sous ces deux couches, l'air circule, absorbe la chaleur et le distribue à l'intérieur. Les plaques perforées non-vitrées fonctionnent de la même façon, excepté que la surface extérieure du recouvrement n'est pas vitrée. Les capteurs plans se comparent aux capteurs vitrés. Effectivement, l'absorbeur emmagasine la chaleur, puis est collectée par le fluide situé dans des tuyaux à l'arrière du capteur. Les capteurs sous vide utilisent également un absorbeur, mais celui-ci se retrouve avec le fluide sous une couche de verre double sous vide (Greenpeace, 2011).

2.5 Chauffage à partir de la biomasse

Le chauffage à partir de biomasse, plus particulièrement le bois, a toujours été important au Canada. Cela s'explique étant donné la quantité de ressource forestière disponible et les avantages liés à l'utilisation de cette technologie. En effet, le bois est une ressource renouvelable nécessitant peu de transformations et dont l'approvisionnement peut se faire localement (Société canadienne d'hypothèques et de logement, 2008). Le chauffage à partir de biomasse est moins utilisé aujourd'hui qu'auparavant, en raison d'émissions atmosphériques de petites particules pouvant avoir des répercussions sur la santé et l'environnement. Effectivement, ces fines particules, mélangées avec les polluants atmosphériques émis par les voitures notamment, forment le phénomène de smog. D'ailleurs, d'ici 2020, tous les foyers et poêles à bois devront être condamnés dans la ville de Montréal, où les problèmes de smog sont majeurs (Côté, 2013).

Le chauffage à partir de biomasse est tout de même encore très populaire en milieu rural, où la problématique du smog est moins importante. Effectivement, en 2010, les émissions de $PM_{2,5}$ au Canada étaient de 104 087 tonnes, dont 45 854 tonnes provenaient du Québec (Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2012). Comme 44 % de ces particules furent émises au Québec, il est possible d'affirmer que la technique est particulièrement populaire dans la province.

Plusieurs types d'appareils de chauffage au bois sont disponibles sur le marché, mais la présente section se concentrera sur les poêles à bois à haute efficacité ainsi que les foyers de masse. Effectivement, les poêles à bois à haute efficacité sont populaires et peu coûteux, tandis que les foyers de masse sont polyvalents et permettent une combustion plus complète.

2.5.1 Poêle à bois à haute efficacité

Jusque dans les années 1980, l'utilisation d'un poêle à bois ou d'un générateur de chaleur au sous-sol assurait souvent le chauffage des résidences. Depuis, l'avènement de technologies assurant une meilleure combustion a amené une révolution dans le domaine. Effectivement, depuis 1988, l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (USEPA) a introduit la *New Source Performance Standard* (NSPS), qui limite les émissions de particules fines des appareils certifiés. En 2000, l'Association canadienne de normalisation (CSA) introduit sa propre certification, intitulé *Essais de rendement des appareils de chauffage à combustibles solides* (B514.1). Les deux normes ont été mise à jour respectivement en 2013 et 2010, imposant des limites encore plus sévères (Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2012). Ces limites sont résumées dans le tableau 2.5.1.

Tableau 2.3 : Limites d'émissions de particules fines établies par les normes de l'USEPA et de la CSA pour différents appareils (inspiré de Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2012)

	Poêle à bois (catalytiques)	Poêle à bois (non-catalytiques)	Foyer de masse
NSPS (1988) et B514.1 (2000)	4,1 g/h	7,5 g/h	Pas de limite actuellement *
B415.1 (2010) et NSPS (2013)	2,5 g/h	4,5 g/h	

*L'USEPA propose actuellement d'imposer une moyenne journalière de 2,0 g/h à ces appareils en 2014.

Les poêles à bois à haute efficacité se divisent en deux types, les poêles catalytiques et non-catalytiques. La première catégorie se distingue par l'utilisation d'un catalyseur en céramique et

palladium situé en aval de la chambre de combustion. Celui-ci permet une meilleure combustion et donc moins d'émissions de particules fines. Les poêles non-catalytiques utilisent plutôt deux chambres de combustion en plus d'un dispositif de pré-chauffage et de distribution d'air. Ces deux technologies offrent une bien meilleure performance qu'un poêle à bois traditionnel (Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2012).

2.5.2 Foyer de masse

Un foyer de masse est un ouvrage de maçonnerie ayant plusieurs chambres de combustion pouvant réaliser des feux intenses, mais espacés. Le combustible est d'abord brûlé dans la chambre primaire, d'où les gaz de combustion voyagent jusqu'à la chambre de combustion secondaire. Celle-ci brûlera les gaz de combustion qui redescendront par les conduits latéraux et sortiront par la cheminée (Écohabitation, s. d.i). La figure 2.5.2 illustre ce procédé.

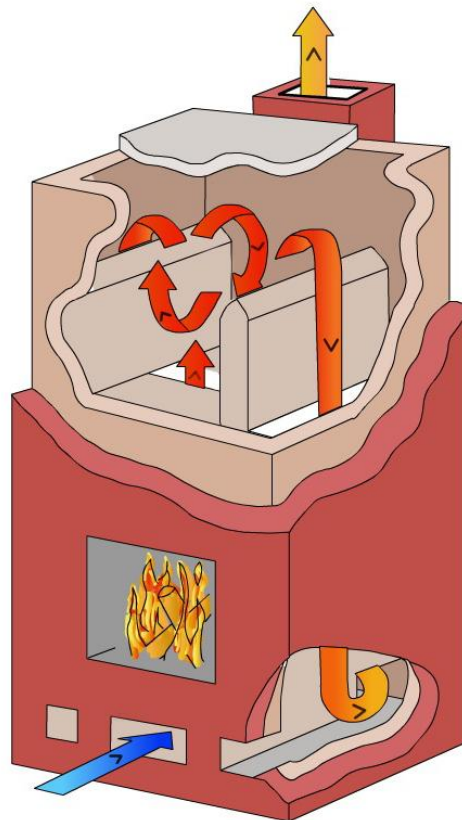


Figure 2.4 : Schéma illustrant le fonctionnement d'un foyer de masse (tiré d'Écohabitation, s. d.i)

Comme les foyers de masse sont construits à partir de matériaux à haute masse thermique, les matériaux emmagasinent la chaleur. Comme c'est le cas pour le chauffage radiant hydronique (voir section 2.2), cette chaleur est lentement libérée dans le bâtiment.

La chambre primaire permet de brûler le bois à une température d'environ 800 °C, tandis que la chambre secondaire brûle les gaz à environ 1 000 °C. Ces températures de combustion sont plus élevées que celle des poêles à bois et permettent une meilleure combustion (Écohabitation, s. d.i). En effet, le taux de combustion des foyers de masse peut atteindre plus de 97 %, comparativement à 80 % pour un poêle certifié par l'USEPA (Foyers Feu vert, 2009).

3. PRÉSENTATION DES ALTERNATIVES D'ISOLATION

La présente section présentera les différentes alternatives d'isolation retenues comme pertinentes pour diminuer l'impact environnemental des bâtiments résidentiels au Québec. Les caractéristiques propres aux technologies seront décrites de même que les statistiques reliées à leur utilisation. Les alternatives présentées sont les suivantes : la laine minérale, la laine naturelle, le coton, la cellulose, la paille et le chanvre. Tous les isolants synthétiques (polystyrène expansé, polystyrène extrudé, polyuréthane, etc.) n'ont pas été retenus dans les alternatives en raison de leur bilan carbone. Effectivement, les émissions de gaz à effet de serre font partie intégrante de l'analyse comparative en section 5. Ces isolants partiraient donc avec un désavantage dès le début de l'analyse.

3.1 Laine minérale

La laine minérale est un isolant très populaire en raison de sa disponibilité et de son efficacité (bons coefficients R et RSI). Celle-ci est composée de fibres inorganiques synthétiques vendues en matelas, panneaux ou en vrac. Deux types de laine minérale sont disponibles : la laine minérale de verre et de roche. Ces deux isolants sont composés d'au moins 90 % de matières premières minérales (roches calcaires, feldspath, dolomite, sable, ciment, etc.) et au maximum 7 % de matières organiques agissant comme liant entre les fibres (Mineral Wool Association, s. d.). L'injection de matière recyclée dans la production est de plus en plus utilisée, si bien qu'entre 30 et 60 % de la production de laine minérale provient de matière recyclée. Ce pourcentage peut atteindre 80 % et même plus dans les produits les plus écologiques (Eurima, 2013). La majorité de ces liants sont à base de formaldéhyde, composé pouvant « *causer des irritations des yeux, du nez et de la gorge et peuvent aggraver les symptômes de l'asthme chez les enfants et les nourrissons* » (Santé Canada, s. d.). Heureusement, des produits sans ces composés sont désormais disponibles, sous l'appellation EcoTouch dans les marques Owens Corning et Johns Manville (GreenSpec, 2011).

3.1.1 Laine minérale de verre

Les méthodes de production des laines minérales de verre et de roches sont pratiquement identiques. Seule la matière première utilisée est différente ; dans le cas de la laine minérale de verre, il s'agit de sable et de morceaux de verre.

La matière première est d'abord soumise à de fortes températures (1 400 à 1 500 °C) pour que celle-ci entre en fusion et se transforme en fibres. De l'eau dans laquelle les liants organiques sont dissous est pulvérisée sur les fibres et celles-ci se refroidissent et deviennent rigides et vitrifiées. Le tout est ensuite durci dans un four à 250 °C pour donner de la stabilité à l'isolant. La laine minérale peut être coupée selon la guise du producteur par la suite. La figure 3.1.1 illustre le processus.

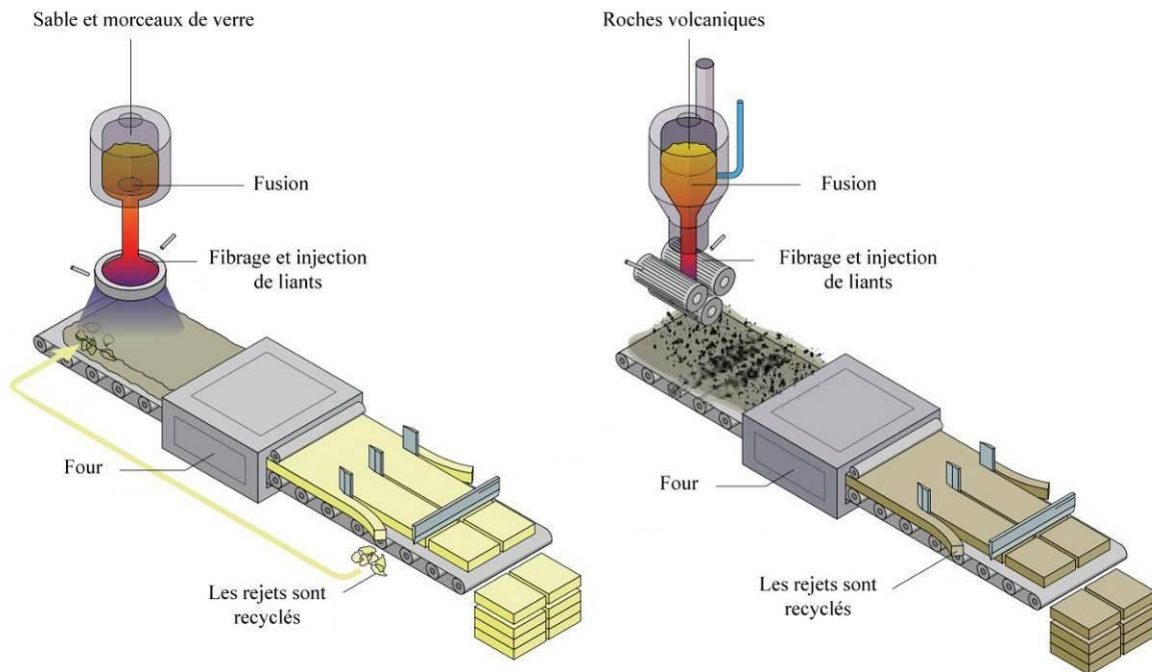


Figure 3.1 : Étapes de production de laine minérale de verre et de roche (Adapté d'Eurima, 2013)

3.1.2 Laine minérale de roche

Tel que mentionné à la section précédente, les deux types de laine minérale de roche ont la même méthode de production, mis à part la matière première. De façon générale, ces deux isolants ont des caractéristiques semblables. La laine minérale de roche a néanmoins une plus grande densité que la laine minérale de verre. Cela améliore sa performance au niveau de l'isolation sonore. De même, l'isolant a une meilleure résistance aux hautes températures (point de fusion plus élevé) que son rival (BuildingGreen, 2012).

3.2 Laine naturelle

La laine de mouton est également un excellent isolant thermique. Cependant, contrairement à l'Europe ou à l'Australie, très peu de matériaux isolants à base de laine naturelle sont disponibles en Amérique du Nord. C'est dommage, car le volume de laine étant trop rude pour être intégrée à l'industrie du textile est substantiel. Cette laine pourrait être utilisée à des fins d'isolation (BuildingGreen, 2012).

Un seul produit à base de laine naturelle est disponible au Québec : le panneau WEKA de la compagnie américaine *Good Shepherd Wool Insulation*. Ces panneaux sont composés de laine de mouton et de chaux pour la protéger de divers parasites et de la décomposition (Good Shepherd Wool Insulation, s. d.a).

3.3 Coton

Le coton peut également être utilisé comme matériel isolant. Effectivement, quelques producteurs récupèrent les retailles de denim, ce textile fort populaire utilisé pour la confection des jeans. La fibre récupérée, mélangée à des liants de polyester produit des panneaux de coton ayant une conductivité thermique très faible (Jasztex, s. d.). Ces panneaux peuvent être installés de la même manière que la laine minérale, mais contrairement à celle-ci, le coton ne comporte aucun danger pour la santé. Le produit ne contient aucun formaldéhyde et est traité au borate pour lui donner une résistance au feu. Le borate est un mélange de sel de bore et de l'un de ses dérivés, l'acide orthoborique. Le traitement au bore n'est pas considéré nocif pour l'homme et protège le matériel contre les champignons et la vermine (Archibio, 2011). Cependant, les effets du bore sur la santé sont relativement peu connus et l'acide orthoborique a été ajouté à la liste des composés potentiellement toxiques du programme d'enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des produits chimiques (REACH) de l'Union Européenne en 2011 (BuildingGreen, 2012).

Au Québec, deux entreprises distribuent des panneaux d'isolation en coton : Jasztex de Montréal et Twin Maple Marketing de la Colombie-Britannique. Leurs produits se nomment respectivement « Blue Jeanious Insulation » et « Ultra Touch » (Jasztex, s. d. et Twin Maple Marketing, s. d.).

3.4 Cellulose

Également basée sur la récupération de matière recyclée, la cellulose peut être utilisée comme isolant. En effet, le papier journal est récupéré et ensuite déchiqueté pour être distribué dans des sacs en vrac. Contrairement au coton cependant, la cellulose est installée avec un souffleur ou un gicleur plutôt qu'en panneaux. Lorsqu'elle est soufflée, la cellulose est appliquée à sec, tandis que lorsqu'elle est giclée, elle est mélangée avec de l'eau et un liant. En raison de son type d'application (pression), cet isolant recouvre 100 % de la surface des murs, ce qui empêche les fuites d'air et augmente son efficacité (Archibio, 2011). La cellulose est également polyvalente : elle peut recouvrir tous les types de surface (angle de 60 à 90°) (Benolec, s. d.a). À noter qu'en raison de sa nature naturelle et donc biodégradable, la cellulose ne peut isoler la dalle de béton.

3.5 Paille

La construction de bâtiments résidentiels en paille a débuté vers 1850 dans l'État du Nebraska où les matériaux de construction tels que le bois et la pierre s'y faisaient rares. La technique a été graduellement remplacée par la construction moderne à travers le dernier siècle. Au Québec, le Groupe de recherches écologiques de la Baie (GREB), fondé en 1990, a spécialisé la technique de construction en ballots de paille (Corbeil, 2012). Celle-ci consiste à coffrer un mélange de mortier allégé (sciure de bois, sable, chaux et ciment de Portland) entre une charpente à double ossature et des ballots de pailles. Comme le mortier est allégé, celui-ci peut être coulé entre ces éléments et rends la technique GREB relativement simple à réaliser (Groupe de recherches écologiques de la Baie, 2012). La figure 3.5 illustre la technique.

Bien que peu populaire au Québec, la technique mérite d'être reconnue en raison de son bilan écologique. Effectivement, la paille est un « déchet » de l'agriculture des céréales et est souvent disponible localement. Sa production n'entraîne l'émission d'aucun composé toxique et son utilisation ne crée pas de déchet de construction en raison de ses propriétés naturelles. En 2011, il existait plus de 150 bâtiments construits selon la technique GREB en France et une vingtaine au Québec (Brossamain et Thévard, 2011). À l'été 2013, trois de ces bâtiments étaient en construction à l'Écohameau de La Baie, à Rawdon et en Mauricie (Roy-Lavallée, 2013).



Figure 3.2 : Mur construit selon la technique GREB (Photos : Sébastien Bergeron lors de la construction de sa maison à Rawdon en août 2013)

3.6 Chanvre

Le chanvre est une variété de plante cultivée de la famille des *Cannabaceae*. Elle est cultivée au Québec depuis le 17^e siècle où on en utilisait les fibres pour le textile. Cependant, en 1938, toute culture de chanvre fut déclarée illégale dans le but de combattre les substances illicites. Cette interdiction a duré 60 ans, jusqu'à ce que le *Règlement sur le chanvre industriel* soit adopté en 1998. Depuis, sa culture est permise à condition que son contenu en tétrahydrocannabinol (THC) soit inférieur à 0,3 % (Archibio, s. d.).

Le chanvre pousse très bien malgré le climat rigoureux du Québec. En fait, un hectare de culture de chanvre est de quatre à huit fois plus bioproductif (quantité produite de biomasse) qu'un hectare de forêt (Gauthier, 2013).

3.6.1 Technique « Canalliance »

La technique « Canalliance » a été développée par l'entreprise ArtCan et son fondateur Gabriel Gauthier. Celle-ci consiste à coffrer un mélange de chènevotte (cœur de la tige des plants de chanvre), de chaux, d'eau et de terre cuite. Le mélange forme un mortier qui, une fois séché, isole le bâtiment et lui donne une masse thermique (Gauthier, 2013). Cette technique et celle du GREB sont les seules à fournir une isolation intéressante en plus d'une masse thermique pouvant retenir la chaleur provenant du rayonnement solaire ou du système de chauffage. Effectivement, toutes les autres solutions utilisées en isolation ont une faible capacité à emmagasiner la chaleur. Ces systèmes hybrides sont donc uniques, en plus d'être composés de matériaux naturels.

Un autre point unique aux deux techniques naturelles (« Canalliance » et GREB) est la capacité de ces murs à « respirer ». En effet, l'humidité produite à l'intérieur du bâtiment est absorbée par les mélanges puis rejetée à l'extérieur où le taux d'humidité est moindre. Cet échange ne peut se faire avec des matériaux conventionnels, où un échangeur d'air récupérateur de chaleur doit être minimalement installé en raison de l'étanchéité des bâtiments modernes (Gauthier, 2013).

La figure 3.6.1 offre un aperçu de l'apparence d'un mur construit à l'aide de la technique.



Figure 3.3 : Apparence d'un mur construit à l'aide de la technique « Canalliance »

3.6.2 Panneaux de fibre de chanvre

Le chanvre est également disponible sous forme de panneaux, où la fibre est compressée et mixée à du polyester pour les obtenir. Les panneaux NaturChanvre sont fabriqués par l'entreprise Matériaux écologiques pour la maison (MEM), située à Rimouski. Comme la production de chanvre au Québec est avant tout pour ses grains, la compagnie doit importer la plante de Bretagne, en France (Angers, 2011). Malgré cela, le matériel est naturel et ne produit aucune émission nocive pour la santé. De plus, celui-ci, comme le chanvre utilisé dans le mur « Canalliance », les panneaux NaturChanvre sont perméables et laissent donc l'humidité sortir du bâtiment (MEM, s. d.).

4. ANALYSE COMPARATIVE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES ALTERNATIVES DE CHAUFFAGE

La présente section a pour but d'évaluer les différentes alternatives de chauffage retenues à l'aide d'une analyse comparative. Celle-ci permet une évaluation en tenant compte de plusieurs critères. Les critères seront d'abord évalués individuellement puis les données seront rassemblées pour analyse en section 4.7. La majorité des données sont de nature quantitative. Celles-ci seront classées de la meilleure alternative à la pire pour chaque critère. Une pondération des données aurait pu être possible, mais les 4 critères sont tous importants. Tous les critères (économique, émission de gaz à effet de serre, efficacité, durabilité) seront évalués pour les 8 alternatives présentées en section 2.

Les données utilisées dans cette section seront en fonction d'une maison unifamiliale de type « moyenne », c'est-à-dire construite après 1990 et ayant 111 m² de superficie habitable (Ministère des Ressources naturelles, 2010). D'autres types d'habitations pourraient avoir des résultats différents, ce qui sera discuté en section 6.

4.1 Limites

La présente étude présente des limites. Effectivement, tous les critères sont évalués pour un seul type de bâtiment résidentiel. Or, pratiquement toutes les constructions sont uniques et seul un calcul de charge de chauffage pour un bâtiment peut évaluer correctement les besoins de chauffage et donc le coût, les émissions de gaz à effet de serre, l'efficacité du système et sa durabilité. Effectivement, l'orientation de la résidence, l'isolation utilisée, le type de fenestration ainsi que la dimension des portes et fenêtres sont tous des facteurs importants pour l'analyse de la charge de chauffage. Si vous utilisez le présent document pour choisir un système de chauffage, vous devrez adapter l'analyse au type de bâtiment choisi, sans quoi les données pourraient être erronées.

4.2 Critères économiques

Le coût des alternatives est le premier critère à évaluer. En tant que tel, le coût monétaire n'a pas d'impact environnemental. Cependant, si une alternative a un coût trop élevé, peu d'utilisateurs auront les moyens de l'utiliser. Donc, en plus d'exceller par rapport aux autres critères portant sur l'environnement, la meilleure alternative se devra d'être abordable. Le coût économique sera

calculé comme étant le coût d'achat et d'installation des appareils ainsi que du fonctionnement de ceux-ci pendant 15 ans (toutes taxes incluses et montants en dollars canadiens en 2013).

Plinthes électriques

Tout d'abord, il s'agit de calculer le montant d'investissement initial, soit le coût d'achat des plinthes électriques. Les appareils Convectair sont recommandés par des nombreux installateurs. Une application calculant la charge de chauffage est disponible sur le site du manufacturier et pour le modèle de maison moyenne, 9 000 W de puissance est nécessaire (Convectair, s. d.). Pour pallier à cette charge de chauffage, l'installation de 4 plinthes de 2 000 W et une de 1 000 W semble convenir. Le coût à l'achat pour les appareils est de 500 \$ pour le 2 000 W et 400 \$ pour le 1 000 W. En comprenant l'installation et le câblage, ces coûts grimpent à 700 et 600 \$ (Lajeunesse, 2013). Le calcul du coût de base des appareils est donc le suivant :

Coût des appareils et de l'installation * nombre = Coût initial

$$700 \$ * 4 = 2\ 800 \$$$

$$2\ 800 \$ + 600 \$ = 3\ 400 \$$$

Coût d'investissement * Taxes = Coût initial total

$$3\ 400 \$ * 1,145 = 3\ 893 \$$$

Pour ce qui est du coût d'utilisation, une évaluation théorique est réalisable grâce à l'application web « Comparez vos coûts d'énergie » de l'Agence de l'efficacité énergétique. Pour une maison unifamiliale dans la région de Montréal, construite en 1997, ayant trois occupants et ayant 111 m² de superficie habitable, l'application estime le coût de chauffage pour une année à 790\$. Ce montant est calculé à partir d'un montant de 0,0827 \$ / kWh et comprends les taxes (Agence de l'efficacité énergétique, s. d.). Cependant, ce montant est déterminé pour des plinthes électriques conventionnelles, moins chères à l'achat et moins efficaces. Or, les Convectair consomment dix pour cent moins d'énergie pour fournir la même chaleur (Angers, 2007). Le coût d'utilisation pour une année est donc de 711 \$. Pour une utilisation de 15 ans, le coût grimpe à 10 665 \$. Le coût final pour chauffer la maison unifamiliale moyenne est donc de :

Coût initial total + Coût d'opération pour 15 ans = Critère économique

$$3\ 893 \$ + 10\ 665 \$ = 14\ 558 \$$$

Thermopompes à air

Tout d'abord, il s'agit de calculer le montant d'investissement initial, soit le coût d'achat de la thermopompe. Règle générale, la puissance nécessaire pour chauffer 650 pi² (60,39 m²) de maison est une tonne (12 000 BTU) (Écohabitation, s. d.j). Pour la maison unifamiliale de 111 m², 1,84 tonne de puissance (22 080 BTU) seraient donc nécessaires. Cette puissance se retrouve encore deux multiples de puissance offerts (9 000, 12 000, 18 000, 24 000, 30 000 et 36 000), si bien que l'achat d'une thermopompe un peu plus puissante que nécessaire est souhaitable. Les Entreprises P. Théorêt offrent plusieurs modèles dont des thermopompes murales Goodman à haute efficacité de 24 000 BTU (MSG-24) à 2 795 \$, installation comprise (Les Entreprises P. Théorêt, 2013). Le calcul du coût de base des appareils est donc le suivant :

Coût d'investissement * Taxes = Coût initial total

$$2\ 795 \$ * 1,145 = 3\ 200,28 \$$$

Pour ce qui est du coût d'utilisation, une évaluation théorique est réalisable grâce à l'application web « Comparez vos coûts d'énergie » de l'Agence de l'efficacité énergétique. Pour une maison unifamiliale dans la région de Montréal, construite en 1997, ayant trois occupants et ayant 111 m² de superficie habitable, l'application estime le coût de chauffage pour une année à 565\$. Ce montant est calculé à partir d'un montant de 0,0827 \$ / kWh et comprend les taxes (Agence de l'efficacité énergétique, s. d.). Pour une utilisation de 15 ans, le coût grimpe à 8 475 \$. Le coût final pour chauffer la maison unifamiliale moyenne est donc de :

Coût initial total + Coût d'opération pour 15 ans = Critère économique

$$3\ 200,28 \$ + 8\ 475 \$ = 11\ 675,28 \$$$

Chauffage radiant hydronique

L'installation d'un système de chauffage radiant hydronique requiert plusieurs éléments : tuyauterie en polyéthylène, élément chauffant (chaudière à électricité ou chauffage solaire thermique avec capteurs à eau), manifold (dirige l'eau dans les différentes zones à chauffer) et thermostats. Le

montant d'investissement initial représente l'installation du plancher chauffant, qui est généralement estimé à cinq dollars par pied carré (Écosolaris, s. d.a) :

Superficie à chauffer * Coût unitaire = Coût initial

$$1195 \text{ pi}^2 * 5,0 \$ / \text{pi}^2 = 5 975 \$$$

Il faut également faire l'achat d'une chaudière électrique pour alimenter le plancher chauffant en eau chaude. Tel qu'estimé pour la thermopompe à air, le bâtiment nécessite 1,84 tonne de puissance (22 080 BTU) pour le chauffage par année. Guillemette Énergies offre plusieurs modèles dont une chaudière modèle MINI-BTH de 9 KW (30 726 BTU) à 865,65 \$ (Guillemette Énergies, 2013). L'investissement total pour un tel système est donc de :

Coût du plancher + (Coût de la chaudière + taxes) = Investissement initial

$$5 975 \$ + (865,65 \$ * 1,145) = 6 966,17 \$$$

Pour un système de chauffage radiant hydronique alimenté en eau chaude par le chauffage solaire thermique à capteurs à eau, l'investissement initial est le suivant :

Coût du plancher + Coût du système solaire (voir p.28 pour calcul) = Investissement initial

$$5 975 \$ + 7 442,5 \$ = 13 417,50 \$$$

Pour ce qui est du coût d'utilisation pour un système avec une alimentation d'eau chaude à partir d'une chaudière électrique, une évaluation théorique est réalisable grâce à l'application web « Comparez vos coûts d'énergie » de l'Agence de l'efficacité énergétique. Pour une maison unifamiliale dans la région de Montréal, construite en 1997, ayant trois occupants et ayant 111 m² de superficie habitable, l'application estime le coût de chauffage pour une année à 790\$. Ce montant est calculé à partir d'un montant de 0,0827 \$ / kWh et comprends les taxes (Agence de l'efficacité énergétique, s. d.). Pour une utilisation de 15 ans, le coût grimpe à 11 850 \$. Le coût final pour chauffer la maison unifamiliale moyenne est donc de :

Coût initial total + Coût d'opération pour 15 ans = Critère économique

$$6 966,17 \$ + 11 850 \$ = 18 816 \$$$

Dans le cas d'un système qui serait alimenté en eau chaude par le chauffage solaire thermique avec capteurs à eau, le coût d'utilisation est nul, car le système exploite une énergie gratuite. Seul le coût d'investissement initial augmentera pour l'achat et l'installation des appareils.

Coût du plancher + Coût du chauffage solaire thermique = Critère économique
 $13\,417 \$ + 0 \$ = 13\,417 \$$

Géothermie

En 2010, le coût unitaire moyen d'un système géothermique à boucle verticale s'élevait à 8 263\$/tonne (Coalition canadienne de l'énergie géothermique, 2012). Tel que mentionné dans l'analyse économique de la thermopompe, la maison à l'étude a besoin d'une charge de chauffage d'environ deux tonnes (24 000 BTU). Le calcul du coût de base des appareils est donc le suivant :

Coût unitaire moyen * Charge de chauffage = Coût initial total
 $8\,263 \$ * 2 = 16\,526 \$$

Pour ce qui est du coût d'utilisation, une évaluation théorique est réalisable grâce à l'application web « Calculateur du coût du système de chauffage domestique » de Ministère des Ressources naturelles. Pour une maison unifamiliale dans la région de Montréal, construite après 1990 et ayant trois occupants, l'application estime le coût de chauffage pour une année à 497\$. Cependant, ce montant inclut le chauffage de l'eau, qui représente 20 % de ce montant, mais pas les taxes (Ministère des Ressources naturelles, s. d.a). Le coût réel peut donc se calculer ainsi :

(Coût estimé par le Ministère des Ressources naturelles – Énergie pour chauffer l'eau) * Taxes
 $(497 \$ * 0,8) * 1,145$
455,25 \$

Le montant total pour une année équivaut donc à 455,25 \$. Cela équivaut à une charge de chauffage annuelle de 21,6 GJ (Ministère des Ressources naturelles, s. d.b). Pour une utilisation de 15 ans, le coût grimpe à 6 828,75 \$. Le coût final pour chauffer la maison unifamiliale moyenne est donc de :

Coût initial total + Coût d'opération pour 15 ans = Critère économique

$$16\,526 \$ + 6\,828,75 \$ = 23\,354,75 \$$$

Chauffage solaire passif

Lorsqu'intégré au bâtiment dès le début du projet, ce type de chauffage ne coûte rien. Effectivement, l'installation de fenestration coûte la même chose, peu importe l'orientation. Cependant, si le chauffage solaire passif est l'unique solution de chauffage retenue, plusieurs dépenses supplémentaires doivent être planifiées : matériaux à forte masse thermique, isolation supérieure (murs, toit, sous les fondations et la fenestration) de même qu'un ventilateur récupérateur de chaleur à haute efficacité. Ces éléments représentent un surcoût de construction d'environ cinq pour cent (Greenpeace, 2011). Pour une maison dont le coût de construction est de 250 000 \$, cela équivaut donc à 12 500 \$.

De même, lorsque le chauffage solaire passif est intégré au bâtiment comme chauffage accessoire (un autre type de chauffage assume la majeure partie du travail), l'ajout de ces éléments n'est plus obligatoire. De par l'apport calorique du chauffage solaire passif, le système de chauffage principal aura moins de chaleur à fournir. Cela est bon pour l'efficacité générale du système ainsi que pour le coût total. Le chauffage solaire passif, lorsqu'utilisé comme chauffage accessoire, est donc un incontournable.

Chauffage solaire thermique

Tout d'abord, il s'agit de calculer le montant d'investissement initial, soit le coût d'achat et d'installation des capteurs thermiques. Pour des capteurs à air, les coûts sont d'environ d'un à deux dollars par watt installé (Greenpeace, 2011). Pour un système de base complet, l'installation se détaille habituellement autour de 2 500 \$ (Écosolaris, s. d.c). Du côté des capteurs à eau, les coûts sont d'environ trois à quatre dollars par watt installé (Greenpeace, 2011). Pour un système de base complet, l'installation se détaille habituellement autour de 6 500 \$ (Écosolaris, s. d.b). Le calcul du coût de base des appareils est donc le suivant :

Coût d'investissement * Taxes = Coût initial total

Air

$$2\,500 \$ * 1,145 = 2\,862,5 \$$$

Eau

$$6\,500 \$ * 1,145 = 7\,442,5 \$$$

Pour ce qui est du coût d'utilisation, il est aisé de constater un avantage du côté du chauffage solaire : la source d'énergie est gratuite. Effectivement, une fois installés, les capteurs solaires vont absorber le rayonnement solaire qui irradie déjà à l'endroit désigné. Le transfert de chaleur, cependant, consomme de l'énergie. Que ce soit de l'air chaud à travers le système de ventilation ou de l'eau chaude à travers un plancher chauffant, une pompe doit l'acheminer. Ce coût ne sera pas calculé, car il reste stable peu importe si la chaleur provient d'une thermopompe, d'un système géothermique ou du chauffage solaire thermique. Le coût final pour chauffer la maison unifamiliale moyenne est donc de :

Coût initial total + Coût d'opération pour 15 ans = Critère économique

Air

$$2\,862,5 \$ + 0 \$ = 2\,862,5 \$$$

Eau

$$7\,442,5 \$ + 0 \$ = 7\,442,5 \$$$

Poêle à bois à haute efficacité

Tout d'abord, il s'agit de calculer le montant d'investissement initial, soit le coût d'achat du poêle à bois. La compagnie Les foyers Mirabel offre de nombreux équipements respectant les normes B415.1 (2010) et NSPS (2013) (voir section 2.5.1). Parmi ceux-ci se retrouve le modèle SUPER 27 de Pacific Energy. Les trois éléments à acheter (poêle à bois, cheminée et tuyau) ont respectivement les coûts suivants : 1 690, 1 195 et 350 \$ (Roberge, 2013). À noter que l'installation est comprise dans ces montants. Le calcul du coût de base des appareils est donc le suivant :

Coût d'investissement * Taxes = Coût initial total

$$(1690 + 1\,195 + 350) \$ * 1,145 = 3\,704,08 \$$$

Pour ce qui est du coût d'utilisation, une évaluation théorique est réalisable grâce à l'application web « Comparez vos coûts d'énergie » de l'Agence de l'efficacité énergétique. Pour une maison unifamiliale dans la région de Montréal, construite en 1997, ayant trois occupants et ayant 111 m² de superficie habitable, l'application estime le coût de chauffage pour une année à 397\$. Ce montant est calculé à partir d'un montant de 77 \$ / cordeau (16" x 4' x 8' de bois) et comprend les taxes (Agence de l'efficacité énergétique, s. d.). Pour une utilisation de 15 ans, le coût grimpe à 5 955 \$. Le coût final pour chauffer la maison unifamiliale moyenne est donc de :

Coût initial total + Coût d'opération pour 15 ans = Critère économique

$$3\,704,08 \$ + 5\,955 \$ = 9\,659,08 \$$$

Foyer de masse

Tout d'abord, il s'agit de calculer le montant d'investissement initial, soit le coût d'achat et d'installation du foyer de masse. Plusieurs modèles, formes et matériaux sont disponibles pour la construction d'un tel système, si bien que le prix varie substantiellement. Effectivement, le prix à l'achat d'un foyer de masse peut varier entre 10 000 et 25 000 \$ (AGRINOVA et Groupe AGÉCO, 2009). Pour des fins de simplification, la valeur médiane sera utilisée pour l'analyse, soit 17 500 \$.

Pour ce qui est du coût d'utilisation, une évaluation théorique est réalisable grâce à l'extrapolation des données de l'application web « Comparez vos coûts d'énergie » de l'Agence de l'efficacité énergétique. Pour une maison unifamiliale dans la région de Montréal, construite en 1997, ayant trois occupants et ayant 111 m² de superficie habitable, l'application estime le coût de chauffage pour une année à 1 589, 636 et 397 \$ pour des appareils à rendement de 20, 50 et 80 % respectivement. Ces montants sont calculés à partir d'un montant de 77 \$ / cordeau (16" x 4' x 8' de bois) et comprends les taxes (Agence de l'efficacité énergétique, s. d.). En utilisant ces données, il est possible de créer une équation les reliant : $y = 31\,816 * x^{-1}$ où $R^2 = 1$. Celle-ci est illustrée en figure 4.2.

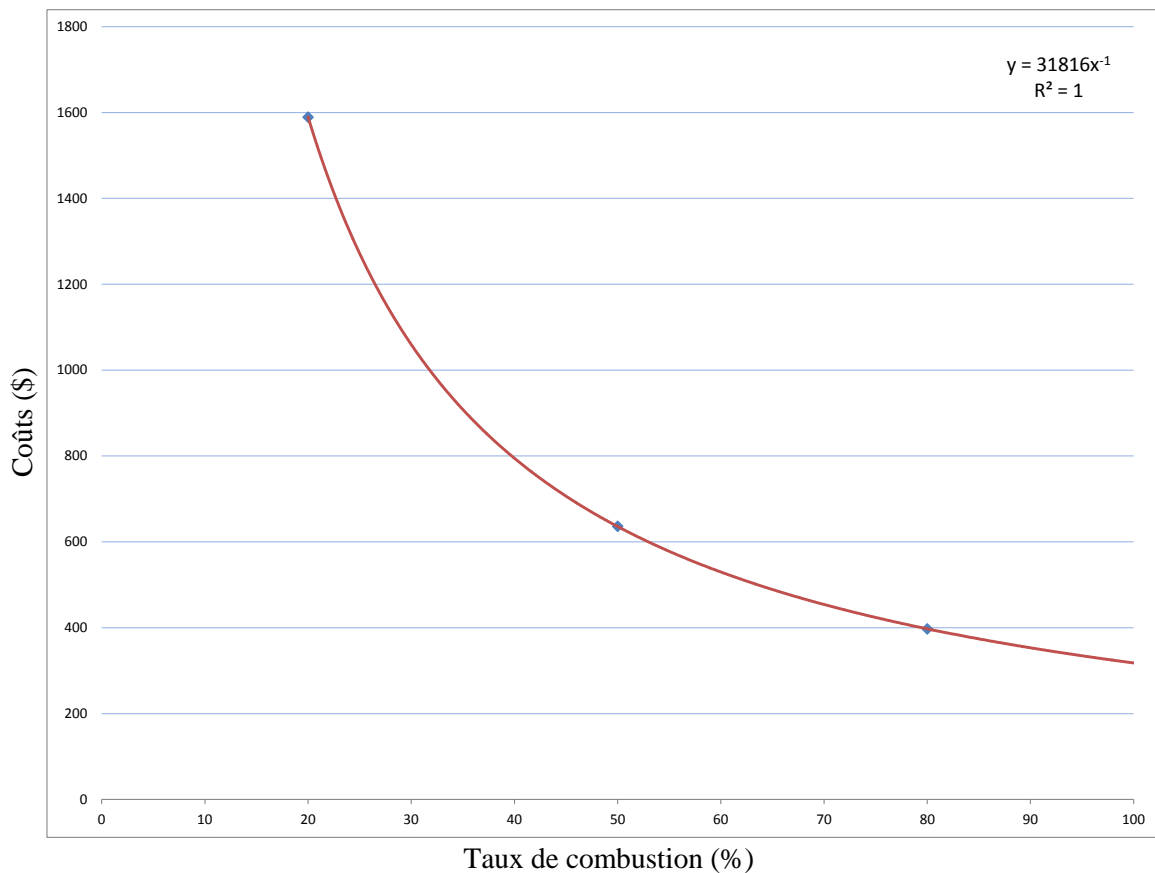


Figure 4.1 : Équation illustrant la baisse du coût du bois en fonction du taux de combustion de l'appareil

$$y = 31\,816 * x^{-1}$$

$$y = 31\,816 * 97^{-1}$$

$$y = 328 \$$$

Pour un taux de combustion de 97 %, le coût du bois sera donc de 328 \$. Pour une utilisation de 15 ans, le coût grimpe à 4 920 \$. Le coût final pour chauffer la maison unifamiliale moyenne est donc de :

Coût initial total + Coût d'opération pour 15 ans = Critère économique

$$17\,500 \$ + 4\,920 \$ = 22\,420 \$$$

4.3 Émissions de gaz à effet de serre

Le deuxième critère à évaluer est la quantité de GES (H₂O, CO₂, CH₄, CFC, N₂O, etc.) émis par les différentes alternatives de chauffage. Les GES sont vitaux pour les cycles climatiques sur la planète, car ils retiennent une partie de la radiation infrarouge émise par celle-ci. En effet, en contact avec les GES, les rayons infrarouges se transforment en énergie cinétique. Sans gaz à effet de serre, la température moyenne de la planète chuterait de 15 à – 8 °C (Olivier, 2009). Cependant, la concentration atmosphérique des différents GES ne cesse d’augmenter depuis le début de l’ère industrielle. Effectivement, la concentration atmosphérique de CO₂ est passée de 280 à 379 ppm entre le début de l’ère industrielle et 2005. Même constat au niveau du CH₄ et du N₂O, qui sont passés respectivement de 715 à 1 774 ppb et 270 à 319 ppb pour la même période (GIEC, 2007). Cela a pour effet de réchauffer la planète : les dix années ayant les plus hautes températures ont toutes été enregistrées depuis 1998 (Agence France-Presse, 2013). Pour éviter un réchauffement plus élevé que deux °C, sans quoi les conséquences du changement climatique augmenteraient drastiquement (CCNUCC, 2009), les émissions de gaz à effet de serre des solutions de chauffage intégrés aux bâtiments résidentiels doivent être limitées.

Le présent critère à évaluer sera calculé comme étant les émissions de GES résultant du fonctionnement des appareils pour chauffer la maison unifamiliale moyenne pendant un an.

Plinthes électriques

En section 4.1, le coût de chauffage pour une année en utilisant des plinthes électriques avait été évalué à 790 \$. Comme ce montant à été calculé avec un coût énergétique de 0,0827 \$ / kWh, il est possible d’obtenir combien de kWh l’équipement utilise :

Coût d’utilisation / Coût énergétique = Quantité d’énergie utilisée

$$790 \$ / 0,0827 \$ / \text{kWh} = 9\,552,6 \text{ kWh}$$

Comme l’hydroélectricité génère 350 g de CO₂ équivalent pour produire un kWh, il est possible de calculer l’émission de GES (Agence de l’efficacité énergétique, 2009) :

Énergie utilisée * Facteur d’émission = Émission de GES

$$9\,552,6 \text{ kWh} * 350 \text{ g / kWh} = 3\,343\,410 \text{ g} = 3,34 \text{ tonnes de CO}_2 \text{ é}$$

Thermopompes à air

En section 4.1, le coût de chauffage pour une année en utilisant une thermopompe avait été évalué à 565 \$. Comme ce montant a été calculé avec un coût énergétique de 0,0827 \$ / kWh, il est possible d'obtenir combien de kWh l'équipement utilise :

$$\begin{aligned} \text{Coût d'utilisation / Coût énergétique} &= \text{Quantité d'énergie utilisée} \\ 565 \$ / 0,0827 \$ / \text{kWh} &= 6\,831,92 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Comme l'hydroélectricité génère 350 g de CO₂ équivalent pour produire un kWh, il est possible de calculer l'émission de GES (Agence de l'efficacité énergétique, 2009) :

$$\begin{aligned} \text{Énergie utilisée} * \text{Facteur d'émission} &= \text{Émission de GES} \\ 6\,831,92 \text{ kWh} * 350 \text{ g / kWh} &= 2\,391\,172 \text{ g} = 2,39 \text{ tonnes de CO}_2 \text{ é} \end{aligned}$$

Chauffage radiant hydronique

Comme les plinthes électriques et les chaudières à eau électriques sont toutes deux des systèmes basés sur la résistance électrique, leurs coûts avaient été évalués à 790 \$ en section 4.1. Comme ce montant a été calculé avec un coût énergétique de 0,0827 \$ / kWh, il est possible d'obtenir combien de kWh l'équipement utilise :

$$\begin{aligned} \text{Coût d'utilisation / Coût énergétique} &= \text{Quantité d'énergie utilisée} \\ 790 \$ / 0,0827 \$ / \text{kWh} &= 9\,552,6 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Comme l'hydroélectricité génère 350 g de CO₂ équivalent pour produire un kWh, il est possible de calculer l'émission de GES (Agence de l'efficacité énergétique, 2009) :

$$\begin{aligned} \text{Énergie utilisée} * \text{Facteur d'émission} &= \text{Émission de GES} \\ 9\,552,6 \text{ kWh} * 350 \text{ g / kWh} &= 3\,343\,410 \text{ g} = 3,34 \text{ tonnes de CO}_2 \text{ é} \end{aligned}$$

Dans le cas d'un chauffage radiant puisant la chaleur à partir du rayonnement solaire, l'émission de GES est négligeable.

Géothermie

En section 4.1, la charge d'énergie requise pour faire fonctionner la pompe géothermique équivalait à 21,6 GJ pour un an (Ministère des Ressources naturelles, s. d.). Il est possible de transformer cette donnée en kWh en réalisant un produit croisé:

$$3,6 \text{ MJ} = 1 \text{ kWh}$$

$$21,6 \text{ GJ (21 600 MJ)} \rightarrow 6\,000 \text{ kWh}$$

Comme l'hydroélectricité génère 350 g de CO₂ équivalent pour produire un kWh, il est possible de calculer l'émission de GES (Agence de l'efficacité énergétique, 2009) :

$$\text{Énergie utilisée} * \text{Facteur d'émission} = \text{Émission de GES}$$

$$6\,000 \text{ kWh} * 350 \text{ g / kWh} = 2\,100\,000 \text{ g} = 2,10 \text{ tonnes de CO}_2 \text{ é}$$

Chauffage solaire passif et thermique

Le chauffage solaire passif et thermique utilisent l'apport calorifique du soleil et ne génèrent donc aucune émission de gaz à effet de serre.

Poêle à bois à haute efficacité

En section 4.1, le coût de chauffage pour une année en utilisant un poêle à bois à haute efficacité avait été évalué à 397 \$. Comme ce montant a été calculé avec un coût énergétique de 77 \$ / cordeau (16" x 4' x 8' de bois), il est possible d'obtenir combien de cordes de bois l'équipement utilise :

$$\text{Coût d'utilisation} / \text{Coût énergétique} = \text{Quantité de cordes}$$

$$397 \$ / 77 \$ / \text{Corde} = 5,16 \text{ Cordes}$$

Comme une corde de bois dur pèse en moyenne 420 kg (le bois mou pourrait également être utilisé, mais il produit une combustion peu efficace), il est possible de calculer la masse de bois nécessaire pour chauffer le bâtiment (Syndicat des Producteurs de Bois de l'Estrie, 2011) :

Quantité de cordes de bois * Poids moyen d'une corde = Masse totale
5,16 Cordes * 420 kg / Corde = 2 167 kg

Comme la combustion d'un kilogramme de bois génère 957,25 g de CO₂ équivalent, il est possible de calculer l'émission de GES (Agence de l'efficacité énergétique, 2009) :

Masse du bois * Facteur d'émission = Émission de GES
2 167 kg * 957,25 g / kg = 2 074 360 g = 2,07 tonnes de CO₂ é

Foyer de masse

En section 4.1, le coût de chauffage pour une année en utilisant un poêle à bois à haute efficacité avait été évalué à 328 \$. Comme ce montant à été calculé avec un coût énergétique de 77 \$ / cordeau (16" x 4' x 8' de bois), il est possible d'obtenir combien de cordes de bois l'équipement utilise :

Coût d'utilisation / Coût énergétique = Quantité de cordes
328 \$ / 77 \$ / Corde = 4.26 Cordes

Comme une corde de bois dur pèse en moyenne 420 kg (le bois mou pourrait également être utilisé, mais il produit une combustion peu efficace), il est possible de calculer la masse de bois nécessaire pour chauffer le bâtiment (Syndicat des Producteurs de Bois de l'Estrie, 2011) :

Quantité de cordes de bois * Poids moyen d'une corde = Masse totale
4,26 Cordes * 420 kg / Corde = 1 789,2 kg

Comme la combustion d'un kilogramme de bois génère 957,25 g de CO₂ équivalent, il est possible de calculer l'émission de GES (Agence de l'efficacité énergétique, 2009) :

Masse du bois * Facteur d'émission = Émission de GES

1 789,2 kg * 957,25 g / kg = 1 712 711 g = 1,71 tonne de CO₂ é

4.4 Efficacité

Le troisième critère à évaluer est l'efficacité des systèmes à transformer une énergie de base (électricité, énergie calorifique, rayonnement solaire, etc.) en chaleur. Cette donnée est souvent identifiée comme étant le coefficient de performance d'un appareil. Le critère est important à évaluer, car si un système n'est pas efficace, beaucoup d'énergie et donc d'argent devra être investi pour arriver à combler la charge de chauffage d'un bâtiment résidentiel.

Plinthes électriques

Tel que mentionné en section 2.1.1, le coefficient de performance des plinthes électriques est égal à un, un kW d'électricité sera transformé en un kW de chaleur par le système. En fait, tous les systèmes de chauffage basés sur la résistance électrique sont habituellement efficaces à 100 %, car l'ensemble de l'énergie électrique utilisée est converti en chaleur. Aucune perte d'énergie n'est enregistrée, comme c'est le cas avec la combustion du bois par exemple (Ministère des Ressources naturelles, 2003a).

Thermopompes à air

La thermopompe à air utilise également l'électricité pour fonctionner, mais de façon différente. L'énergie est utilisée pour le transfert de chaleur, qui est moins coûteux énergétiquement que d'en créer comme c'est le cas avec les plinthes électriques. Le coefficient de performance des thermopompes est donc supérieur (deux à trois) : un kW d'électricité sera transformé en de deux à trois kW de chaleur vers un ménage (Écohabitation, s. d.c).

Chauffage radiant hydronique

Un plancher chauffant alimenté en eau chaude par une chaudière aura le même coefficient de performance que la plinthe électrique, car tous les systèmes de chauffage basés sur la résistance électrique sont habituellement efficaces à 100 %. Le coefficient de performance du chauffage

radiant hydronique est donc de un : un kW d'électricité sera transformé en un kW de chaleur par le système.

Géothermie

Dépendamment du type d'échangeur de chaleur utilisé dans le système géothermique, l'efficacité variera. Effectivement, les capteurs de chaleur horizontaux sont moins efficaces que les verticaux ou à circuit ouvert, car le réseau de capteurs est moins profond et donc plus près des variations météorologiques. Comme les systèmes à capteurs de chaleur verticaux sont plus populaires au Québec, l'efficacité de ce système sera utilisée pour l'analyse. Le coefficient de performance d'un tel système est de trois à quatre : un kW d'électricité sera transformé en de trois à quatre kW de chaleur.

Chauffage solaire passif

Évaluer l'efficacité du chauffage solaire passif demande une méthode différente, car contrairement aux autres alternatives de chauffage, le solaire passif n'est pas un dispositif installé dans la résidence. Pour évaluer le coefficient de performance du chauffage solaire passif, les gains et pertes thermiques par rayonnement devront être quantifiés en fonction du vitrage. Lorsqu'utilisé comme système principal de chauffage, le solaire passif demande l'installation de fenêtres à faible émissivité (faible E) tandis qu'une fenestration normale peut être utilisée lorsqu'utilisé comme système secondaire. Les pertes et gains thermiques de tels vitrages sont résumés en figure 4.4.

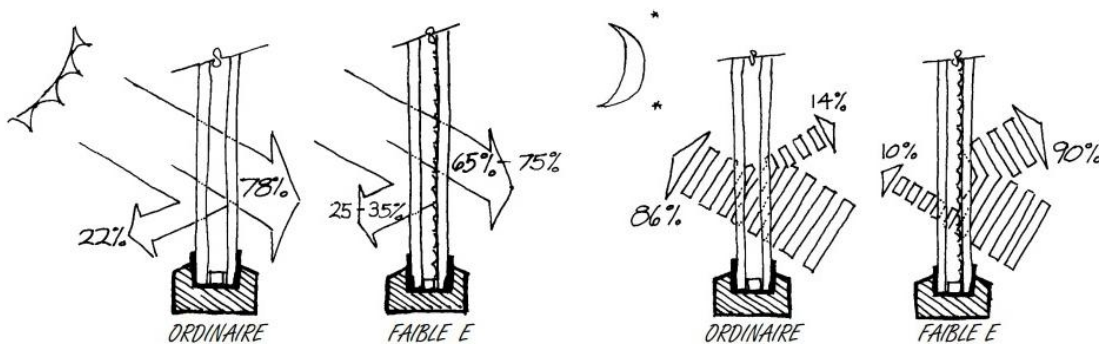


Figure 4.2 : Gains et pertes thermiques par rayonnement de fenêtres normales et à faible émissivité (tiré du Ministère des Ressources naturelles, 2003b)

Un bâtiment résidentiel situé dans la région de Montréal reçoit annuellement 1 440 kWh d'énergie solaire sur une superficie d'un mètre carré à angle optimal (Funk, 2010). Pour un vitrage normal, les gains et pertes thermiques équivalent à :

Rayonnement * Proportion du gain thermique = Gain thermique par rayonnement

$$1\,440 \text{ kWh} * 0,78 = 1\,123,2 \text{ kWh}$$

Gain thermique par rayonnement * Proportion de la perte thermique = Gain total

$$1\,123,2 \text{ kWh} * 0,14 = 157,3 \text{ kWh}$$

Gain thermique total / Gain thermique initial = Coefficient de performance

$$157,3 \text{ kWh} / 1\,440 \text{ kWh} = 0,11$$

Pour un vitrage faible-E, les gains et pertes thermiques équivalent à :

Rayonnement * Proportion du gain thermique = Gain thermique par rayonnement

$$1\,440 \text{ kWh} * 0,70 = 1\,008 \text{ kWh}$$

Gain thermique par rayonnement * Proportion de la perte thermique = Gain total

$$1\,008 \text{ kWh} * 0,90 = 907,2 \text{ kWh}$$

Gain thermique total / Gain thermique initial = Coefficient de performance

$$907,2 \text{ kWh} / 1\,440 \text{ kWh} = 0,63$$

Chauffage solaire thermique

L'efficacité des capteurs thermiques solaires varie en fonction du type de capteur et de la température extérieure. De façon générale, celle-ci peut atteindre 75 % dans les meilleures conditions (Greenpeace, 2011).

Les capteurs à eau sont plus performants, car à volume égal, l'eau peut emmagasiner environ 3 500 fois plus d'énergie que l'air à cause de sa faible densité. Ainsi, ces panneaux peuvent convertir en

chaleur jusqu'à 80 % (COP = 0,8) de l'énergie solaire reçue en été. En hiver, le rendement peut chuter jusqu'à 40 % en raison de la perte de chaleur causée par le temps froid (Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques, 2012). Les capteurs à air arrivent plutôt à atteindre une efficacité de 73 % (COP = 0,73) en été et ce rendement peut baisser jusqu'à 16 % en hiver (MC² Énergie, s. d.).

Poêle à bois à haute efficacité et foyer de masse

Pour des fins de simplification, le taux de combustion sera utilisé comme coefficient de performance. Les poêles à bois certifiés par l'USEPA et les foyers de masse atteignent respectivement un taux de combustion de 80 % (COP = 0,8) et 97 % (COP = 0,97) (Foyers Feu vert, 2009).

4.5 Durabilité

Le dernier critère à évaluer est la durabilité, soit la durée de vie estimée des appareils des divers systèmes. Celle-ci est importante, car une courte durée de vie d'un appareil demande ressources naturelles et monétaires lors du remplacement. Plus un dispositif aura une longue durée de vie, moins son impact environnemental sera grand.

Plinthes électriques

La majorité des appareils installés à l'intérieur d'un bâtiment auront une durée de vie supérieure à ceux installés à l'extérieur en raison d'une protection face aux intempéries et au froid. Les plinthes électriques sont très durables, car placées à l'intérieur, mais aussi parce que c'est un système très simple. En effet, il n'y a pas de pièces en mouvements, seulement un fil métallique au travers duquel passe de l'électricité. Sa durée de vie peut donc atteindre 40 ans (Tison, 2008).

Thermopompes à air

Les thermopompes à air, contrairement aux plinthes électriques, doivent affronter les intempéries et le froid pendant l'hiver, ce qui diminue la durée de vie de l'appareil. Le compresseur, qui augmente la pression de la vapeur pour faire augmenter sa température, est la pièce la plus vulnérable du

système. Malgré tout, la durée de vie moyenne d'une thermopompe à air peut atteindre de 15 à 20 ans (Ministère des Ressources naturelles, s. d.c). Pour des fins de simplification, la valeur médiane sera utilisée pour l'analyse, soit 17,5 ans.

Chauffage radiant hydronique

Un plancher chauffant, lorsque bien installé, aura une durée de vie équivalente à celle du bâtiment résidentiel. Effectivement, la tubulure de polyéthylène est souvent protégé par du béton ou un couvre-plancher et n'est pas sensible à la composition de l'eau. Certains tests accordent à la tubulure une durée de vie allant de 200 à 300 ans (Fauteux, 2009).

C'est donc plutôt l'élément chauffant de l'eau qui à une durée de vie limitée. Dans le cas d'une chaudière électrique, l'appareil à une durée de vie moyenne de 20 à 30 ans (Tison, 2006). Pour des fins de simplification, la valeur médiane sera utilisée pour l'analyse, soit 25 ans.

Géothermie

Le système géothermique est composé de nombreux éléments, mais celui plus susceptible d'avoir une faible durée de vie est la pompe à chaleur, assurant le transfert de la chaleur des échangeurs au système de ventilation. Il s'agit essentiellement d'une thermopompe, mais en raison de son emplacement (à l'intérieur du bâtiment) et d'une charge thermique et mécanique moins élevée, sa durée de vie est plus grande, soit de 20 à 25 ans (Ministère des Ressources naturelles, s. d.d). Pour des fins de simplification, la valeur médiane sera utilisée pour l'analyse, soit 22,5 ans.

Chauffage solaire passif

Peu importe si le chauffage solaire passif est utilisé comme système de chauffage principal ou secondaire, sa durée de vie sera substantielle. En effet, l'orientation de la maison demeurera la même durant toute la vie utile du bâtiment, de même que l'isolation supérieure. Seule la fenestration devra être changé, tous les dix ans pour un vitrage double scellé ou tous les 25 à 30 ans pour la structure en aluminium ou PVC (Tison, 2008). Comme le chauffage solaire passif utilisé comme système de chauffage secondaire ne demande pas nécessairement l'installation de ces éléments, la durée de vie sélectionnée pour l'analyse sera « à vie ».

Chauffage solaire thermique

Peu importe si les capteurs thermiques transfèrent la chaleur à l'eau ou à l'air, le système est composé de peu de pièces mobiles et par conséquent, a une longue durée de vie et demande peu d'entretien. Le réservoir d'eau chaude et la pompe ont des durées de vie moins élevées que le capteur thermique, qui ont respectivement 10, 15 et 25 ans de vie utile (Funk, 2010 et Écosolaris, s.d.b).

Poêle à bois à haute efficacité

Les poêles à bois, qu'ils soient à haute efficacité ou conventionnels, ont une longue durée de vie et nécessitent très peu d'entretien (ramonage occasionnel de la cheminée). Dépendamment de l'utilisation de l'appareil, sa durée de vie est estimée entre 25 et 30 ans (Association des professionnels du chauffage, s. d.). Pour des fins de simplification, la valeur médiane sera utilisée pour l'analyse, soit 27,5 ans.

Foyer de masse

En considérant l'ouvrage de maçonnerie massive qu'est le foyer de masse, il est aisé de constater que sa durée de vie est très grande. Effectivement, un foyer de masse bien installé peut avoir une vie utile aussi grande que le bâtiment résidentiel dans lequel il se trouve (AGRINOVA et Groupe AGÉCO, 2009).

4.6 Résultats

La présente section a pour but de résumer les résultats de l'analyse des quatre critères (coûts économiques, émission de GES, efficacité et durabilité) dans le but de rendre l'information plus facilement compréhensible. À partir des données, le classement et la normalisation permettront la quantification utile à l'analyse comparative. En effet, la normalisation des données permet une comparaison numérique, car toutes les données sont transformées dans un axe de un à zéro, où les meilleurs résultats sont de zéro et les pires, de un.

Coûts économiques

Les coûts des diverses alternatives de chauffage ont été calculés à la section 4.2. Ceux-ci comprenaient le coût d'investissement initial (achat et installation des systèmes), de même que le coût de fonctionnement pour 15 années. Ces coûts et le classement des performances sont résumés par le tableau 4.6.1.

Tableau 4.1 : Classement et normalisation des alternatives de chauffage selon le coût économique

Alternatives		Coût économique (\$)	Classement (1 à 11)	Normalisation (0 à 1)
Plinthes électriques		14 558	8	0,62
Thermopompes à air		11 675	5	0,50
Chauffage radiant hydronique	Chaudière électrique	18 816	9	0,81
	Chauffage solaire thermique (capteurs à eau)	13 417	7	0,58
Géothermie		23 355	11	1
Chauffage solaire passif	Système principal	12 500	6	0,54
	Système secondaire	0	1	0
Chauffage solaire thermique	Capteurs à air	2 863	2	0,12
	Capteurs à eau	7 443	3	0,32
Poêles à bois à haute efficacité		9 659	4	0,41
Foyers de masse		22 420	10	0,96

Il est aisé de constater que le chauffage solaire passif utilisé comme système secondaire (zéro dollars) est de loin la meilleure alternative au niveau du coût économique. Cependant, son utilisation implique qu'un autre système doit assumer le rôle de système de chauffage primaire, si bien que d'autres systèmes peu onéreux doivent être considérés. Le chauffage solaire thermique fonctionnant grâce à des capteurs thermiques à air (2 863 \$), des capteurs thermiques à eau (7 443 \$) ou un poêle à bois à haute efficacité (9 659 \$) sont de bons candidats. Effectivement, tous les autres systèmes coûtent plus de 10 000 \$ pour chauffer le bâtiment résidentiel pendant 15 ans.

La période de temps utilisée est de 15 ans, car les Québécois ont tendance à déménager et changer de résidence relativement souvent. Cependant, certaines personnes, une fois bien installées, peuvent rester dans le même bâtiment résidentiel très longtemps. Pour cette raison, un aperçu des coûts pour 50 ans a été illustré à la figure 4.6. Celle-ci inclut l'investissement initial (achats des appareils et installation), les frais de fonctionnement annuels ainsi que les coûts de remplacement des appareils et éléments en dollars canadiens de 2013 (basés sur la section 4.5). Sur une période plus longue, les mêmes systèmes sont encore dominants au niveau du coût, mais d'autres commencent à être plus compétitifs. C'est le cas du chauffage radiant hydronique fonctionnant grâce à des capteurs solaires thermiques à eau, du foyer de masse et même le chauffage solaire passif utilisé comme système primaire.

Émission de gaz à effet de serre

La quantité des émissions de GES pour tous les systèmes a été calculée en section 4.3 pour le fonctionnement du système pendant un an. Les émissions de GES pour la fabrication et la distribution de tous les éléments de chaque système n'ont pas été réalisées en raison de la complexité de la chose. Les émissions de GES découlent donc seulement de la combustion ou l'utilisation des sources d'énergies propres à chacun des systèmes. Ces quantités et le classement des performances sont résumés par le tableau 4.6.2.

Tous les systèmes ayant pour base l'exploitation du rayonnement solaire ont un net avantage sur les autres, car cette méthode n'émet aucun GES pour produire de la chaleur. Le chauffage radiant hydronique fonctionnant grâce à des capteurs solaires thermiques à eau, de même que les quatre systèmes de chauffage solaire sont à prioriser face aux émissions de GES. Les systèmes fournissant de la chaleur à partir de la combustion de la biomasse se retrouvent en deuxième position avec 1,71 et 2,07 tonnes de CO₂ é. Tous les systèmes ayant pour base l'électricité arrivent en dernière position. Il serait cependant pertinent de noter que toutes ces quantités d'émission de gaz à effet de serre sont minimes. Effectivement, l'hydroélectricité produit très peu de GES (350 g/kWh) comparativement à l'électricité produite par le charbon (3 154 g/kWh) ou la chaleur produite à partir de mazout lourd (3 146 g/L), mazout léger (2 735 g/L) ou propane (1 544 g/L). L'utilisation de systèmes électriques au Québec n'est donc pas une problématique au niveau des émissions de GES.

Tableau 4.2 : Classement et normalisation des alternatives de chauffage selon les émissions de gaz à effet de serre

Alternatives		Émissions de GES (tonnes de CO ₂ é)	Classement (1 à 11)	Normalisation (0 à 1)
Plinthes électriques		3,34	10	1
Thermopompes à air		2,39	9	0,72
Chauffage radiant hydronique	Chaudière électrique	3,34	10	1
	Chauffage solaire thermique (capteurs à eau)	0	1	0
Géothermie		2,10	8	0,63
Chauffage solaire passif	Système principal	0	1	0
	Système secondaire			
Chauffage solaire thermique	Capteurs à air			
	Capteurs à eau			
Poêles à bois à haute efficacité		2,07	7	0,62
Foyers de masse		1,71	6	0,52

Efficacité

L'efficacité des différents systèmes, soit leur capacité à transformer leur source d'énergie en chaleur, a été déterminée en section 4.4. Un résumé de l'évaluation du coefficient de performance des systèmes et le classement des performances apparaît au tableau 4.6.3. Jusqu'ici, pour la normalisation, toutes les meilleurs performances affichaient les données les plus basses. Or, au niveau de l'efficacité, les meilleures alternatives détiennent plutôt la plus haute valeur, soit le plus grand coefficient de performance. Les valeurs inverses ($1 / x$) devront donc être utilisées pour la normalisation.

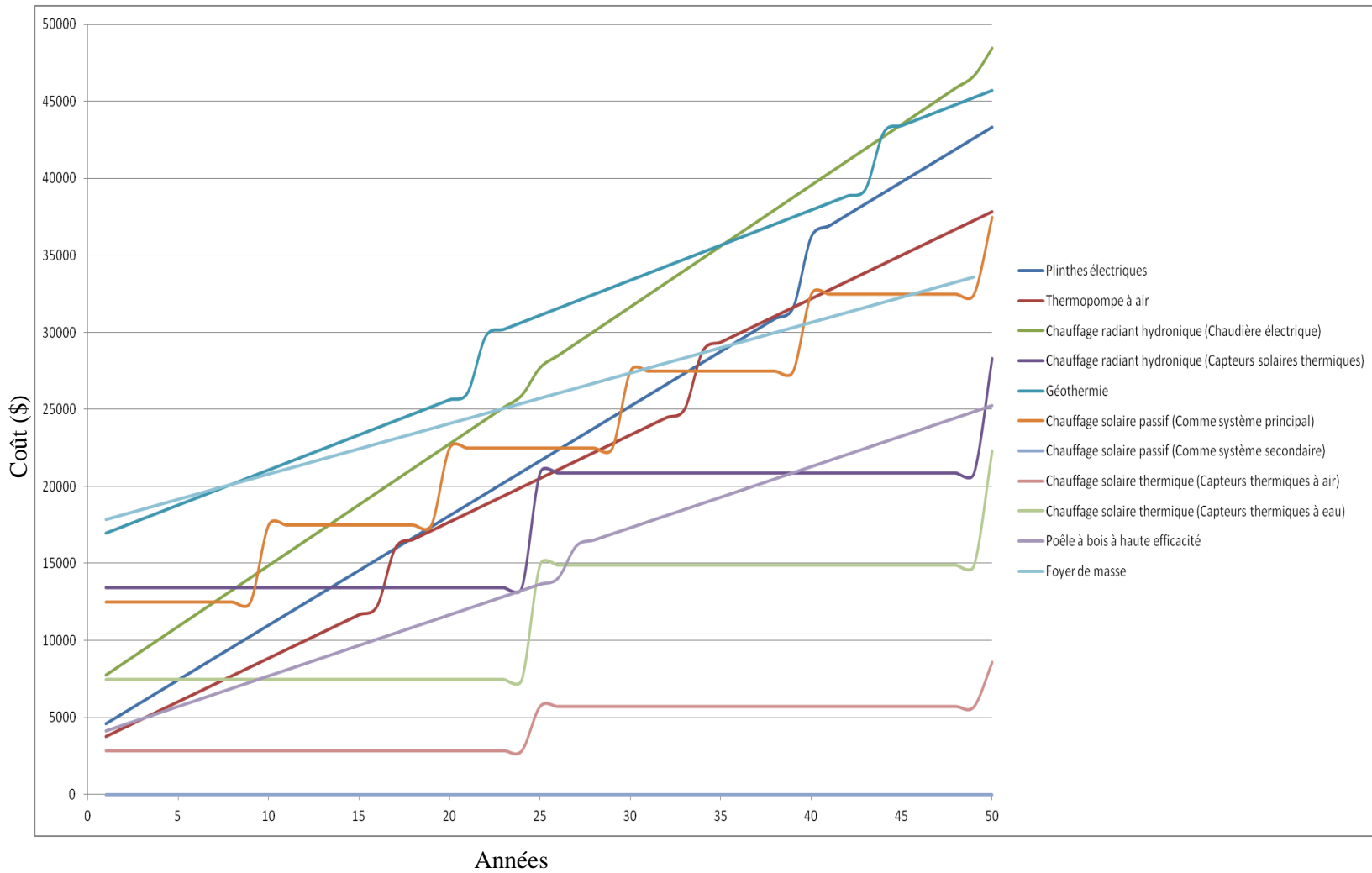


Figure 4.3 : Variation du coût économique des alternatives de chauffage pendant 50 ans

Tableau 4.3 : Classement et normalisation des alternatives de chauffage selon l'efficacité

Alternatives		Efficacité (COP)	Inversion (1 / COP)	Classement (1 à 11)	Normalisation (0 à 1)
Plinthes électriques		1	1	3	0,11
Thermopompes à air		2 à 3	0,40	2	0,04
Chauffage radiant hydronique	Chaudière électrique	1	1	3	0,11
	Chauffage solaire thermique (capteurs à eau)	0,80	1,25	6	0,14
Géothermie		3 à 4	0,29	1	0,03
Chauffage solaire passif	Système principal	0,63	1,59	10	0,18
	Système secondaire	0,11	9,09	11	1
Chauffage solaire thermique	Capteurs à air	0,73	1,37	9	0,15
	Capteurs à eau	0,80	1,25	6	0,14
Poêles à bois à haute efficacité		0,80	1,25	6	0,14
Foyers de masse		0,97	1,03	5	0,11

À partir de ces données, il est possible d'apercevoir que les deux systèmes utilisant les thermopompes sont les plus efficaces. Effectivement, la pompe à chaleur géothermique et la thermopompe à air ont des COP allant respectivement de trois à quatre et de deux à trois dépendamment des modèles et de l'installation. Cette performance provient du fait que ces appareils ne produisent pas de chaleur, ils la transfèrent du sol ou de l'air, ce qui est moins coûteux énergétiquement. Les deux autres systèmes utilisant l'électricité (plinthes électriques et chauffage radiant hydronique alimenté par une chaudière électrique) sont également efficaces (COP de un). Les systèmes utilisant la biomasse (poêles à bois à haute efficacité et foyers de masse) offrent des taux de combustion acceptables s'approchant même de l'efficacité des systèmes électriques dans le cas des foyers de masse (COP de 0,97). Les systèmes les moins efficaces sont définitivement ceux exploitant le rayonnement solaire (COP de 0,8 à 0,11). Il est cependant important de mentionner que malgré une efficacité médiocre, ces systèmes utilisent un carburant renouvelable et gratuit.

Durabilité

La durabilité des différents systèmes, soit durée de vie estimée en années, a été déterminé en section 4.5. Un résumé de cette évaluation et le classement des performances apparaissent au tableau 4.6.4. Comme pour l'efficacité, les meilleures alternatives affichent la plus haute valeur, soit la plus grande durée de vie en années. Les valeurs inverses ($1 / x$) devront donc être utilisées pour la normalisation. Aussi, les valeurs « à vie » seront considérées comme étant 100 ans.

Tableau 4.4 : Classement et normalisation des alternatives de chauffage selon la durabilité

Alternatives		Durabilité (ans)	Inversion (1 / ans)	Classement (1 à 11)	Normalisation (0 à 1)
Plinthes électriques		40	0,025	3	0,42
Thermopompes à air		17,5	0,057	10	0,95
Chauffage radiant hydronique	Chaudière électrique	Tubulure : à vie Chaudière : 25	0,016	5	0,27
	Chauffage solaire thermique (capteurs à eau)	Tubulure : à vie Réservoir d'eau chaude : 10 Pompe : 15 Capteur thermique : 25	0,027	7	0,45
Géothermie		22,5	0,044	6	0,73
Chauffage solaire passif	Système principal	Orientation et isolation : À vie Fenestration : 10	0,018	11	0,3
	Système secondaire	À vie	0,01	1	0,17
Chauffage solaire thermique	Capteurs à air	Réservoir d'eau chaude : 10 Pompe : 15 Capteur thermique : 25	0,05	8	0,83
	Capteurs à eau		0,06	8	1
Poêles à bois à haute efficacité		27,5	0,036	4	0,6
Foyers de masse		À vie	0,01	1	0,17

Deux systèmes retiennent l'attention : le chauffage solaire passif utilisé comme système secondaire et les foyers de masse. Effectivement, ces deux systèmes ont une durée de vie équivalente au bâtiment dans lequel ils se retrouvent. Évidemment, le fait de ne pas avoir à remplacer les composantes du système après quelques années est un énorme avantage tant au niveau économique que social. Les propriétaires ne sont pas souvent enclins à investir des ressources humaines et matérielles dans des systèmes de chauffage.

Deux autres systèmes ont de très longues durées de vie, les plinthes électriques (40 ans) et les foyers à bois à haute efficacité (27,5 ans). Les capteurs thermiques à air et eau des systèmes de chauffage solaire thermique affichent une durée de vie intéressante (25 ans), mais des composantes comme le réservoir d'eau chaude et la pompe ont une durée de vie trop courte. Les systèmes géothermiques ont également une bonne durée de vie (22,5 ans) et après ce laps de temps, seule la pompe à chaleur est à changer et non pas tout le système, ce qui est avantageux.

4.7 Analyse comparative

Suite à l'étude et au classement de chacun des critères, l'analyse comparative comprenant tous les critères est nécessaire. Le tableau 4.7 assimile tous les précédents résultats pour déterminer le système ayant le plus faible impact environnemental à partir des données du coût économique, de l'émission de GES, de l'efficacité et de la durabilité. Pour se faire, toutes les données de normalisation sont additionnées et le plus petit total l'emporte.

Tableau 4.5 : Analyse comparative des critères d'évaluation des alternatives de chauffage

		Critère économique		Émissions de GES		Efficacité		Durabilité		TOTAL
		Montant (\$)	Normalisation (0 à 1)	Émissions (tonnes de CO ₂ é)	Normalisation (0 à 1)	Coefficient de performance	Normalisation (0 à 1)	Durée de vie (ans)	Normalisation (0 à 1)	
Plinthes électriques		14 558	0,62	3,34	1	1	0,11	40	0,42	2,15
Thermopompe à air		11 675	0,50	2,39	0,72	2 à 3	0,04	17,5	0,95	2,21
Chauffage radiant hydronique	Chaudière électrique	18 816	0,81	3,34	1	1	0,11	Tubulure : à vie Chaudière : 25	0,27	2,19
	Capteurs solaires thermiques à eau	13 417	0,58	0	0	0,80	0,14	Tubulure : à vie Réservoir: 10 Pompe : 15 Capteur thermique : 25	0,45	1,17
Géothermie		23 355	1	2,10	0,63	3 à 4	0,03	22,5	0,73	2,39

Tableau 4.5 : Analyse comparative des critères d'évaluation des alternatives de chauffage

		Critère économique		Émissions de GES		Efficacité		Durabilité		TOTAL
		Montant (\$)	Normalisation (0 à 1)	Émissions (tonnes de CO ₂ é)	Normalisation (0 à 1)	Coefficient de performance	Normalisation (0 à 1)	Durée de vie (ans)	Normalisation (0 à 1)	
Chauffage solaire passif	Système principal	12 500	0,54	0	0	0,63	0,18	Orientation et isolation : À vie Fenestration : 10	0,30	1,02
	Système secondaire	0	0	0	0	0,11	1	À vie	0,17	1,17
Chauffage solaire thermique	Capteurs à air	2 863	0,12	0	0	0,73	0,15	Réservoir d'eau chaude : 10 Pompe : 15	0,83	1,10
	Capteurs à eau	7 443	0,32	0	0	0,80	0,14	Capteur thermique : 25	1	1,46
Poêle à bois à haute efficacité		9 659	0,41	2,07	0,62	0,80	0,14	27,5	0,60	1,77
Foyer de masse		22 420	0,96	1,71	0,52	0,97	0,11	À vie	0,17	1,76

D'après l'analyse comparative, voici les systèmes ayant les meilleurs résultats en fonction des critères d'analyse :

1. Chauffage solaire passif comme système principal (1,02 / 4)
2. Chauffage solaire thermique avec capteurs à air (1,10 / 4)
3. Chauffage solaire passif comme système secondaire (1,17 / 4)
3. Chauffage radiant hydronique avec chauffage solaire thermique à capteurs à eau (1,17 / 4)
5. Chauffage solaire thermique avec capteurs à eau (1,46 / 4)
6. Foyer de masse (1,76 / 4)
7. Poêle à bois à haute efficacité (1,77 / 4)
8. Plinthes électriques (2,15 / 4)
9. Chauffage radiant hydronique avec chaudière électrique (2,19 / 4)
10. Thermopompe à air (2,21 / 4)
11. Géothermie (2,39 / 4)

Le chauffage solaire passif comme système principal est donc le grand gagnant, avec un score de 1,02 sur une possibilité de quatre. Cependant, ce type de système ne peut assumer à lui seul la charge de chauffage d'un bâtiment résidentiel moyen. Effectivement, même avec une excellente isolation de l'enveloppe de la maison et de la fenestration, le chauffage solaire passif ne peut fournir que 60 % des besoins de chauffage d'une résidence (Greenpeace, 2011).

Partager la charge de chauffage avec un autre système devient donc essentiel. Le chauffage solaire thermique avec capteurs à air arrive en deuxième position, mais est également dépendant du rayonnement solaire et de son approvisionnement inconstant. Le chauffage radiant hydronique avec chauffage solaire thermique à capteurs à eau (3^e place) et le chauffage solaire thermique avec capteurs à eau (5^e place) connaissent la même problématique. Pour combler la charge de chauffage lors des périodes sans ensoleillement, il faut donc se tourner vers les solutions de chauffage à base de biomasse, le foyer de masse et le poêle à bois à haute efficacité. Ces deux alternatives ont récoltées pratiquement le même nombre de points dans l'analyse, si bien qu'ils sont tous les deux viables, mais pour différentes raisons. Effectivement, comparativement au poêle à bois, le foyer de masse coûte beaucoup plus cher à l'achat, mais est plus efficace, si bien que ses émissions de GES sont plus basses. De plus, sa durée de vie est équivalente à celle du bâtiment, alors que le poêle demande un remplacement après plus ou moins 30 ans. Cependant, tous les poêles à bois seront

interdits d'ici 2020 sur l'Île de Montréal si bien que pour cette région, une autre technologie doit être considérée. Deux recommandations sont alors possibles :

Bâtiments résidentiels à Montréal :

Chauffage solaire passif + Chauffage solaire thermique avec capteurs à air + Plinthes électriques.

Bâtiments résidentiels à l'extérieur de Montréal :

Chauffage solaire passif + Chauffage solaire thermique avec capteurs à air + Foyer de masse ou Poêle à bois à haute efficacité.

5. ANALYSE COMPARATIVE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES ALTERNATIVES D'ISOLATION

La présente section a pour but d'évaluer les différentes alternatives d'isolation retenues à l'aide d'une analyse comparative. Celle-ci permet une évaluation en tenant compte de plusieurs critères. Les critères seront d'abord évalués individuellement, puis les données seront rassemblées pour analyse en section 5.7. La majorité des données sont de nature quantitative. Celles-ci seront classées de la meilleure alternative à la pire pour chaque critère. Une pondération des données aurait pu être possible, mais les quatre critères sont tous importants. Tous les critères (économique, émission de gaz à effet de serre, énergie grise et efficacité) seront évalués pour les huit alternatives présentées en section 3.

5.1 Limites

La présente étude présente des limites. Effectivement, tous les critères sont évalués pour un seul type de dimension. Or, pratiquement toutes les constructions sont uniques et d'autres dimensions d'isolation pourraient faire varier les résultats. Si vous utilisez le présent document pour choisir un matériel isolant, vous devriez adapter l'analyse à votre construction, sans quoi les données pourraient être erronées.

5.2 Critères économiques

Le coût des alternatives est le premier critère à évaluer. En tant que tel, le coût monétaire n'a pas d'impact environnemental. Cependant, si une alternative a un coût trop élevé, peu d'utilisateurs auront les moyens de l'utiliser. Donc, en plus d'exceller par rapport aux autres critères portant sur l'environnement, la meilleure alternative se devra d'être abordable. Le coût économique sera calculé comme étant le coût d'achat (montants en dollars canadiens en 2013) d'un mètre carré d'isolant ayant une valeur R d'approximativement 20. Cette valeur de résistance thermique a été choisie, car les normes du Code de construction du Québec de 1983 à août 2012 obligeaient les murs extérieurs à avoir une valeur R de 19 (Fauteux, 2013).

Laine minérale

Les laines minérales sont souvent utilisées en construction conventionnelle en raison de leur prix et de leur disponibilité. Les panneaux isolants Roxul de verre et de roche coutaient respectivement 9,69 et 16,15 \$ / m² en 2012 (Fauteux, 2012). Comme les données requises pour l'analyse comparative sont en dollars canadiens de 2013, une conversion doit être effectuée. Ces montants représentent 9,79 et 16,32 \$ / m² en dollars de 2013 (Banque du Canada, 2013a).

Laine naturelle

Tel que mentionné auparavant, une seule compagnie propose des produits à base de laine naturelle au Québec : la compagnie américaine *Good Shepherd Wool Insulation*. Leurs panneaux WEKA se vendent à un prix de 2,66 \$ / pi², ce qui équivaut à 28,63 \$ / m² (Good Shepherd Wool Insulation, s. d.b). Cette donnée est cependant en dollars américains de 2013, ce qui demande également une conversion :

Coût USD * Taux de change septembre 2013 (Banque du Canada, 2013b) = Coût CAN

$$28,63 \$ * 1,03424000 = 29,61 \$$$

Coton

Le magasin ontarien Eco Building Resource offre les panneaux UltraTouch de 0,14 cm (5,5 po) x 0,41 m (16,25 po) x 2,39 m (94 po) à un prix de 88,35 \$ pour six morceaux (Eco Building Resource, s. d.). À partir de ces informations, il est possible de déterminer le coût par mètre carré :

Largeur de l'isolant * Longueur de l'isolant = Surface occupée par l'isolant

$$0,41 \text{ m} * 2,39 \text{ m} = 0,98 \text{ m}^2 \text{ dwdw}$$

Surface occupée par l'isolant * Nombre de morceaux = Surface totale

$$0,98 \text{ m}^2 * 6 = 5,88 \text{ m}^2$$

Prix / Surface = Coût final

$$88,35 \$ / 5,88 \text{ m}^2 = 15,03 \$ / \text{m}^2$$

Cellulose

La cellulose à une très bonne disponibilité. Il est possible de faire installer la cellulose soufflée et giclée par les professionnels de chez Benolec pour un prix de 13,99 \$ / m² (1,30 \$ / pi²) et 12,91 \$ / m² (1,20 \$ / pi²) (Martin, 2013). Comme la valeur retenue pour l'analyse est le prix de l'isolant sans installation, ces coûts doivent être réduits d'approximativement 25 % :

Coûts comprenant l'installation * facteur = Coûts de l'isolant

$$13,99 \text{ \$ / m}^2 * 0,75 = 10,49 \text{ \$ / m}^2$$

$$12,91 \text{ \$ / m}^2 * 0,75 = 9,68 \text{ \$ / m}^2$$

Paille

À l'été 2013, Audrey Roy-Lavallée et Sébastien Bergeron construisaient leur maison de rêve à l'aide de la technique GREB. À l'aide des données fournies par leur construction, il est possible d'estimer le coût par mètre carré pour les balles de foin (Roy-Lavallée, 2013) :

Coût des balles de foin / Surface des murs = Coût

$$((500 \text{ balles de foin} * 4 \text{ \$}) + 500 \text{ \$ livraison}) / (((9,75 * 4,88 \text{ m}) * 2) + ((11,58 * 4,88 \text{ m}) * 2))$$

$$2 \text{ 500 \$} / (95,16 + 113,02 \text{ m}^2)$$

$$12,01 \text{ \$ / m}^2$$

Cependant, le critère comparatif est pour une valeur R de 20 alors que les balles de paille fournissent une valeur de résistance thermique de 30 (voir section 5.5). Le coût par mètre carré doit donc être multiplié par 0,66 (2/3), ce qui donne un coût final de 8,01 \$ / m².

Chanvre

Le coût pour un mètre carré d'isolant est complexe à calculer pour la technique Canalliance. Effectivement, celle-ci utilise le même matériel pour construire un bloc uniforme de mur extérieur, si bien qu'il est impossible de calculer le coût exact de l'isolant. En auto construction (donc sans main-d'œuvre), le coût de construction d'un mur à l'aide de la technique est approximativement de 215,25 \$ / m² (20\$ / pi²) (Archibio, s. d.). Cependant, la finition et le matériel non isolant sont inclus

dans ce montant, ce qui peut représenter 75 % de la facture. De plus, le critère comparatif est pour une valeur R de 20 alors que les murs Canalliance fournissent une valeur de résistance thermique de 25 (voir section 5.5). Le coût par mètre carré doit donc être multiplié par 0,8 (4/5) :

$$\begin{aligned} & (\text{Coût de construction – finition}) * \text{facteur} = \text{Coût pour analyse} \\ & ((215,25 \$ / \text{m}^2) / 4) * 0,8 \\ & 43,05 \$ / \text{m}^2 \end{aligned}$$

Pour ce qui est des panneaux NaturChanvre, ceux-ci coûtaient 21,42 \$ / m² en 2012 (Fauteux, 2012). Comme les données requises pour l'analyse comparative sont en dollars canadiens de 2013, une conversion doit être effectuée. Ce montant représente 21,65 \$ / m² en dollars de 2013 (Banque du Canada, 2013a).

5.3 Émission de gaz à effet de serre

Le deuxième critère à évaluer est la quantité de GES (H₂O, CO₂, CH₄, CFC, N₂O, etc.) émis par les différentes alternatives d'isolation. Les GES sont vitaux pour les cycles climatiques sur la planète, car ils retiennent une partie de la radiation infrarouge émise par celle-ci. En effet, en contact avec les GES, les rayons infrarouges se transforment en énergie cinétique. Sans gaz à effet de serre, la température moyenne de la planète chuterait de 15 à - 8 °C (Olivier, 2009). Cependant, la concentration atmosphérique des différents GES ne cesse d'augmenter depuis le début de l'ère industrielle. Effectivement, la concentration atmosphérique de CO₂ est passée de 280 à 379 ppm entre le début de l'ère industrielle et 2005. Même constat au niveau du CH₄ et du N₂O, qui sont passés respectivement de 715 à 1 774 ppb et 270 à 319 ppb pour la même période (GIEC, 2007). Cela a pour effet de réchauffer la planète : les dix années ayant les plus hautes températures ont toutes été enregistrées depuis 1998 (Agence France-Presse, 2013). Pour éviter un réchauffement plus élevé que deux °C, sans quoi les conséquences du changement climatique augmenteraient drastiquement (CCNUCC, 2009), les émissions de gaz à effet de serre des différents matériaux isolants intégrés aux bâtiments résidentiels doivent être limitées.

Le présent critère à évaluer sera calculé comme étant les émissions de GES résultant de la production d'un kilogramme de matériel isolant. À noter que selon la position de l'utilisateur, ces

données peuvent varier, car elles proviennent en majorité de la base de données autrichienne Baubook (Olivia et Courgey, 2011).

Laine minérale

Les laines minérales demandent une grande quantité d'énergie et donc d'émission de GES lors de leur production. Effectivement, tel qu'expliqué en section 3.1.1, les matériaux sont soumis à de hautes températures pour que ceux-ci entrent en fusion et pour stabiliser les fibres. En fait, la production de laines minérales de verre et de roche émettent respectivement 10,17 et 9,35 kg CO₂ é par kilogramme produit (Olivia et Courgey, 2011).

Laine naturelle

La laine naturelle, comme son nom l'indique, provient d'un procédé naturel. Des moutons sont élevés pour leur viande ou leur laine, et celle-ci est récoltée à certains intervalles. La laine utilisée en isolation représente beaucoup moins d'émission de GES que la laine utilisée dans le domaine du textile, parce que tous les types de laines peuvent être utilisés. Effectivement, certaines laines trop rudes ne peuvent être intégrées au textile. Pour cette raison, le bilan carbone de la laine naturelle est basse : 0,16 kg CO₂ é / kg (Olivia et Courgey, 2011).

Coton

La culture du coton n'occupe qu'environ 2,4% des terres arables du monde, mais consomme à elle seule 11% des pesticides et 25% des insecticides utilisés mondialement (SynAIRgis, 2007). C'est pourquoi les émissions de GES liées à la production de la matière sont aussi élevées : 6,78 kg CO₂ / kg (Hammond et Jones, 2008). Cependant, cette donnée représente le bilan carbone de la production du coton alors que l'isolant récupère du matériel qui serait envoyé dans un site d'enfouissement. Pour cette raison, les données disponibles pour des panneaux français de marque Métisse seront utilisées, car leurs compositions sont très semblables aux panneaux Blue Jeanious. La seule différence est la présence de laine dans le panneau (15 %). Le bilan carbone est moins élevé que le coton de l'industrie du coton, mais tout de même médiocre comparé à d'autres fibres naturelles ou recyclées : 1,80 kg CO₂ é / kg (Olivia et Courgey, 2011).

Cellulose

En raison de l'approvisionnement de la matière première (recyclage) et du faible bilan carbone de la cellulose (les végétaux sont des puits à carbone), l'émission de GES de la cellulose est négative, c'est-à-dire qu'elle contient plus de carbone que sa production n'en relâche. Le bilan carbone de la matière projetée et giclée est respectivement de - 5,46 et - 10,01 kg CO₂ é / kg (Olivia et Courgey, 2011).

Paille

Comme la laine naturelle et la cellulose, la paille provient d'un processus naturel. Tel que mentionné en section 3.5, la paille provient de la culture des céréales et est disponible presque partout. La paille, comme la cellulose, contient plus de carbone que sa production n'en relâche avec un bilan carbone de - 26,44 kg CO₂ é / kg (Olivia et Courgey, 2011).

Chanvre

Très peu d'études évaluent le bilan carbone ou énergétique du chanvre et celles-ci ne proviennent jamais d'Amérique. La technique Canalliance sera donc évaluée comme étant la chènevotte en vrac et les panneaux NaturChanvre seront considérés comme de la laine de chanvre pour les biens de l'étude. Les produits français de chènevotte en vrac et la laine de chanvre ont respectivement un bilan carbone de - 34,38 et - 0,78 CO₂ é / kg (Olivia et Courgey, 2011).

5.4 Énergie grise

Le troisième critère à évaluer est l'énergie grise, soit l'énergie consommée par la production des matériaux isolants (Hammond et Jones, 2008). Afin d'évaluer l'impact environnemental des différentes alternatives d'isolation, le critère est primordial, car la production de certains matériaux demande une quantité d'énergie considérable. Donc, un isolant très efficace diminue la charge de chauffage d'un bâtiment et cela résulte en une meilleure efficacité énergétique, mais celle-ci peut être négligeable dépendamment de l'énergie investie dans le processus de fabrication. L'énergie investie dans le processus de production provient de l'extraction de matières premières, le transport

de ces matières, le chauffage et l'éclairage des entrepôts, le fonctionnement des appareils de production, etc.

Le présent critère à évaluer sera calculé comme étant l'énergie investie (kWh) dans la production d'un kilogramme de matériel isolant. À noter que selon la position de l'utilisateur, ces données peuvent varier, car les données proviennent en majorité de la base de données autrichienne Baubook (Olivia et Courgey, 2011).

Laine minérale

Tel que mentionné auparavant, la production des laines minérales demande beaucoup d'énergie en raison des hautes températures des fours pour que les fibres entrent en fusion et se stabilisent. La laine minérale de verre demande beaucoup plus d'énergie : 62 kWh / kg, comparativement à la laine minérale de roche (37 kWh / kg) (Olivia et Courgey, 2011).

Laine naturelle

La laine naturelle de mouton demande une quantité relativement faible d'énergie lors de sa production. La majorité de celle-ci est consommée lors de la fabrication des panneaux, car la récolte de la laine se fait de façon simple. La fabrication d'un kilogramme d'isolant en laine naturelle consomme 16 kWh (Olivia et Courgey, 2011).

Coton

Les panneaux isolants à base de coton recyclé ont un bilan carbone élevé en comparaison avec les différentes alternatives à base de fibres végétales. Ce n'est donc pas une surprise de voir le même phénomène avec l'énergie grise. La fabrication d'un kilogramme d'isolant en laine naturelle consomme 53 kWh (Olivia et Courgey, 2011).

Cellulose

Comme pour le coton, les données d'émission de GES et d'énergie grise sont reliées. Cependant, contrairement à cette matière, la cellulose affiche un bon bilan. La cellulose giclée, en raison de

l'ajout de liant à base d'eau, affiche une énergie grise plus importante que la cellulose soufflée. La production d'un kilogramme de ces alternatives représente respectivement une énergie grise de 21 et 12 kWh (Olivia et Courgey, 2011).

Paille

La paille provient d'un processus obligatoire pour la récolte des céréales, si bien que son énergie grise est très faible : 5 kWh / kg (Olivia et Courgey, 2011).

Chanvre

Très peu d'études évaluent le bilan carbone ou énergétique du chanvre et celles-ci ne proviennent jamais d'Amérique. La technique Canalliance sera donc évaluée comme étant la chènevotte en vrac et les panneaux NaturChanvre seront considérés comme de la laine de chanvre pour les biens de l'étude. Produire un kilogramme de chènevotte en vrac et de laine de chanvre en France demande respectivement 6 et 52 kWh (Olivia et Courgey, 2011).

5.5 Efficacité

Le dernier critère à évaluer est l'efficacité des matériaux à empêcher le mouvement de la chaleur soit par conduction, convection ou radiation. Cette donnée est identifiée comme étant la valeur de résistance thermique (RSI), qui est le degré de résistance de l'isolant au flux de chaleur. Cette mesure est souvent utilisée en valeur impériale (R) (RSI utilise les valeurs internationales). Le critère est important à évaluer, car si un isolant à une faible valeur R, la chaleur traverse le bâtiment facilement et la charge de chauffage devient très importante (Ministère des Ressources naturelles, 2012). Évidemment, une haute charge de chauffage équivaut à beaucoup d'énergie et donc beaucoup d'argent. Le critère d'efficacité sera évalué comme étant la valeur de résistance thermique R pour une épaisseur de 0,03 m (1 po) de matériel isolant.

Laine minérale

Les panneaux de laine minérale sont reconnus pour leur excellente résistance au flux de chaleur. De façon générale, les laines minérales de verre et de roche ont des valeurs R allant respectivement de

2 à 4,5 et 3,7 à 4,3 R / po (BuildingGreen, 2012). Pour avoir des valeurs plus précises, la valeur R des produits du fabricant Roxul sont utilisés dans l'analyse. Les deux produits (verre et roche) ont une épaisseur de 14 cm (5,5 po) et respectivement une valeur R de 18 et 19,25 (Fauteux, 2012). À partir de ces données, il est possible de déterminer les valeurs R pour 1 po d'isolant :

Valeur R totale / Épaisseur = Valeur R pour un po

$$18 \text{ R} / 5,5 \text{ po} = 3,27 \text{ R} / \text{po}$$

$$19,25 \text{ R} / 5,5 \text{ po} = 3,5 \text{ R} / \text{po}$$

Laine naturelle

De façon générale, les panneaux de laine ont une valeur R allant de 3,7 à 4 R / po (BuildingGreen, 2012). Cependant, tel que mentionné auparavant, un seul panneau est disponible au Québec, le panneau WEKA. Le produit à une valeur R de 19 et une épaisseur de 13,34 cm (5,25 po) (Good Shepherd Wool Insulation, s. d.b). À partir de ces données, il est possible de déterminer la valeur R pour 1 po d'isolant :

Valeur R totale / Épaisseur = Valeur R pour un po

$$19 \text{ R} / 5,25 \text{ po} = 3,62 \text{ R} / \text{po}$$

Coton

De façon générale, les panneaux de coton ont une valeur R allant de 3,5 à 3,8 R / po (BuildingGreen, 2012). Les panneaux UltraTouch de Twin Maple Marketing ont une valeur R de 30 pour une épaisseur de 20,32 cm (8 po) (Twin Maple Marketing, s. d.). À partir de ces données, il est possible de déterminer les valeurs R pour 1 po d'isolant :

Valeur R totale / Épaisseur = Valeur R pour un po

$$30 \text{ R} / 8 \text{ po} = 3,75 \text{ R} / \text{po}$$

Cellulose

De façon générale, la cellulose a une valeur R allant de 3,6 à 3,8 R / po (BuildingGreen, 2012). Pour avoir encore une fois une valeur fiable d'un produit disponible au Québec, la valeur R de l'isolant cellulose Benotherme de Benolec sera utilisée. Celui-ci à une valeur R de 3,8 / po, pour les produits soufflés et giclés (Martin, 2013).

Paille

Afin de valider la technique GREB face au *Règlement modifiant le Code de construction pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels* adopté en août 2012, un essai de performance thermique a été réalisé pour un mur isolé à la paille. Le test, réalisé au printemps 2013, a déterminé qu'un mur réalisé à l'aide de la technique GREB avait une valeur R de 30 (Fauteux, 2013b). Comme ces murs ont une épaisseur de 40,64 cm (16 po), la valeur R pour 1 pouce d'isolant est facilement calculable :

$$\begin{aligned} \text{Valeur R totale} / \text{Épaisseur} &= \text{Valeur R pour un po} \\ 30 \text{ R} / 16 \text{ po} &= 1,88 \text{ R} / \text{po} \end{aligned}$$

Chanvre

Également afin de valider la technique Canalliance face au *Règlement modifiant le Code de construction pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels* adopté en août 2012, un essai de performance thermique a été réalisé pour ce mur. Le test a déterminé qu'un mur réalisé à l'aide de cette technique avait une valeur R de 25 (Gauthier, 2013). Comme ces murs ont une épaisseur de 30,48 cm (12 po), la valeur R pour 1 pouce d'isolant est facilement calculable :

$$\begin{aligned} \text{Valeur R totale} / \text{Épaisseur} &= \text{Valeur R pour un po} \\ 25 \text{ R} / 12 \text{ po} &= 2,08 \text{ R} / \text{po} \end{aligned}$$

Concernant les panneaux de chanvre NaturChanvre, ceux-ci ont une valeur R de 18,5 pour une épaisseur de 14 cm (5,5 po) (Fauteux, 2012). À partir de ces données, il est possible de déterminer la valeur R pour 1 pouce d'isolant :

$$\text{Valeur R totale} / \text{Épaisseur} = \text{Valeur R pour un po}$$

18,5 R / 5,5 po = 3,36 R / po

5.6 Résultats

La présente section a pour but de résumer les résultats de l'analyse des quatre critères (coûts économiques, émission de GES, énergie grise et efficacité) dans le but de rendre l'information plus facilement compréhensible. À partir des données, le classement et la normalisation permettront la quantification utile à l'analyse comparative. En effet, la normalisation des données permet une comparaison numérique, car toutes les données sont transformées dans un axe de un à zéro, où les meilleurs résultats sont de zéro et les pires, de un.

Coûts économiques

Le coût des diverses alternatives d'isolation a été calculé en section 5.2. Ceux-ci représentaient le coût d'achat incluant les taxes (dollars canadiens en 2013). Ces coûts et le classement des performances sont résumés par le tableau 5.6.1.

Tableau 5.1 : Classement et normalisation des alternatives d'isolation selon le coût économique

Alternatives		Coût économique (\$ / m ²)	Classement (1 à 9)	Normalisation (0 à 1)
Laine minérale	De verre	9,79	3	0,23
	De roche	16,32	6	0,38
Laine naturelle		29,61	8	0,69
Coton		15,03	5	0,35
Cellulose	Soufflée (sec)	10,49	4	0,24
	Giclée (humide)	9,68	2	0,23
Paille		8,01	1	0,19
Chanvre	Canalliance	43,05	9	1
	Panneaux NaturChanvre	21,65	7	0,50

Après avoir analysé les différents coûts, il est aisé de constater que plusieurs matériaux isolants sont abordables. Effectivement, six des neuf alternatives coûtent moins de 20 \$ par mètre carré pour un facteur de résistance thermique d'environ R-20. Les meilleures alternatives se trouvent à être la paille (8,01 \$ / m²), la cellulose giclée (9,68 \$ / m²), la laine minérale de verre (9,79 \$ / m²) et la cellulose soufflée (10,49 \$ / m²).

Trois matériaux isolants sont objectivement trop onéreux à utiliser si le seul critère considéré est le coût économique : la laine naturelle (29,61 \$ / m²) et les deux isolants en chanvre (43,05 \$ / m² et 21,65 \$ / m²). Ces derniers ont cependant des bons bilans de GES et d'énergie grise (voir tableaux 5.6.2 et 5.6.3), si bien qu'il est pertinent de continuer à les considérer dans l'analyse.

Émission de gaz à effet de serre

Les émissions de GES provenant de la production des différentes alternatives d'isolation ont été identifiées en section 5.3. Ces émissions et le classement des performances sont résumés par le tableau 5.6.2. Le calcul de normalisation doit être transformé pour les données d'émission de GES, car plusieurs d'entre elles sont négatives et rendent l'opération impossible. Pour pallier à ceci, toutes les données seront additionnées de 35 kg CO₂ é / kg.

Après analyse des différents bilans carbone affichés par les alternatives, il est aisé de constater que certaines de celles-ci performant très bien. Effectivement, la production d'un kilogramme d'isolant en chanvre (Canalliance et panneaux NaturChanvre), de paille et de cellulose (soufflée et giclée) permet la séquestration d'une quantité non négligeable de GES. La technique Canalliance, qui utilise la chènevotte en vrac, a le meilleur bilan carbone avec une séquestration de 34,38 kg d'équivalent CO₂. La paille et la cellulose giclée sont également des choix intéressants, avec une séquestration de respectivement 26,44 et 10,01 kg d'équivalent CO₂. Il est également intéressant de noter que la laine naturelle ne séquestre pas de carbone, mais en rejette très peu (0,1g kg CO₂ é).

La performance des panneaux de coton recyclé est quelque peu décevante avec une émission de 1,80 kg d'équivalent CO₂, mais cela est tout de même peu en comparaison du bilan carbone des laines minérales. En effet, les laines minérales de verre et de roche émettent respectivement 10,17 et 9,35 kg d'équivalent CO₂ pour la production d'un seul kg d'isolant. Cependant, d'autres matériaux

non couverts par la présente analyse affichent un bilan carbone encore pire. Le polystyrène extrudé et le polyuréthane ont un bilan carbone de respectivement 22,02 et 16,36 kg CO₂ / kg (Olivia et Courgey, 2011).

Tableau 5.2 : Classement et normalisation des alternatives d'isolation selon l'émission de gaz à effet de serre

Alternatives		Émission de GES (kg CO ₂ é / kg)	Classement (1 à 9)	Normalisation (0 à 1)
Laine minérale	De verre	10,17	9	1
	De roche	9,35	8	0,98
Laine naturelle		0,16	6	0,78
Coton		1,80	7	0,82
Cellulose	Soufflée (sec)	- 5,46	4	0,65
	Giclée (humide)	- 10,01	3	0,55
Paille		- 26,44	2	0,19
Chanvre	Canalliance	- 34,38	1	0,01
	Panneaux NaturChanvre	- 0,78	5	0,76

Énergie grise

L'énergie grise ayant été consommée lors de la production des différentes alternatives d'isolation a été calculée en section 5.4. Ces quantités et le classement des performances sont résumés par le tableau 5.6.3.

Les données du bilan carbone et énergétique sont intimement liées. Ce n'est donc pas une surprise de voir les fibres végétales avoir les meilleurs résultats encore une fois. La production d'un kg de paille, de chènevotte en vrac (Canalliance) et de cellulose soufflée ne requiert que seulement 5, 6 et 12 kWh. La laine naturelle, avec une consommation de 16 kWh / kg est également un choix intéressant.

Les isolants consommant beaucoup d'énergie lors de leur production sont la laine minérale de verre, les panneaux de coton recyclé et les panneaux NaturChanvre avec la consommation de respectivement 62, 53 et 52 kWh / kg. Comme c'était le cas avec les émissions de GES, d'autres isolants non couverts par l'analyse ont des bilans énergétiques encore pires. C'est le cas du polystyrène extrudé et du polyuréthane qui consomment 181 et 115 kWh d'énergie pour la production d'un kg d'isolant (Olivia et Courgey, 2011).

Tableau 5.3 : Résumé de l'énergie grise des différentes alternatives d'isolation et le classement en résultant

Alternatives		Énergie grise (kWh / kg)	Classement (1 à 9)	Normalisation (0 à 1)
Laine minérale	De verre	62	9	1
	De roche	37	6	0,60
Laine naturelle		16	4	0,26
Coton		53	8	0,86
Cellulose	Soufflée (sec)	12	3	0,19
	Giclée (humide)	21	5	0,34
Paille		5	1	0,08
Chanvre	Canalliance	6	2	0,10
	Panneaux NaturChanvre	52	7	0,84

Efficacité

L'efficacité des différentes alternatives d'isolation a été déterminée en section 5.4. Ces données et le classement des performances sont résumés par le tableau 5.6.4. Jusqu'ici, pour la normalisation, toutes les meilleures performances affichaient les données les plus basses. Or, au niveau de l'efficacité, les meilleures alternatives affichent la plus haute valeur, soit la plus grande valeur de résistance thermique. Les valeurs inverses ($1 / x$) devront donc être utilisées pour la normalisation.

Tableau 5.4 : Résumé de l'efficacité des différentes alternatives d'isolation et le classement en résultant

Alternatives		Efficacité (R / po)	Inversion (1 / (R / po))	Classement (1 à 8)	Normalisation (0 à 1)
Laine minérale	De verre	3,27	0,3058	6	0,58
	De roche	3,5	0,2857	4	0,54
Laine naturelle		3,62	0,2762	3	0,52
Coton		3,75	0,2667	2	0,50
Cellulose	Soufflée (sec)	3,8	0,2632	1	0,50
	Giclée (humide)				
Paille		1,88	0,5319	8	1
Chanvre	Canalliance	2,08	0,4808	7	0,90
	Panneaux NaturChanvre	3,36	0,2976	5	0,56

La majorité des isolants analysés ont une efficacité semblable, soit une valeur de résistance R entre 3 et 4. Seuls les isolants chanvre Canalliance et la paille ont une efficacité moindre (respectivement de 2,08 et 1,88). Ces résultats semblent indiquer que le critère est plus ou moins important à considérer pour les matériaux ayant au moins une valeur R de trois par pouce d'épaisseur. Il est à noter que tous les isolants analysés, malgré leur meilleur bilan carbone et énergétique, sont moins efficaces que les isolants synthétiques. Le polyuréthane soufflé, par exemple, affiche habituellement une résistance thermique de 6 à 6,8 R (BuildingGreen, 2012).

5.7 Analyse comparative

Suite à l'étude et au classement de chacun des critères, l'analyse comparative comprenant tous les critères est nécessaire. Le tableau 5.7 assimile tous les précédents résultats pour déterminer le matériel isolant ayant le plus faible impact environnemental à partir des données du coût économique, de l'émission de GES, de l'énergie grise et de l'efficacité. Pour se faire, toutes les données de normalisation sont additionnées et le plus petit total l'emporte.

Tableau 5.5 : Analyse comparative des critères d'évaluation des alternatives d'isolation

		Critère économique		Émissions de GES		Énergie grise		Efficacité		TOTAL
		Montant (\$ / m ²)	Normalisation (0 à 1)	Émissions (tonnes de CO ₂ é / kg)	Normalisation (0 à 1)	Énergie (kWh / kg)	Normalisation (0 à 1)	Résistance thermique (R)	Normalisation (0 à 1)	
Laine minérale	De verre	9,79	0,23	10,17	1	62	1	3,27	0,58	2,81
	De roche	16,32	0,38	9,35	0,98	37	0,60	3,5	0,54	2,50
Laine naturelle		29,61	0,69	0,16	0,78	16	0,26	3,62	0,52	2,25
Coton		15,03	0,35	1,80	0,82	53	0,86	3,75	0,50	2,53
Cellulose	Soufflée (sec)	10,49	0,24	- 5,46	0,65	12	0,19	3,8	0,50	1,58
	Giclée (humide)	9,68	0,23	- 10,01	0,55	21	0,34			1,62

Tableau 5.5 : Analyse comparative des critères d'évaluation des alternatives d'isolation

		Critère économique		Émissions de GES		Énergie grise		Efficacité		TOTAL
		Montant (\$ / m ²)	Normalisation (0 à 1)	Émissions (tonnes de CO ₂ é / kg)	Normalisation (0 à 1)	Énergie (kWh / kg)	Normalisation (0 à 1)	Résistance thermique (R)	Normalisation (0 à 1)	
Paille		8,01	0,19	- 26,44	0,19	5	0,08	1,88	1	1,46
Chanvre	Technique Canalliance	43,05	1	- 34,38	0,01	6	0,10	2,08	0,90	2,01
	Panneaux	21,65	0,50	- 0,78	0,76	52	0,84	3,36	0,56	2,66

D'après l'analyse comparative, voici les matériaux isolants ayant les meilleurs résultats en fonction des critères d'analyse :

1. Paille (1,46 / 4)
2. Cellulose soufflée (1,58 / 4)
3. Cellulose giclée (1,62 / 4)
4. Chanvre (technique Canalliance) (2,01 / 4)
5. Laine naturelle (2,25 / 4)
6. Laine minérale de roche (2,50 / 4)
7. Coton (2,53 / 4)
8. Chanvre (panneaux NaturChanvre) (2,66 / 4)
9. Laine minérale de verre (2,81 / 4)

Il est aisé de constater que les trois premiers isolants démontrent un bien meilleur score que les autres alternatives. Effectivement, le chanvre Canalliance (4^e position) récolte 0,39 points de plus que la cellulose giclée (3^e position). Cependant, certains isolants ne peuvent pas être utilisés sur toutes les surfaces d'un bâtiment résidentiel. L'utilisation de la paille, l'isolant ayant le meilleur bilan environnemental, n'est pas conseillé pour la toiture (problématique : poids) et sous la dalle de béton (problématique : décomposition). La cellulose soufflée, quant à elle, peut être utilisée pour l'isolation de la toiture, mais pas pour la dalle de béton, pour la même raison (Martin, 2013). Trois recommandations sont alors possibles :

Isolation de la fondation: Laine minérale de roche

Isolation des murs intérieurs et extérieurs : Paille ou Cellulose soufflée

Isolation de la toiture: Cellulose soufflée

L'isolation des murs extérieurs en paille selon la technique GREB semble donc l'alternative à utiliser, car en plus de son excellent bilan carbone, énergétique et monétaire, celle-ci n'utilise que des matériaux naturels. Cependant, ces murs ne pourront avoir une résistance thermique supérieure à R-30. La construction d'un mur ayant une résistance thermique limitée va à l'encontre des résultats de l'analyse des solutions de chauffage (section 4), car le chauffage solaire passif demande une isolation supérieure. Pour cela, la construction de murs à double ossature (voir section 6.1) isolés avec la cellulose soufflée est recommandée.

6. ANALYSE POUR D'AUTRES TYPES DE BÂTIMENTS

Les analyses comparatives des alternatives de chauffage (section 4) et des matériaux isolants (section 5) ont été réalisées pour la construction d'un bâtiment résidentiel moyen. Les alternatives affichant le meilleur impact environnemental ont donc été identifiées pour ce type de bâtiment seulement. Or, tous les bâtiments sont uniques et il serait intéressant de pousser l'analyse à d'autres constructions pertinentes. Deux autres types de bâtiment seront analysés dans la présente section : les bâtiments résidentiels hyper-isolés et les immeubles à logements. Effectivement, les conclusions de la section 4, où l'utilisation du chauffage solaire passif prime, dictent l'utilisation d'une hyper-isolation. De plus, les immeubles à logements (incluant les condominiums) permettent une densification de l'habitation.

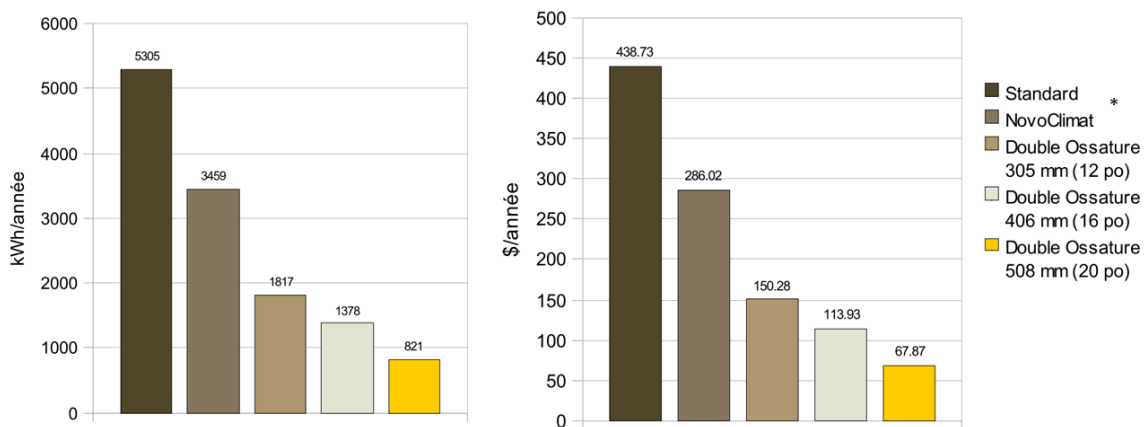
La section 6, contrairement aux sections 4 et 5 où tous les critères étaient analysés, consiste en une discussion portant sur les différences entre les constructions et l'identification des meilleures alternatives de chauffage et d'isolation applicables à celles-ci.

6.1 Bâtiments résidentiels hyper-isolés

Devant l'incertitude de la hausse des prix de l'énergie ou des possibles pannes d'électricité, un bâtiment bien isolé fait tout son sens. Devant ces problématiques, certains constructeurs écologiques munissent leurs bâtiments résidentiels d'une hyper-isolation, soit une isolation largement supérieure à celle des murs extérieurs conventionnels. Cela est rendu possible grâce à la technique du mur à double ossature, qui ressemble beaucoup à un mur traditionnel en bois, mais qui augmente l'espace entre les rangées de poteaux. Pour un mur conventionnel, l'espace choisie est d'habituellement de 15,24 cm (6 po) ou 20,32 cm (8 po) alors que l'espacement des murs à double ossature peut aller de 24,13 cm (9 ½ po) à 50,8 cm (20 po). Cet espace supplémentaire est rempli par du matériel isolant, ce qui augmente de beaucoup sa résistance thermique. Effectivement, un mur conventionnel peut maximalement atteindre une valeur de R-35 alors qu'un mur à double ossature peut atteindre une valeur de R-71 avec de la cellulose soufflée. Il est à noter que pour obtenir une efficacité énergétique optimale, le toit et les fenêtres doivent également avoir une haute valeur de résistance thermique (Archibio, 2011).

6.1.1 Évaluation économique

L'utilisation de murs à double ossature, en raison de l'augmentation de la résistance thermique, réduit la charge de chauffage du bâtiment. Effectivement, un mur à double ossature de 50,8 cm consomme approximativement 6,5 fois moins d'énergie en une année qu'un mur construit avec les normes d'isolation entre 1983 et 2012 (821 et 5305 kWh / année). Comparativement à un mur respectant les nouvelles normes d'isolation obligées par le Code de construction du Québec, le même mur à double ossature consomme 4,2 fois moins d'énergie (821 et 3459 kWh / année). Pour une maison alimentée par Hydro-Québec en 2011, cette diminution de la charge de chauffage se traduisait en une économie de 370,86 et 218,15 \$ par année pour ces murs. Tous les détails sont résumés en figure 6.1.



* La figure datant de 2011, les termes « Standard » et « Novoclimat » représentent en 2013, respectivement, les normes d'isolation du Code de construction du Québec de 1983 à 2012 et les nouvelles normes d'isolation du Code de construction du Québec (depuis août 2012).

Figure 6.1 : Consommation d'énergie et coûts attribuables aux murs hors-sol annuellement au Québec (tiré d'Archibio, 2011)

En Section 4.2, le coût de chauffage annuel d'une maison moyenne construite selon les normes en 1990 et utilisant les plinthes électriques était de 790 \$. À l'aide des données de la figure 6.1, il est possible de calculer ce coût pour une maison munie de murs à double ossature de 50,8 cm :

Coût de chauffage * facteur = Coût de chauffage pour maison munie de murs à double ossature
 $790 \$ / \text{année} * 0,1547 = 122,21 \$ / \text{année}$

Répartis sur 10 ans, ces deux scénarios représentent un investissement pour le fonctionnement de respectivement 7 900 et 1 222,10 \$, ce qui donne une différence de coût de 6 677,90 \$. Afin d'évaluer si le recours à une hyper-isolation est viable, une analyse de coût est pertinente. Pour la construction de 4 murs extérieurs (bâtiment de 12 x 9,25 mètres, hauteur de 2,44 mètres), la différence de coût est la suivante :

Longueur du bâtiment * hauteur du bâtiment = Superficie du 1^{er} mur
 $12 \text{ m} * 2,44 \text{ m} = 29,28 \text{ m}^2$

Largeur du bâtiment * hauteur du bâtiment = Superficie du 2^e mur
 $9,25 \text{ m} * 2,44 \text{ m} = 22,57 \text{ m}^2$

(Superficie du 1^{er} mur * Nombre) + (Superficie du 2^e mur * Nombre) = Superficie totale
 $(29,28 \text{ m}^2 * 2) + (22,57 \text{ m}^2 * 2) = 103,70 \text{ m}^2$

Superficie * Coût unitaire pour mur conventionnel = Coût conventionnel
 $103,70 \text{ m}^2 * 13,99 \$ / \text{m}^2 = 1 450,76 \$$

Superficie * Coût unitaire pour mur à double ossature de 20 po (Martin, 2013) = Coût pour mur à double ossature
 $103,70 \text{ m}^2 * 26,91 \$ / \text{m}^2 = 2 790,57 \$$

Le coût pour isoler avec de la cellulose soufflée les murs conventionnels est donc de 1 450,76 \$, comparativement à 2 790,57 \$ pour les murs à double ossature de 20 pouces. Cela représente un surplus de coûts de 1 339,81 \$. Le nombre d'années pour rembourser l'investissement est facilement calculable :

Surplus monétaire payé / économies annuelles = Retour sur l'investissement
 $1 339,81 \$ / 667,79 \$ / \text{année} = 2,01 \text{ années}$

L'argent supplémentaire investi pour l'isolation supplémentaire sera donc remboursé en à peine 2 années grâce aux économies d'énergie. Si, en plus de l'isolation supérieure procurée par les murs à double ossature, le bâtiment résidentiel profite du chauffage solaire passif, l'avantage économique pourrait être encore plus intéressant. Effectivement, l'utilisation du chauffage solaire passif peut combler de 50 à 60 % des besoins en chaleur d'un bâtiment résidentiel (Greenpeace, 2011). En utilisant la valeur médiane (55 %), le calcul devient le suivant :

Coût de chauffage pour maison munie de murs à double ossature * facteur = Coût de chauffage total
 $122,21 \text{ \$ / année} * 0,55 = 67,22 \text{ \$ / année}$

Surplus monétaire payé / économies annuelles = Retour sur l'investissement
 $1\ 339,81 \text{ \$} / 722,78 \text{ \$ / année} = 1,85 \text{ année}$

Toujours pour l'exemple, le coût supplémentaire à l'achat pour l'isolation supérieure serait remboursé après seulement 22 mois. Après cette courte période de temps, le bâtiment aura toujours une très petite charge de chauffage et les utilisateurs continueront d'épargner. Ceux-ci devront déboursé à peine 672,20 \$ en dix ans!

6.1.2 Évaluation de l'émission de gaz à effet de serre et de l'énergie grise

L'hyper-isolation d'un bâtiment est donc viable financièrement, mais est-ce également le cas pour l'émission de GES et l'énergie grise? Ces deux facteurs influencent directement l'impact environnemental d'un bâtiment et il est donc vital de les évaluer. Effectivement, l'énergie grise et l'émission de GES occasionnées par la production de la quantité d'isolant supplémentaire utilisée doivent être inférieures aux économies procurées par l'hyper-isolation. Autrement, le processus deviendrait inutile.

L'analyse consistera en la comparaison de 4 murs extérieurs (bâtiment de 12 x 9,25 mètres) construits à l'aide de techniques conventionnelles (épaisseur : 0,15 m (6 pouces)) et de la technique de double ossature (épaisseur : 0,51 m (20 pouces)). Tous les murs auront pour isolation de la cellulose soufflée de Benolec. La première étape consiste à calculer le volume d'isolant nécessaire pour tous les murs :

Murs conventionnels :

Longueur * Largeur * Hauteur = Volume

$$12 \text{ m} * 0,15 \text{ m} * 2,44 \text{ m} = 4,46 \text{ m}^3$$

$$9,25 \text{ m} * 0,15 \text{ m} * 2,44 \text{ m} = 3,44 \text{ m}^3$$

Mur 1 + Mur 2 + Mur 3 + Mur4 = Volume total

$$4,46 \text{ m}^3 + 4,46 \text{ m}^3 + 3,44 \text{ m}^3 + 3,44 \text{ m}^3 = 15,8 \text{ m}^3$$

Murs à double ossature :

Longueur * Largeur * Hauteur = Volume

$$12 \text{ m} * 0,51 \text{ m} * 2,44 \text{ m} = 14,87 \text{ m}^3$$

$$9,25 \text{ m} * 0,51 \text{ m} * 2,44 \text{ m} = 11,47 \text{ m}^3$$

Mur 1 + Mur 2 + Mur 3 + Mur4 = Volume total

$$14,87 \text{ m}^3 + 14,87 \text{ m}^3 + 11,47 \text{ m}^3 + 11,47 \text{ m}^3 = 52,68 \text{ m}^3$$

Volume murs à double ossature – Volume murs conventionnels = Différence de volume

$$52,68 \text{ m}^3 - 15,8 \text{ m}^3 = 36,88 \text{ m}^3$$

Comme la cellulose soufflée Benolec est injectée à une densité de 3,0 lbs / pi³, il devient possible de calculer la quantité exacte d'isolation supplémentaire (Benolec, s. d.a) :

Produit croisé (1 pi³ = 0.028316846592 m³)

$$3,0 \text{ lbs pour } 0.028316846592 \text{ m}^3$$

$$105,94 \text{ lbs pour } 1 \text{ m}^3$$

$$48,05 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Différence de volume * Poids de l'isolant = Poids de l'isolation supplémentaire

$$36,88 \text{ m}^3 * 48,05 \text{ kg} / \text{m}^3 = 1772,08 \text{ kg}$$

Comme la production de cellulose soufflée séquestre plus de carbone qu'elle n'en rejette (voir Tableau 5.6.2), l'utilisation de plus de matériel isolant n'est pas problématique. Dans un contexte de réchauffement climatique, cette pratique est même positive. Comme la production d'un kilogramme

de cellulose soufflée séquestre 5,46 kilogrammes en équivalent CO₂, l'utilisation de murs à double ossature pour une maison de 111 m² pourra séquestrer pas moins de 9675,56 kg CO₂ é. Cela équivaut à 9,7 tonnes en équivalent CO₂. Au niveau des émissions de GES, l'utilisation de la technique est donc très positive.

Au niveau de l'énergie grise, la production d'un kilogramme de cellulose soufflée consomme 12 kWh. L'utilisation de murs à double ossature pour une maison de 111 m² consommera donc 21 264,96 kWh. Tel que mentionné en section 6.1.1, la différence de consommation énergétique entre un mur isolé selon les standards de 1990 et un mur à double ossature est de 4484 kWh par année. À partir de ces données, il est possible de déterminer le nombre d'années nécessaires pour amortir l'énergie grise contenue dans l'isolant supplémentaire :

$$\begin{aligned} & \text{Énergie supplémentaire} / \text{Économie par année} = \text{Période d'amortissement} \\ & 21\,264,96 \text{ kWh} / 4484 \text{ kWh} / \text{année} = 4,74 \text{ années} \end{aligned}$$

Il est donc possible d'affirmer qu'un bâtiment résidentiel de 111 m² commence à économiser de l'énergie à partir du 9^e mois de la quatrième année après sa construction. Considérant que l'isolation est habituellement efficace pour toute la durée de vie d'un bâtiment, il devient très pertinent de mieux isoler.

Évidemment, ces données ne représentent que les murs extérieurs. La fondation ainsi que le toit doivent également être hyper-isolés, sans quoi le bâtiment sera inefficace. Effectivement, par exemple, si la toiture avait une faible isolation en rapport à la fondation et aux murs extérieurs, la chaleur pourrait s'échapper par cette structure. L'isolant supplémentaire installé dans les murs et la fondation ne servirait à rien.

6.1.3 Solutions de chauffage et d'isolation optimales

Mis à part l'efficacité énergétique, les caractéristiques d'un bâtiment résidentiel hyper-isolé ne sont pas réellement différentes, si bien que les recommandations résultant des analyses comparatives demeurent pertinentes (voir sections 4.7 et 5.7).

6.2 Immeubles à logements et condominiums

La construction d'immeubles à logements et condominiums a pris un certain envol depuis le début des années 2000. Effectivement, dans la grande région de Montréal, entre les années 1990 et 2000, il y avait en moyenne 2 871 mises en chantier de copropriétés par année. Or, entre 2001 et 2009, cette moyenne a augmenté à 7 500 constructions. Suivant la même tendance, l'année 2011 a connu la plus grosse mise en chantier de copropriétés, avec 12 681 (Bergeron, 2012). Le succès rencontré depuis peu par la copropriété est relié à son prix plus abordable que les maisons individuelles. De plus, la population du Québec est vieillissante et certains besoins des personnes âgées sont plus facilement satisfaits dans ce type d'habitation (Société canadienne d'hypothèques et de logement, 2013).

Étant donné la popularité du marché de la copropriété, il est pertinent d'analyser les alternatives de chauffage et d'isolation en fonction de celui-ci.

6.2.1 Alternatives de chauffage

Comparativement aux maisons individuelles, les immeubles à logements et condominiums ont une charge de chauffage globale beaucoup plus grande, car celle-ci comprend l'espace de tous les appartements ou condominiums individuels et l'espace communautaire. Individuellement, les logements ou condominiums peuvent se comparer aux maisons individuelles si les mêmes critères de la section 4 sont utilisés. Cependant, étant donné l'étroite relation qu'ont ces unités, pourquoi ne pas les considérer comme un tout? L'installation d'un seul système pouvant s'occuper d'une très grande charge de chauffage serait avantageux d'un point de vue monétaire et des émissions de gaz à effet de serre. Effectivement, si la facture est partagée entre tous les occupants, l'installation du système et les frais de fonctionnements seront plus bas individuellement. De même, l'installation d'un seul système comparativement à plusieurs systèmes représente une énergie grise plus basse et donc moins d'émission de GES.

Les alternatives analysées par le présent rapport sont les suivantes : chauffage à l'électricité (plinthes électriques et thermopompes à air), chauffage radiant hydronique, géothermie, chauffage solaire passif, chauffage solaire thermique (capteurs à eau et à air), poêle à bois à haute efficacité et foyer de masse. De façon réaliste, le seul système respectant les précédents critères est la

géothermie. En général, une charge de chauffage de 45 000 BTU (3,75 tonnes) est nécessaire pour que le coût économique des systèmes géothermiques soit rentable (Fontaine, 2013).

Les propriétaires ou locataires de logements locatifs peuvent également chauffer de façon individuelle. Dans ce cas, les recommandations résultant de l'analyse comparative en section 4.7 demeurent valides.

6.2.2 Alternatives d'isolation

Mis à part la plus grande superficie de murs, toit et fondation à isoler, les caractéristiques d'un immeuble à logements ne sont pas réellement différentes d'un bâtiment unifamilial, si bien que les recommandations résultant de l'analyse comparative en section 5.7 demeurent pertinentes. Cependant, l'isolation en paille selon la technique GREB est plus ou moins recommandable dans ce cas-ci. Effectivement, la méthode demande beaucoup d'efforts physiques et donc une main d'œuvre importante (beaucoup plus que pour la construction conventionnelle). Le système n'est également pas très connu des professionnels du bâtiment, ce qui peut constituer une barrière à l'utilisation de la technique (Brossamain et Thévard, 2011). Pour ces raisons, l'utilisation de la cellulose soufflée est recommandée.

7. PISTES DE RÉFLEXION

Maintenant que les meilleures alternatives de chauffage et d'isolation ont été identifiées pour les bâtiments résidentiels unifamiliaux, les bâtiments hyper-isolés et les immeubles à logements, il serait pertinent d'évaluer la méthode à suivre pour que celles-ci soient appliquées. En effet, identifier les meilleures solutions est une étape à réaliser dans le processus, mais si aucun constructeur n'applique ces recommandations, le bilan environnemental de la construction résidentielle au Québec ne s'améliora pas. Pour se faire, deux éléments sont cruciaux : l'amélioration des normes de construction et de la réglementation entourant l'aménagement du territoire.

7.1 Amélioration des normes de construction

Tel que mentionné en section 1.3, la Régie du bâtiment du Québec a adopté le Règlement modifiant le Code de construction pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels en août 2012. Les nouvelles normes d'isolation sont pratiquement les mêmes que ce que Novoclimat exigeait (Régie du bâtiment, 2012). Ce changement devenait nécessaire, car les normes n'avaient pas changé depuis 1983 et devenaient désuètes. Effectivement, le Code de construction du Québec obligeait une isolation pour le toit et les murs hors-sol de respectivement R-30,1 et 19,3. Les nouvelles normes sont de R-41 et 24,5, toujours pour le toit et les murs hors-sol (Régie du bâtiment, 2012).

Les spécialistes du bâtiment durable s'entendent pour dire que le règlement est une bonne entrée en la matière, mais qu'il comporte tout de même des lacunes importantes. Effectivement, les nouvelles normes visent les bâtiments d'au plus trois étages et ayant moins de 600 m², ce qui exclut les grands bâtiments à logements (Écohabitation, 2013b). Également, les tests d'infiltrométrie ne sont toujours pas obligatoires. Ceux-ci évaluent l'étanchéité des bâtiments en calculant le nombre de changements d'air à l'heure (CAH). Augmenter la valeur de résistance thermique des bâtiments sans vérifier l'étanchéité est un non-sens, car même si un bâtiment est bien isolé, la structure peut avoir des fuites d'air importantes. En plus de diminuer l'efficacité énergétique globale, ces fuites d'air créent de la condensation dans les murs et cela mène éventuellement à des moisissures (Écohabitation, 2012b). Finalement, le règlement limite la superficie totale des ouvertures brutes

(fenêtres, portes, etc.) à 30 % de la superficie des murs hors-sol sans prendre en compte l'orientation de celles-ci (Régie du bâtiment, 2012). Or, l'installation d'une fenêtre au sud, même si celle-ci est de base (peu isolée), représente un gain énergétique grâce au rayonnement solaire.

Pour être conséquente avec les buts énoncés, la prochaine révision du Code de construction du Québec devra donc régler ces détails. Une nouvelle augmentation des valeurs de résistance thermique pourrait également être envisagée, de même que l'utilisation obligatoire de ventilateurs récupérateurs de chaleur et de thermostats intelligents.

Malgré cela, en octobre dernier, le gouvernement du Québec annonçait des investissements importants pour soutenir le marché de la construction et de la rénovation écologique. En effet, l'État a créé le crédit d'impôt *ÉcoRénov*, donnant un crédit d'impôt maximal de 10 000 \$ aux particuliers et entrepreneurs réalisant des rénovations écologiques entre le 8 octobre 2013 et le 1^{er} novembre 2014 (Ministère des Finances et de l'Économie, 2013). Un autre programme, *Chauffez vert*, permettra le remplacement de « *systèmes à combustibles fossiles par des systèmes alimentés à l'électricité ou par d'autres énergies renouvelables* » (Ministère des Ressources naturelles, 2013). Finalement, plus tôt en 2013, le gouvernement a aussi bonifié le programme Rénoclimat, offrant déjà depuis plusieurs années une assistance technique et financière pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels québécois (Portail Québec, 2013).

La venue de ces programmes est encourageante, car l'industrie de la construction écologique a besoin d'aide pour devenir concurrentielle. Il est à espérer que cette tendance continue dans les années à venir.

7.2 Réglementation entourant l'aménagement du territoire

L'analyse comparative en section 4.7 a révélé que le chauffage solaire passif était essentiel pour réduire l'impact environnemental des bâtiments résidentiels. À titre de rappel, ce type de chauffage consiste à laisser entrer le plus possible le rayonnement solaire et la retenir avec des matériaux ayant une forte masse thermique. Comme le soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest, le rayonnement solaire est plus intense au sud. Pour pouvoir exploiter cette énergie gratuite, les bâtiments doivent donc être dans un axe où l'installation de fenêtres au sud est possible. De nombreux règlements et lois, tant au niveau gouvernemental que municipal, dictent les

spécifications requises pour l'aménagement du territoire, mais aucune ne tient compte de la disponibilité de l'énergie solaire.

L'aménagement solaire du territoire doit débiter par une modification de la *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme*, qui répartit les pouvoirs de planification et d'aménagement du territoire à travers les ministères, les municipalités régionales de comté (MRC) et les municipalités. Ces changements parviendraient aux schémas d'aménagement et de développement (SAD) des MRC et puis aux plans d'urbanisme des municipalités (Paradis, 2011). Il serait intéressant que les modifications portent sur la modification de tous les lots constructibles, mais présentement vierges (zonage blanc). Ceux-ci doivent être modifiés pour être dans un axe « nord-sud », afin que toute future construction puisse exploiter la technique du chauffage solaire passif.

En 2007, le gouvernement du Québec a publié un document d'orientation intitulé « Pour un développement durable de l'énergie éolienne » qui visait à aider les MRC à développer de manière durable l'énergie éolienne sur leur territoire (Ministère des Affaires municipales et des Régions, 2007). Pourquoi alors ne pas faire de même pour l'aménagement solaire du territoire?

CONCLUSION

Afin de déterminer quelles solutions de chauffage et d'isolation ont le plus faible impact environnemental, des analyses comparatives ont été réalisées. Celles-ci portaient sur l'aspect économique, les émissions de gaz à effet de serre, l'énergie grise, l'efficacité ainsi que la durabilité. Ces critères ont été évalués pour un bâtiment résidentiel moyen, soit une maison unifamiliale de 111 m² située dans la grande région de Montréal.

Le chauffage solaire passif utilisé comme système principal s'est avéré la meilleure alternative de chauffage. Cette technique consiste à laisser entrer le rayonnement solaire grâce à une fenestration au sud et à la retenir grâce à une isolation supérieure et une masse thermique importante. L'alternative de chauffage est recommandée, car elle propose de nombreux avantages. En effet, elle ne produit aucune émission de GES et elle peut même séquestrer du carbone en choisissant un isolant végétal (voir section 6.1.2). De plus, une fois construits, des éléments comme l'orientation du bâtiment et l'isolation supérieure ont une durée de vie équivalente à celle du bâtiment. Seule la fenestration à isolation supérieure (faible émissivité, double vitrage, etc.) doit être remplacée pour assurer une bonne efficacité. Cependant, le chauffage solaire passif à lui seul ne peut fournir assez d'énergie pour combler la charge de chauffage d'un bâtiment résidentiel au Québec. Un deuxième système doit assurer cette charge lorsqu'il y a peu ou pas de rayonnement solaire. Le chauffage solaire thermique avec capteurs à air et le chauffage radiant hydronique avec chauffage solaire thermique à capteurs à eau récoltent également de très bons scores, mais sont tous les deux également dépendants de la ressource solaire.

L'utilisation d'une solution de chauffage à base de biomasse, soit le foyer de masse ou le poêle à bois à haute efficacité, est donc à considérer. Ces deux alternatives ont reçu pratiquement le même nombre de points dans l'analyse comparative, mais pour différentes raisons. Effectivement, le foyer de masse coûte beaucoup plus cher à l'achat, mais est plus efficace (moins d'émissions de GES) et à une durée de vie équivalente à celle du bâtiment. Cependant, ces solutions de chauffage seront interdites sur l'Île de Montréal d'ici 2020, si bien que les utilisateurs situés à cet endroit devront se tourner vers les plinthes électriques. Celles-ci sont efficaces et ont une bonne durée de vie, mais leurs frais d'utilisation sont élevés et leur bilan carbone est moins bon que les autres alternatives.

Au niveau des matériaux isolants, l'analyse comparative a révélé que 3 produits se démarquent des autres : la paille (technique GREB), la cellulose soufflée et giclée. L'impact environnemental de la paille est très faible, car elle est très économique, séquestre une grande quantité de carbone lors de son procédé et ne requiert que très peu d'énergie lors de sa production. Cependant, les murs extérieurs construits à l'aide de la technique GREB ont une valeur de résistance thermique équivalente à R-30 et sont limités à cette valeur (murs déjà très épais). Une alternative plus conventionnelle est donc l'utilisation de cellulose soufflée ou giclée. Celles-ci coûtent plus cher, séquestrent moins de carbone (mais en séquestre tout de même) et demandent plus d'énergie lors de leur production, mais leur efficacité n'est pas limitée par leur épaisseur. Effectivement, pour la même efficacité (R-30), la cellulose prend approximativement la moitié de l'espace requis pour la paille.

Néanmoins, certains isolants ne peuvent servir dans toutes les situations. Au niveau de la toiture, la paille et la cellulose giclée ne peuvent être appliquées en raison de leur poids. L'application de la cellulose soufflée est donc recommandée. C'est plus complexe pour l'isolation des fondations. Effectivement, tous les isolants naturels et d'origine végétale sont putrescibles lorsqu'en présence du sol. Aucune de ces trois alternatives ne peut donc être utilisée. La laine minérale de roche doit donc être considérée pour cette application, malgré son impact environnemental médiocre.

Tous les résultats de la présente étude ont mené vers l'utilisation du concept de bâtiment résidentiel hyper-isolé. Ceux-ci, comme le nom l'indique, sont dotés d'une isolation supérieure rendue possible grâce à l'utilisation de murs à double ossature. Au lieu d'un espace de six ou huit pouces comme c'est le cas avec les murs conventionnels, cette technique offre jusqu'à 20 pouces de jeu qui sert à mettre plus d'isolant. Les sections 6.1.1 et 6.1.2 démontrent que l'utilisation d'une plus grande quantité d'isolant (cellulose soufflée) est rentable, permet de séquestrer une quantité non négligeable de carbone et d'obtenir des économies d'énergie après seulement quelques années. C'est la technique à privilégier pour réduire l'impact environnemental des bâtiments résidentiels au Québec et même dans tous les pays industrialisés.

Cependant, pour arriver à cet objectif, les normes de construction devront continuer à devenir plus sévères. De plus, le gouvernement devra continuer à fournir des incitatifs aux particuliers et aux entrepreneurs pour que ceux-ci participent à la migration vers une construction plus écologique. En attendant, des modifications à la *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme* pour intégrer

l'aménagement solaire doivent être apportées. Effectivement, toutes les rues projetées et les lots en zone blanche présentement vierges devraient être aménagés dans un axe « nord-sud », afin de pouvoir exploiter le rayonnement gratuit offert par le soleil. Après tout, l'énergie la plus propre est celle qui n'est pas consommée.

RÉFÉRENCES

- Agence France-Presse (2013). La planète a battu des records de chaleur et d'émissions de CO₂ en 2012. *Le Devoir*. <http://www.ledevoir.com/environnement/actualites-sur-l-environnement/384579/la-planete-a-battu-des-records-de-chaleur-et-d-emissions-de-co2-en-2012> (Page consultée le 2 septembre 2013).
- AGRINOVA et Groupe AGÉCO (2009). Combustion de biomasse – Résidentielle. In MAMROT. *Développement régional*. http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/developpement_regional/ruralite/groupes_travail/Combustion_residentielle.pdf (Page consultée le 13 septembre 2013).
- Angers, G. (2007). Plus beau et plus chaud... avec un convecteur. *La Presse*. <http://maison.lapresse.ca/renovation/entretien-de-la-maison/200712/21/01-871298-plus-beau-et-plus-chaud-avec-un-convecteur.php> (Page consultée le 9 octobre 2013).
- Angers, G. (2011). Laine de chanvre : un isolant vert et éprouvé. *La Presse*. <http://www.lapresse.ca/le-soleil/maison/habitation/201102/25/01-4374139-laine-de-chanvre-un-isolant-vert-et-eprouve.php> (Page consultée le 9 octobre 2013).
- Archibio (s. d.). Chanvre. In Archibio. *Découvrez*. <http://www.archibio.qc.ca/decouvrez-chanvre> (Page consultée le 9 octobre 2013).
- Archibio (2011). Construction du mur écologique à double ossature. In *Écohabitation. Cahier de projet*. http://www.ecohabitation.com/assistance/sites/all/files/cahiers/20110715_cahier_03.pdf (Page consultée le 28 septembre 2013).
- Association des professionnels du chauffage (s.d). Feuillelet d'information à l'intention du client. In Association des professionnels du chauffage. *EPA Appareils*. http://www.poelesfoyers.ca/index.php?option=com_content&view=article&id=74:feuillelet-dinformation-a-lintention-du-client&catid=40:fp-roknewspager&Itemid=184 (Page consultée le 13 septembre 2013).
- Benolec (s. d.a). Cellulose Beno-Therm. In Benolec. *Nos produits*. http://www.benolec.com/prod_beno-therm.php (Page consultée le 28 septembre 2013).
- Benolec (s. d.b). BenoTherm. In Benolec. *Nos produits*. http://www.benolec.com/wp-content/uploads/Depliant-Beno-Therm.fr_.pdf (Page consultée le 16 octobre 2013).
- Bergeron, M. (2012). Condos: près d'un record historique à Montréal. *La Presse*. <http://affaires.lapresse.ca/economie/immobilier/201211/06/01-4590746-condos-pres-dun-record-historique-a-montreal.php> (Page consultée le 13 novembre 2013).
- Bernier, F. (2013). Unanimité au sujet du ralentissement. *Information Construction*, Mars, p.3.

- Blasi, D. (2013). *Nombre total d'habitations certifiées Novoclimat depuis le lancement du programme* (document interne obtenu via une demande d'accès à l'information). Québec, Ministère des Ressources naturelles, 2 p.
- Brossamain, V. et Thévard, J.P. (2011). *Construire son habitation en paille selon la technique du GREB*. 3e édition, Chécy, À Contrevent, 160 p.
- Canada. Banque du Canada (2013a). Feuille de calcul de l'inflation. *In* Banque du Canada. *Taux et statistiques*. <http://www.banqueducanada.ca/taux/renseignements-complementaires/feuille-de-calcul-de-linflation/> (Page consultée le 15 octobre 2013).
- Canada. Banque du Canada (2013b). Moyenne mensuelle des taux de change – septembre 2013. *In* Banque du Canada. *Taux et statistiques*. <http://www.banqueducanada.ca/stats/assets/pdf/nrma-2013-09.pdf> (Page consultée le 15 octobre 2013).
- Canada. Conseil canadien des ministres de l'environnement (2012). Code de pratiques pour les appareils résidentiels de chauffage au bois. *In* Conseil canadien des ministres de l'environnement. *Publications*. http://www.ccme.ca/assets/pdf/pn_1480_wood_burning_code_fr.pdf (Page consultée le 25 août 2013).
- Canada. Ministère des Ressources naturelles (s. d.a). Chauffe-eau : Énergie . *In* Ministère des Ressources naturelles. *Systèmes de chauffage et dispositifs de régulation*. <http://oe.e.rncan.gc.ca/equipement/chauffage/13828> (Page consultée le 2 septembre 2013).
- Canada. Ministère des Ressources naturelles (s. d.b). Calculateur du coût du système de chauffage domestique . *In* Ministère des Ressources naturelles. *Systèmes de chauffage et dispositifs de régulation*. <http://oe.e.rncan.gc.ca/residentiel/personnel/outils/calculatrice/calchauffage/comparez-current-chauffage.cfm> (Page consultée le 1^{er} septembre 2013).
- Canada. Ministère des Ressources naturelles (s. d.c). Thermopompes à air. *In* Ministère des Ressources naturelles. *Publications*. <http://oe.e.rncan.gc.ca/publications/residentiel/chauffage-thermopompe/1464> (Page consultée le 13 septembre 2013).
- Canada. Ministère des Ressources naturelles (s. d.d). Pompes géothermiques (systèmes à énergie du sol). *In* Ministère des Ressources naturelles. *Publications*. <http://oe.e.rncan.gc.ca/publications/residentiel/chauffage-thermopompe/13758> (Page consultée le 13 septembre 2013).
- Canada. Ministère des Ressources naturelles (2003a). Le chauffage à l'électricité. *In* Ministère des Ressources naturelles. *Publications*. http://oe.e.rncan.gc.ca/sites/oe.e.rncan.gc.ca/files/files/pdf/publications/Le_chauffage_electricite.pdf (Page consultée le 18 juillet 2013).
- Canada. Ministère des Ressources naturelles (2003b). Guide du consommateur – L'achat de portes et fenêtres à bon rendement énergétique. *In* Ministère des Ressources naturelles.

- Publications*. <http://publications.gc.ca/collections/Collection/M92-156-2003F.pdf> (Page consultée le 12 septembre 2013).
- Canada. Ministère des Ressources naturelles (2004). Le chauffage et le refroidissement à l'aide d'une thermopompe. *In* Ministère des Ressources naturelles. *Publications*. http://oeenrcan.gc.ca/sites/oeenrcan.gc.ca/files/pdf/publications/infosource/pub/home_f/chauffage-thermopompe/depliant.pdf (Page consultée le 18 juillet 2013).
- Canada. Ministère des Ressources naturelles (2010). Enquête sur l'utilisation de l'énergie par les ménages - 2007. *In* Ministère des Ressources naturelles. *Publications*. <http://oeenrcan.gc.ca/publications/statistiques/euem-sommaire07/pdf/euem-sommaire07.pdf> (Page consultée le 2 septembre 2013).
- Canada. Ministère des Ressources naturelles (2011). Évolution de l'efficacité énergétique au Canada de 1990 à 2009. *In* Ministère des Ressources naturelles. *L'Office de l'efficacité énergétique*. <http://oeenrcan.gc.ca/publications/statistiques/evolution11/index.cfm> (Page consultée le 26 mai 2013).
- Canada. Ministère des Ressources naturelles (2012). Emprisonnons la chaleur. *In* Ministère des Ressources naturelles. *Publications*. http://oeenrcan.gc.ca/sites/oeenrcan.gc.ca/files/files/residentiel/personnel/documents/Emprisonnons-la-chaleur_F.pdf (Page consultée le 13 octobre 2013).
- Canada. Santé Canada (s. d.) Le formaldéhyde. *In* Santé Canada. *Santé de l'environnement et du milieu de travail*. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/air/in/poll/construction/formaldehyde-fra.php> (Page consultée le 25 septembre 2013).
- Canada. Société canadienne d'hypothèques et de logement (2008). Le guide du chauffage au bois résidentiel. *In* Société canadienne d'hypothèques et de logement. *Publications et rapports*. <https://www03.cmhc-schl.gc.ca/catalog/productDetail.cfm?cat=3&itm=95&lang=fr&fr=1377463038940> (Page consultée le 25 août 2013).
- Canada. Société canadienne d'hypothèques et de logement (2013). Perspectives du marché de l'habitation – Faits saillants – Région du Québec. *In* Société canadienne d'hypothèques et de logement. *Publications et rapports*. http://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/esub/64661/64661_2013_Q04.pdf?fr=1384370861622 (Page consultée le 13 novembre 2013).
- Canada. Statistique Canada (2010). Les ménages et l'environnement : utilisation de l'énergie. *In* *Statistiques Canada*. *Publications*. <http://www.statcan.gc.ca/pub/11-526-s/11-526-s2010001-fra.pdf> (Page consultée le 17 juillet 2013).
- Coalition canadienne de l'énergie géothermique (2012). État de l'industrie canadienne de la géothermie 2011. *In* CCÉG. *Publications*. http://www.geo-exchange.ca/fr/UserAttachments/article82_Final%20Stats%20Report%202011%20-%20February%206,%202012_F.pdf (Page consultée le 6 septembre 2013).

- Conseil du bâtiment durable du Canada (2005). A business case for green buildings in Canada. *In* Canada Green Building Council. *Ressources*.
http://www.cagbc.org/AM/PDF/A%20Business%20Case%20for%20Green%20Bldgs%20in%20Canada_sept_12.pdf (Page consultée le 19 juin 2013).
- Conseil du bâtiment durable du Canada (2013). Projets LEED au Canada. *In* Canada Green Building Council. *Profil et statistiques*.
http://www.cagbc.org/AM/PDF/LEED_projects_in_Canada-20130531_FR.xlsx (Page consultée le 27 juin 2013).
- Convectair (s. d.). De quelle puissance d'appareil ai-je besoin ?. *In* Convectair. *Calcul de puissance*.
<http://www.convectair.net/calcul2/cafr/> (Page consultée le 9 octobre 2013).
- Corbeil, C. (2012). *Les constructions alternatives au Québec, est-ce possible?*. Rapport réalisé pour le cours ENV 750 : Projet spécial en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 32 p.
- Côté, C. (2013). Le chauffage au bois tire à sa fin. *La Presse*, Août, p.A16.
- Eco Building Resource (s. d.). Product price list & order form. *In* Eco Building Resource. *Products*.
<http://www.eco-building.ca/store.htm> (Page consultée le 5 novembre 2013).
- Écohabitation (2012a). Comprendre la géothermie. *In* Écohabitation. *Actualité*.
<http://www.ecohabitation.com/actualite/nouvelles/comprendre-geothermie> (Page consultée le 2 août 2013).
- Écohabitation (2012b). CODE DE CONSTRUCTION DU QUÉBEC: ÉCOHABITATION DEMANDE UN TEST D'INFILTROMÉTRIE OBLIGATOIRE. *In* Écohabitation. *Actualité*.
<http://www.ecohabitation.com/actualite/nouvelles/code-construction-quebec-ecohabitation-demande-test-infiltrometrie-obligatoire> (Page consultée le 25 novembre 2013).
- Écohabitation (2013a). Les projets LEED au Québec. *In* Écohabitation. *Certification LEED*.
<http://www.ecohabitation.com/leed/projets> (Page consultée le 27 juin 2013).
- Écohabitation (2013b). NOUVEAU CODE DE CONSTRUCTION DU QUÉBEC : PEUT MIEUX FAIRE!. *In* Écohabitation. *Actualité*.
<http://www.ecohabitation.com/actualite/nouvelles/nouveau-code-construction-quebec-mieux-faire> (Page consultée le 25 novembre 2013).
- Écohabitation (s. d.a). Définition du système. *In* Écohabitation. *Certification LEED*.
<http://www.ecohabitation.com/leed/definition-systeme> (Page consultée le 24 juin 2013).
- Écohabitation (s. d.b). Se chauffer à l'électricité : les plinthes électriques. *In* Écohabitation. *Fiches techniques*. <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/se-chauffer-electricite-plinthes-electriques> (Page consultée le 18 juillet 2013).
- Écohabitation (s. d.c). Se chauffer à l'électricité : le chauffage par thermopompe air-air ou air-eau. *In* Écohabitation. *Fiches techniques*. <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/se-chauffer-electricite-chauffage-thermopompe-air-air-air-eau> (Page consultée le 18 juillet 2013).

- Écohabitation (s. d.d). Choisir son chauffage : le rayonnement, comment ça marche?. *In* Écohabitation. *Fiches techniques*. <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/choisir-chauffage-rayonnement-marche> (Page consultée le 22 juillet 2013).
- Écohabitation (s. d.e). Se chauffer à l'électricité : la géothermie à circuit ouvert. *In* Écohabitation. *Fiches techniques*. <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/se-chauffer-electricite-geothermie-circuit-ouvert> (Page consultée le 2 août 2013).
- Écohabitation (s. d.f). Se chauffer à l'électricité : la géothermie à capteurs horizontaux. *In* Écohabitation. *Fiches techniques*. <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/se-chauffer-electricite-geothermie-capteurs-horizontaux> (Page consultée le 2 août 2013).
- Écohabitation (s. d.g). Se chauffer à l'électricité : la géothermie à capteurs verticaux fermés. *In* Écohabitation. *Fiches techniques*. <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/se-chauffer-electricite-geothermie-capteurs-verticaux-fermes> (Page consultée le 2 août 2013).
- Écohabitation (s. d.h). C'est quoi, la « masse thermique »?. *In* Écohabitation. *Fiches techniques*. <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/masse-thermique> (Page consultée le 18 août 2013).
- Écohabitation (s. d.i). Chauffage au bois : fonctionnement des foyers de masse. *In* Écohabitation. *Fiches techniques*. <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/chauffage-bois-fonctionnement-foyers-masse> (Page consultée le 27 août 2013).
- Écohabitation (s. d.j). JE PENSE ACHETER UNE THERMOPOMPE. DANS LES PROPOSITIONS QUE J'AI UNE EST DE 7,5 DE HSPF ET L'AUTRE EST DE 8,5. QUELLE SERAIT LA DIFFÉRENCE DE CONSOMMATION?. *In* Écohabitation. *Assistance*. <http://www.ecohabitation.com/assistance/question/chauffage-climatisation-je-pense-acheter-une-thermopompe-dans-les-propositions-que-j'ai-une> (Page consultée le 1^{er} septembre 2013).
- Écohabitation (s. d.k). Les isolants passés à la loupe. *In* Écohabitation. *Fiches techniques*. <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/isolants-passes-loupe> (Page consultée le 16 octobre 2013).
- Écosolaris (s. d.a). Chauffage radiant au Québec. *In* Écosolaris. *Produits & Services*. http://www.ecosolaris.ca/fr/produits_et_services/chauffage-radiant-plancher.php (Page consultée le 6 septembre 2013).
- Écosolaris (s. d.b). Installation de chauffe-eau solaire au Québec. *In* Écosolaris. *Produits & Services*. http://www.ecosolaris.ca/fr/produits_et_services/chauffe-eau-solaire.php (Page consultée le 13 septembre 2013).
- Écosolaris (s. d.c). Installation de chauffe-air solaire au Québec. *In* Écosolaris. *Produits & Services*. http://www.ecosolaris.ca/fr/produits_et_services/chauffe-air-solaire.php (Page consultée le 15 septembre 2013).

- Eurima (2013). Putting natural resources to work for the benefit of our planet. *In* Eurima. *Publications*. <http://www.eurima.org/flipbook/mineralwool/index.html> (Page consultée le 22 septembre 2013).
- Fauteux, A. (2009). Planchers à eau chaude autoconstruits – Les conseils d’un expert éviteront des erreurs coûteuses. *La maison du 21e siècle*, Automne, p.50 – 54.
- Fauteux, A. (2012). Quel isolant choisir?. *La maison du 21e siècle*, Automne, p.30 – 36.
- Fauteux, A. (2013a). Le programme Novoclimat 2.0 est lancé. *In* LA maison du 21^e siècle. *Actualités*. <https://maisonsaine.ca/energies/maisons-novoclimat-20-plus-vertes-20-plus-efficaces.html> (Page consultée le 2 novembre 2013).
- Fauteux, A. (2013b). Mur de paille GREB : R-30, selon Air-Ins. *La maison du 21e siècle*, Été, p.23.
- Fontaine, J. (2013). Discussion au sujet des coûts de chauffage d’une maison standard avec la géothermie. Communication orale. *Entrevue menée par Gabriel Parent-Leblanc avec Jacques Fontaine, président chez Géothermie Boréale*, 5 septembre 2013, Bois-des-Filion.
- Foyers Feu vert (2009). Efficacité et économie du foyer de masse thermique. *In* Groupe de recherches écologiques de la Baie. *Publications du GREB*. http://www.greb.ca/GREB/Publications_files/7%20Efficacite%20Economie_Foyers%20de%20masse%20Feu%20vert%20masonry%20heater.pdf (Page consultée le 27 août 2013).
- Funk, D. (2010). *L’énergie solaire : circonstances et conditions d’exploitation au Québec*. Essai de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 88 p.
- Gauthier, G. (2013). Construction en chanvre. Communication orale. *Atelier 2013 du fonds foncier communautaire Terravie*. 18 mai 2013, Saint-Sauveur.
- GIEC (2007). Changements climatiques 2007 – Rapport de synthèse. *In* GIEC. *Rapports d’évaluation*. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf (Page consultée le 2 septembre 2013).
- Good Shepherd Wool Insulation (s. d.a) WEKA Panel. *In* Good Shepherd Wool Insulation. <http://www.goodshepherdwool.com/pdf/weka.pdf> (Page consultée le 9 octobre 2013).
- Good Shepherd Wool Insulation (s. d.b) Pricing. *In* Good Shepherd Wool Insulation. <http://www.goodshepherdwool.com/prices.htm> (Page consultée le 15 octobre 2013).
- Groupe de recherches écologiques de la Baie (2012). Construire en paille avec LA TECHNIQUE DU GREB. *In* Groupe de recherches écologiques de la Baie. *Publications*. http://www.greb.ca/GREB/Publications_files/Presentation%20Technique%20du%20GREB%2020%20octobre%202012.pdf (Page consultée le 9 octobre 2013).
- Greenpeace (2011). Le potentiel des énergies solaires au Québec. *In* Greenpeace. *Ressources*. <http://www.greenpeace.org/canada/Global/canada/report/2011/09/Le%20potentiel%20des%20%C3%A9nergies%20solaires%20au%20Qu%C3%A9bec.pdf> (Page consultée le 12 août 2013).

- GreenSpec (2011). Greening the Pink Panther: Owens Corning's New EcoTouch Fiberglass. *In* GreenSpec. *Blog*. <http://greenspec.buildinggreen.com/blogs/greening-pink-panther-owens-corning-new-ecotouch-fiberglass> (Page consultée le 25 septembre 2013).
- Guillemette Énergies (2013). Chaudière Électrique modèle MINI-BTH Ultra de Thermo 2000. *In* Guillemette Énergies. *Nos produits*. http://www.guillemetteenergies.ca/catalogue/chaudiere-lectrique-modle-mini-bth-ultra-de-thermo-2000_191 (Page consultée le 16 septembre 2013).
- Hammond, G. P. et Jones, C. I. (2008) Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 161 (2). pp. 87-98. ISSN 1751-4223
- Jasztex (s. d.). Blue Jeanious Insulation. *In* Jasztex. *Produits*. http://www.jasztex.com/pdf/Jasztex_Blue_Jeanious.pdf (Page consultée le 28 septembre 2013).
- Lajeunesse, P. (2013) Discussion au sujet des coûts d'installation de plinthes électriques pour un bâtiment résidentiel. Communication orale. *Entrevue menée par Gabriel Parent-Leblanc avec Patrice Lajeunesse, propriétaire de Les Entreprises Patrice Lajeunesse – Maître électricien*, 9 octobre 2013, Bois-des-Filion.
- Legault, L. (2011). 50 ans d'évolution de l'architecture résidentielle québécoise. *Québec Habitation*, Septembre, p.16 – 28.
- Les Entreprises P. Théorêt (2013). Liste de prix 2013. *In* Les Entreprises P. Théorêt. *Prix*. <http://lesentreprisesptheoret.com/prix.html> (Page consultée le 1^{er} septembre 2013).
- Martin, Y. (2013). Discussion au sujet des coûts et de la résistance thermique de la cellulose soufflée et giclée de Benolec. Communication orale. *Entrevue menée par Gabriel Parent-Leblanc avec Yvon Martin, directeur des ventes chez Benolec*, 5 novembre 2013, Bois-des-Filion.
- Matte, D. (2011). *Climatologie de l'enseillement au Québec*. Mémoire de maîtrise en sciences géographiques, Université de Laval, Québec, Québec, 159 p.
- MC² Énergie (s. d.). Graphiques efficacité et énergie. *In* MC² Énergie. *Esolair*. <http://mc2energie.com/graphiques.html> (Page consultée le 12 septembre 2013).
- MEM (s. d.). Fiche d'information technique. *In* MEM. *Produits*. <http://www.memvegetal.com/wp-content/uploads/2013/08/fiche-technique-isolant-chanvre-francais.pdf> (Page consultée le 9 octobre 2013).
- Météo Média (2013). Température. *In* Météo Media. *Statistiques météo*. <http://www.meteo-media.com/previsions/statistics/temperature/cl7025250/caqc0363> (Page consultée le 2 juin 2013).

- Mineral Wool Association (s. d.). Quelles sont les matières premières composant la laine minérale? In Mineral Wool Association. *Questions fréquentes*. <http://www.laineminerale.net/questions-frequentes> (Page consultée le 22 septembre 2013).
- Nouveau-Brunswick. Efficacité NB (s. d.). Thermopompes et systèmes de chauffage à résistance électrique. In Efficacité NB. *Chauffage et isolation*. http://0101.nccdn.net/1_5/3cc/25f/200/Thermopompes-et-syst-mes-de-chauffage---r-sistance-lectrique.pdf (Page consultée le 18 juillet 2013).
- Olivia, J.P. et Courgey, S. (2011) *L'isolation thermique écologique*. 2^e édition, Saint-Étienne, Terre vivante, 255 p. (Collection Techniques de pro)
- Olivier, M.J. (2009). Chimie de l'environnement. 6e édition, Québec, Les productions Jacques Bernier, 368 p.
- Paradis, M. M. (2011). *Analyse de la réglementation entourant l'implantation d'infrastructures d'énergies renouvelables en milieu urbain*. Essai de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 109 p.
- Québec. Agence de l'efficacité énergétique (s. d.). Comparez vos coûts d'énergie. In Agence de l'efficacité énergétique. <http://coutsenergie.aee.gouv.qc.ca/> (Page consultée le 31 août 2013).
- Québec. Agence de l'efficacité énergétique (2009). Facteurs d'émission et de conversion. In Agence de l'efficacité énergétique. *Médias*. http://www.efficaciteenergetique.mrnf.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/facteurs_emission.pdf (Page consultée le 2 septembre 2013).
- Québec. Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques (2012). Performance des chauffe-eau solaires installés au Québec dans le cadre du projet pilote sur les chauffe-eau solaires domestiques. In Ministère des Ressources naturelles. *Médias*. http://www.efficaciteenergetique.mrnf.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/solaire/Rapport_tech_nique_Ch chauffe-eau_solaires.pdf (Page consultée le 12 septembre 2013).
- Québec. Ministère des Affaires municipales et des Régions (2007). Pour un développement durable de l'énergie éolienne. In Ministère des Affaires municipales et des Régions. *Aménagement du territoire*. http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/amenagement_territoire/orientations_gouvernementales/orientations_eoliennes.pdf (Page consultée le 25 novembre 2013).
- Québec. Ministère des Finances et de l'Économie (2013). Bulletin d'information 2013-10 – Mesures fiscales visant à stimuler les investissements des particuliers et des entreprises. In Ministère des Finances et de l'Économie. *Nouveautés dans le site*. http://www.finances.gouv.qc.ca/documents/bulletins/fr/BULFR_2013-10-f-b.pdf (Page consultée le 26 novembre 2013).
- Québec. Ministère des Ressources naturelles (s. d.a). La consommation totale d'énergie et l'intensité énergétique (1984-2009). In Ministère des Ressources naturelles. *Consommation totale d'énergie*. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/energie/statistiques/consommation-energie.xls> (Page consultée le 26 mai 2013).

- Québec. Ministère des Ressources naturelles (s. d.b). Exigez une habitation de qualité certifiée. *In* Ministère des Ressources naturelles. *Mon habitation*. <http://www.efficaciteenergetique.mrnf.gouv.qc.ca/mon-habitation/novoclimat/> (Page consultée le 24 juin 2013).
- Québec. Ministère des Ressources naturelles (s. d.c). Géothermie. *In* Ministère des Ressources naturelles. *Innovation*. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/energie/innovation/innovation-geothermie.jsp> (Page consultée le 23 juillet 2013).
- Québec. Ministère des Ressources naturelles (s. d.d). Le pétrole et le gaz naturel comme sources d'énergies. *In* Ministère des Ressources naturelles. *Pétrole et gaz naturel*. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/energie/petrole-gaz/petrole-gaz-sources.jsp> (Page consultée le 12 août 2013).
- Québec. Ministère des Ressources naturelles (2013). Chauffez vert. *In* Ministère des Ressources naturelles. *Mon habitation*. <http://efficaciteenergetique.mrn.gouv.qc.ca/mon-habitation/chauffez-vert/> (Page consultée le 26 novembre 2013).
- Québec. Portail Québec (2013). Efficacité énergétique - La ministre Martine Ouellet annonce une bonification du programme Rénoclimat de 34,1 M\$. *In* Portail Québec. *Actualité gouvernementale*. <http://communiqués.gouv.qc.ca/gouvqc/communiqués/GPQF/Fevrier2013/03/c2595.html> (Page consultée le 26 novembre 2013).
- Québec. Régie du bâtiment (2012). Présentation sur le règlement modifiant le Code de construction pour favoriser l'efficacité énergétique. *In* Régie du bâtiment. *Publications*. <https://www.rbq.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/Publications/francais/guide-participant-reglement-efficacite-energetique.pdf> (Page consultée le 24 juin 2013).
- Rivoal, J. (2007). BIO-1534 Physiologie végétale, cours #3 - Photosynthèse. Montréal, Département de sciences biologiques, Université de Montréal, 90 p.
- Roberge, D. (2013). Discussion au sujet de l'évaluation économique de l'installation d'un poêle à bois. Communication orale. *Entrevue menée par Gabriel Parent-Leblanc avec Diane Roberge, Responsable des ventes chez Les Foyers Mirabel*, 8 octobre 2013, Bois-des-Filion.
- RONA (2013). Plinthes. *Chauffage et climatisation*. <http://www.rona.ca/fr/construction/chauffage-et-climatisation/plinthes> (Page consultée le 31 août 2013).
- Roy-Lavallée, A. (2013) Discussion au sujet des coûts de la construction GREB. Communication orale. *Entrevue menée par Gabriel Parent-Leblanc avec Audrée Roy-Lavallée, propriétaire de la construction GREB à Rawdon*, 10 août 2013, Rawdon.
- Sabourin, M. (2013). Immobilier : les paris sont ouverts. *L'actualité*, 25 avril.
- SynAIRgis (2007) Étude Équicoton. *In* Équiterre. *Publication*. http://www.equiterre.org/sites/fichiers/Etude_Equicoton.pdf (Page consultée le 18 octobre 2013).

- Syndicat des Producteurs de Bois de l'Estrie (2011). Ce qu'il est important de savoir sur le bois de chauffage. *In* SPBESTRIE. *Archives*.
http://www.spbestrie.qc.ca/fr/public/archives/BOIS_CHAUFF.pdf (Page consultée le 2 septembre 2013).
- The World Bank (2013). Population, total. *In* The World Bank. *World DataBank - World Development Indicators*. <http://databank.worldbank.org/data/views/reports/tableview.aspx#> (Page consultée le 25 avril 2013).
- Tison (2006). Chauffe-eau: louer ou acheter? Mazout, électricité ou gaz?. *La Presse*.
<http://affaires.lapresse.ca/economie/200901/06/01-676983-chauffe-eau-louer-ou-acheter-mazout-electricite-ou-gaz.php> (Page consultée le 13 septembre 2013).
- Tison (2008). Toiture, fenêtres, plomberie et cie: quelle durée de vie?. *La Presse*.
<http://maison.lapresse.ca/habitation/conseils/200806/16/01-872265-toiture-fenetres-plomberie-et-cie-quelle-duree-de-vie.php> (Page consultée le 13 septembre 2013).
- Twin Maple Marketing (s. d.). Ultra Touch Natural Cotton Fiber Insulation. *In* Eco Building Resource. *ECO Insulation*. <http://www.eco-building.ca/pdf/ultratouch.pdf> (Page consultée le 28 septembre 2013).
- United Nations Framework Convention on Climate Change (2009). Copenhagen Accord. *In* United Nations Framework Convention on Climate Change. *Framework Convention on Climate Change*. <http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/l07.pdf> (Page consultée le 25 avril 2013).
- Université Laval (2012). Calculer son empreinte écologique. *In* Université Laval. *Développement durable*. <http://www2.ulaval.ca/developpement-durable/comment-participer/calculer-son-empreinte-ecologique.html> (Page consultée le 25 avril 2013).
- WWF (2012). Living Planet Report 2012. *In* WWF. *Living Planet Report*.
http://awsassets.panda.org/downloads/1_lpr_2012_online_full_size_single_pages_final_120516.pdf (Page consultée le 25 avril 2013).

BIBLIOGRAPHIE

- Archibio (2011). Construction écologique de la dalle sur sol. *In* Écohabitation. *Cahier de projet*. http://www.ecohabitation.com/assistance/sites/all/files/cahiers/20110505_cahier_05.pdf (Page consultée le 2 novembre 2013).
- Banque Royale du Canada (2011). L'exception qui devient la norme – Les bâtiments écologiques et la norme LEED. *In* Banque Royale du Canada. *Rendre votre entreprise plus verte*. http://www.rbc.com/collectivites-durabilite/_assets-custom/pdf/Green%20&%20LEED%20White%20Paper%20FR.pdf (Page consultée le 2 novembre 2013).
- Beaudin, È. *La vie en vert*, Montréal, Télé Québec, 25 novembre 2009, émission de télévision (30 minutes).
- Boudreault, J. *Légitime dépense*, Montréal, Télé Québec, 24 septembre 2012, émission de télévision (30 minutes).
- British Broadcasting Corporation (2012). Global resources stock check. *In* British Broadcasting Corporation. *Science and Environment*. <http://www.bbc.com/future/story/20120618-global-resources-stock-check> (Page consultée le 2 novembre 2013).
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (2007). A comparison of the limits to growth with thirty years of reality. *In* Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. *Publications*. <http://www.csiro.au/files/files/plje.pdf> (Page consultée le 2 novembre 2013).
- Corporation des maîtres mécaniciens en tuyauterie du Québec (2012). Estimation des besoins en chauffage d'un bâtiment résidentiel. *In* Régie du bâtiment Québec. *Les renseignements techniques*. <https://www.rbq.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/Publications/francais/fiche-bonnes-pratiques-estimation-besoins-chauffage-batiment.pdf> (Page consultée le 2 novembre 2013).
- Dubé, H. (2013). Discussion au sujet de la maison de style Earthship l'ES-Cargo. Communication orale. *Entrevue menée par Gabriel Parent-Leblanc avec Hélène Dubé, co-proprétaire de l'ES-Cargo*, 16 mai 2013, Chertsey.
- European Industrial Hemp Association (2011). Hemp Fibres for Green Products – An assessment of life cycle studies on hemp fibre applications. *In* European Industrial Hemp Association. *Documents*. http://eiha.org/attach/639/11-07-07_META-LCA_Hemp_Fibre_Products.pdf (Page consultée le 2 novembre 2013).
- Fauteux, A. (2013a). Discussion au sujet de la construction écologique. Communication orale. *Entrevue menée par Gabriel Parent-Leblanc avec André Fauteux, rédacteur en chef du magazine La maison du 21^e siècle*, 11 juin 2013, Sainte-Adèle.
- Groupe de recherches écologiques de la Baie (2011). Expérimentation de capteurs solaires thermiques peu coûteux et intégrés au bâtiment. *In* Groupe de recherches écologiques de la Baie. *Publications*.

http://www.greb.ca/GREB/Publications_files/Experimentation_capteur_GREB.pdf (Page consultée le 2 novembre 2013).

Mercier, D., Dutil, Y., Rousse, D., Pronovost, F., Boudreau, D., Hudon, N. et Castonguay, M. (2011). Les isolants thermiques naturels : construction verte et efficacité énergétique. *In* Chaire de recherche industrielle en technologies de l'énergie et en efficacité énergétique. *Publications*. http://www.t3e.info/pdf/Publications/2011_CIFQ_Chicoutimi_Isolants.pdf (Page consultée le 2 novembre 2013).

Pelletier, J-P. (2013) ENV 705 : Évaluation des impacts. *Cours donné dans le cadre de la maîtrise en gestion de l'environnement de l'Université de Sherbrooke*, Hiver 2013, Longueuil.

Programme des Nations Unies pour l'environnement (2011a). Un nouveau rapport analyse l'évolution du climat au fil des deux dernières décennies. *In* Programme des Nations Unies pour l'environnement. *UNEP News Center*. <http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=2656&ArticleID=8922&l=fr> (Page consultée le 25 avril 2013).

Programme des Nations Unies pour l'environnement (2011b). Keeping track of our changing environment – From Rio to Rio+20 (1992-2012). *In* Programme des Nations Unies pour l'environnement. *Publications*. http://www.unep.org/geo/pdfs/keeping_track.pdf (Page consultée le 25 avril 2013).

Québec. Institut de la statistique du Québec (2012). Le Québec chiffres en main – Édition 2012. *In* Institut de la statistique du Québec. *Publications*. http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/referenc/pdf2012/QCM2012_fr.pdf (Page consultée le 2 novembre 2013).

Québec. Ressources naturelles Québec (s. d.). Chauffage. *In* Ressources naturelles Québec. *Conseils pratiques*. <http://www.efficaciteenergetique.mrnf.gouv.qc.ca/mon-habitation/conseils-pratiques/chauffage/> (Page consultée le 26 juin 2013).

Science Applications International Corporation (2010). Étude de l'industrie et du marché des capteurs thermosolaires actifs au Canada (2009). *In* Ministère des Ressources naturelles. *Publications*. http://canmetenergie.rncan.gc.ca/sites/canmetenergy.rncan.gc.ca/files/files/pubs/STC_survey_2009-FinalReport_French.pdf (Page consultée le 2 novembre 2013).

STELPRO (s. d.). Série « B » Plinthe-Convecteur. *In* STELPRO. *Guide de l'utilisateur*. <http://fr.stelpro.com/contenu/fr/pdf/guides/Utilisateur/B.pdf> (Page consultée le 31 août 2013).

World Business Council for Sustainable Development (2007). Energy Efficiency in Buildings – Business realities and opportunities. *In* World Business Council for Sustainable Development. *Publications & tools*. <http://www.wbcsd.org/Pages/EDocument/EDocumentDetails.aspx?ID=13559&NoSearchContextKey=true> (Page consultée le 31 août 2013).