

L'ÉNERGIE SOLAIRE :
CIRCONSTANCES ET CONDITIONS D'EXPLOITATION AU QUÉBEC

par

David Funk

Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de
l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, janvier 2010

IDENTIFICATION SIGNALÉTIQUE

L'ÉNERGIE SOLAIRE :

CIRCONSTANCES ET CONDITIONS D'EXPLOITATION AU QUÉBEC

David Funk

Essai effectué en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.)

Sous la direction de Guy Fouquet

Université de Sherbrooke

janvier 2010

Mots clés : énergie solaire, énergie renouvelable, solaire passif, solaire actif, solaire photovoltaïque, éclairage naturel, efficacité énergétique, gaz à effet de serre.

Les besoins énergétiques ne cessent de croître au Québec. Malgré son potentiel énorme, l'énergie solaire ne correspond qu'à une partie négligeable de la production et de la consommation d'énergie dans la province. Pourtant, l'exploitation du rayonnement solaire est compétitive à plusieurs niveaux par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables. Les technologies exploitant l'énergie solaire passive et active augmentent l'efficacité énergétique des bâtiments même dans une région nordique comme le Québec. Le solaire photovoltaïque favorise l'autoproduction et même la vente d'électricité sur le réseau public. L'éclairage naturel est bénéfique à de nombreux égards. De plus, une exploitation à grande échelle du rayonnement solaire engendrerait une réduction de la consommation de l'électricité et des combustibles fossiles et, par conséquent, une diminution des frais associés au chauffage, à l'eau chaude et à l'éclairage. Afin de promouvoir l'émergence de l'énergie solaire au Québec, une réflexion sur les stratégies énergétiques actuelles et futures doit avoir lieu tant à l'échelle individuelle que municipale, provinciale et fédérale.

SOMMAIRE

Les besoins en énergie de toutes sortes sont en croissance partout sur la planète. Le Québec ne fait pas exception à cette règle en présentant une hausse de la consommation énergétique d'environ 27 % entre 1981 et 2006. Les analystes du ministère des Ressources naturelles et de la Faune prédisent, selon le scénario le plus probable, que cette demande continuera d'augmenter à un taux de 1 % par année d'ici 2016. À l'heure actuelle, les Québécois nécessitent annuellement environ 5,3 tonnes d'équivalent pétrole (tep) pour répondre à leurs besoins énergétiques, ce qui fait d'eux les troisièmes plus grands consommateurs d'énergie au monde après les Américains et les Canadiens. Néanmoins, la demande en énergie au Québec est comblée à près de 50 % de sources renouvelables, principalement hydroélectriques, ce qui en fait un chef de file en Amérique du Nord. Une plus grande exploitation de l'énorme potentiel qu'offre le rayonnement solaire permettrait d'accentuer davantage ce leadership. En effet, les nombreuses applications de l'énergie solaire, particulièrement dans le domaine du bâtiment, sont bien adaptées au contexte québécois. Cela est dû au fait que la quantité d'énergie que le Soleil envoie vers la Terre est 10 000 fois plus grande que la quantité totale d'énergie consommée à l'échelle de la planète. De plus, le taux de rayonnement reçu dans le sud du Québec est tout à fait comparable à la moyenne mondiale, soit environ 1 500 kWh par mètre carré par année. Pourtant, la part occupée par cette source d'énergie est actuellement négligeable dans le portrait énergétique québécois.

L'objectif principal de cet essai consiste, dans un premier temps, à démontrer qu'il est techniquement faisable, écologiquement souhaitable, économiquement rentable et socialement acceptable de développer la filière de l'énergie solaire au Québec et d'ajouter cette filière aux autres sources d'énergie renouvelables. Les principales technologies solaires évaluées dans ce document exploitent deux formes d'énergie du Soleil, soit la chaleur et la lumière, et cela, de cinq façons différentes : le solaire thermique passif, le solaire thermique actif, le solaire thermodynamique, le solaire photovoltaïque et l'éclairage naturel. Ces technologies solaires sont présentées et comparées aux autres sources d'énergie renouvelables (hydraulique, éolienne, biomasse et géothermie) afin de déterminer leurs meilleures applications. Il est donc possible d'établir dans quelles circonstances et à quelles conditions il est le plus pertinent d'exploiter cette source d'énergie. Aussi, plusieurs recommandations faisant la promotion de cette forme d'énergie et favorisant son émergence sont formulées.

L'exploitation du solaire thermique passif vise à utiliser directement les rayons du Soleil pour réchauffer des surfaces ayant la capacité d'emmagasiner et de redistribuer cette énergie. Le rayonnement pénètre à l'intérieur d'un bâtiment par les fenêtres et est absorbé par les murs, les planchers, les meubles, etc. Ce sont ces surfaces et objets qui libèrent la chaleur tout au long de la journée et même durant la nuit. Puisque la performance de ce phénomène ne dépend pas de la température extérieure, mais bien de la puissance et du temps de l'ensoleillement, le solaire thermique passif, lorsqu'il est utilisé judicieusement, s'applique très bien au Québec. Ainsi, un simple choix stratégique dans l'orientation des bâtiments et une disposition astucieuse de la fenestration permet de réduire considérablement leur consommation énergétique, et ce, gratuitement.

Une première technologie solaire thermique active utilise également le rayonnement solaire afin de générer de la chaleur à l'aide d'un capteur, d'un réservoir et d'une pompe dans lesquels circule un fluide caloporteur. Cette chaleur peut être utilisée pour produire de l'eau chaude domestique ou industrielle et pour le chauffage des bâtiments. Encore une fois, le rendement de ce phénomène ne dépend pas de la température extérieure, mais bien de la puissance et du temps de l'ensoleillement. Bien que le coût relié à l'achat des capteurs solaires soit encore élevé, l'apport en énergie solaire peut combler, gratuitement, jusqu'à 60 % des besoins en eau chaude domestique. Les murs solaires aspirent l'air frais de l'extérieur et le préchauffe avant qu'il ne pénètre dans le système de ventilation. Cette deuxième technique, particulièrement bien adaptée pour les latitudes nordiques, réduit les frais de chauffage des bâtiments commerciaux et industriels. Certains modèles plus petits sont destinés aux applications résidentielles.

Les centrales solaires thermodynamiques concentrent le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à une température assez élevée (parfois plus de 1000°C) pour qu'il actionne une ou des turbines. Cette technologie, qui nécessite une superficie de plusieurs dizaines d'hectares, vise donc à transformer l'énergie solaire en électricité pour la distribuer sur le réseau. Il est peu probable de voir naître de tels projets au Québec puisqu'ils requièrent un énorme potentiel d'ensoleillement. En fait, cette technologie peut difficilement concurrencer les autres sources d'énergies renouvelables comme l'hydroélectricité et l'éolien.

Le solaire photovoltaïque est probablement la forme d'énergie solaire la plus connue. Cette technologie exploite la lumière du Soleil pour la convertir en électricité. Les cellules

photovoltaïques captent les électrons libérés par la collision entre les photons projetés par le Soleil et le matériau semi-conducteur. La faible efficacité de cette technologie, de l'ordre de 15 %, son coût encore élevé et le faible tarif de l'électricité permettent difficilement de justifier une utilisation répandue dans le contexte québécois. Par contre, il peut s'agir d'une solution pertinente pour atteindre l'autonomie énergétique lorsque le réseau de distribution est hors de portée, pour des chalets éloignés par exemple. En effet, combinée à l'éolien, elle demeure une source d'énergie sûre et peu polluante.

L'éclairage naturel possède plusieurs avantages par rapport à la lumière artificielle. Dans les bâtiments commerciaux, les économies d'énergie peuvent être substantielles. En effet, une intégration adéquate de l'éclairage naturel diminue l'apport thermique généré par les lumières et réduit les besoins en climatisation. L'accès aux rayons du soleil présente aussi de nombreux bénéfices pour le bien-être des occupants.

La comparaison avec les autres sources d'énergie renouvelables selon des critères de développement durable permet de déterminer que l'énergie solaire doit davantage être employée au Québec. En effet, plusieurs applications sont bien adaptées dans le contexte québécois malgré son climat nordique et le faible coût de l'électricité. De plus, l'exploitation de l'énergie solaire produit peu d'impacts environnementaux, favorise la création d'emplois dans toutes les régions du Québec et est mieux acceptée socialement que de nombreux projets de développement énergétique.

Pour favoriser l'émergence de l'utilisation de l'énergie solaire, un changement de paradigme est nécessaire tant au niveau individuel que municipal, provincial et fédéral. D'abord, les individus doivent croire aux bénéfices de l'efficacité énergétique et de l'exploitation du rayonnement solaire et doivent appliquer de la pression sur les entreprises et les dirigeants. Les municipalités peuvent aussi encourager ou du moins accepter l'utilisation de l'énergie solaire à travers le développement urbain, les projets collectifs et la réglementation. La stratégie énergétique du Québec doit faire la promotion de l'énergie solaire en ajustant les tarifs énergétiques et en offrant des subventions comme celles proposées par de nombreux gouvernements à travers le monde. Finalement, les normes fédérales de construction doivent mieux régir l'orientation des bâtiments, leur fenestration et l'utilisation active de l'énergie solaire afin de réduire la consommation d'électricité et les émissions de gaz à effet de serre.

REMERCIEMENTS

Cet essai constitue le point culminant de ma maîtrise en environnement. Je tiens à remercier tous ceux, amis, collègues et membres de ma famille qui m'ont accompagné au cours de cette démarche.

Un merci tout particulier à mon directeur M. Guy Fouquet qui, malgré son emploi du temps très chargé, a su me faire profiter de son expérience, de ses réflexions et de ses conseils dans les domaines de l'environnement et de l'énergie.

Merci Isabelle pour tes encouragements, tes idées, ta présence et ton soutien essentiels. Tu es véritable rayon de soleil qui illumine ma vie.

Merci à Marie-Maude d'avoir accepté de relire ce travail, pour avoir trouvé les bons mots et les formulations justes.

Merci à mes anciens coéquipiers de projet de baccalauréat d'avoir contribué à ma passion de l'énergie solaire.

Merci à tous ceux qui travaillent pour la suite des choses. Vous constituez une source d'inspiration, de motivation et d'espoir pour un monde meilleur.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 PROBLÉMATIQUE	3
2 L'ÉNERGIE SOLAIRE.....	7
2.1 Le Soleil et le Québec.....	7
2.2 Le solaire thermique passif.....	11
2.2.1 Les bâtiments solaires passifs	11
2.2.2 Le mur Trombe	15
2.2.3 Le phénomène d'îlot de chaleur urbain.....	16
2.2.4 La corde à linge	17
2.3 Le solaire thermique actif.....	18
2.3.1 Le chauffe-eau solaire	18
2.3.2 Le quartier Drake Landing	21
2.3.3 Le mur solaire.....	22
2.3.4 La neige de Cap-Rouge.....	23
2.4 Le solaire thermodynamique.....	23
2.5 Le solaire photovoltaïque.....	26
2.6 L'éclairage naturel	29
3 L'ANALYSE COMPARATIVE	32
3.1 Le chauffage.....	33
3.1.1 L'énergie solaire	34
3.1.2 L'électricité	35
3.1.3 La biomasse	36
3.1.4 La géothermie.....	38
3.2 La production d'eau chaude.....	40
3.2.1 L'énergie solaire	40
3.2.2 L'électricité	41
3.2.3 La biomasse	41
3.2.4 La géothermie.....	42

3.3	La génération d'électricité	42
3.3.1	L'énergie solaire	42
3.3.2	L'énergie hydraulique	43
3.3.3	L'éolien	44
3.3.4	La biomasse	48
3.4	L'éclairage	49
3.4.1	L'énergie solaire	49
3.4.2	L'électricité	49
4	LES RÉSULTATS DE L'ANALYSE	54
4.1	La faisabilité technique	54
4.2	Les impacts sur l'environnement.....	56
4.3	Les aspects économiques	57
4.4	Les enjeux sociaux	58
4.5	La rétrospective de l'analyse	61
4.5.1	Le solaire thermique passif	61
4.5.2	Le solaire thermique actif.....	61
4.5.3	Le solaire thermodynamique.....	61
4.5.4	Le solaire photovoltaïque.....	62
4.5.5	L'éclairage naturel	62
5	LA PROMOTION ET L'ÉMERGENCE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE	63
5.1	Au niveau citoyen, commercial et industriel	63
5.1.1	L'éducation et la sensibilisation	63
5.1.2	Le choix de l'efficacité énergétique	64
5.1.3	L'autoproduction d'électricité solaire	64
5.2	Au niveau municipal.....	65
5.2.1	Les règlements municipaux	65
5.2.2	L'urbanisme	66
5.2.3	Les projets collectifs	67
5.3	Au niveau provincial.....	68
5.3.1	La stratégie énergétique du Québec.....	68
5.3.2	Les tarifs et aides financières	69

5.4	Au niveau fédéral.....	71
5.4.1	Les normes du bâtiment	72
5.4.2	La réduction des émissions de GES	73
5.5	Le sommaire des recommandations	74
CONCLUSION.....		76
RÉFÉRENCES		79

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Évolution de la consommation totale d'énergie au Québec.....	3
Figure 1.2	Évolution de la consommation d'énergie par habitant au Québec.....	4
Figure 1.3	Répartition des formes d'énergie au Québec en 2006	5
Figure 2.1	Axes de positionnement du soleil.....	8
Figure 2.2	Position du soleil selon les saisons.....	8
Figure 2.3	Variation du rayonnement solaire durant l'année à Montréal	8
Figure 2.4	La consommation finale d'énergie par secteur en 2006	10
Figure 2.5	Consommation d'énergie des bâtiments résidentiels au Québec et commerciaux au Canada.....	10
Figure 2.6	Exemple de design d'une habitation solaire passive	12
Figure 2.7	Gain solaire et perte thermique des fenêtres ordinaires et à faible E	13
Figure 2.8	Habitations à orientations diverses dans un nouveau développement.....	15
Figure 2.9	Schéma d'un mur Trombe	16
Figure 2.10	Îlots de chaleur urbain de la Communauté métropolitaine de Montréal.....	17
Figure 2.11	Système de capteurs solaires et réservoir d'eau chaude	19
Figure 2.12	Capteur plat.....	20
Figure 2.13	Capteur à tubes sous vide	20
Figure 2.14	Besoins en eau chaude comblés par un capteur solaire à Montréal	20
Figure 2.15	Vue aérienne de la communauté solaire de Drake Landing Okotoks.....	21
Figure 2.16	Système de chauffage de l'air.....	22
Figure 2.17	Différents types de centrales solaires thermodynamiques	24
Figure 2.18	Fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique	25
Figure 2.19	Système solaire autonome	27
Figure 2.20	Système solaire relié au réseau.....	27
Figure 2.21	Répartition du potentiel solaire sur la planète	28
Figure 2.22	Les bénéfices de l'éclairage naturel dans les bâtiments	29
Figure 2.23	Exemple de stratégie d'éclairage naturel	31
Figure 3.1	Les applications de l'énergie solaire	32
Figure 3.2	L'efficacité et le confort en fonction des modes de chauffage	33
Figure 3.3	Installation d'une éolienne domestique au sommet d'une tour	47
Figure 4.1	Le village solaire Solarsiedlung	60

Tableau 2.1	Moyenne de l'énergie solaire reçue annuellement sur une surface d'un mètre carré, inclinée selon un angle optimal.....	9
Tableau 2.2	Configuration d'une habitation solaire passive	12
Tableau 3.1	Comparaison des sources d'énergie renouvelables selon les applications .	51

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

°C	Degré Celsius
AEE	Agence de l'efficacité énergétique
CMNÉB	Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments
CNB	Code national du bâtiment
Faible E	Faible émissivité
GES	Gaz à effet de serre
GJ	Gigajoule
km/h	Kilomètre par heure
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattheure
m ²	Mètre carré
m ³	Mètre cube
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et Faune
MW	Mégawatt
RNCan	Ressources naturelles Canada
SCHL	Société canadienne d'hypothèques et de logement
TEP	Tonne équivalent de pétrole
W	Watt

INTRODUCTION

Les besoins énergétiques ne cessent de croître à l'échelle mondiale. Les enjeux environnementaux poussent les pays à explorer des sources d'énergie renouvelables. Dans ce contexte, le Québec fait office de pionnier grâce à sa production d'électricité provenant presque exclusivement de sources hydrauliques. Une autre source d'énergie renouvelable et peu polluante provient du rayonnement solaire. Il s'agit de la source d'énergie la plus répandue et la plus accessible sur terre. « Chaque jour, le soleil envoie vers la Terre 10 000 fois la quantité totale d'énergie consommée à l'échelle de la planète! » (AEE, s. d.a). Les diverses applications qui découlent de l'exploitation des rayons solaires sont innombrables. Les technologies solaires les plus répandues s'observent majoritairement dans le domaine de l'immobilier : solaire thermique passif, solaire thermique actif, solaire thermodynamique, solaire photovoltaïque et éclairage naturel. Les avantages de l'exploitation à plus grande échelle de l'énergie solaire au Québec seraient nombreux : amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, diminution de la consommation en énergie fossile et électrique, création d'emplois à travers toutes les régions de la province, réduction des émissions de gaz à effet de serre, hausse des exportations d'électricité, etc.

En produisant individuellement une partie de l'énergie qu'il consomme et en axant ses efforts sur l'efficacité énergétique, chaque Québécois pourrait réduire ses impacts sur l'environnement tout en participant à l'enrichissement collectif. Pourtant, l'exploitation du rayonnement solaire est négligeable dans l'éventail énergétique québécois. Est-ce dû au fait que les technologies solaires sont mal adaptées au climat nordique de la province? En réalité, leur performance dépend très peu de la température extérieure, mais bien de la puissance et de la durée de l'ensoleillement. À ce sujet, le Québec présente le même potentiel que les pays les plus audacieux dans le domaine puisque le rayonnement reçu est tout à fait comparable à la moyenne mondiale. Le soleil est aussi abondant dans le sud de la province qu'en Allemagne, pays qui produisait 39 % de l'énergie solaire mondial en 2004 (Baril, 2008). Cela n'empêche pas le solaire de souffrir d'un certain scepticisme puisque les connaissances de la population par rapport à ses caractéristiques sont limitées. Alors, dans quelles circonstances et à quelles conditions est-il pertinent d'exploiter l'énergie solaire au Québec?

Cet essai est construit de sorte que chaque chapitre permette d'atteindre un objectif spécifique. D'abord, la problématique met en relief, malgré les préjugés à son égard, le potentiel de l'énergie solaire et de son exploitation au Québec par rapport aux autres sources d'énergie conventionnelles. Le second chapitre décrit l'énergie solaire sous toutes ses formes afin d'établir le potentiel des différentes technologies, leur faisabilité et leurs impacts environnementaux, économiques et sociaux. Les principales applications solaires évaluées dans ce document exploitent deux formes d'énergie du soleil, soit la chaleur (thermique passif, thermique actif et thermodynamique) et la lumière (solaire photovoltaïque et éclairage naturel). Le troisième et quatrième chapitres analysent et comparent l'énergie solaire aux autres types d'énergie renouvelables à l'aide d'une grille de critères de développement durable. Cette démarche permet de déterminer quelles applications se prêtent le mieux à l'utilisation de l'énergie solaire. Finalement, le cinquième chapitre formule des recommandations adressées aux individus, aux municipalités et aux gouvernements afin favoriser une intégration harmonieuse et judicieuse de l'énergie solaire dans le contexte québécois.

Bien que l'exploitation de l'énergie solaire s'intensifie depuis quelques années et que les technologies évoluent sans cesse, les principes et les phénomènes mis en cause sont très bien connus et font aujourd'hui l'objet de large consensus. Le rayonnement solaire a été le sujet de nombreuses études, recherches et discussions si bien que les ouvrages techniques et scientifiques sont nombreux et fiables. Ils constituent une source importante de références utilisées dans cet essai. Les gouvernements, les sociétés d'État et les centres de recherches procurent également des références crédibles. Plusieurs informations sont également tirées des médias qui font état dans l'actualité des nouveaux projets et du développement des technologies émergentes. Or, si les principes de base de l'énergie solaire sont maîtrisés, ce sont leurs applications et leurs conséquences économiques, environnementales et sociales qui font l'objet de débats et d'opinions variés. Il est donc primordial d'analyser également les points de vue d'organismes indépendants et de groupes de militants. Les arguments soulevés permettent, après vérifications des faits auprès de sources crédibles, de comparer le développement de l'énergie solaire par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables en regard aux principes du développement durable.

1 PROBLÉMATIQUE

L'énergie, peu importe sous quelle forme elle est exploitée, constitue un élément essentiel au développement des sociétés. La croissance de la population et les progrès technologiques exigent des ressources énergétiques toujours plus grandes. Le Québec ne fait pas exception à cette règle. En fait, « si le Québec était un pays, il serait le troisième plus énergivore au monde, par habitant, après les États-Unis et le Canada, toutes sources d'énergie confondues » (Cardinal, 2007, p. 96). Malgré un style de vie et un climat comparable, les Québécois consommaient en 2001 presque deux fois plus d'énergie par habitant que la moyenne de l'Union européenne (MRNF, 2005a).

Tel que le démontre le graphique suivant, la demande dans la province a constamment augmenté au cours des années 1981 à 2006 pour atteindre plus de 40 millions de tonnes d'équivalent de pétrole (tep), unité de référence en énergie. Il s'agit d'une hausse d'environ 27 %. Cette situation peut être considérée comme étant normale puisque la population a également augmenté au cours de la même période. Néanmoins, la figure 1.2 de la page suivante montre qu'en plus de la croissance de la population, chaque habitant hausse constamment sa demande individuelle en énergie. Durant cette même période de 25 ans, la consommation d'énergie de chaque Québécois a grimpé d'environ 17 % (MRNF, s. d.a).

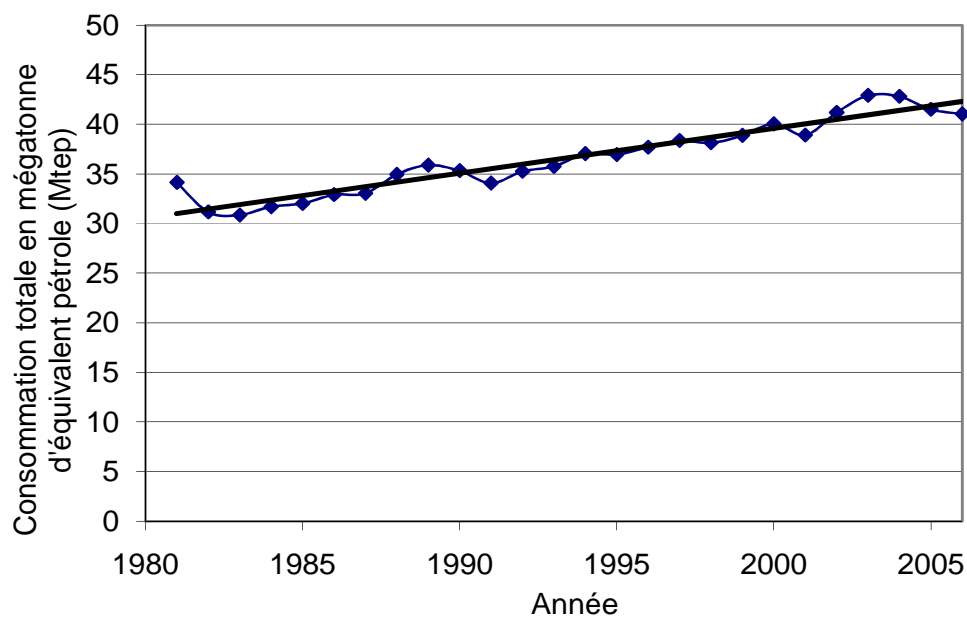


Figure 1.1 Évolution de la consommation totale d'énergie au Québec.
Tirée de MRNF, s. d.a.

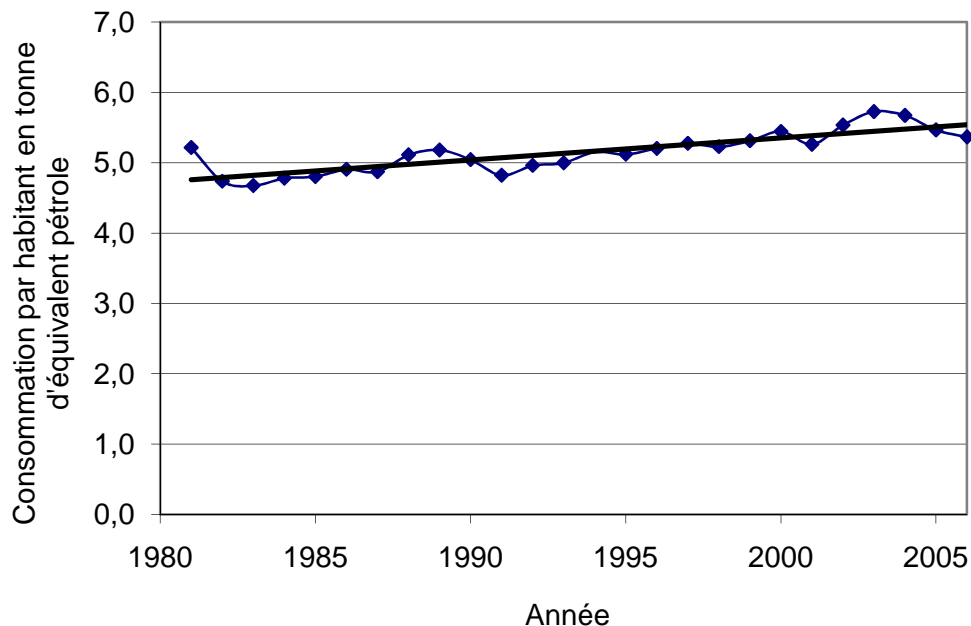


Figure 1.2 Évolution de la consommation d'énergie par habitant au Québec.
Tirée de MRNF, s. d.a.

Cette tendance devrait se poursuivre puisque les analystes du ministère des Ressources naturelles et de la Faune prédisent que la demande en énergie continuera d'augmenter à un taux de 1 % par année d'ici 2016, selon le scénario le plus probable (MRNF, 2005b). Selon Ressources naturelles Canada, la hausse sera plus marquée dans le secteur de l'électricité, qui gagne de la popularité au dépend des énergies fossiles, avec une augmentation de 22 % entre 2006 et 2016. Uniquement dans le secteur résidentiel, la consommation énergétique grimpera de 14,8 % à l'échelle du pays durant la période de 2005-2020. La croissance du nombre de ménages et la tendance persistante à acquérir des logements plus spacieux « l'emporteront sur les gains d'efficacité énergétique réalisés partiellement par les changements dans la réglementation des équipements » (RNCAN, 2006, p. 19).

Les besoins en énergie de plus en plus grands des Québécois appliquent une forte pression sur l'environnement. À travers les années, les sources d'énergie utilisées dans la province se sont diversifiées. Au milieu du 20^e siècle, les gouvernements qui se sont succédé à Québec ont choisi de miser sur l'hydroélectricité afin de réduire la dépendance de la province aux énergies fossiles (pétrole et gaz naturel). Au début des années 1970, alors que plus de 80 % des résidences étaient chauffées au mazout, les énergies fossiles comptaient pour 73 % de l'approvisionnement énergétique du Québec. « Aujourd'hui, la

situation est complètement inversée. » (Cardinal, 2007, p. 92) Le développement de l'hydroélectricité, qui a mené à une révolution sociale et environnementale, a été très bénéfique au niveau économique. En effet, la province est riche en ressources hydriques, qui constituent une source d'énergie renouvelable, et pauvre en combustibles fossiles, énergie non renouvelable.

En 2006, l'électricité, produite à près de 95 % de sources renouvelables (Hydro-Québec, 2009a) couvrait 40 % des besoins de la province, toutes activités confondues (figure 1.3). En ajoutant la biomasse à l'électricité, l'approvisionnement en énergie au Québec provient à près de 50 % de sources renouvelables. Le pétrole (39 %), le gaz naturel (13 %) et le charbon (1 %) sont toutes des sources d'énergie non renouvelables qui assurent l'autre moitié des besoins en énergie de la province (MRNF, s. d.b). À titre comparatif, l'Union européenne, région du monde reconnue pour son leadership en matière d'environnement, vise un taux de 20 % d'énergies renouvelables d'ici 2020 (Marciano, 2008).

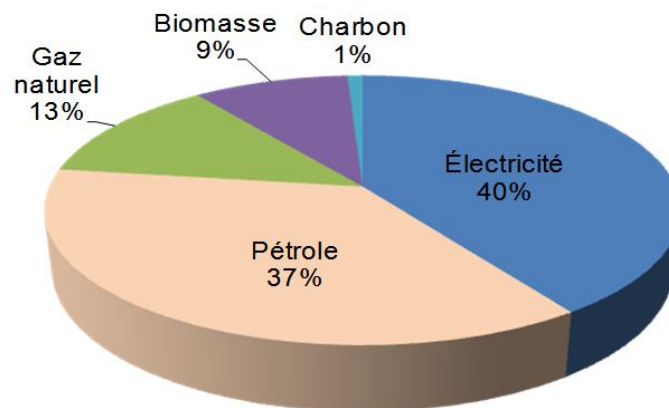


Figure 1.3 Répartition des formes d'énergie au Québec en 2006
Tirée de MRNF, s. d.b.

Or, si près de 50 % de l'énergie consommée au Québec provient déjà de sources renouvelables, la province dispose d'un énorme potentiel encore inexploité, notamment en ce qui concerne l'énergie solaire. Le Conseil européen des énergies renouvelables décrit le rayonnement solaire de la façon suivante :

« En une journée, la lumière du soleil qui atteint la Terre produit suffisamment d'énergie pour satisfaire les besoins énergétiques mondiaux actuels pendant huit ans. Même si seule une petite partie de ce potentiel est techniquement exploitable, c'est encore suffisant pour fournir près de six fois plus d'énergie que ce dont le monde a actuellement besoin » (EREC. 2007, p. 17).

Partout sur la planète, l'exploitation du Soleil vit une véritable révolution. L'exploitation de l'énergie solaire à partir de cellules photovoltaïques seulement a augmenté de 3 275 % entre 1998 et 2008. C'est plus que toutes les autres sources d'énergie réunies. Même l'éolien reste loin derrière avec une augmentation de la production de 1 120 %. Cette progression a des répercussions importantes au niveau économique puisque « [c]'est l'énergie solaire et les titres qui y sont reliés directement ou indirectement qui ont battu tous les records de croissance » en 2006 (Baril, 2008). Malgré cette hausse fulgurante, les cellules photovoltaïques comptent pour seulement 0,04 % de la production totale d'énergie à travers le monde (BP, 2009).

Cette source d'énergie renouvelable permettrait donc de remplacer ou du moins de réduire substantiellement la consommation des formes d'énergie conventionnelles et permettrait même de produire de l'électricité. Pourtant, au Québec, l'utilisation de l'énergie solaire en est encore à ses premiers balbutiements. Cela s'explique par la convergence de plusieurs facteurs dont la méconnaissance de la population au sujet des technologies solaires, le scepticisme entourant les capacités du solaire en climat froid et une industrie du solaire peu développée et souffrant d'un manque de moyens et de visibilité. La problématique consiste donc à déterminer s'il serait vraiment pertinent d'exploiter l'énergie solaire dans le contexte québécois. Si oui, dans quelles circonstances et comment favoriser son émergence?

Les prochains chapitres tenteront d'abord de déterminer si le potentiel du rayonnement solaire est suffisamment grand dans la province pour justifier son exploitation à grande échelle. Les données scientifiques, les statistiques et les exemples qui seront présentés permettront ensuite d'évaluer la faisabilité technique et les impacts environnementaux, économiques et sociaux de l'utilisation du rayonnement solaire. Cette source d'énergie sera également comparée à d'autres sources d'énergie renouvelables telles que l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse et la géothermie. Cette démarche permettra d'établir quels sont les avantages et les inconvénients du solaire par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables et pour quelles applications l'énergie solaire doit être favorisée. Finalement, puisque l'énergie solaire est méconnue et que son exploitation n'est pas encore usuelle, plusieurs recommandations seront formulées pour en faire la promotion auprès de la population, des entreprises et des différents paliers de gouvernement.

2 L'ÉNERGIE SOLAIRE

Le chapitre précédent a soulevé la problématique de l'augmentation constante de la demande en énergie fossile et en électricité alors que le Québec hésite à considérer le rayonnement solaire comme une alternative sérieuse. Ce chapitre présente le potentiel de l'utilisation judicieuse de l'énergie solaire dans la province à travers différentes méthodes et technologies. La première section fournit plusieurs informations générales concernant les spécifications de l'énergie solaire et son exploitation potentielle au Québec. Les sections suivantes procureront des renseignements et des données sur la faisabilité technique et sur les impacts environnementaux, économiques et sociaux des cinq principales applications du rayonnement solaire, soit le solaire thermique passif, le solaire thermique actif, le solaire thermodynamique, le solaire photovoltaïque et l'éclairage naturel.

2.1 Le Soleil et le Québec

Le Soleil a toujours constitué un symbole très puissant pour les hommes. Situé à près de 150 millions de kilomètres de la Terre, son diamètre est plus de cent fois celui de la planète bleue. Albert Einstein décrivait la réaction qui se produit à l'intérieur du Soleil ainsi : « À chaque seconde, 620 millions de tonnes d'hydrogène 1 fusionnent pour former de l'hélium 4 avec une perte de masse de 4,3 millions de tonnes qui est transformée en énergie » (Gaillard, 2008, p. 14). La Terre ne reçoit qu'une infime partie des rayons projetés par le Soleil, mais cela demeure suffisant pour couvrir 10 000 fois les besoins en énergie de toute l'humanité (AEE, s. d.a). En fait, le rayonnement solaire est à la base de pratiquement toutes les formes d'énergie renouvelables disponibles sur la planète : l'énergie solaire telle qu'elle sera décrite dans cet essai, l'énergie éolienne produite par des masses d'air de températures différentes, l'énergie hydraulique renouvelée par le cycle de l'eau, l'énergie de la biomasse issue du phénomène de photosynthèse et l'énergie marémotrice créée par l'attraction solaire et lunaire. Seule la géothermie de profondeur échappe à cette règle (Dessus, 1999).

Peu importe la localisation sur Terre, la moitié des 8 760 heures que compte une année se déroulent le jour et l'autre moitié la nuit. Alors qu'à l'équateur les nuits et les jours sont identiques durant toute l'année, l'inclinaison de la Terre crée des périodes de clarté et de noirceur qui durent six mois aux pôles. La répartition est différente, mais comme il s'agit

de la même planète, le nombre d'heures d'ensoleillement est égal partout (Tanguay et Desjardins, 2009). La trajectoire du Soleil dans le ciel varie en fonction des saisons et de la latitude. Cette trajectoire est décrite par des formules mathématiques qui permettent de prévoir avec une très grande précision la position du soleil, en azimut et en élévation, à tout moment de l'année et cela pour les décennies à venir (figure 2.1). Pour la région de Montréal, située à une latitude de 45 degrés, l'élévation du soleil atteint un peu plus de 65 degrés au solstice d'été et moins de 25 degrés le 21 décembre (figure 2.2). Cette variation de la hauteur du soleil en fonction des saisons constitue un élément essentiel en architecture bioclimatique. Il en sera question à la section suivante.

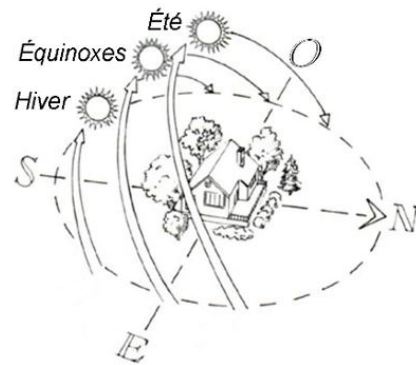
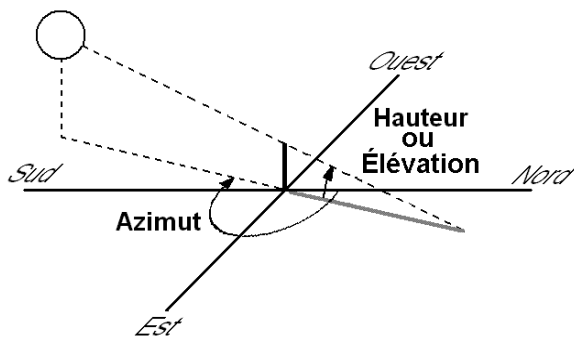


Figure 2.1 Axes de positionnement du soleil Figure 2.2 Position du soleil selon les saisons
Modifié de Pinyon deSign, s. d.

L'élévation plus ou moins culminante du soleil dans le ciel affecte la durée du jour et l'épaisseur de l'atmosphère que doivent traverser les rayons. La combinaison de ces deux facteurs et la présence plus fréquente de nuages à certaines périodes de l'année engendrent une variation de la puissance du rayonnement solaire (figure 2.3).

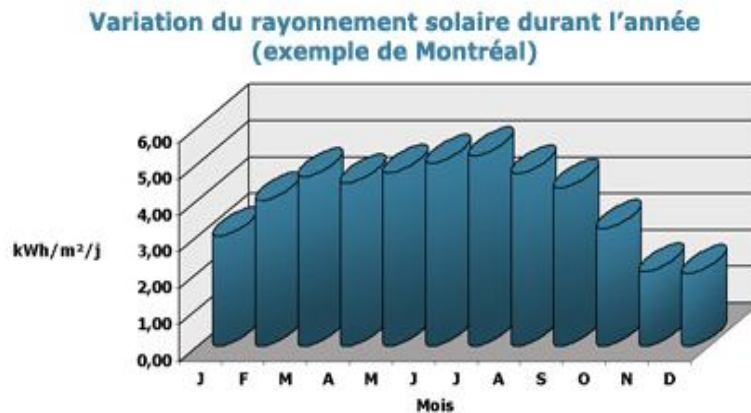


Figure 2.3 Variation du rayonnement solaire durant l'année à Montréal
Tirée de AEE, s. d.a.

Comment se fait-il que le Québec présente un potentiel d'exploitation de l'énergie solaire notable malgré qu'un climat nordique y règne durant plusieurs mois dans l'année? En fait, la performance des technologies solaires dépend très peu de la température extérieure, mais bien de la puissance et de la durée de l'ensoleillement. Ce sont les rayons infrarouges projetés par le Soleil qui sont associés à la chaleur puisqu'ils engendrent une vibration des atomes et donc une élévation de la température (transfert de chaleur par rayonnement). À cet effet, le tableau 2.1 compare la moyenne de l'énergie solaire reçue annuellement par différentes villes du Québec, de l'Espagne, de la Chine et de l'Allemagne. D'après ces données, le Québec présente un potentiel aussi intéressant que les pays qui sont reconnus comme étant des leaders dans le domaine. En pratique cependant, la province est bien loin de pouvoir s'y comparer. L'Allemagne, par exemple, produisait près 39 % de l'énergie solaire mondiale en 2004, et cela, même si le soleil fournit moins de 1 % de la consommation énergétique totale du pays tous secteurs confondus (industrie, transport et autres) (Baril, 2008). Seulement au niveau résidentiel, ce n'est pas moins de 4 % des foyers allemands qui sont munis de panneaux solaires thermiques pour un total de sept millions de mètres carrés (Tregouët, 2007). À titre comparatif, en janvier 2008, seulement sept clients d'Hydro-Québec avaient adhéré au programme d'autoproduction à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques.

Tableau 2.1 Moyenne de l'énergie solaire reçue annuellement sur une surface d'un mètre carré, inclinée selon un angle optimal
Tiré de AEE, s. d.a.

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

L'énergie solaire possède la capacité de remplacer les sources d'énergie conventionnelles dans de nombreuses applications, notamment dans le domaine immobilier et de la production d'électricité. Ensemble, les secteurs commercial, résidentiel et industriel représentent 75 % de la consommation en énergie au Québec (figure 2.4). La filière thermique de l'énergie solaire (sans production d'électricité) peut combler, à elle seule, une partie importante des besoins en chauffage et en eau chaude. Le potentiel maximal

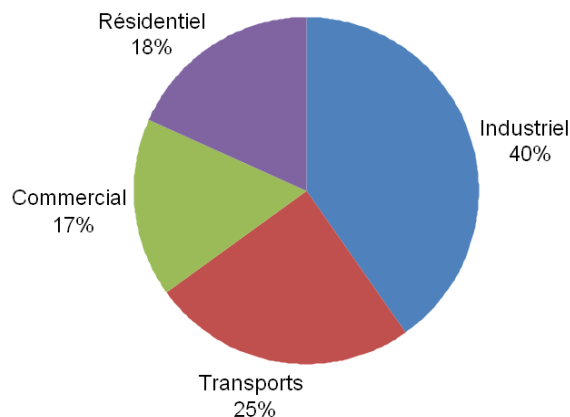


Figure 2.4 La consommation finale d'énergie par secteur en 2006
Tirée de MRNF, s. d.b.

de l'utilisation du rayonnement solaire thermique atteint respectivement un taux de 74 % et d'un peu moins de 70 % de la consommation des secteurs résidentiel et commercial. Le soleil peut également satisfaire une proportion non négligeable des besoins en éclairage de jour (figure 2.5). La grande diversité des activités industrielles rend plus difficile une telle estimation pour ce secteur. Néanmoins, les mêmes propriétés de l'énergie solaire (chauffage, eau chaude et éclairage) peuvent certainement s'appliquer à de nombreuses industries. À cela s'ajoute l'électricité produite à partir de panneaux de cellules photovoltaïques qui peut être utilisée pour une multitude de fonctions. L'énergie solaire possède donc un fort potentiel au Québec. Il suffit maintenant de savoir l'employer de façon judicieuse et en accord avec les enjeux du développement durable. C'est ce qui sera évalué dans les prochaines sections.

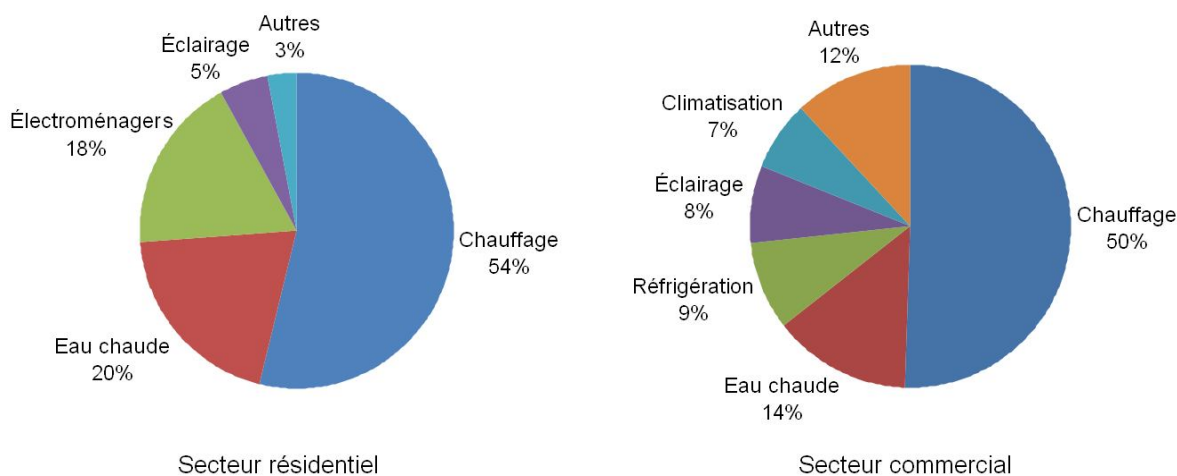


Figure 2.5 Consommation d'énergie des bâtiments résidentiels au Québec et commerciaux au Canada
Tirée de l'Institut de la statistique, s. d. et TRNEE, 2009.

2.2 Le solaire thermique passif

Le solaire thermique passif est la première des cinq utilisations de l'énergie solaire qui est présentée dans cet essai. Comme le nom l'indique, les techniques d'exploitation de cette forme d'énergie solaire ne font appel à aucun équipement mécanique ou électrique. Elles se produisent de façon passive.

2.2.1 Les bâtiments solaires passifs

Le potentiel de solaire thermique passif dans le domaine immobilier est important puisque, tel que démontré à la section précédente, le chauffage représente près de 50 % des besoins en énergie des résidences et des commerces. Cette utilisation du rayonnement solaire permet de réduire, à la source, la demande en énergie pour le fonctionnement d'une maison individuelle de 30 à 50 % en remplaçant, entre autres, l'électricité ou les combustibles fossiles (SCHL, s. d.a). La performance d'une habitation solaire passive réside dans sa capacité à optimiser les quatre principes suivants : capter la chaleur du rayonnement solaire, l'emmagasiner à l'aide d'une masse thermique, la conserver par isolation et la redistribuer adéquatement (Dermers et Potvin, 2004).

Au Québec, plusieurs éléments favorisent la disponibilité du rayonnement solaire au moment où la demande en chauffage est la plus élevée. Aux mois de janvier, février et mars, le soleil s'élève à environ 25 degrés à midi, la turbidité dans l'air est faible, le ciel est généralement dégagé et la neige au sol réfléchit les rayons. De grandes fenêtres orientées au sud-est, au sud et au sud-ouest laisseraient ces rayons pénétrer à l'intérieur d'un bâtiment. L'orientation de la maison et de la disposition des fenêtres par rapport au parcours du soleil dans le ciel constituent donc des facteurs majeurs dans la conception d'une habitation solaire passive. En été, c'est le contraire. Un apport trop élevé en énergie solaire est néfaste puisqu'elle génère une surchauffe. Il faut donc bloquer les rayons alors que le soleil grimpe jusqu'à 60 degrés (Thibaudeau, 2009). Afin de réduire les besoins et les coûts liés à la climatisation des bâtiments, plusieurs stratégies architecturales peuvent être mises en place lors de la conception ou au cours de rénovations : auvent, avant-toit, brise-soleil, etc. (figure 2.6). L'emplacement d'arbres à feuillage caduc situés à l'ouest, au sud et à l'est des bâtiments constitue un autre moyen efficace et gratuit d'empêcher l'excès de chaleur en été sans réduire l'apport thermique en hiver puisque les branches sont alors dénudées (RNCAN, 2004).

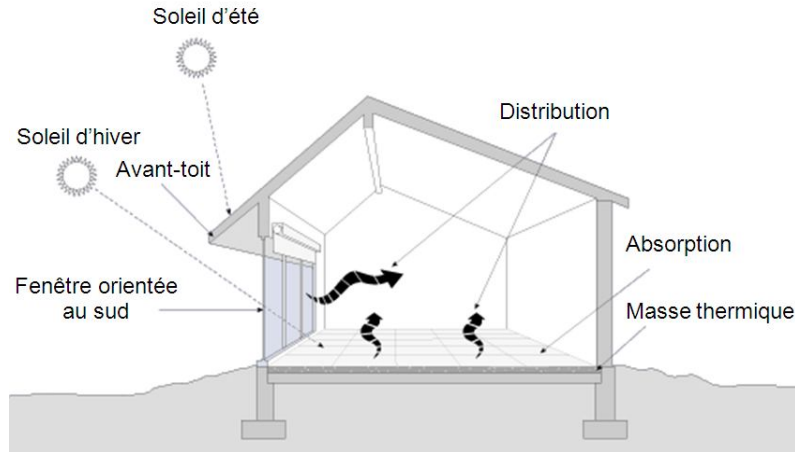


Figure 2.6 Exemple de design d'une habitation solaire passive
Modifié de Climate Navigator, s. d.

Après avoir maximisé le captage du rayonnement solaire, le défi consiste à l'emmagasiner pour que la chaleur soit redistribuée ultérieurement, c'est-à-dire à la fin de la journée et durant la nuit. La présence de matériaux à forte inertie thermique est nécessaire. Une dalle de 50 millimètres de béton sous le plancher, par exemple, permet d'absorber et d'emmagasiner la chaleur du rayonnement solaire durant toute la journée et crée ainsi une masse thermique (Dermers et Potvin, 2004). Pour que ce principe fonctionne adéquatement et qu'il ne génère pas de surchauffe durant le jour, certaines proportions entre la surface vitrée et la surface de plancher doivent être respectées. Pour un mètre carré de fenêtre orientée au sud, il faut compter jusqu'à six mètres de surface exposée au rayon du soleil (plancher et mur). C'est donc dans la partie sud des bâtiments que doivent être disposées les pièces à aire ouverte (salle à manger et salon) puisqu'elles offrent une grande surface d'absorption (tableau 2.2).

Tableau 2.2 Configuration d'une habitation solaire passive
Inspiré de Ideesmaison.com, s. d.

Orientation	Caractéristiques	Surface fenêtre / plancher
Sud	Gain solaire positif. Favorable pour les pièces ouvertes (salon, salle à manger, etc.). Nécessite une protection contre les rayons en été.	1/6 à 1/3
Est	Ensoleillement au début de journée. Favorable pour les chambres afin de profiter de la fraîcheur en fin de journée.	1/6 à 1/4
Ouest	Ensoleillement en fin de journée. Nécessite une protection pour contrer la surchauffe en été.	1/6 à 1/4
Nord	Aucun apport solaire. Favorable pour la salle de bain et les pièces froides.	0 à 1/6

Au même titre qu'une serre, la performance d'un bâtiment solaire passive dépend également de sa capacité à empêcher que l'énergie qui a été captée et emmagasinée ne s'échappe. En plus de garantir une isolation performante pour les planchers, les murs et le toit, un compromis doit être trouvé entre la surface vitrée, le type de fenêtre et les gains solaires. Il s'agit d'un élément important puisque, par temps froid, les fenêtres causent des pertes de chaleur jusqu'à 10 fois plus grandes que celles occasionnées par un mur d'une surface équivalente. Une partie de ces pertes est causée par les phénomènes de conduction et de convection, mais c'est le rayonnement qui représente le deux tiers des pertes thermiques totales d'une fenêtre ordinaire. La chaleur de l'intérieur des bâtiments est dissipée vers le ciel dont la température est extrêmement faible. Cette perte de chaleur est particulièrement marquée durant les nuits sans nuages. Dans ces conditions, du givre peut se former sur les surfaces exposées au ciel clair malgré une température supérieure au point de congélation. Ces pertes thermiques peuvent toutefois être réduites si un revêtement à faible émissivité (faible E) est appliqué sur la surface intérieure des vitres. Ainsi, les fenêtres sont transparentes à la majeure partie des rayons solaires, mais elles sont opaques au rayonnement provenant des surfaces chaudes de l'intérieur du bâtiment. Pour une journée entière, un gain solaire passif légèrement plus faible durant le jour est largement compensé par la valeur isolante plus élevée du vitrage à faible E durant la nuit (figure 2.7).

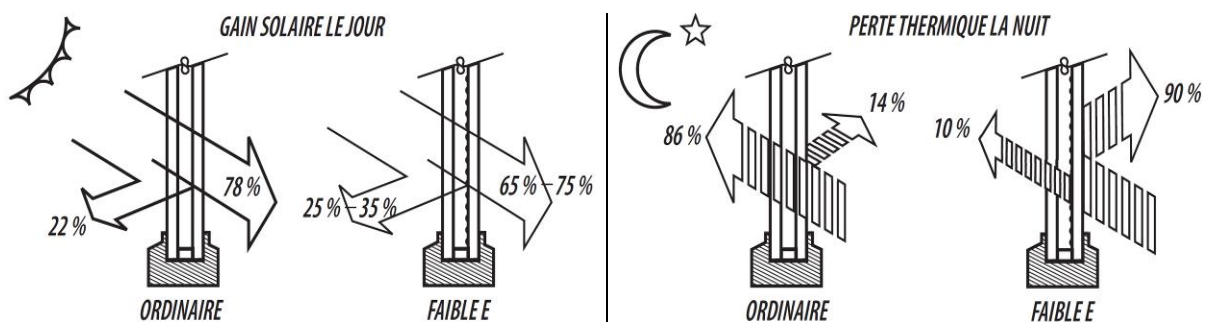


Figure 2.7 Gain solaire et perte thermique des fenêtres ordinaires et à faible E
Modifié de APCHQ, 2008, p. 20.

Les fenêtres à haut rendement énergétique combinent cette technique avec l'utilisation de gaz inerte (argon ou krypton). Elles diminuent donc les effets de pertes thermiques par rayonnement, mais aussi par conduction et par convection (RNCAN, 2004). Ainsi, une fenêtre à triple vitrage réduit le gain solaire de 20 % comparativement à une fenêtre à simple vitrage, mais possède un facteur d'isolation supérieur. Les technologies qu'utilisent aujourd'hui les fenêtres ont donc permis d'augmenter de manière significative leur

performance. Intégrées dans un bâtiment solaire passif, les fenêtres orientées au sud « laissent pénétrer plus d'énergie pendant la journée qu'elles n'en laissent fuir pendant la nuit » (RNCAN, 2004, p. 22). Par contre, une fenêtre orientée au nord ne procure aucune énergie autre que la lumière naturelle et génère donc d'importantes pertes thermiques. Son bilan énergétique est négatif.

Une façon de réduire davantage les pertes de chaleur par rayonnement et d'augmenter le confort des occupants consiste tout simplement à fermer les rideaux ou les stores une fois le soleil tombé. Ces obstacles limitent également le phénomène de rayonnement. La bonne habitude de fermer les rideaux ou les stores permettrait de réduire la facture de chauffage de 5 %. En été, c'est le contraire. La fermeture des rideaux durant le jour réduit les risques de surchauffe des locaux diminuant ainsi les besoins en climatisation (Audet, 2006). Toutefois, cette solution n'est pas parfaite puisque les rideaux ou les stores bloquent la chaleur du soleil après qu'elle ait pénétré à l'intérieur du bâtiment. Tel que décrit précédemment, l'utilisation d'un auvent, d'un avant-toit ou d'un brise-soleil placé à l'extérieur du bâtiment est préférable.

Le dernier élément d'une maison solaire passive est la distribution de la chaleur à travers toute l'habitation. De façon naturelle, la chaleur emmagasinée dans le plancher et les murs sera réémise par rayonnement et par convection assurant ainsi un très grand confort chez les occupants. Un système de ventilation mécanique ou un échangeur de chaleur peut également favoriser la répartition de l'air chaud dans toutes les pièces (Dermers et Potvin, 2004).

Les principes des bâtiments solaires passifs sont relativement simples, mais démontrent une très grande efficacité pour le chauffage des bâtiments. Néanmoins, à l'heure actuelle, ils ne sont pas spontanément mis en application au Québec. Au contraire, les constructions qui intègrent de façon intentionnelle et réfléchie les caractéristiques de bâtiments solaires passifs demeurent somme toute exceptionnelles. Pourtant, il ne s'agit que de choix stratégiques qui, s'ils sont tenus en compte lors des premières étapes de conception, « peu[vent] réduire considérablement les coûts de chauffage d'une maison, même en climat froid ». De plus, « [p]lusieurs principes de conception solaire passive peuvent être intégrés dans un projet sans que cela n'occasionne de coûts supplémentaires » (RNCAN, 2009b). Par contre, il faut souligner que ces principes simples

peuvent difficilement être mis en application sans une planification urbaine adéquate. En effet, l'intégration de stratégies d'exploitation de l'énergie solaire passive par des fenêtres principalement orientées au sud s'avère ardue dans des quartiers comme celui illustré à la figure 2.8. Les maisons qui sont construites dans les nouveaux quartiers présentent souvent de grandes façades vitrées, et cela, peu importe leur positionnement par rapport au parcours du soleil. Les habitations produisent également de l'ombre sur leurs voisins qui ne peuvent jouir de la chaleur et de la lumière que procure le soleil. La planification urbaine constitue donc un facteur majeur sur la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. La volonté de développer l'énergie solaire passive au Québec doit donc être exprimée à la fois par les citoyens, les architectes, les entrepreneurs, les promoteurs et les autorités provinciales et municipales.



Figure 2.8 Habitations à orientations diverses dans un nouveau développement
Modifié de Pentian Construction, s. d.

2.2.2 Le mur Trombe

Une autre application de l'énergie solaire passive peu exploitée au Québec, malgré son développement dans les années 1950, est le mur Trombe. Ce principe de chauffage utilise le phénomène d'une serre en réchauffant un mur (masse thermique) protégé par une surface vitrée. Le transfert de chaleur vers l'intérieur du bâtiment s'effectue de deux manières. D'abord, de l'air circule de façon passive ou à l'aide d'un ventilateur de bas en haut entre les parois et se réchauffe. Cet air chaud peut ensuite être propulsé dans le bâtiment. Durant la nuit, un clapet de contrôle peut limiter la circulation de l'air en fonction de sa température. Le système transmet également son gain thermique directement par rayonnement à travers le mur (figure 2.9). Ce rayonnement peut se poursuivre tout au long de la nuit.

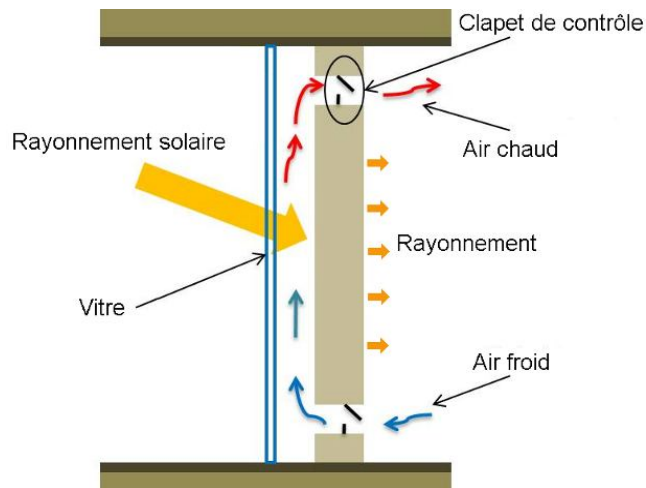


Figure 2.9 Schéma d'un mur Trombe
Modifié de Ékopédia, 2009.

La performance du mur Trombe est toutefois mise en doute dans la province à cause des nuits froides en hiver. Puisque les transferts thermiques s'effectuent toujours d'un point chaud à un point froid, le mur a tendance à perdre sa chaleur vers l'extérieur du bâtiment plutôt que vers l'intérieur. La Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) a réalisé une série d'évaluations théoriques en 2007. Les résultats pour des bâtiments bien isolés à Montréal montrent des pertes nettes d'énergie des mois de novembre à février, pertes qui ne sont pas compensées par les gains du printemps et de l'automne. L'étude conclut donc que « les murs de masse ne semblent pas constituer une technique viable pour le chauffage des locaux au Canada » (SCHL, 2007, p. 6).

2.2.3 Le phénomène d'îlot de chaleur urbain

L'apport thermique du rayonnement solaire est primordial en hiver pour réaliser, entre autres, des économies de chauffage des bâtiments. Néanmoins, la situation inverse se produit de plus en plus souvent en été alors que les besoins en climatisation augmentent. L'énergie du soleil est captée sous forme de chaleur dans les matériaux : béton, asphalte, briques, toits goudronnés, etc. La température dans le milieu urbain peut être jusqu'à dix degrés Celsius supérieurs à celle ressentie en campagne. Le 5 juillet 2008, une température de 41,9°C a été observée à l'usine de Bombardier, dans Saint-Laurent, alors qu'il faisait 21,7°C à quelques kilomètres de distance. Il s'agit d'une différence de plus de 20 degrés (Côté, 2009). Ce phénomène s'appelle l'îlot de chaleur urbain. Avec la construction de centres commerciaux, de parcs industriels et les développements immobiliers, leur nombre augmente sans cesse.

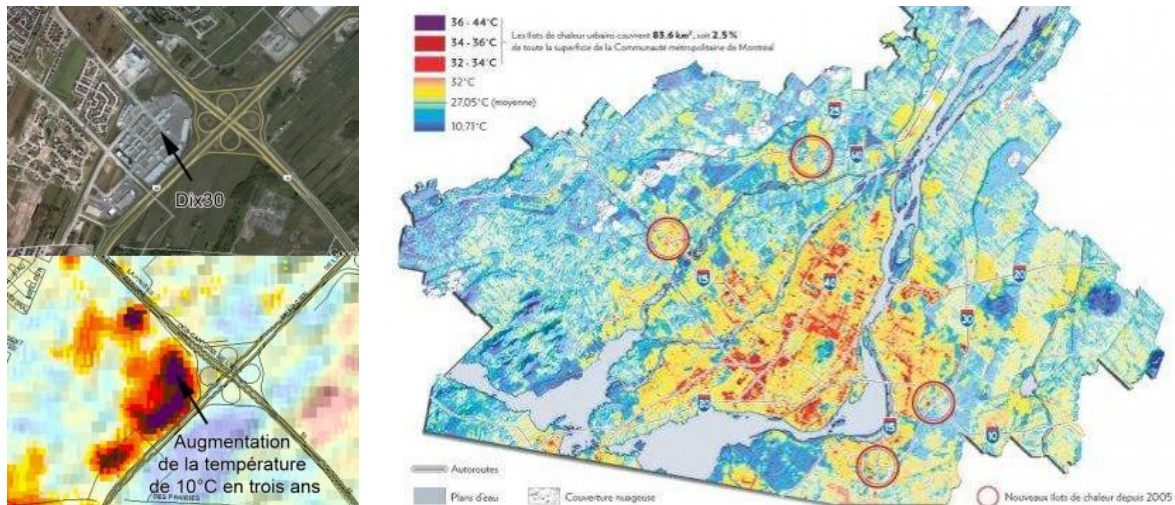


Figure 2.10 Îlots de chaleur urbain de la Communauté métropolitaine de Montréal
Modifié de Côté, 2008

Cette mauvaise planification du captage de l'énergie solaire fait croître les besoins en climatisation et crée de véritables problèmes de santé publique. Pour contrer le phénomène des îlots de chaleur, plusieurs municipalités ont déjà entrepris de vastes projets de reverdissement par la plantation de milliers d'arbres. En plus de filtrer la pollution de l'air, les feuillus créent de l'ombre, empêchant les rayons solaires d'atteindre les surfaces qui pourraient les absorber. Il faut dire que les « superficies boisées ont diminué de 18 % dans la région métropolitaine de Montréal entre 1998 et 2005 » (Corriveau, 2008). L'utilisation de surfaces plus pâles ou réfléchissantes sur les toitures ou sur les routes constitue d'autres solutions efficaces. Un aménagement urbain qui limite le phénomène d'îlot de chaleur permettrait donc de réduire substantiellement la demande en énergie. L'électricité qui n'est pas consommée dans la province peut alors être vendue aux États voisins qui ont aussi de grands besoins en climatisation durant l'été.

2.2.4 La corde à linge

Les sècheuses à linge sont des électroménagers qui consomment une quantité non négligeable d'énergie, notamment parce qu'elles produisent de la chaleur. En Ontario, « une sècheuse électrique utilisée systématiquement consomme chaque année quelque 900 kilowatts, ce qui représente 6 % de la consommation d'électricité du secteur résidentiel » (Francoeur, 2008). Au Québec, si ce taux s'élève à 3 %, ce n'est pas parce que les sècheuses sont plus performantes ou moins utilisées, mais surtout parce que davantage d'électricité est consacrée au chauffage. Or, l'utilisation d'une corde à linge ou d'un séchoir amovible peut facilement remplacer cet appareil plusieurs mois par année. Le

linge peut alors sécher à l'extérieur en profitant directement de deux sources d'énergie renouvelables : la chaleur du soleil et le vent. Il s'agit sans contredit d'une solution beaucoup plus efficace en termes d'énergie. En plus, les vêtements durent plus longtemps et les rayons solaires procurent un effet détachant. Tout comme c'est le cas pour la fermeture des rideaux ou des stores une fois la nuit tombée, l'utilisation plus fréquente et répandue d'une corde à linge fait appel au comportement de la population et nécessite des efforts individuels. Néanmoins, plusieurs municipalités restreignent ou interdisent le droit à l'utilisation de corde à linge. Il s'agit pourtant d'une simple habitude dont même Hydro-Québec fait la promotion.

2.3 Le solaire thermique actif

Les technologies solaires actives visent à tirer profit de l'énergie thermique du rayonnement solaire pour la transmettre à un fluide caloporteur. La chaleur ainsi produite peut servir directement pour le chauffage des bâtiments ou pour générer de l'eau chaude domestique. Le potentiel de remplacement des énergies conventionnelles pour le chauffage et l'eau chaude s'élève donc à près de respectivement 75 % et 65 % dans les secteurs résidentiel et commercial (voir section 2.1). Ce pourcentage est plus difficile à établir pour le secteur industriel puisque les sources de consommation d'énergie varient énormément en fonction des activités des entreprises.

2.3.1 Le chauffe-eau solaire

C'est certainement la production d'eau chaude domestique qui est l'application la plus connue dans le domaine du solaire thermique actif. Les panneaux solaires utilisent le même principe que les tuyaux enroulés sur les cabanons pour chauffer l'eau d'une piscine, mais de façon plus performante et cela à longueur d'année. Encore une fois, le rendement de ce phénomène ne dépend pas de la température extérieure, mais bien de la puissance et du temps de l'ensoleillement. « Un système solaire thermique est en mesure de convertir en chaleur jusqu'à 70 % de l'énergie captée » (AEE, s. d.a). Il est généralement composé des éléments suivants : les capteurs solaires, la tuyauterie isolée, le réservoir de stockage d'eau chaude avec échangeur de chaleur, la pompe et le régulateur.

Les capteurs, qui absorbent l'énergie du rayonnement solaire et la transmettent au fluide caloporteur, doivent être orientés plein sud pour être le plus efficace. Ils sont souvent installés sur les toits, les murs ou sur un trépied. Le fluide caloporteur circule en boucle

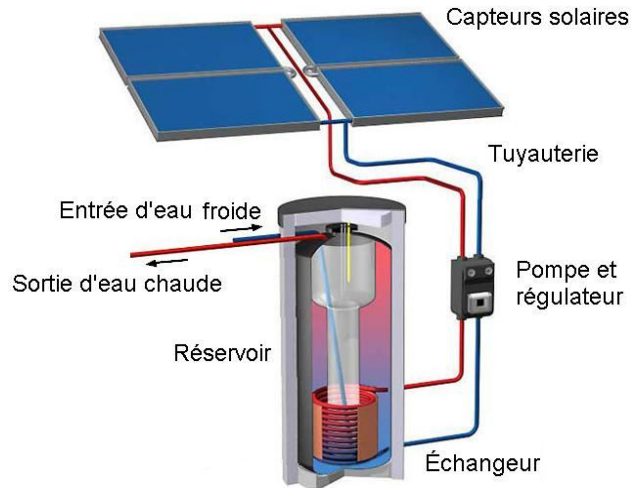


Figure 2.11 Système de capteurs solaires et réservoir d'eau chaude
Modifié de 3e habitat, s. d.

fermée dans les capteurs et à travers la tuyauterie isolée jusqu'au réservoir d'eau chaude. Un serpentin y joue le rôle d'échangeur de chaleur, permettant au fluide de céder sa chaleur, sans contact direct, à l'eau domestique qui sera ainsi préchauffée. Tant que la température du fluide caloporteur est suffisamment élevée, le régulateur active la pompe électrique pour recommencer le cycle. Tout dépendant de la configuration du système, un apport supplémentaire d'énergie peut augmenter la température de l'eau directement dans le réservoir de stockage. L'eau préchauffée peut également être transférée dans un second chauffe-eau, traditionnel celui-là, où un apport de chaleur peut être fourni, en cas de besoin, par un élément électrique ou par la combustion de gaz naturel.

Deux types de capteurs solaires thermiques domestiques sont bien adaptés pour le Québec. Il s'agit du capteur plat et du capteur à tubes sous vide. Le premier a l'apparence d'une fenêtre placée sur un toit. Il met en œuvre le principe d'une serre en utilisant une fenêtre à faible émissivité pour emprisonner le rayonnement solaire. La chaleur peut alors être transmise au fluide caloporteur qui circule dans un serpentin. Le tout est protégé du froid extérieur par un boîtier isolé (figure 2.12). Le deuxième type de capteur profite de l'effet de serre et des propriétés isolantes du vide pour réchauffer le tube caloporteur (figure 2.13). Ces capteurs ont une épaisseur d'environ dix centimètres et la surface exposée au soleil mesure environ trois mètres carrés. Étant donné qu'un système de chauffe-eau à énergie solaire comporte peu de pièces mobiles, sa durée de vie est relativement élevée et l'entretien est minime. À part le fluide caloporteur qui doit être remplacé environ au deux à trois ans, le réservoir a une durée de vie de près de dix ans, la pompe, environ 15 ans et les capteurs, plus de 20 ans.



Figure 2.12 Capteur plat
Modifié de Autan Solaire, s. d.



Figure 2.13 Capteur à tubes sous vide
Tiré de AEE, s. d.a.

Le nombre de capteurs solaires nécessaires pour une habitation dépend du système sélectionné, de la consommation en eau chaude des occupants, de la disposition des capteurs et de l'inclinaison de ceux-ci par rapport au parcours du soleil. L'Agence de l'efficacité énergétique estime que deux capteurs solaires d'une surface d'environ trois mètres carrés chacun (32 pieds carrés) peuvent combler la majorité des besoins en eau chaude d'une famille de trois personnes. Durant l'été, le système peut fournir près de 90 % de l'eau chaude, 100 % pour les journées très ensoleillées. Par contre, la performance diminue à seulement 30 % au début de l'hiver (novembre et décembre) à cause du taux d'ensoleillement moins élevé (figure 2.14). Sur une année complète, « un chauffe-eau solaire domestique peut fournir au maximum 60 % de l'énergie » (AEE, s. d.a). Un système d'appoint sera donc toujours nécessaire, surtout pour les périodes de l'année durant lesquelles l'ensoleillement est moindre.

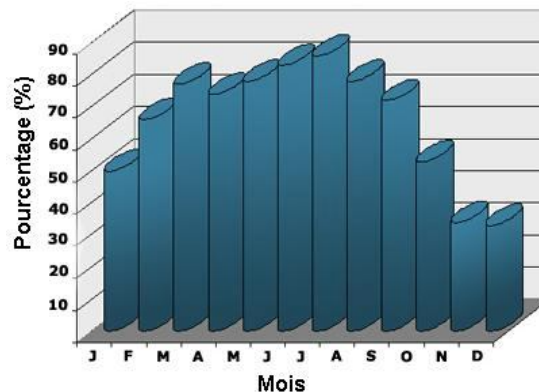


Figure 2.14 Besoins en eau chaude comblés par un capteur solaire à Montréal
Modifié de l'Agence de l'efficacité énergétique, s. d.

L'Agence de l'efficacité énergétique (AEE) a lancé un projet-pilote en juin 2009 afin d'évaluer, de manière expérimentale, le potentiel de cette application au Québec. L'Agence fournit une aide financière représentant environ 50 % du coût d'un système de

chauffe-eau solaire. Ce coût peut s'élever entre 4 600 \$ et 8 500 \$. Un système solaire thermique permettrait de réaliser des économies d'environ 200 \$ par année puisqu'un système muni de capteurs d'environ six mètres carrés de surface devrait fournir en moyenne 2 700 kWh. La période de retour sur l'investissement demeure donc longue. Le projet, qui vise l'implantation de 600 systèmes à travers le Québec d'ici octobre 2010, permettra de mesurer l'offre et la demande de cette technologie (AEE, s. d.a). Son prix devrait diminuer au fur et à mesure que la popularité des capteurs solaires augmentera. Il faut dire que la province est nettement en retard dans le domaine. À titre comparatif, les habitations de l'Autriche, qui jouit d'un ensoleillement comparable au nord-est de l'Amérique, sont déjà munies d'un total de 900 000 mètres carrés de chauffe-eau solaires (Tanguay et Desjardins, 2009). La compétition entre les vendeurs et les installateurs est nécessairement plus forte.

2.3.2 Le quartier Drake Landing

Plusieurs autres applications peuvent permettre de tirer profit de l'énergie captée à partir de panneaux solaires. Par exemple, la communauté Drake Landing dans la ville d'Okotoks, en Alberta, utilise un système urbain de stockage d'énergie solaire pour combler la majorité des besoins en chauffage et en eau chaude d'une cinquantaine d'habitations. Les toits des garages sont recouverts de quelque 800 panneaux solaires plats qui génèrent 1,5 mégawatt de puissance thermique lors d'une journée d'été typique (figure 2.15). Cette chaleur est dirigée vers deux cuves de stockage à court terme de 120 mètres cubes et vers un puits de stockage saisonnier souterrain. La température dans le sol et la roche environnante atteint 80°C à la fin de l'été. Durant l'hiver, l'eau chaude retourne vers chaque maison pour combler 90 % des besoins en chauffage et 60 % de la demande en eau chaude. Puisque cette énergie remplace celle produite par des



Figure 2.15 Vue aérienne de la communauté solaire de Drake Landing Okotoks
CanmetÉnergie, 2009, p. 1.

combustibles fossiles ou des centrales thermiques électriques, « chaque maison produira jusqu'à 5 tonnes de moins de gaz à effet de serre et réduira sa consommation en énergie de 110,8 GJ (30 777 kWh) par rapport à celle d'une maison canadienne conventionnelle » (CanmetÉnergie, 2009, p.2). Le taux de rayonnement solaire étant similaire au Québec, ce genre de projet pourrait être réalisé ici avec des résultats comparables.

2.3.3 Le mur solaire

Le préchauffage de l'air extérieur avant son traitement par les systèmes de ventilation constitue un dérivé du principe du mur de Trombe présenté à la section 2.2.2. Cette technique consiste à aspirer de l'air frais extérieur par les petits orifices d'une feuille profilée métallique (figure 2.16). Cet air circule ensuite entre la feuille métallique et le mur du bâtiment en absorbant l'énergie gratuite du soleil. Si le rayonnement solaire n'est pas suffisant pour que la température de consigne soit atteinte (exemple : 21°C), le système de ventilation procure la chaleur supplémentaire. Plus le volume d'air à préchauffer est grand, plus la superficie couverte par le système doit être large. Les feuilles profilées métalliques peuvent parfois couvrir une façade entière. Par contre, elles ont l'avantage de pouvoir être installées sur de nouveaux bâtiments comme sur des bâtiments existants. Les applications sont nombreuses dans les secteurs industriel et commercial. Le pavillon de l'École de gestion John-Molson de l'Université Concordia en est un bon exemple. Une partie de la façade est munie de ce type de capteur solaire, ce qui réduira la demande en énergie pour le chauffage.

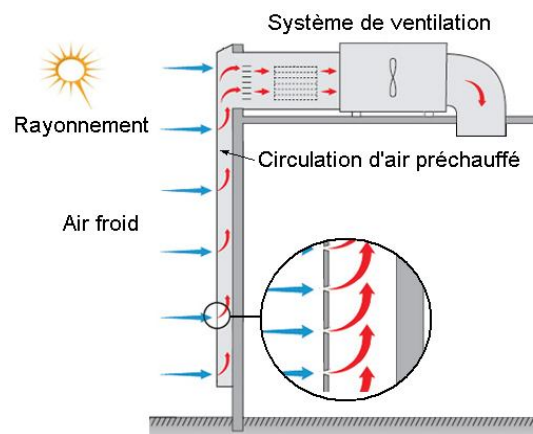


Figure 2.16 Système de chauffage de l'air
Modifié de Solar Wall, s. d.

Les modèles résidentiels sont légèrement différents. D'abord, ils sont beaucoup plus petits (quelques mètres carrés seulement). Selon leur type, ils peuvent aspirer et préchauffer

l'air frais de l'extérieur avant qu'il pénètre dans l'habitation. D'autres modèles recirculent l'air intérieur en boucle fermée afin d'augmenter sa température. C'est le même principe qu'un convecteur électrique, mais l'apport thermique provient du soleil. Peu importe le modèle choisi, la technique du mur solaire est particulièrement bien adaptée aux régions nordiques comme le Québec puisque l'élévation du soleil est faible en hiver. Les rayons frappent donc les surfaces verticales avec un meilleur angle d'incidence. Un des principaux fabricants des modèles industriels et commerciaux, SolarWall, estime que le retour sur investissement se situe entre zéro et trois ans pour les nouvelles constructions et entre trois et sept ans pour les rénovations. Ces durées dépendent de l'apport solaire et du coût des énergies conventionnelles (électricité, gaz naturel, etc.). Le système permettrait de réduire jusqu'à 50 % la consommation d'énergie pour le chauffage en captant de 410 à 970 kWh de chaleur par mètre carré de surface (SolarWall, s. d.).

2.3.4 La neige de Cap-Rouge

En 1998, l'ancienne ville de Cap-Rouge, près de Québec, a su innover avec une utilisation particulière de l'énergie solaire. La municipalité devait trouver un moyen de respecter la nouvelle réglementation concernant l'élimination des neiges usées. Elle ne pouvait plus déverser ses neiges usées directement dans la rivière du Cap Rouge, mais ne disposait pas de terrain vacant conforme où l'entreposer. Une fondeuse géothermique a donc été fabriquée. « À long terme, la solution apparaissait beaucoup plus rentable que le transport de la neige jusqu'à la ville voisine » (MDDEP, s. d.a). Une série de capteurs solaires thermiques permettent donc d'accumuler de la chaleur durant tout l'été dans un réservoir aquifère souterrain. La température de l'eau grimpe jusqu'à 25°C. La municipalité se sert de cette énergie solaire pour faire fondre jusqu'à 1000 mètres cubes de neige par jour et « dispose ainsi de 60 000 m³ de neige usée par année, soit l'équivalent de 3000 camions de neige » (Tanguay et Desjardins, 2009, p. 55). En réduisant les coûts de transport et l'aménagement des sites d'entreposage, la Ville de Québec épargnerait environ 100 000 \$ par hiver (La Presse Canadienne, 2008a). La fondeuse de Cap-Rouge constitue donc un bon exemple d'exploitation de l'énergie solaire qui procure des avantages à la fois économiques et environnementaux.

2.4 Le solaire thermodynamique

Les centrales solaires thermodynamiques concentrent le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à une température beaucoup plus élevée que celle atteinte par les

systèmes présentés à la section précédente. En fait, l'énergie dégagée par les systèmes solaires thermodynamiques est suffisante pour actionner des turbines à vapeur et produire de l'électricité. Cette application est difficilement applicable au Québec puisqu'elle demande des superficies pouvant atteindre plusieurs dizaines d'hectares et exige un énorme potentiel de rayonnement solaire. Le coût de production de l'électricité serait également plus élevé que celui d'Hydro-Québec. Néanmoins, le solaire thermodynamique est digne de mention puisqu'il crée une véritable révolution énergétique dans plusieurs pays comme les États-Unis et l'Espagne.

Contrairement aux cellules photovoltaïques qui produisent directement de l'électricité, les centrales solaires thermodynamiques optimisent d'abord la captation thermique pour ensuite transformer cette chaleur en énergie mécanique et finalement en électricité. Il existe plusieurs types de centrales à énergie solaire thermodynamique : à capteur parabolique (1), à capteurs cylindro-paraboliques (2), à effet cheminée (3), à miroirs de Fresnel (4) et à tour solaire ou à concentration solaire (5) (figure 2.17).

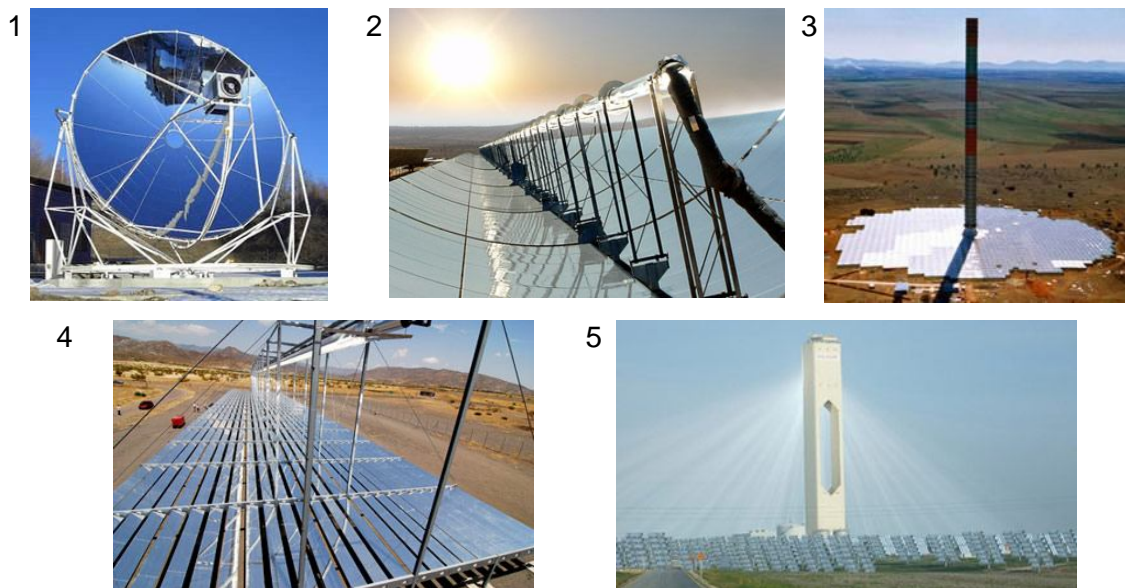


Figure 2.17 Différents types de centrales solaires thermodynamiques
Ecosources, s. d.

Tout dépendant de la technologie utilisée, le point où se concentre le rayonnement peut atteindre des températures extrêmement élevées, jusqu'à 1000 degrés Celsius. Plus le point focal est petit, plus la chaleur est intense. L'objectif est de générer suffisamment de vapeur pour actionner des turbines pouvant développer une puissance atteignant 64 mégawatts (MW). C'est le cas de la centrale Nevada Solar One aux États-Unis qui

alimente 40 000 foyers américains en électricité. Il s'agit de la plus grande centrale solaire utilisant des capteurs cylindro-paraboliques au monde. Elle occupe une superficie d'un peu plus d'un kilomètre carré et compte environ 200 000 miroirs (Ecosources, s. d.). Il n'est donc pas étonnant qu'elle soit située en plein désert tout près de Las Vegas. « Les centrales solaires [thermodynamiques] permettent de transformer de 20 % à 40 % de l'énergie potentielle en électricité, contre 15 % pour les panneaux photovoltaïques » (Bérubé, 2008). Actuellement, le coût de cette technologie varie de 15 à 20 ¢/kWh, mais pourrait bientôt chuter autour de 10 ¢. Il s'agit sensiblement des mêmes coûts de production que les parcs éoliens et les nouvelles centrales hydroélectriques au Québec. En Californie seulement, 35 projets similaires sont sur les planches à dessin. Toutefois, la grande consommation en eau nécessaire pour nettoyer les miroirs de ces centrales devient de plus en plus la source de critiques (Bérubé, 2009).

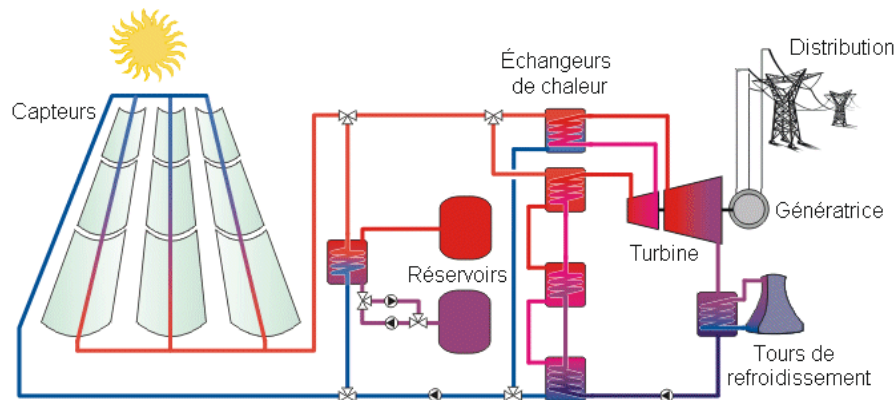


Figure 2.18 Fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique
Modifié de Quaschnigb, V., s. d.

De l'autre côté de l'océan Atlantique, l'Europe, l'Afrique du Nord et le Proche-Orient lancent le projet Desertec. Ce projet de plusieurs centaines de milliards de dollars doit permettre à l'Union européenne d'atteindre, tel que mentionné précédemment, un taux de production de 20 % d'énergies renouvelables d'ici 2020 (Marciano, 2008). Les États entourant la mer Méditerranée seront tous reliés par un réseau interconnecté alimenté, entre autres, par des centrales thermodynamiques situées en Afrique du Nord. L'objectif est d'exploiter l'énergie solaire équivalente à 1,5 million de barils de pétrole que reçoit annuellement chaque kilomètre carré de désert. En fait, les besoins actuels en énergie de la planète entière pourraient être comblés si seulement 0,3 % des 40 millions de kilomètres carrés de déserts de la planète étaient recouverts de centrales solaires (IMA, 2006). Encore une fois, cela démontre la puissance du rayonnement solaire. Néanmoins,

cette approche est difficilement applicable ou justifiable au Québec puisque la disponibilité et l'efficacité des autres sources d'énergie renouvelables sont plus grandes.

2.5 Le solaire photovoltaïque

Parmi toutes formes d'utilisations de l'énergie solaire, c'est probablement les cellules photovoltaïques qui sont les plus connues. Cette technologie exploite la lumière du soleil pour la convertir directement en électricité. C'est le physicien français Antoine-César Becquerel qui a observé la réaction photovoltaïque pour la première fois en 1839 lorsque des éléments conducteurs ont généré un courant en présence de lumière (photons). Le principe est le suivant : la collision entre un photon et un matériau semi-conducteur génère des charges électriques positives et négatives qui engendrent un faible courant. Cette réaction est produite par plusieurs matériaux, mais c'est actuellement le silicium qui est le plus couramment utilisé dans la fabrication de cellules photovoltaïques. Sa pureté doit atteindre plus de 99,999 %. Même si la silice est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre, les producteurs ont du mal à répondre à la croissance de la demande mondiale en panneaux solaires. Plusieurs entreprises québécoises se sont lancées dans la course au solaire photovoltaïque. Il en sera question dans le chapitre suivant.

Un des principaux avantages des panneaux solaires photovoltaïques réside dans leur flexibilité. Ils peuvent être installés pratiquement partout et produisent de l'électricité là où se trouve la demande. Les impacts du transport de l'énergie sur de longues distances sont donc éliminés. De plus, « ils affichent une durée utile qui excède 40 ans, n'émettent pas de polluants, sont peu coûteux à exploiter et peuvent être installés aisément sur la plupart des maisons » (SCHL, s. d.b). Dans le sud du Québec, un panneau d'un mètre carré peut produire environ 130 watts en plein soleil, soit une moyenne d'un peu plus de 100 kWh par année. L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque convient particulièrement bien à l'alimentation des habitations qui se situent loin du réseau d'électricité. L'installation de panneaux solaires reliés à des accumulateurs (batteries) pour atteindre l'autonomie énergétique devient alors plus avantageuse financièrement que le raccordement au réseau dont les frais peuvent atteindre de 5 000 à 10 000 \$ par kilomètre. Un nombre suffisant d'accumulateurs permet une autonomie d'une durée de trois à sept jours (figure 2.19). Néanmoins, d'autres sources d'énergie sont généralement nécessaires pour combler les besoins liés aux électroménagers et au chauffage, par exemple, ou pour garantir une alimentation constante.

Les systèmes photovoltaïques tendent de plus en plus à être raccordés au réseau (Figure 2.20). Un onduleur synchrone combine alors l'énergie produite par les cellules photovoltaïques et l'énergie d'Hydro-Québec en fonction des charges domestiques. En cas de surplus, l'excédent d'énergie produit par l'habitation est retourné au réseau pour être consommé par d'autres clients. Lorsque l'installation solaire ne produit pas assez d'électricité, l'habitation achète la quantité d'énergie déficitaire. Une série d'accumulateurs peut être jumelée à ce système pour assurer un approvisionnement autonome en cas de panne de courant, mais cela représente des frais supplémentaires (SCHL, s. d.b). Globalement, l'énergie solaire peut fournir de 25 à 75 % des besoins en énergie d'une maison à haut rendement énergétique (Hydro-Québec, s. d.a).

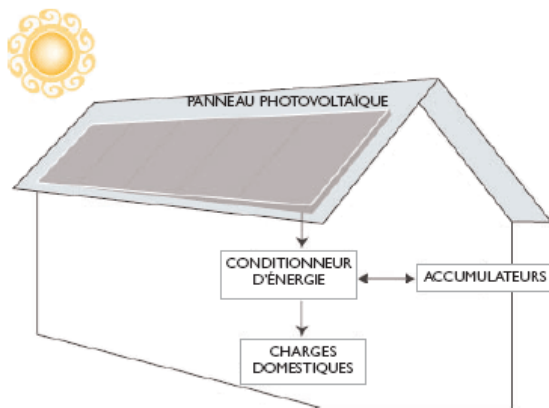


Figure 2.19 Système solaire autonome
Tiré de SCHL, s. d.b.

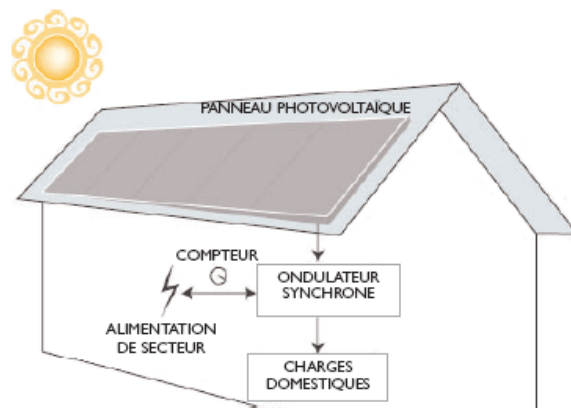


Figure 2.20 Système solaire relié au réseau
Tiré de SCHL, s. d.b.

Au mois de septembre 2009, seulement 11 clients résidentiels partageaient l'électricité issue de leurs panneaux solaires avec Hydro-Québec en participant au programme d'autoproduction. La puissance générée variait, en moyenne, entre 2 et 2,5 kilowatts, ce qui est suffisant pour alimenter de 20 à 25 lumières de 100 watts (Bonneau, 2009). Cette situation n'a rien de surprenant puisque les contraintes sont nombreuses pour les autoproducteurs. D'abord, Hydro-Québec n'achète pas les surplus, mais accorde plutôt des crédits sous forme de kilowattheures. Ces derniers peuvent être appliqués au solde des factures des clients ou reportés aux soldes ultérieurs pour une période maximale de 24 mois. D'ailleurs, Hydro-Québec indique clairement dans les critères d'admissibilité du programme que les autoproducteurs ne peuvent produire plus d'énergie que leur propre consommation, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent dégager des surplus systématiques. Pourquoi? La réglementation en vigueur ne permet pas à Hydro-Québec d'acheter de l'électricité sans passer par un processus d'appels d'offres. En plus des frais d'installation

des équipements d'autoproductions, les clients doivent déboursier un montant de 400 \$ pour l'inspection des installations. La situation est toute autre dans plusieurs pays d'Europe et même en Ontario, où les personnes qui produisent de l'électricité à partir de l'énergie solaire recevaient, jusqu'à tout récemment, des redevances de 0,42 \$/kWh (Hydro-Québec, s. d.b). Ce tarif d'achat de l'énergie solaire par l'Ontario est passé à 0,80 \$/kWh à la fin du mois de septembre 2009 dans le cadre d'un programme de transition de la province en faveur de l'énergie verte (Ontario, 2009). C'est plus de dix fois le tarif de vente d'Hydro-Québec aux clients résidentiels.

L'utilisation de l'électricité générée par les panneaux photovoltaïques ne se limite pas aux bâtiments. Comme les surplus sont envoyés sur le réseau public, cette énergie peut être consommée par n'importe quel appareil. L'engouement pour le solaire photovoltaïque est notable partout sur la planète. La Californie souhaite installer des capteurs sur 100 000 toits par année au cours de dix prochaines années. L'Allemagne possède le même genre d'objectif, mais constitue déjà le chef de file dans le domaine puisque, tel que mentionné précédemment, le pays produisait 39 % de l'énergie solaire mondial en 2004 (Baril, 2008). La France veut mettre en place des centrales solaires photovoltaïques dont la puissance cumulée s'élèvera à 300 MW et vise à atteindre un total de 5 400 MW d'ici 2020 (AFP, 2008). Le Japon se bat aussi pour demeurer dans les leaders. Pourtant, à l'exception de la Californie, ces pays ne possèdent pas un potentiel solaire beaucoup plus grand que le Québec, tel que le démontre la figure suivante. Ce n'est donc pas une question de faisabilité technique, mais bien de stratégie énergétique.

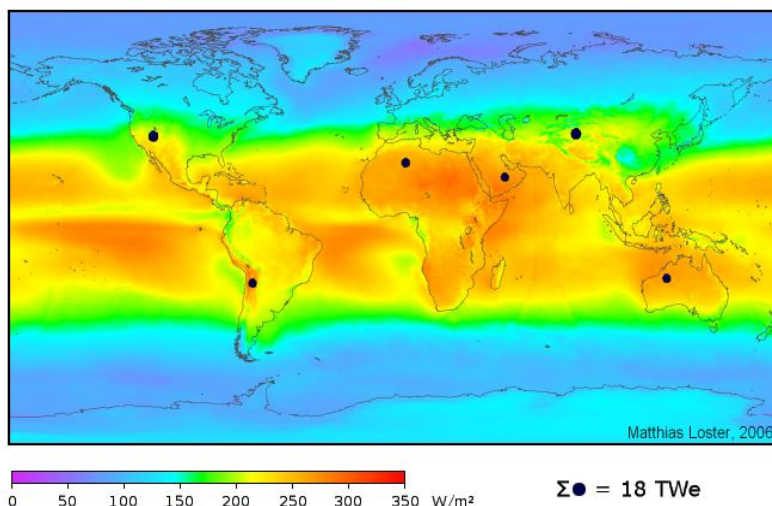


Figure 2.21 Répartition du potentiel solaire sur la planète
Tiré de Planet Air, s. d.

2.6 L'éclairage naturel

Les ampoules fluocompactes ont créé une véritable révolution dans le domaine de l'éclairage parce que, pour la même quantité de lumière produite par les ampoules incandescentes, elles ne consomment qu'une fraction de l'énergie. Les prochaines générations de diode électroluminescente (LED en anglais) créeront certainement le même genre de révolution dès leur entrée sur le marché d'ici quelques années. Or, la source la plus puissante de lumière ne demeure-t-elle pas le Soleil? Le Québec est exposé à une quantité suffisante de lumière du jour pour répondre à la majorité des besoins en éclairage des bâtiments commerciaux. Dans le sud de la province, le niveau de luminosité moyen sous un ciel couvert est d'environ 7500 lux. C'est 15 fois plus que la lumière requise pour réaliser la plupart des tâches intérieures (TPSGC, 2002). Ainsi, l'éclairage naturel comporte de nombreux avantages s'il est bien intégré dès la conception des bâtiments résidentiels, commerciaux ou industriels (figure 2.22).

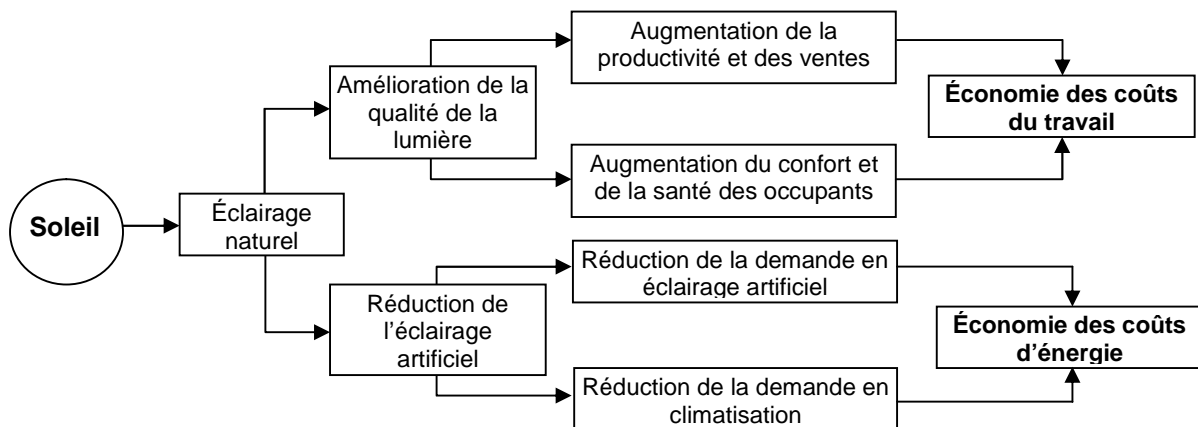


Figure 2.22 Les bénéfices de l'éclairage naturel dans les bâtiments
Modifié de TPSGC, p. 6, 2002.

D'abord, le rayonnement solaire améliore la qualité de l'éclairage dans les bâtiments puisqu'il couvre tout le spectre de la lumière visible auquel la vision humaine est adaptée. Les appareils d'éclairage artificiel ne produisent, quant à eux, qu'un faible éventail de longueurs d'onde. L'exposition à la lumière naturelle augmente la productivité des occupants qui sont à la fois plus créatifs, plus efficaces et ont moins tendance à être malades. Certaines études menées dans le domaine commercial et rapportées par Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC) démontrent même que les clients sont plus portés à acheter en présence de la lumière du jour. Ce facteur serait plus significatif que les heures d'ouverture et les caractéristiques du bassin de population

à proximité du magasin, entre autres. Les statistiques prouvent à 99,9 % que l'éclairage naturel augmente l'indice de vente de 31 à 49 % possiblement à cause de l'attitude plus calme des clients, d'une meilleure visibilité ou d'un meilleur rendu de couleur de la marchandise, ou encore d'un meilleur service de la part de vendeurs plus motivés.

En ce qui a trait à l'augmentation du confort et de la santé des occupants, d'autres études établissent le lien entre la variation de l'intensité de la lumière naturelle et une réponse positive de l'organisme. L'exposition à l'éclairage du soleil augmente le confort tout en diminuant le stress des occupants. Dans les régions nordiques comme le Québec, il s'agit également d'une solution à favoriser pour réduire les effets des troubles affectifs saisonniers causés par la durée plus courte des jours en hiver. Cette forme de dépression est caractérisée par plusieurs symptômes : fatigue, suralimentation, hypersomnie, désynchronisation de l'horloge biologique, etc. (TPSGC, 2002).

L'éclairage naturel permet de remplacer, du moins durant le jour, les appareils d'éclairage artificiel qui consommeraient une quantité d'énergie plus grande. Dans certains bâtiments commerciaux, les magasins à grande surface par exemple, l'éclairage représente de 30 à 40 % de la consommation d'électricité. Différents systèmes de contrôle munis de capteur de luminosité permettent d'optimiser l'utilisation de l'éclairage naturel en réduisant l'éclairage conventionnel (tube fluorescent, lampes halogènes, etc.). Ainsi, lorsque la lumière du jour est suffisante, les appareils électriques s'éteignent ou sont tamisés. À la tombée de la nuit ou lors de journée nuageuse, les lumières s'allument en fonction des besoins d'éclairage. Les économies d'énergie réalisées à l'aide de ce genre de système peuvent réduire de deux tiers les frais d'éclairage.

Malgré l'augmentation de l'efficacité des ampoules ou des tubes fluorescents, la majorité de l'énergie qu'ils consomment n'est pas transformée en lumière, mais bien en chaleur. Ainsi, l'éclairage naturel peut réduire de manière importante les besoins en climatisation et la demande de pointe en électricité. Il s'agit d'une option qui s'applique surtout dans le cas des bâtiments commerciaux qui sont majoritairement occupés durant le jour, alors que la lumière du soleil est justement disponible. Cette solution serait particulièrement bénéfique aux États-Unis, qui, lors de chaudes journées d'été, importent à fort prix de l'électricité pour répondre à la demande instantanée en climatisation. Toutefois, pour que l'éclairage naturel soit exploité de façon judicieuse, la fenestration doit être bien intégrée aux bâtiments au risque d'augmenter davantage l'apport de chaleur. Tel que mentionné dans

la section sur l'énergie solaire passive, il faut éviter que les rayons du soleil pénètrent directement dans les pièces en été. À l'inverse, en hiver, la plus faible quantité de chaleur produite par la fermeture des lumières pourra être compensée par un apport solaire thermique passif. Une demande plus constante au cours de la journée rendue possible par l'exploitation de l'énergie solaire réduit donc les frais d'électricité et diminue la pression sur l'ensemble du réseau.

L'intégration de l'éclairage naturel dans la conception des bâtiments est influencée par de nombreux facteurs. Le rayonnement solaire direct constitue une source importante de lumière, mais peut causer des problèmes d'éblouissement. À l'opposé, la lumière naturelle diffuse générée par temps plus nuageux est moins intense, mais peut être contrôlée plus facilement. Les besoins en éclairage dépendent également de la fonction des locaux : salle de classe, bureau, hall d'entrée, cuisine, etc. Aussi, une faible variation du niveau d'éclairage peut être sans importance dans une cafétéria par exemple, mais inacceptable dans une salle d'opération. L'emplacement du bâtiment dans son milieu est également un élément important à considérer. En région urbaine, des immeubles avoisinants peuvent créer de l'ombrage à certains moments de la journée et selon la saison. La forme du bâtiment, la disposition des pièces, la dimension et la position des fenêtres sont tous des facteurs qui influencent l'accès à la lumière naturelle par les occupants (TPSGC, 2002). Les défis que soulève la conception d'un bâtiment visant à tirer profit de l'éclairage naturel doivent donc être résolus par la collaboration entre de nombreux acteurs, mais permettent de réduire la consommation d'énergie et améliorent le bien-être des occupants.

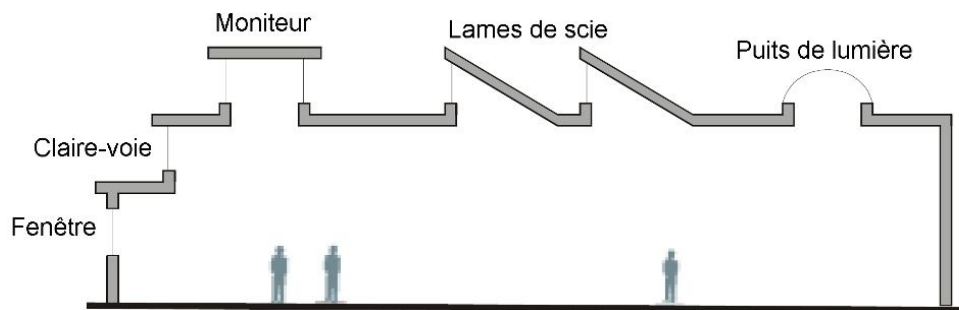


Figure 2.23 Exemple de stratégie d'éclairage naturel
Modifié de TPSGC, 2002, p. 32.

3 L'ANALYSE COMPARATIVE

Le chapitre précédent a présenté le potentiel de l'énergie solaire au Québec et a décrit différentes façons de l'exploiter à travers des données scientifiques, des statistiques et des exemples. Les utilisations les plus fréquentes et les plus répandues de la chaleur et de la lumière du soleil se regroupent en quelques applications : le chauffage des bâtiments, la production d'eau chaude, la génération d'électricité et l'éclairage de jour (figure 3.1). Les prochaines sections comparent donc l'énergie solaire à d'autres sources d'énergie pour ces quatre domaines. Leurs principaux avantages et inconvénients respectifs seront décrits dans un contexte de développement durable. Ainsi, les résultats de l'analyse, présentés sous forme de tableau à la fin de ce chapitre, détermineront dans quelles circonstances et à quelles conditions il est le plus pertinent d'exploiter l'énergie solaire.

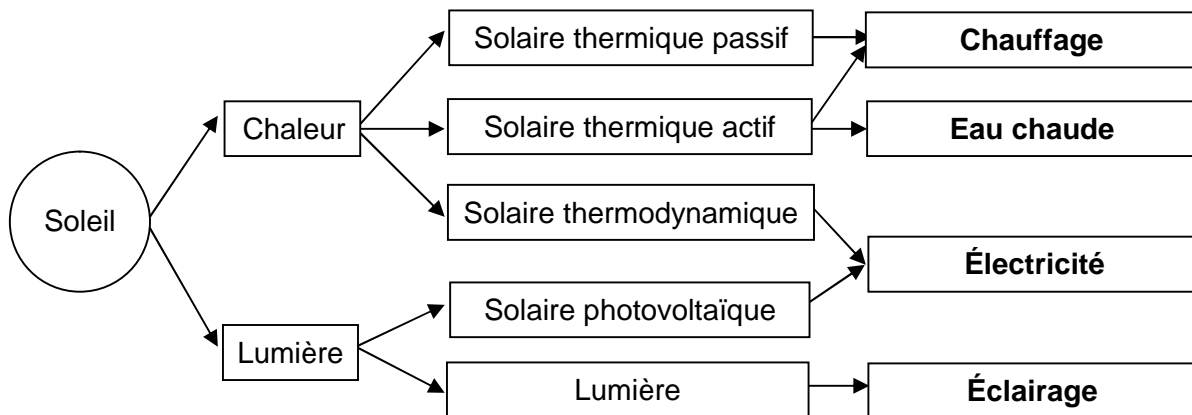


Figure 3.1 Les applications de l'énergie solaire

Au cours de cette analyse, seules les sources d'énergie renouvelables seront présentées et comparées. Une énergie renouvelable est définie par le thésaurus de l'activité gouvernementale comme étant une « énergie renouvelée ou régénérée naturellement, donc la quantité disponible est très importante par rapport aux besoins de l'humanité » (Thésaurus, s. d.). Cette même définition précise toutefois que ne peuvent être renouvelables que les énergies qui sont exploitées à un rythme qui ne dépasse pas les quantités reçues ou générées. Cela explique pourquoi les combustibles fossiles et le nucléaire sont délibérément exclus de l'analyse. En effet, leur vitesse d'exploitation surpasse largement le rythme auquel la nature peut les générer. De plus, les énergies non renouvelables sont souvent les plus polluantes et ne constituent pas une solution envisageable à long terme. L'analyse démontrera également que la capacité et la complémentarité des sources d'énergie renouvelables sont suffisamment grandes pour

suffire à pratiquement tous les besoins en électricité au Québec et pour combler l'ensemble des besoins énergétiques dans les domaines résidentiel et commercial. Il est donc souhaitable et même envisageable, du moins pour ces secteurs, que l'utilisation des combustibles fossiles et du nucléaire devienne de plus en plus désuète. L'énergie solaire sera donc comparée à l'énergie hydraulique, à l'énergie éolienne, à la biomasse et à la géothermie.

3.1 Le chauffage

Puisque le Québec se situe en région nordique, les besoins en chauffage des bâtiments constituent une part importante de la consommation en énergie : près de 50 % pour les secteurs résidentiel et commercial. Actuellement, la grande majorité des bâtiments sont chauffés par de l'énergie fournie par les combustibles fossiles ou l'électricité. Pourtant, bien d'autres alternatives existent. Les types de chauffage présentent de nombreuses caractéristiques différentes. Néanmoins, le niveau de confort des occupants et l'efficacité d'un système de chauffage dépend surtout de la répartition de la température de l'air dans une pièce en fonction de la hauteur et du mode de transmission de la chaleur : convection, conduction et rayonnement (figure 3.2). Ces aspects seront évalués dans les prochaines sections en plus des critères environnementaux, économiques et sociaux.

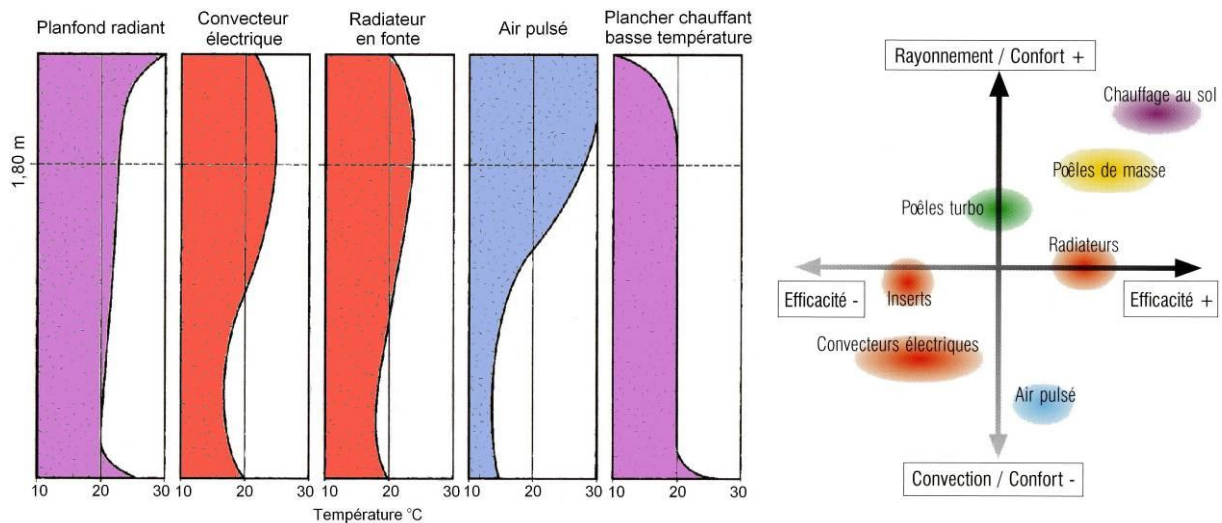


Figure 3.2 L'efficacité et le confort en fonction des modes de chauffage
Tiré de Lhomme, 2001, p. 162 et de Claret et Groult, 2008, p. 19.

3.1.1 L'énergie solaire

Les sections sur le solaire passif et le solaire thermique actif ont démontré que le rayonnement du soleil peut combler la majorité de la demande en chauffage. Dans le cas du solaire passif, une planification urbaine et architecturale adéquate permet aux bâtiments de capter, d'absorber et de redistribuer la chaleur gratuite du soleil, et cela peu importe la température extérieure. Cette technique ne demande aucun mécanisme de contrôle sophistiqué, mais nécessite un système de chauffage d'appoint. Tel que mentionné précédemment, l'intégration de plusieurs principes de conception solaire passive n'occasionne pas de coûts supplémentaires aux projets. En effet, la performance des bâtiments solaires passifs ne repose, en grande partie, que sur la présence d'une surface d'absorption de l'énergie solaire et sur la disposition et la taille des fenêtres. Du point de vue environnemental, seule l'étape de construction requiert légèrement plus de ressources qu'une construction conventionnelle, notamment pour établir une masse thermique efficace. Cette dernière peut être constituée de béton, pour les planchers, ou de briques, pour les murs. Finalement, les habitations solaires passives assurent un grand confort chez les occupants parce que les surfaces (planchers et murs) réchauffent les pièces par rayonnement. La répartition de la chaleur est donc constante sur toute la colonne d'air. Ce système de chauffage est également plus efficace parce que la température des surfaces (planchers et murs) ne doit pas être élevée contrairement à des radiateurs ou des plinthes électriques.

L'exemple du quartier solaire de Drake Landing, en Alberta, démontre qu'il est possible de combler 90 % des besoins en chauffage d'une habitation canadienne par l'utilisation du solaire thermique actif. La réduction des impacts sur environnement est majeure puisque l'énergie albertaine provient principalement de sources fossiles. Ce serait également le cas pour les habitations québécoises qui sont chauffées à l'huile ou au gaz naturel. L'exploitation de l'énergie solaire permet aussi de réduire la demande en électricité qui peut ainsi être utilisée à de meilleurs escients. Le projet de Drake Landing a nécessité des investissements de sept millions de dollars pour les 52 maisons unifamiliales qui reçoivent en moyenne une facture d'utilisation de l'énergie solaire de 60 \$ par mois pour le chauffage. Un même projet réalisé aujourd'hui profiterait de la recherche et du développement qu'a exigés cette première expérience et ne coûterait que quatre millions de dollars. D'importantes économies d'échelle seraient aussi possibles en augmentant substantiellement le nombre habitation (CanmetÉnergie, 2009). Cela constitue une

occasion idéale pour favoriser la pensée collective et ainsi améliorer le sentiment d'appartenance et la fierté de la population à l'égard de leur quartier.

Finalement, les murs solaires peuvent être facilement installés sur de nouveaux bâtiments ou sur des bâtiments existants. En préchauffant l'air extérieur avant qu'il ne pénètre dans le système de ventilation, cette technique permet de réaliser des économies importantes en énergie et en frais de chauffage. La période retour sur l'investissement, entre zéro et sept ans, est tout à fait raisonnable. Un des désavantages de l'installation de panneaux solaires thermiques ou des murs solaires demeure leur aspect inesthétique s'ils sont mal intégrés à l'architecture des bâtiments.

3.1.2 L'électricité

Dans le cadre de cet essai, l'électricité consommée dans la province est considérée comme une énergie renouvelable puisqu'elle est produite à près de 95 % de sources hydrauliques. Le nombre élevé de bâtiments qui sont chauffés à partir de l'électricité fait du Québec une exception dans le monde. À titre de comparaison, « le chauffage à l'électricité est utilisé dans plus de 70 % des logements québécois, contre à peine plus de 20 % ailleurs au Canada » (Lafrance, 2002, p.256). Cette situation est très bénéfique du point de vue environnemental puisque l'électricité a remplacé des sources d'énergie non renouvelable et polluante. Les tarifs avantageux de l'électricité favorisent grandement son adoption pour les nouvelles constructions et même la conversion des systèmes de chauffage existants.

Le chauffage par des plinthes électriques nécessite peu de ressources, est facile d'installation, fiable et flexible. Par contre, les plinthes, tout comme les convecteurs, réchauffent les espaces par convection et génèrent une colonne d'air dont la température varie davantage que le chauffage par rayonnement. Ce phénomène est encore plus accentué dans le cas des fournaises qui propulsent de l'air chaud (voir figure 3.2 au début de la section 3.1). « La température ambiante doit être surchauffée pour être confortable » (Dupuy, 2008, p. 225). Aussi, les éléments chauffants rôtissent les particules de poussière, produisant ainsi une odeur caractéristique. Quant au chauffage par plancher ou plafond radiant, il procure un confort accru, mais génère des champs électromagnétiques.

L'utilisation de l'électricité pour le chauffage procure sans aucun doute des avantages à l'échelle de la province. Par contre, du point de vue continental, le bilan est plus mitigé. Au Québec, le rendement énergétique de la production d'électricité est très efficace. Il en sera d'ailleurs question à la section 3.3. Par contre, les États-Unis et la plupart des autres provinces canadiennes doivent brûler des combustibles fossiles, pour d'abord générer de la chaleur, puis de l'énergie mécanique et finalement de l'électricité. Le rendement de cette production électrique est souvent inférieur à 50 % et les conséquences environnementales, économiques et sociales sont considérables. Pour plusieurs spécialistes comme Gaëtan Lafrance (2002, p. 256), « il s'agit d'une situation absurde en termes d'efficacité énergétique ». Selon lui, il faut éviter que les combustibles fossiles servent à produire de l'électricité tant et aussi longtemps que l'électricité servira à produire de la chaleur. Ainsi, chaque forme d'énergie serait utilisée pour les fins où elle est la plus efficace. Pour le Québec, cela représenterait une plus grande utilisation de combustibles fossiles pour le chauffage et une augmentation de l'exportation des surplus d'électricité aux États voisins. Ainsi, la pollution augmenterait à l'échelle provinciale, mais diminuerait globalement du point de vue continental. Néanmoins, cet essai montre qu'il est également possible d'utiliser des sources d'énergie renouvelables pour le chauffage et ainsi réduire substantiellement la demande des sources d'énergie conventionnelles, que ce soit les combustibles fossiles ou l'électricité.

3.1.3 La biomasse

Le terme biomasse, dans le domaine énergétique, regroupe l'ensemble des matériaux organiques provenant de la décomposition d'organismes vivants : matières végétales, déchets organiques, résidus de bois, tourbe, etc. Plutôt qu'être considérées comme des déchets, ces substances peuvent devenir des ressources lorsqu'elles sont brûlées pour générer de la chaleur. Même si son utilisation est similaire à celle des combustibles fossiles, la biomasse constitue une source d'énergie renouvelable si elle est exploitée adéquatement. Les arbres, par exemple, peuvent être coupés et recueillis pour être utilisés comme source d'énergie. D'autres arbres pousseront alors au même endroit. Le cycle pourra recommencer de façon durable tant et aussi longtemps que le rythme des coupes n'excède pas le rythme de croissance. Ainsi, la ressource ne s'épuise pas.

L'autre différence majeure avec le pétrole ou le gaz naturel réside dans le fait que la combustion de la biomasse n'ajoute pas, à proprement dit, de gaz carbonique dans

l'atmosphère. En effet, pour reprendre l'exemple de l'arbre, la quantité de gaz libérée lors de sa combustion correspond à la même quantité de gaz captée lors de sa croissance par le phénomène de photosynthèse. L'exploitation durable de la biomasse ne contribue donc pas aux phénomènes des changements climatiques puisque le bilan d'émission de gaz à effet de serre est nul ou « carbone neutre ». Selon les estimations du MRNF (2008), la seule utilisation de la biomasse forestière pour le chauffage institutionnel et commercial permettrait de réduire la consommation de mazout de l'ordre de 80 % et d'électricité de 20 %.

Les possibilités de chauffage par la biomasse vont bien au-delà de la simple bûche qui brûle dans un foyer. Au cours des dernières années, les équipements (foyer, foyer de masse, poêle, chaudière) et les combustibles (bois, granulés, écorces, etc.) se sont diversifiés et améliorés. La biomasse peut servir parfois comme chauffage d'appoint avec une production de chaleur plus ou moins contrôlée et des interventions fréquentes pour l'alimentation. Elle peut aussi combler entièrement les besoins en chauffage d'un bâtiment de manière autonome avec une efficacité pouvant atteindre 90 %. Les différents systèmes propagent la chaleur par convection, comme c'est le cas pour les fournaies, ou par rayonnement dont les foyers de masse constituent probablement le meilleur exemple. Le rendement énergétique du bois est de loin supérieur à celui des combustibles fossiles puisqu'il restitue entre 6 et 20 fois plus d'énergie qu'il en consomme pour le transport et l'emballage. Ce bilan énergétique est seulement 0,8 dans le cas du gaz naturel. Aussi, les cendres résultant de la combustion de la biomasse peuvent servir comme engrais pour les jardins ou les champs (Claret et Groult, 2008).

Par contre, une combustion imparfaite de la biomasse rejette de nombreux polluants dans l'atmosphère (monoxyde de carbone, composés organiques volatils, particules fines, oxydes d'azote et hydrocarbures aromatiques polycycliques) et affecte la qualité de l'air. « Au Québec, le chauffage au bois résidentiel est responsable de la moitié des émissions de particules fines provenant des activités humaines » (MDDEP, s. d.b). Les effets sur la santé sont aussi nombreux : maux de tête, irritation du système respiratoire, aggravation de l'angine, etc. Les adeptes de la biomasse demeurent également vulnérables face aux prix de la matière première, au même titre que les combustibles fossiles et l'électricité. De plus, les besoins en réapprovisionnement, plus ou moins fréquents, sont toujours présents, peu importe le type d'appareil.

Une façon d'utiliser indirectement la biomasse pour le chauffage consiste à imiter le processus naturel de dégradation de la matière organique. En absence d'oxygène, cette décomposition produit du méthane qui peut être exploité exactement comme du gaz naturel. Ce combustible peut être acheminé jusqu'aux bâtiments pour être brûlé de manière à combler entièrement les besoins en chauffage. Encore une fois, le bilan des émissions de gaz à effet de serre est nul et ce qui devaient être des déchets (résidus de table, feuilles, gazon, résidus de bois, etc.) deviennent des ressources. Pas moins de six projets de biométhanisation ont été annoncés pour la région de Montréal à la suite de la publication du projet de la nouvelle politique québécoise de gestion des matières résiduelles au mois de novembre 2009. Ces usines pourront générer du biogaz qui servira pour le chauffage ou pour la production d'électricité (Cardinal, 2009). Il en sera question à la section 3.3.

3.1.4 La géothermie

La croûte terrestre constitue une source presque inépuisable de chaleur. En fait, à partir de la surface de la planète, la température du sol d'élève de deux à quatre degrés Celsius à chaque 100 mètres. Elle peut atteindre jusqu'à 150°C à moins de cinq kilomètres de profondeur. L'énergie puisée du sol se nomme la géothermie. La plupart des applications au Québec n'utilisent que les quelques premiers mètres du sol. Dans le sud de la province, la chaleur du centre de la Terre et le rayonnement solaire y maintiennent une température constante durant toute l'année d'environ 10°C. Cette chaleur peut être exploitée pour couvrir 100 % des besoins en chauffage des bâtiments et réduire les frais qui y sont associés de près de 60 % (Hydro-Québec, s. d.c). L'AAE estime que « la conversion d'un ancien système central à l'huile ou au gaz vers la géothermie réduit les émissions de gaz à effet de serre de 5 à 10 tonnes par année » (Beaudin, 2009).

Un système géothermique fonctionne pratiquement comme un réfrigérateur ou une thermopompe et peut être installé pour un bâtiment neuf ou existant. Un conduit s'enfonce dans le sol à l'horizontale ou à la verticale, puise la chaleur et la transporte jusqu'à la thermopompe géothermique. Dans le cas des habitations existantes, les capteurs verticaux peuvent être installés en n'endommageant qu'une partie très limitée du terrain, soit environ deux mètres carrés. Par un changement d'état du fluide caloporteur, la thermopompe capte l'énergie thermique et la redistribue dans le bâtiment par un plancher

radiant ou un chauffage central à air pulsé. Ce genre de système est particulièrement bien adapté pour le Québec puisque l'alternance des saisons assure l'équilibre thermique du sol. En effet, la thermopompe géothermique puise la chaleur durant l'hiver pour le chauffage et y réinjecte de la chaleur en été pour la climatisation des bâtiments (Beaudin, 2009).

La géothermie possède plusieurs avantages par rapport à une thermopompe conventionnelle. D'abord, elle est plus efficace parce que la température sous la surface du sol est plus constante que la température de l'air extérieur. Elle peut donc fonctionner même durant le plus grand froid de l'hiver alors que le réseau électrique subit ses plus grandes pointes de demande. Chaque kilowatt d'électricité introduit dans le système se traduit par un gain d'au moins trois kilowatts d'énergie calorifique (Francoeur, 2004). Aussi, un système géothermique est plus silencieux qu'une thermopompe et peut ainsi être installé à l'intérieur des bâtiments où il sera à l'abri des intempéries. Les parties mécaniques de ce système ont une durée de vie d'environ 20 ans alors que le circuit souterrain peut fonctionner normalement pendant 50 ans ou plus (Hydro-Québec, s. d.c). Le seul entretien requis est le nettoyage mensuel du filtre pour les systèmes à air sans quoi l'économie d'énergie chute sous les 30 % (Tison, 2006).

Les investissements que nécessite l'installation d'un système géothermique sont élevés : 25 000 \$ et 30 000 \$ en moyenne pour une maison de 2 000 pieds carrés. Le retour sur l'investissement est évalué à moins de 15 ans (Beaudin, 2009). La période de rentabilité est plus courte dans le secteur commercial puisque les économies de chauffage et de climatisation sont plus grandes. Certaines subventions sont offertes aux propriétaires afin de diminuer le coût d'achat d'un système géothermique, ce qui est avantageux autant pour les propriétaires que pour Hydro-Québec. En effet, l'énergie économisée peut être vendue plus cher aux États voisins. La Corporation des entreprises en traitement de l'air et du froid (CETAF) a estimé, en 2005, que la géothermie permettrait au Québec d'économiser 240 MWh par an (Bergeron, 2006). Il faut dire que la province est en retard dans le domaine avec environ 3 000 nouvelles installations par année, comparativement aux 27 000 unités qui ont été mises en service en Suède en 2001 (Francoeur, 2004).

3.2 La production d'eau chaude

La production d'eau chaude, tel que mentionné à la section 2.1, est responsable de respectivement 20 et 14 % de la consommation en énergie des secteurs résidentiel et commercial. Pour une habitation moyenne, cela représente des frais d'environ 400 \$ par année. Historiquement, les bâtiments nord-américains sont surtout munis de chauffe-eau avec réservoir. Or, les chauffe-eau instantanés, surtout connus en Europe, font leur entrée sur le marché. Au lieu de stocker l'eau chaude dans un réservoir, ils la produisent sur demande à l'aide d'un élément électrique ou d'un brûleur (Beaudin, 2008). Peu importe le type de chauffe-eau utilisé, il doit suffisamment élever la température de l'eau pour limiter les dangers de brûlure tout en réduisant les risques de contamination par les bactéries. Ces deux facteurs sont, en quelques sortes, contradictoires puisque sous une température de 49°C, les bactéries de type légionelle se développent et peuvent causer des pneumonies. Les chauffe-eau doivent donc produire de l'eau assez chaude pour qu'elle circule à 60°C dans le réseau de plomberie (Hydro-Québec, s. d.d). De toute façon, les gains énergétiques engendrés par la diminution de la température de l'eau chaude sont négligeables au Québec. Cela est principalement dû au fait que les pertes de chaleur du chauffe-eau sont entièrement récupérées pour le chauffage du bâtiment et cela, durant la plupart des mois de l'année (Perrier, 2008). Pour faire des économies d'eau chaude, il est donc préférable de réduire, à la source, la consommation par l'utilisation, par exemple, de pomme de douche à débit réduit ou par le changement des habitudes de lavage.

3.2.1 L'énergie solaire

L'utilisation de panneaux solaires installés sur le toit et dans lesquels circule un fluide caloporteur constitue une bonne façon de tirer profit du rayonnement solaire. Avec une efficacité pouvant atteindre 70 %, cette méthode permet de combler 60 % des besoins en eau chaude d'une famille sur une année complète. Les économies monétaires sont équivalentes. Les coûts d'achat et d'installation du système solaire atteignent présentement entre 4 600 \$ et 8 500 \$. La durée de vie est comparable aux autres modèles présentés dans les sections suivantes. Un chauffe-eau solaire ne nécessite pas d'entretien particulier sinon que de remplacer les fluides caloporteurs.

L'expérience de Drake Landing montre qu'il est avantageux de mettre en commun un système de production d'eau chaude avec des panneaux solaires. En créant une masse thermique de gros volume, il est possible de répartir sur toute l'année l'énergie solaire qui

a été captée et emmagasinée principalement en été. Cela permet également d'avoir un système moins sensible aux variations quotidiennes du rayonnement solaire. Néanmoins, un système d'appoint sera toujours nécessaire afin d'assurer un approvisionnement constant en eau chaude, surtout au début de l'hiver alors que l'ensoleillement est plus faible. Selon la configuration choisie, il faut prévoir un espace suffisant pour accueillir deux réservoirs : un premier pour le préchauffage avec les panneaux solaires et l'autre pour l'apport d'énergie supplémentaire (électricité, gaz naturel, etc.) Les capteurs munis de miroirs paraboliques utilisés surtout par les centrales thermodynamiques peuvent également servir à produire de l'eau chaude. Puisque la taille des installations est plus imposante, cette technique semble mieux adaptée aux secteurs commercial ou industriel pour lesquels les volumes d'eau chaude à produire sont plus importants.

3.2.2 L'électricité

L'utilisation d'un chauffe-eau électrique est assez généralisée au Québec. Leur efficacité s'est grandement améliorée au cours des dernières années, si bien que les modèles les plus récents « consomment jusqu'à 40 % moins d'énergie que les modèles ordinaires » (Beaudin, 2008). Leur prix d'achat varie entre 550 \$ et 1 000 \$. Les modèles de chauffe-eau instantanés alimentés à l'électricité ne sont pas pertinents pour le Québec. Les modèles disponibles actuellement ne sont pas assez puissants pour élever suffisamment la température de l'eau. Il faut dire que sa température à la sortie du réseau d'aqueduc est à près de 0°C durant les mois les plus froids de l'année. Leur utilisation générerait également des pointes importantes de demande en électricité.

3.2.3 La biomasse

L'utilisation d'un chauffe-eau conçu pour fonctionner avec du gaz naturel est intéressante pour les bâtiments reliés à un réseau d'alimentation au biogaz. Cela pourrait être le cas, par exemple, dans des quartiers situés à proximité d'une usine de méthanisation ou d'un lieu d'enfouissement technique où sont captées les émissions de méthane. Tel que décrit dans la section 3.1.3, ces gaz peuvent être de très bonne qualité et présentent un bilan d'émission de GES nul. Les chauffe-eau au gaz sont néanmoins plus chers que leur équivalent électrique (1100\$) (Tison, 2006). Par contre, ils sont plus puissants et prennent donc moins de temps pour réchauffer la même quantité d'eau. L'option des chauffe-eau instantanés peut même s'avérer un bon choix. Ils permettraient de diminuer la consommation de gaz de 20 %. Par contre, ils sont encore plus chers que les chauffe-eau

au gaz avec réservoir. Cela explique sûrement pourquoi Gaz-Métro accorde une remise de 450 \$ pour encourager leur achat (Beaudin, 2008).

Un bâtiment qui utilise un système de combustion de la biomasse solide (bois, écorces, etc.) pourrait également se servir de cette source d'énergie pour produire l'eau chaude sanitaire. Un système d'échangeur de chaleur relirait alors le chauffe-eau à la chaudière. Cette méthode, qui peut s'avérer complexe, paraît plus appropriée pour les bâtiments d'une certaine envergure ou pour des habitations reliées en réseau.

3.2.4 La géothermie

La chaleur puisée du sol par un système géothermique pour le chauffage des bâtiments peut également servir à préchauffer l'eau chaude sanitaire. Ainsi, la température de l'eau pourra être élevée à environ 50°C alors qu'elle était à près de 5°C à sa sortie du réseau d'aqueduc. L'avantage de tel système est l'exploitation plus efficace de l'énergie électrique pour obtenir une augmentation équivalente de température. Il est possible qu'une source d'énergie supplémentaire soit nécessaire pour augmenter davantage la température de l'eau (Guide Perrier, s. d.a). L'utilisation de la géothermie pour la production d'eau chaude n'est pas pertinente si un tel système n'est pas déjà installé pour le chauffage du bâtiment.

3.3 La génération d'électricité

L'utilisation de l'électricité est aujourd'hui omniprésente et couvre, au Québec, 40 % des besoins en énergie. Elle est employée à de multiples usages autant pour des applications industrielles que commerciales ou résidentielles. Au cours des années, les sources de production d'électricité se sont diversifiées dans la province. Chacune d'entre elles possède des avantages et des faiblesses.

3.3.1 L'énergie solaire

L'électricité pouvant être générée à partir du rayonnement du soleil fait appel à deux techniques : le solaire thermodynamique et le solaire photovoltaïque. La section 2.4 a démontré que l'application du solaire thermodynamique est plutôt restreinte dans le contexte québécois. Cette technologie est surtout en expansion dans les régions où le potentiel solaire est plus élevé. Par contre, les applications reliées à l'utilisation de panneaux photovoltaïques sont nombreuses. Plusieurs pays à travers le monde, en Allemagne par exemple, produisent de l'électricité à partir de champs de panneaux

photovoltaïques. Même si le potentiel solaire est similaire, sinon plus grand au Québec, cette forme de production demeure peu rentable comparativement à l'hydroélectricité. L'énergie solaire est donc surtout utilisée pour alimenter des installations qui sont loin du réseau électrique et dont le coût de raccordement est élevé. Elle peut alors fournir de 25 à 75 % des besoins en électricité d'une maison à haut rendement énergétique (Hydro-Québec, s. d.a). Une autre source d'énergie sera donc nécessaire pour combler l'ensemble de la demande. Il en sera d'ailleurs question dans la section 3.3.3 sur l'énergie éolienne.

Les panneaux solaires photovoltaïques ont l'avantage de ne nécessiter aucun entretien et ne font pas de bruit comme c'est le cas pour les petites éoliennes. Au Canada, c'est le Québec qui est le principal producteur de silice, composé à la base de la fabrication de panneaux photovoltaïques. D'ailleurs, la compagnie norvégienne Renewable Energy Corporation devrait débiter la construction d'une usine de polysilicium à Bécancour en 2010 pour commencer la production en 2012. Cette entreprise offrira du travail à environ 300 personnes et les retombées économiques pour la région sont estimées à 100 millions par année (La Presse Canadienne, 2008b). La compagnie CentennialSolar tente également de se lancer dans la fabrication de panneaux solaires à Sainte-Anne-des-Monts. Cette entreprise, établie à Ville Saint-Laurent, pourrait ainsi créer de 150 à 200 emplois (Thériault, 2009). La convergence de plusieurs facteurs pourrait faire en sorte que la production à grande échelle d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques deviendrait pertinente au Québec. Ce n'est toutefois pas le cas actuellement.

3.3.2 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est bien connue au Québec. L'énergie issue de sources hydrauliques est produite grâce au déplacement de l'eau qui entraîne des turbines électriques. Elle est responsable de près de 95 % de la production de l'électricité consommée dans la province. La société d'État Hydro-Québec joue un rôle important dans le développement économique et dans la création d'emploi à travers plusieurs régions. Parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, l'hydroélectricité possède l'un des meilleurs bilans d'émissions de gaz à effet de serre (GES) responsables des changements climatiques. Cette forme d'énergie présente également un excellent rendement de l'investissement énergétique puisqu'il se situe entre 170 et 280. Cette donnée représente le ratio entre la quantité d'énergie produite pendant la durée de vie normale d'une centrale

et l'énergie qui a été requise pour la construire, l'entretenir et l'alimenter. Ce rendement élevé est principalement dû à la longue durée de vie d'une installation hydroélectrique. Le plus proche concurrent est l'éolien, avec un rendement de l'investissement énergétique de 34 (Hydro-Québec, 2005).

Néanmoins, les centrales hydroélectriques avec réservoir nécessitent l'inondation de grands territoires qui sont, au Québec, souvent éloignés. Elles doivent également être raccordées par des lignes électriques qui parcourent de longues distances. Ces lignes de haute tension de plusieurs milliers de kilomètres génèrent des pertes, nécessitent le déboisement de sections de forêt et constituent une source de pollution visuelle. L'augmentation du taux de mercure dans l'eau au cours des premières années d'inondation pose également des problèmes pour la faune aquatique. Finalement, les projets hydroélectriques ont historiquement engendré des frictions entre le gouvernement et plusieurs communautés.

L'énergie marémotrice constitue aussi une forme d'énergie hydraulique. Il existe déjà des centrales marémotrices dans le monde et plusieurs projets tentent d'évaluer le potentiel de l'utilisation d'hydroliennes pour produire de l'électricité. L'installation de turbines immergées dans l'eau comporte des avantages et des inconvénients. D'abord, comme l'eau est beaucoup plus dense que l'air et les débits d'eau plus réguliers que le vent, le potentiel de puissance des hydroliennes est beaucoup plus élevé que celui des éoliennes pour la même surface d'hélice. Néanmoins, leurs impacts sur la faune marine ne sont pas encore très bien connus. Elles créent également des zones de turbulences qui pourraient modifier la sédimentation. Le gouvernement de la Nouvelle-Écosse a investi neuf millions de dollars dans l'installation d'une première hydrolienne sur le fond marin de la baie de Fundy au mois de novembre 2009 (Radio-Canada, 2009a). Encore une fois, l'Europe est en avance dans le domaine. De nombreux projets y sont en cours. Le Québec prend, à tort ou à raison, du retard de ce domaine malgré les quelques études réalisées par Hydro-Québec.

3.3.3 L'éolien

L'énergie éolienne utilise le déplacement de l'air sous forme de vent pour générer une énergie mécanique et a longtemps été employée pour propulser les voiliers, les moulins à vent ou les pompes hydrauliques. Aujourd'hui, l'énergie éolienne est surtout exploitée pour

être transformée en électricité à l'aide d'un alternateur. Cette forme d'énergie connaît un fort engouement tout autour de la planète, notamment parce que les éoliennes peuvent être implantées partout où la puissance de vent est suffisante. Le potentiel intégrable au réseau électrique d'Hydro-Québec est évalué à 4 000 MW d'ici 2015, mais il peut augmenter en fonction des nouveaux développements hydroélectriques. À titre comparatif, la puissance installée dans les parcs éoliens à l'échelle du globe totalisait, en 2008, près de 120 800 MW dont la majorité est produite aux États-Unis, en Allemagne et en Espagne (MRNF, s. d.c). Le Québec a avantage à favoriser cette forme d'énergie puisque son caractère intermittent est complémentaire avec l'hydroélectricité. Lorsqu'il vente, les turbines des centrales hydroélectriques peuvent être arrêtées et l'eau est gardée dans les réservoirs. Si le vent cesse, l'eau remet en marche les turbines.

Le développement récent de l'énergie éolienne génère des retombées économiques importantes puisqu'Hydro-Québec a inclus dans le processus d'appel d'offres une clause de contenu régional. Cela signifie qu'au moins 60 % des coûts globaux du projet doivent être dépensés dans la province et au moins 30 % des dépenses doivent être effectuées dans la région de la Gaspésie – Îles-de-la-Madeleine. Cette démarche permettra de créer environ 4 000 emplois lors de la phase de construction et 800 emplois permanents en usine ou pour la gestion et l'entretien des parcs d'éoliennes (MRNF, s. d.c). Les prix d'achat par Hydro-Québec pour les premier et deuxième appels d'offres sont respectivement de 6,5 ¢/kWh et 8,7 ¢/kWh auxquels s'ajoutent des frais de 1,8 ¢/kWh pour le transport et le service d'équilibrage. Certains appels d'offres sont également réservés aux municipalités et aux autochtones à un taux de 12,5 ¢/kWh (Baril, 2009). Ces montants sont bien au-dessus du tarif du bloc patrimonial qui est fixé à 2,79 ¢/kWh. Cela signifie donc que la société d'État achète l'électricité éolienne à un coût plus élevé qu'une partie de l'électricité qu'elle vend actuellement.

L'exploitation des éoliennes génère peu de pollution une fois la construction complétée. Toutefois, leur mise en place et le transport des équipements requièrent le déboisement de section plus ou moins grande de forêts. Aussi, le mât de l'éolienne doit être érigé sur une base massive de béton. Néanmoins, le site peut être réaménagé à la suite du démantèlement de l'éolienne lorsque sa fin de vie utile est atteinte. Les émissions de GES liées à ce type de production d'électricité sont similaires à celles de l'hydroélectricité. Par contre, le retour sur l'investissement énergétique est beaucoup moins élevé (Hydro-

Québec, 2005). Le facteur d'utilisation des parcs d'éoliennes est estimé à 35 %, c'est-à-dire que sur une année complète, chaque éolienne produit de l'électricité en moyenne une journée sur trois (Hydro-Québec, s. d.e). Les éoliennes les plus performantes actuellement produisent une puissance qui s'élève à 5 MW. La taille de leur mât peut atteindre plus de 100 mètres de haut auquel s'ajoutent des pales de 90 mètres de diamètre. À ces dimensions, les promoteurs doivent tenir compte des impacts visuels et auditifs des parcs d'éoliennes. Ils doivent aussi étudier les risques sur les populations d'oiseaux et sur les chauves-souris (MRNF, s. d.c).

La gestion et la planification des projets éoliens ont récemment fait l'objet de plusieurs critiques dans le milieu municipal, étant même qualifiées d'« anarchiques ». À cet effet, le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) a affirmé en 2006 que « le développement de la filière éolienne au Québec devrait être mieux encadré, en particulier pour les terres privées » (BAPE, 2006, p. 2). Plusieurs recommandations avaient alors été formulées afin d'améliorer l'acceptabilité sociale, écologique et économique des projets de parcs éoliens. Le vent constitue donc une source d'énergie renouvelable pertinente à développer à grande échelle au Québec, mais à travers un processus bien encadré et qui respecte les principes du développement durable.

Les éoliennes de plus petite taille peuvent aussi devenir intéressantes pour alimenter directement des habitations en électricité. De façon similaire aux installations de panneaux solaires photovoltaïques, une éolienne domestique doit être accompagnée, entre autres, de batteries et d'un onduleur pour transformer le courant continu en courant alternatif. L'énergie fournie par l'éolienne domestique peut alimenter différents appareils électriques : micro-ondes, télévision, lumières, etc. Comme l'énergie éolienne est intermittente, d'autres sources d'énergie sont souvent nécessaires pour assurer une alimentation électrique constante. Ce pourrait être le solaire pour générer davantage d'électricité ou la biomasse pour le chauffage. Il peut également arriver que les propriétaires d'habitation autonome en énergie soient obligés d'utiliser des combustibles fossiles pour combler les pointes de demande. Une telle habitation peut donc générer plus d'impact sur l'environnement qu'une maison conventionnelle. Par contre, l'exploitation d'une petite éolienne conscientise leurs propriétaires à l'importance des économies d'énergie. Ces derniers ont nécessairement tendance à favoriser des équipements et des comportements qui réduisent leur consommation énergétique.

Pour être plus efficace, l'éolienne doit être perchée au sommet d'une tour qui peut atteindre dix mètres (figure 3.3). Une protection contre les éclairs est alors nécessaire (Pilon, 2008). Pour qu'un projet d'installation éolienne soit abordable, les vents doivent souffler à un minimum de 18 km/h. « La production d'électricité varie selon le cube de la vitesse moyenne des vents » (RNCREQ, 2009). Cela signifie qu'une augmentation de la vitesse des vents de 10 % résulte en une hausse de 33 % de la production d'électricité. Ainsi, plus une installation est grosse et est exposée à des vents forts et constants, plus le coût de revient par kilowattheure diminue. L'ensemble des équipements requis demande néanmoins un investissement important qui est difficilement rentabilisable pendant la durée de vie de l'éolienne. De façon similaire à l'installation de panneaux photovoltaïques, une éolienne domestique constitue une solution à favoriser presque exclusivement dans le cas d'habitations isolées dont le raccordement au réseau électrique serait très dispendieux. Plus la demande électrique est grande, plus l'éolien devient avantageux par rapport à l'énergie solaire. Par contre, une éolienne produit du bruit, requiert un entretien une ou deux fois par an et a une durée de vie moindre que les panneaux solaires (RNCREQ, 2009). Pour devenir une option vraiment intéressante, le prix d'achat et d'installation d'une éolienne domestique doit diminuer et celui de l'électricité doit augmenter (Pilon, 2008).



Figure 3.3 Installation d'une éolienne domestique au sommet d'une tour
Guide Perrier (s. d.b)

3.3.4 La biomasse

La production d'électricité à partir de biomasse est surtout répandue en Europe. La proportion de la production d'électricité du Québec provenant de cette source d'énergie représentait seulement 0,20 % en 2006, soit l'équivalent de la production du secteur éolien pour la même année (MRNF, s. d.d). En 2008, le gouvernement a autorisé Hydro-Québec à lancer un appel d'offres pour la production de 125 MW à partir de la biomasse forestière. L'objectif n'est pas de couper des arbres pour en faire de l'électricité. Les centrales électriques brûleraient plutôt les branchages et les résidus de bois pour générer de la vapeur qui actionnent des turbines électriques. Normalement, cette matière est accessible localement dans plusieurs régions de la province. Néanmoins, la crise forestière a montré la faiblesse du réseau d'approvisionnement. En effet, certaines usines du Fonds de revenu Boralex-Énergie ont dû cesser leur production faute de matières premières (Moreault, 2008).

Tel que mentionné précédemment, la combustion des résidus de bois ne produit pas directement d'émission de GES, ce qui est avantageux par rapport aux combustibles fossiles. Par contre, les impacts sur l'environnement ne sont pas nuls. Les promoteurs doivent prendre soin de laisser sur les sites de coupe un minimum de 30 % de matière ligneuse. Cette dernière est essentielle pour la régénération des forêts puisqu'elle sert d'engrais. En plus des difficultés techniques et économiques pour recueillir la matière, un solide programme de reboisement doit être implanté. À cet effet, un avis du gouvernement canadien rappelle que « l'énergie de la biomasse doit être un produit cultivé et non extrait » (Moreault, 2008). Un suivi environnemental est aussi nécessaire pour évaluer la qualité de l'eau, la qualité et l'érosion des sols et les émissions atmosphériques.

La production d'électricité à partir de biogaz constitue une autre façon de tirer profit de la biomasse. Le site d'enfouissement de Lachenaie, par exemple, capte le méthane généré par la dégradation des déchets à l'aide de puits, le brûle et transforme l'énergie thermique en électricité. Il envoie sur le réseau public une puissance de 4 MW, ce qui représente l'équivalent de la demande en électricité de 2 500 foyers québécois. Encore une fois, ce qui était considéré comme un déchet et qui produisait des émissions de gaz à effet de serre avant 1996 est devenu une ressource qui assure un revenu stable à la compagnie qui exploite le site (BFI Canada, s. d.). Les projets d'usines de méthanisation prévus pour la gestion des matières résiduelles généreront également du biogaz qui pourrait être

exploité pour produire de l'électricité. La production d'électricité à partir de biomasse demeure somme toute négligeable. Par contre, sa valorisation à des fins thermiques constitue une part importante du portrait énergétique québécois.

3.4 L'éclairage

Au Québec, la consommation d'énergie consacrée à l'éclairage est de 5 % pour le secteur résidentiel et de 8 % pour le secteur commercial. Plusieurs facteurs influencent les besoins et le type d'éclairage. La biomasse a longtemps été utilisée comme source de lumière par les hommes (foyer, chandelle, etc.). Néanmoins, elle n'est pas considérée dans cette analyse puisqu'elle a été remplacée par des sources d'éclairage plus modernes et dont la faisabilité technique est plus grande.

3.4.1 L'énergie solaire

La section 2.6 a démontré que le soleil peut combler une grande partie des besoins en lumière. En effet, le taux de luminosité même sous un ciel couvert est environ 15 fois supérieur à la lumière requise pour réaliser la plupart des tâches. Cet éclairage naturel comporte plusieurs avantages tant au niveau du confort et que de la qualité de l'environnement intérieur. Les impacts sur les occupants sont notables : augmentation de la productivité, baisse des congés de maladie, réponse positive de l'organisme, réduction des troubles affectifs saisonniers, etc. De plus, les économies d'énergie peuvent être importantes, particulièrement dans le secteur commercial où l'éclairage représente jusqu'à 40 % de la consommation d'électricité. L'exploitation de la lumière naturelle combinée avec un système de contrôle du taux de luminosité permet de réduire par deux tiers les frais d'éclairage. Néanmoins, les fenêtres ou les puits de lumière doivent être bien intégrés aux bâtiments afin de limiter les inconvénients causés par les éblouissements et doivent être adaptés aux besoins spécifiques des locaux. La fenestration doit aussi empêcher les surcharges thermiques en été et les trop grandes pertes de chaleur en hiver. Finalement, un système complémentaire de lumières est nécessaire pour assurer un niveau d'éclairage adéquat lors des journées nuageuses et durant la nuit.

3.4.2 L'électricité

Si l'éclairage naturel est avantageux durant le jour, les appareils d'éclairages électriques sont indispensables à de nombreux égards. D'abord, ils assurent une constance de la luminosité durant toute la journée peu importe l'emplacement des locaux dans un

bâtiment. Les types de lumières fonctionnant à l'électricité sont extrêmement variés : incandescente, fluorescente, fluocompacte, halogène, DEL, etc. Les rendus de couleurs et les différents niveaux d'intensité sont également abondants. Le nombre élevé de combinaison de ces facteurs permet de combler pratiquement tous les besoins d'éclairage. Par contre, malgré les progrès technologiques, la majorité de l'énergie consommée par les lumières est encore transformée en chaleur. Cela a pour effet, entre autres, d'augmenter les besoins en climatisation en été. Il s'agit donc d'une double inefficacité. Certains types de lumières également contiennent des métaux lourds, notamment le mercure, qui peuvent occasionner des impacts si sont émis dans l'environnement. À cet effet, les gestions des lumières en fin de vie causent des défis particuliers. Finalement, le bourdonnement produit par l'éclairage artificiel peut incommoder les personnes hypersensibles.

Tableau 3.1 Comparaison des sources d'énergie renouvelables selon les applications

Sources d'énergie	Faisabilité technique	Environnement	Économie	Social
1. Le chauffage				
Solaire	<ul style="list-style-type: none"> + Diminue la demande en chauffage (jusqu'à 90 %) + Aucun élément mécanique ou électrique (passif) - Exige un système de chauffage d'appoint - Exige une meilleure planification urbaine et architecturale - Nécessite une masse thermique ou des installations complexes 	<ul style="list-style-type: none"> + Réduit la demande en énergie à la source pour le chauffage + Aucune émission de polluant durant l'utilisation + Démantèlement et recyclage des matériaux en fin de vie - Nécessite une masse thermique en béton (passif) 	<ul style="list-style-type: none"> + Économies importantes des frais de chauffage + Différence d'investissement minime par rapport à une habitation conventionnelle (passif) - Investissement important pour le solaire actif 	<ul style="list-style-type: none"> + Confort accru pour les occupants hiver comme été + Sensibilise les occupants à l'efficacité énergétique + Favorise la pensée collective - Impact visuel (panneaux solaires)
Électricité	<ul style="list-style-type: none"> + Installation facile et rapide (plinthes) + Technologies éprouvées - Installation plus complexe pour plancher chauffant - Utilisation non optimale de l'électricité à l'échelle continentale 	<ul style="list-style-type: none"> + Électricité produite à >95 % de sources renouvelables - Réduit les possibilités d'exportation de l'électricité (remplace les combustibles fossiles) - Diminue la qualité de l'air intérieur (plinthes) 	<ul style="list-style-type: none"> + Faible coût des installations (plinthes) - Client vulnérable au prix de l'électricité - Réduit les possibilités d'exportations (diminution des profits d'Hydro-Québec) 	<ul style="list-style-type: none"> + Confiance de la population + Confort accru (plancher chauffant) - Confort moins élevé (plinthes et air pulsé) - Produit des champs électromagnétiques
Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> + Technologies éprouvées + Chaudière à haute efficacité (80 à 90 %) - Foyer ouvert à faible efficacité (15 %) 	<ul style="list-style-type: none"> + Valorise la matière organique + Remplace les combustibles fossiles - Pollution atmosphérique - Nécessite un réapprovisionnement régulier (bois, écorces, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> + Économies importantes des frais de chauffage - Client vulnérable au prix de la matière - Investissement important pour un nouveau système 	<ul style="list-style-type: none"> + Confort accru (foyer de masse) + Favorise la pensée collective - Confort moins élevé (air pulsé) - Augmente les problèmes de santé (bois)
Géothermie	<ul style="list-style-type: none"> + Rendement énergétique très élevé (3 pour 1) + Possibilité de chauffage et climatisation + Technologies éprouvées - Puits verticaux profonds 	<ul style="list-style-type: none"> + Optimise l'utilisation de l'électricité + Aucune émission de polluant durant l'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> + Diminue les frais de chauffage de 60 % - Investissement important 	<ul style="list-style-type: none"> + Confort accru (plancher chauffant) + Aucun impact visuel ou sur la santé - Confort moins élevé (air pulsé)

Sources d'énergie	Faisabilité technique	Environnement	Économie	Social
2. La production d'eau chaude				
Solaire	<ul style="list-style-type: none"> + Peut répondre à 60 % des besoins - Exige un système d'appoint 	<ul style="list-style-type: none"> + Réduit la demande en énergie à la source + Aucune émission de polluant durant l'utilisation - Nécessite plus de matières pour la fabrication des équipements 	<ul style="list-style-type: none"> + Réduit les frais pour la production d'eau chaude - Long retour sur l'investissement 	<ul style="list-style-type: none"> + Sensibilise les occupants à l'efficacité énergétique + Favorise la pensée collective - Impact visuel (panneaux solaires)
Électricité	<ul style="list-style-type: none"> + Technologies éprouvées + Source d'énergie fiable et flexible - Utilisation non optimale de l'électricité à l'échelle continentale 	<ul style="list-style-type: none"> + Équipements récents plus performants + Électricité produite à >95 % de sources renouvelables - Réduit les possibilités d'exportation de l'électricité (remplace les combustibles fossiles) 	<ul style="list-style-type: none"> + Faible coût d'achat et d'exploitation des équipements - Client vulnérable au prix de l'électricité - Réduit les possibilités d'exportation (diminution des profits) 	<ul style="list-style-type: none"> + Confiance de la population
Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> + Haute efficacité (biogaz) + Possibilité de chauffe-eau instantané (biogaz) - Installations résidentielles rares (biomasse solide) 	<ul style="list-style-type: none"> + Valorise la matière organique + Remplace les combustibles fossiles - Pollution atmosphérique 	<ul style="list-style-type: none"> + Réduit les frais pour la production d'eau chaude - Client vulnérable au prix de la matière 	<ul style="list-style-type: none"> + Favorise la pensée collective - Augmente les problèmes de santé (bois)
3. La génération d'électricité				
Solaire	<ul style="list-style-type: none"> + Énergie consommée où elle est produite + Peut combler 75 % des besoins - Faible rendement (<15 %) - Installation complexe (batterie, onduleur, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> + Aucune émission polluante durant l'utilisation - Gestion des équipements en fin de vie (batteries) 	<ul style="list-style-type: none"> + Solution pour les sites isolés - Coût d'achat très élevé - Retour sur l'investissement très long 	<ul style="list-style-type: none"> + Aucun entretien + Aucun bruit + Sensibilise les utilisateurs à l'efficacité énergétique - Impact visuel
Hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> + Technologies éprouvées + Efficacité de près de 95 % - Demande des installations de grande envergure - Transport de l'énergie sur de longues distances 	<ul style="list-style-type: none"> + Retour sur l'investissement énergétique très important + Peu d'émission de polluants - Inondation de vastes territoires - Impacts sur la faune et flore 	<ul style="list-style-type: none"> + Coûts de production extrêmement faible + Retombées économiques pour toute la province - Investissements majeurs 	<ul style="list-style-type: none"> + Fierté nationale + Retombées sociales dans toute la province - Acceptabilité sociale en baisse

Sources d'énergie	Faisabilité technique	Environnement	Économie	Social
3. La génération d'électricité (suite)				
Éolienne	<ul style="list-style-type: none"> + Technologies éprouvées + Complémentarité avec l'hydroélectricité - Facteur de production de 35 % 	<ul style="list-style-type: none"> + Grand potentiel à exploiter + Possibilité de réhabilitation du site - Impact sur les oiseaux - Gestion des équipements en fin de vie (batteries – pour éolienne domestique) 	<ul style="list-style-type: none"> + Retombées économiques en région - Coûts de production plus élevés que le prix de vente 	<ul style="list-style-type: none"> + Crée des emplois en région - Acceptabilité sociale incertaine - Impact visuel - Impact sonore - Entretien fréquent
Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> + Technologies éprouvées (bois, écorces, etc.) + Disponibilité de la matière première - Technologies en développement (méthanisation) 	<ul style="list-style-type: none"> + Valorise la matière organique + Remplace les combustibles fossiles - Diminution de la matière fertilisante - Érosion accrue du sol - Pollution atmosphérique 	<ul style="list-style-type: none"> + Retombées économiques en région + Valorisation économique des déchets - Coûts de production plus élevés que le prix de vente 	<ul style="list-style-type: none"> + Crée des emplois en région - Faible connaissance de la population à ce sujet
4. L'éclairage				
Solaire	<ul style="list-style-type: none"> + Technique simple + Grand potentiel de l'éclairage naturel - Exige une meilleure planification urbaine et architecturale 	<ul style="list-style-type: none"> + Réduit la demande en énergie à la source (éclairage et climatisation) + Aucune émission de polluant durant l'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> + Réduit les frais d'éclairage + Augmente la productivité + Augmente les ventes + Diminue les absences (journée de maladie) - Augmentation des frais de chauffage ou de climatisation si mal intégré 	<ul style="list-style-type: none"> + Meilleur environnement de travail + Réponse positive de l'organisme + Réduit les troubles affectifs saisonniers - Risque d'éblouissement
Électricité	<ul style="list-style-type: none"> + Technologies éprouvées + Appareils adaptés à chaque besoin + Éclairage constant (jour et nuit) - Faible efficacité énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation d'énergie accrue (éclairage et climatisation) - Appareil contenant des métaux lourds (mercure) - Gestion des appareils en fin de vie (déchet dangereux) 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmente les frais en énergie (éclairage et climatisation) - Frais d'achat et de remplacements réguliers des équipements 	<ul style="list-style-type: none"> + Éclairage constant et adapté - Impacts chez les hypersensibles

4 LES RÉSULTATS DE L'ANALYSE

L'analyse comparative résumée dans le tableau des pages précédentes permet d'établir divers constats. D'abord, bien que certaines formes d'énergie renouvelables soient encore en développement, la faisabilité technique de leur exploitation est assez élevée pour justifier leur utilisation dans de nombreuses applications. En effet, dans le contexte québécois, les énergies renouvelables, ou une combinaison de celles-ci, possèdent un potentiel suffisamment grand pour combler l'ensemble des besoins énergétiques des bâtiments résidentiels et, dans la plupart des cas, commerciaux. Les entreprises industrielles devraient aussi profiter des nombreuses opportunités qu'offrent les sources d'énergie renouvelables pour réduire les impacts environnementaux, améliorer leur image corporative et réaliser des économies.

Bien entendu, l'énergie hydraulique constitue la source d'énergie renouvelable la plus répandue au Québec à cause de l'importance de l'hydroélectricité. Néanmoins, tel que démontré au cours de l'analyse, différentes formes d'exploitation de l'énergie solaire s'appliquent particulièrement bien au domaine de l'immobilier et de la production d'électricité en milieu isolé. Les prochaines sections résument les enjeux entourant la faisabilité technique et les impacts environnementaux, économiques et sociaux de l'utilisation du rayonnement solaire. Cette démarche permettra d'établir dans quelles circonstances ou à quelles conditions il est le plus pertinent d'exploiter chaque forme d'exploitation de l'énergie solaire présentée au chapitre deux (solaire thermique passif, solaire thermique actif, solaire thermodynamique, solaire photovoltaïque et l'éclairage naturel).

4.1 La faisabilité technique

L'utilisation répandue au Québec de plusieurs formes d'énergie solaire est tout à fait plausible du point de vue de la faisabilité technique, notamment à cause de son énorme potentiel : 10 000 fois la quantité totale d'énergie consommée à l'échelle de la planète. Rappelons que la province possède un potentiel solaire tout à fait comparable aux grandes puissances mondiales dans le domaine. Les exemples présentés dans cet essai ont démontré que le rayonnement solaire peut combler jusqu'à 90 % des besoins en chauffage, fournir jusqu'à 60 % de l'eau chaude et produire 75 % de l'électricité des habitations. Cette énergie est consommée directement là où elle est produite, éliminant

ainsi les problématiques et les impacts reliés aux infrastructures de transports (ligne de transmission, gazoduc et approvisionnement en biomasse).

Tel qu'indiqué à de nombreuses reprises, le climat froid du Québec en hiver n'affecte en rien la performance des technologies solaires puisque cette énergie est transmise sous forme de rayonnement. Les techniques employées pour exploiter l'énergie thermique solaire sont souvent très simples, ont été expérimentées et sont maîtrisées depuis de nombreuses années. Le solaire passif n'exige qu'une conception architecturale et urbaine adéquate. Le solaire actif tire profit des phénomènes de concentration du rayonnement solaire et des échanges thermiques. Il a également été démontré que la lumière naturelle, qui pénètre à l'intérieur des bâtiments par de simples fenêtres ou puits de lumière, possède de nombreux atouts par rapport à l'éclairage artificiel. La production d'électricité à grande échelle à partir de cellules photovoltaïques ou de centrale thermodynamique est probablement la seule application de l'énergie solaire qui se justifie difficilement du point de vue technique. Dans le contexte québécois, l'exploitation d'autres sources d'énergie renouvelables comme l'hydraulique, l'éolien ou la biomasse serait donc à favoriser pour la production d'électricité. Néanmoins, l'alimentation autonome en électricité à partir de panneaux photovoltaïques constitue une solution pertinente et techniquement réalisable pour les bâtiments ou appareils qui ne sont pas reliés au réseau public.

Globalement, toutes les formes d'exploitation de l'énergie solaire permettent de réduire considérablement, et à la source, la dépendance face aux autres sources d'énergie. Cette efficacité énergétique encourage l'utilisation optimale de chaque forme d'énergie en engendrant, entre autres, une diminution de la consommation d'électricité pour la production de chaleur. Les surplus peuvent alors être consommés pour des applications où cette forme d'énergie est beaucoup plus performante que les autres : transport électrifié, communication, appareils électroniques, etc. Les surplus peuvent également être vendus aux États voisins qui produisent leur électricité avec une faible efficacité, améliorant ainsi le bilan énergétique de la région du nord-est de l'Amérique. Le principal inconvénient de toutes les applications de l'énergie solaire (chauffage, eau chaude, électricité et éclairage) demeure cependant le caractère intermittent et aléatoire du rayonnement. Une source d'énergie supplémentaire est donc toujours nécessaire.

4.2 Les impacts sur l'environnement

Du point de vue environnemental, l'énergie solaire a l'avantage de ne générer pratiquement aucun impact durant son utilisation. En fait, la grande majorité des impacts sont produits avant ou après l'utilisation des technologies solaires. Une habitation solaire passive, par exemple, requiert la confection d'une masse thermique souvent constituée de béton, et la fabrication du ciment qu'il renferme est énergivore. Les panneaux solaires thermiques contiennent du glycol qui doit être géré adéquatement en fin de vie. C'est également le cas des batteries qui peuvent être reliées à des capteurs photovoltaïques. Néanmoins, les composés des panneaux solaires thermiques comme ceux des panneaux photovoltaïques peuvent en grande partie être désassemblés et récupérés ou recyclés. Contrairement à la biomasse, le solaire ne produit pas d'émissions atmosphériques polluantes et ne risque pas de détériorer la qualité de l'air intérieur des bâtiments. Les installations solaires sont également moins dangereuses pour la faune que les éoliennes. Globalement, la longue durée de vie et la nature des équipements nécessaires à l'exploitation de l'énergie solaire engendrent des impacts environnementaux relativement faibles comparativement aux autres sources d'énergie renouvelables.

L'un des principaux atouts de l'exploitation de l'énergie solaire réside cependant dans sa capacité à remplacer les sources d'énergie conventionnelles, que ce soient les combustibles fossiles ou l'électricité. Dans le premier cas, l'utilisation de technologies solaires permettrait de réduire directement la production de polluants atmosphériques qui participent, entre autres, aux changements climatiques et à la formation de smog. Elle préserverait aussi les sources d'énergie non renouvelables dont l'extraction, la transformation et le transport engendrent des impacts importants sur les écosystèmes. En deuxième lieu, la substitution de l'électricité par l'énergie solaire augmenterait la marge entre l'offre et la demande du réseau d'Hydro-Québec. Une quantité plus grande d'hydroélectricité pourrait alors être vendue aux États voisins qui réduiraient, à leur tour, leur consommation de combustibles fossiles. C'est donc tout le continent qui y gagnerait. La réduction de la demande en électricité rendue possible grâce à l'utilisation de l'énergie solaire rendrait également moins nécessaire la construction de nouvelles centrales thermiques ou hydroélectriques. Les milieux naturels du Québec pourraient ainsi être préservés.

4.3 Les aspects économiques

Les technologies solaires présentent de nombreux avantages du point de vue économique. D'abord, le rayonnement solaire est totalement gratuit. Les propriétaires d'installations solaires sont donc à l'abri des hausses des tarifs d'électricité, de biogaz ou de biomasse (bois ou granule). Aussi, l'exploitation passive ou active du rayonnement solaire diminue considérablement les frais de chauffage et de production d'eau chaude. Si les habitations solaires passives sont plus chères à l'achat que les habitations conventionnelles, c'est souvent qu'elles sont mieux isolées, qu'elles intègrent d'autres éléments d'efficacité énergétique et qu'elles possèdent des caractéristiques d'une maison dite « saine ». Les systèmes solaires actifs sont encore dispendieux au Québec malgré les nouveaux programmes d'aide financière. La période de retour sur l'investissement est donc assez longue, comme c'est le cas pour les systèmes de géothermie. Néanmoins, plus l'industrie du solaire se développera, plus les coûts reliés à l'achat, à l'installation et à l'entretien des systèmes diminueront.

Du point de vue économique, la production d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou de centrale thermodynamique n'est tout simplement pas rentable au Québec. Les énergies hydraulique et éolienne ainsi que la biomasse constituent certainement des investissements plus judicieux, du moins pour l'instant. En effet, les autoproductions d'électricité à partir du solaire ne retirent aucun avantage financier, contrairement à leur semblable en Ontario ou en Allemagne. Cela est dû au fait qu'Hydro-Québec crédite l'énergie envoyée sur le réseau au lieu de l'acheter. L'autoproduction n'est pertinente qu'en milieu isolé, où l'énergie solaire remplace les génératrices ou évite aux propriétaires de déboursier les frais importants de branchement au réseau d'électricité. L'investissement requis demeure important compte tenu du prix élevé d'un système complet : panneaux, onduleur, batteries, etc. Par contre, les propriétaires ont tout avantage à profiter au maximum de l'éclairage naturel pour lequel les bénéfices financiers sont majeurs, à condition qu'il soit bien intégré. Les propriétaires profitent ainsi d'une réduction des frais d'électricité pour la lumière et la climatisation et sauvent sur l'achat et le remplacement des appareils d'éclairage artificiel. Du point de vue commercial, les bienfaits sur la productivité, l'augmentation des ventes et la diminution des congés pour maladie ont également été démontrés.

Encore une fois, la réduction de la consommation en électricité substituée par l'énergie solaire permettrait d'augmenter les exportations d'Hydro-Québec vers les États voisins. Ces mêmes exportations constituent une portion significative des bénéfices de l'entreprise. À titre d'exemple, en 2008, Hydro-Québec a exporté 6 % de sa production et a ainsi généré 30 % de ses profits (Radio-Canada, 2009b). Et puisqu'Hydro-Québec est une société publique, les profits reviennent à la population sous forme de divers programmes et services gouvernementaux. En prenant ce facteur en considération, il pourrait être économiquement avantageux d'utiliser davantage certaines technologies solaires, et cela même si leur coût de revient est plus élevé que les tarifs d'électricité payés par les Québécois. En effet, le surcoût du solaire serait compensé par la vente des surplus d'électricité à un prix supérieur.

4.4 Les enjeux sociaux

En ce qui a trait à l'aspect social, les applications de l'énergie solaire demeurent en grande partie méconnues par la population qui croit souvent, et à tort, que cette source d'énergie n'est pas exploitable en climat froid. Plusieurs personnes profitent déjà, peut-être de façon inconsciente, du confort qu'apporte une habitation solaire passive et d'une meilleure luminosité créée par la lumière naturelle. Il y a donc un certain scepticisme à surmonter, mais ce serait possible grâce à des outils d'éducation et de sensibilisation. À l'heure actuelle, l'acceptabilité sociale des technologies solaires est difficilement mesurable, compte tenu du nombre peu élevé d'installations dans la province. L'aspect esthétique des panneaux pourrait possiblement être un sujet de discorde. Par contre, leur faible entretien et l'absence de bruit les avantagent par rapport aux petites éoliennes. Contrairement à la combustion de la biomasse, qui produit des polluants atmosphériques, l'exploitation de l'énergie solaire n'a aucun impact sur la santé. Aussi, l'éclairage naturel crée un meilleur environnement de travail et engendre une réponse positive de l'organisme.

L'exploitation de l'énergie solaire constitue une très bonne occasion de favoriser les projets collectifs. En effet, la mise en commun de l'énergie produite ne ferait qu'amplifier le sentiment d'appartenance et de fierté des habitants envers leur quartier. Bien entendu, cette production décentralisée de l'énergie demande plus d'efforts et plus d'investissements individuels. L'adoption à grande échelle de l'énergie solaire permettrait cependant de créer de nombreux emplois dans toutes les régions du Québec et dans de

nombreux corps de métiers : fabrication, assemblage, installation, plomberie, construction, industrie minière, hautes technologies, recherche et développement, consultation, ingénierie, etc.

Les Québécois sont de plus en plus critiques face aux choix énergétiques de la province. L'objectif du gouvernement consiste à atteindre 11 térawattheures d'efficacité énergétique. Cette réduction représente environ 5 % du bilan énergétique de la province, soit l'équivalent de la production annuelle de deux centrales nucléaires de la taille de Gentilly II. Toutefois, la consommation énergétique du Québec continuera d'augmenter à travers les années puisque la hausse de la demande sera plus importante que sa réduction. Cette situation laisse croire qu'à cause des tarifs actuels relativement peu élevés de l'électricité et des combustibles fossiles, la population est peu interpellée par les conséquences de sa consommation. L'abandon du projet de la centrale thermique du Suroît en constitue un exemple frappant. La population du Québec s'est mobilisée pour manifester contre la production d'électricité à partir de gaz thermique, et cela, malgré des motifs de sécurité énergétique. D'un autre côté, elle n'a modifié en rien son comportement et ses habitudes afin de réduire, voire de stabiliser sa consommation.

Dans le cas des adeptes de l'énergie solaire, c'est tout à fait le contraire. Les propriétaires qui choisissent délibérément d'habiter une maison en exploitant l'énergie du soleil deviennent particulièrement sensibles à l'importance des économies d'énergie. Cet effet de conscientisation envers l'efficacité énergétique constitue un des principaux avantages du solaire. Étant parfaitement conscients des enjeux énergétiques, ces propriétaires choisissent d'abord de réduire au minimum leur besoin en énergie et optimisent ensuite la chaleur ou la lumière qu'ils captent du soleil. Par exemple, les personnes qui optent pour le solaire passif s'assurent que l'isolation de leur habitation est adéquate. Pour ce faire, ils peuvent obtenir les certifications Renoclimat ou Novoclimat, qui améliorent d'un minimum de 25 % la performance énergétique des bâtiments (AEE, s. d.b). Les propriétaires optimisent ensuite la fenestration de manière à maximiser l'apport solaire en hiver et le minimiser en été. Ceux qui installent des capteurs solaires thermiques adoptent des pommes de douche à débit réduit, se munissent d'un lave-vaisselle Energy Star ou installent un système de récupération de chaleur des eaux grises Power-Pipe®. Quant aux propriétaires qui ont installé des panneaux photovoltaïques, ils font tout pour réduire leur

consommation d'électricité à l'aide d'appareils performants et surtout adaptés à leurs besoins.

« Tandis que la plupart des maisons au Canada consomment de 20 à 30 kWh par jour, les maisons éconergétiques ne consomment souvent que 8 à 12 kWh quotidiennement » (SCHL, s. d.b). Dans le cas de maison très éconergétiques, cette consommation peut être réduite à 2 ou 3 kW et à aussi peu que 100 à 1000 W pour des chalets en région éloignée. En Europe, les concepts de maison ZEN (Zéro Énergie Net) et de *Plusenergiehaus* (maison à énergie positive) sont présentement à l'essai. Les habitations qui ont été construites selon ces principes doivent produire autant sinon plus d'énergie qu'elles n'en consomment (figure 4.1). C'est ce qu'imposera l'Europe à partir de 2019 à tous les nouveaux bâtiments ou à ceux faisant l'objet de rénovations importantes (Guilbeault, 2009). Le rayonnement solaire constitue une part importante de l'apport énergétique de ces bâtiments.



Figure 4.1 Le village solaire Solarsiedlung
Greenline, s. d.

Cette recherche de réduction à la source de la consommation énergétique, soutenue par une tarification de l'énergie plus élevée, a été entreprise il y a plusieurs années en Europe et se poursuit encore aujourd'hui. L'exemple de la Pacific Gas & Electric de Californie est une autre preuve qu'un changement de paradigme est possible. Dans les années 1980, la plus grande compagnie privée d'électricité aux États-Unis a réussi à mettre une croix sur la dizaine de centrales thermiques et nucléaires en incitant la population à réduire sa consommation. « En 1992, elle n'avait plus aucun projet de construction de prévu et a

fermé sa division construction » (Tanguay et Desjardins, 2009, p. 107). Pourquoi ne pas établir des objectifs similaires, de manière à bâtir un projet de société auquel chaque Québécois, dans la mesure de ses capacités, pourrait contribuer?

4.5 La rétrospective de l'analyse

L'analyse présentée dans les sections précédentes a comparé l'énergie solaire sous plusieurs aspects. Elle a d'abord confronté le rayonnement solaire aux autres sources d'énergie renouvelables dans plusieurs contextes : chauffage, eau chaude, électricité et éclairage. Les technologies solaires ont ensuite été évaluées selon leur faisabilité technique et en fonction des différents critères du développement durable : environnement, économie et social. Voici, en quelques lignes, une récapitulation qui établit, pour chaque technique d'exploitation de l'énergie solaire, un constat final.

4.5.1 Le solaire thermique passif

Les principes relativement simples de l'architecture d'un bâtiment solaire passif devraient être appliqués au plus grand nombre de constructions possible. Le seul fait d'orienter correctement une habitation et de positionner adéquatement ses fenêtres par rapport au parcours du soleil réduit sa consommation énergétique pour le chauffage et même pour la climatisation. Il s'agit sans aucun doute de la meilleure solution à mettre en œuvre dans une stratégie d'efficacité énergétique par le rayonnement solaire.

4.5.2 Le solaire thermique actif

Le mur solaire s'avère probablement la technologie solaire active la plus simple et la plus rentable à intégrer aux bâtiments pour diminuer leur frais de chauffage. L'installation de panneaux solaires thermiques constitue une bonne alternative pour la production d'eau chaude et même le chauffage. Son potentiel d'économie d'énergie est impressionnant. Par contre, elle nécessite des équipements un peu plus complexes et la période de retour sur l'investissement est plus longue.

4.5.3 Le solaire thermodynamique

Malgré les nombreux projets de centrales solaires thermodynamiques à travers le monde, la production d'électricité à partir de cette technologie est difficilement justifiable au Québec. L'utilisation des autres formes d'énergie renouvelables constitue certainement une solution plus judicieuse, notamment au plus économique.

4.5.4 Le solaire photovoltaïque

La production d'électricité à partir de panneaux solaires photovoltaïques est en plein essor partout sur la planète. Il s'agit d'une avenue appropriée dans les pays qui ont difficilement accès à des ressources renouvelables pour générer leur électricité. Néanmoins, ce n'est pas le cas au Québec. Les avantages de l'utilisation des technologies photovoltaïques sont donc beaucoup plus faibles. Mieux vaut miser sur l'économie plutôt que sur la production d'énergie. De plus, cette solution ne peut être économiquement rentable que pour les bâtiments qui sont éloignés du réseau d'alimentation. Seules des modifications importantes au niveau de la tarification de l'électricité pourraient rendre intéressante l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque.

4.5.5 L'éclairage naturel

La performance énergétique élevée des nouvelles fenêtres fait en sorte que la lumière naturelle devrait constituer la principale source d'éclairage de jour des bâtiments, du moins dans le secteur commercial. En effet, l'éclairage à partir du rayonnement solaire ne possède pratiquement que des avantages s'il est bien intégré à l'architecture des bâtiments.

5 LA PROMOTION ET L'ÉMERGENCE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Les sections précédentes ont démontré que le rayonnement solaire constitue une source d'énergie renouvelable dont de nombreuses applications auraient avantage à être développées au Québec. En effet, une plus grande exploitation de certaines technologies solaires serait bénéfique tant aux niveaux environnemental, économique que social. Le solaire connaît actuellement une véritable révolution à travers le monde entier. Le retard accumulé dans la province est déjà considérable par rapport au niveau de développement et d'implantation des technologies solaires par les états qui misent sur les énergies renouvelables comme le Québec. Les sections suivantes formulent donc plusieurs recommandations pour promouvoir l'énergie solaire dans la province et pour favoriser son émergence selon quatre niveaux de décision : individuel, municipal, provincial et fédéral.

5.1 Au niveau citoyen, commercial et industriel

Comme c'est le cas dans plusieurs domaines faisant appel à de nouvelles technologies, ce sont d'abord les citoyens, les entreprises et les industries qui doivent démontrer leur intérêt et leur volonté d'innover. En effet, c'est à eux que revient la décision de supporter ou non la filière de l'énergie solaire dans la recherche de l'efficacité énergétique et le développement des énergies alternatives. La population doit aussi être consciente que les comportements et les habitudes de vie qu'elle adopte influencent sa consommation d'énergie et engendre des répercussions sur l'environnement, l'économie et la société.

5.1.1 L'éducation et la sensibilisation

Plusieurs organismes à travers le Canada et le Québec font la promotion des différentes formes d'exploitation de l'énergie solaire. Leur rôle d'éducation et de sensibilisation est primordial. La population générale devient de plus en plus consciente des enjeux environnementaux, économiques et sociaux liés à l'énergie. Néanmoins, les citoyens et les entrepreneurs sont peu informés sur l'énorme potentiel que représente l'énergie solaire. Il faut donc leur donner les renseignements, le soutien et les outils pour qu'ils adoptent un changement de comportement ou qu'ils aient l'audace d'entreprendre une démarche sérieuse en faveur des technologies solaires. Les entrepreneurs, les professionnels et les élus devraient également participer à des rencontres ou des séances d'informations sur le sujet. Énergie Solaire Québec n'est qu'un des nombreux organismes qui proposent fréquemment des cliniques et des soupers au sujet du solaire. Une autre excellente façon d'atteindre indirectement la population consiste à sensibiliser les jeunes

dans les écoles. Ces derniers pourront ensuite influencer l'intérêt de leurs proches envers les bénéfices de l'énergie solaire et leur inculquer de bonnes habitudes.

Recommandation :

- Poursuivre et accentuer les efforts d'éducation et de sensibilisation du grand public et des professionnels au sujet des bénéfices de l'exploitation judicieuse de l'énergie solaire.

5.1.2 Le choix de l'efficacité énergétique

De nombreuses industries à travers le Québec ont fait des efforts considérables au cours de dernières années afin de réduire leur consommation énergétique. L'utilisation de technologies solaires permettrait à plusieurs d'entre elles de poursuivre dans la voie de l'efficacité énergétique. Le chauffage des entrepôts par une conception solaire passive ou l'emploi du mur solaire sont des exemples d'économie d'énergie et de réduction des impacts sur l'environnement. La production d'eau chaude à partir de panneaux solaires thermiques ou de concentrateurs paraboliques pourrait certainement s'avérer une solution pertinente et économiquement rentable pour de nombreuses industries. Les entreprises commerciales pourraient, quant à elle, favoriser l'éclairage naturel de leurs locaux, par exemple. Encore une fois, les économies des frais d'énergie justifieraient l'exploitation du rayonnement solaire qui, contrairement aux combustibles fossiles ou aux autres sources d'énergie renouvelables, est gratuit. Chaque citoyen peut également réduire sa consommation énergétique à l'aide de différentes technologies solaires. Tel que démontré au cours de l'analyse comparative, la mise en commun de la réduction de la demande d'électricité ou de combustibles fossiles est bénéfique sur tous les aspects : environnemental, économique et social.

Recommandation :

- Étudier personnellement, à titre de propriétaire ou d'employé d'une entreprise, les multiples opportunités qu'offre l'exploitation du rayonnement solaire pour permettre aux bâtiments d'atteindre un haut niveau d'efficacité énergétique et pour diminuer les frais associés à l'achat d'énergie.

5.1.3 L'autoproduction d'électricité solaire

L'autoproduction d'électricité à partir d'énergie solaire photovoltaïque demeure marginale au Québec. Si cette solution ne pas idéale dans toutes les circonstances, elle doit

toutefois être sérieusement considérée pour répondre aux besoins en énergie des bâtiments ou des appareils qui sont éloignés du réseau d'alimentation. C'est le cas, par exemple, de résidences éloignées qui auraient tout avantage à tirer profit de l'énergie gratuite, renouvelable et peu polluante que procure le solaire. Cette alternative permet une certaine autonomie et réduit l'utilisation polluante et coûteuse d'une génératrice alimentée aux combustibles fossiles. Dans le cas de bâtiments reliés au réseau public, la production d'électricité à partir de panneaux solaires photovoltaïques est peu pertinente dans le contexte québécois, du moins pour l'instant. Cette approche, pourtant hautement valorisée en Allemagne ou en Ontario, pour ne nommer que ces deux États, pourrait néanmoins devenir intéressante si Hydro-Québec adapte son système tarifaire. La vente à un prix concurrentiel de l'électricité produite de façon décentralisée serait alors avantageuse pour les pionniers de l'énergie solaire.

Recommandation :

- Oser faire figure de pionnier dans la production décentralisée d'électricité par l'utilisation de technologies solaires photovoltaïques sur sa propriété.

5.2 Au niveau municipal

Si les gouvernements fédéral et provincial influencent les stratégies énergétiques globales, les municipalités doivent jouer un rôle primordial dans leur mise en application à l'échelle locale. En effet, elles sont beaucoup plus proches des citoyens et des entreprises et sont surtout en mesure de jouer un rôle de catalyseur pour engendrer des mouvements populaires et rassembleurs. Voici trois sujets à travers lesquels les dirigeants de municipalités pourraient favoriser l'émergence de l'exploitation judicieuse de l'énergie solaire.

5.2.1 Les règlements municipaux

Les municipalités constituent l'organe gouvernemental le plus près de la population. Elles peuvent donc jouer un rôle très important dans la promotion des différentes formes d'énergie solaire à partir d'instruments incitatifs et législatifs. En Californie, une loi interdit aux municipalités de refuser les projets résidentiels d'énergie solaire. Au mois de novembre 2009, un couple ayant installé un système de panneaux solaires a eu gain de cause contre leurs voisins qui prétextaient que l'installation leur gâchait la vue sur San Francisco. Comme le comité d'appel du service des permis a jugé que les panneaux

étaient sécuritaires, il n'a eu le choix que d'approuver l'investissement de 90 000 \$ du couple (Perreault, 2009). Qu'arriverait-il dans de pareilles circonstances dans une municipalité du Québec? Les règlements actuels sont souvent flous en ce qui a trait à l'installation de système d'autoproduction d'énergie, que ce soit par des panneaux solaires ou de petites éoliennes.

Dans le cadre du projet-pilote de système de chauffe-eau solaire, l'Agence de l'efficacité énergétique a mené un sondage qui confirme que « 90 % des municipalités du Québec acceptent l'installation de systèmes solaires » (AEE, s. d.a). Certaines restrictions peuvent toutefois s'appliquer et un permis peut être nécessaire. Bref, la plupart des municipalités doivent certainement gérer les installations solaires aux cas par cas parce que leurs instruments législatifs ne sont pas encore adaptés à l'encadrement de ces nouvelles technologies. Dans un souci d'équité et de vision à long terme, le Comité consultatif d'urbanisme devrait entreprendre une réflexion sur les plans et les règlements d'urbanisme en vigueur dans les municipalités du Québec. Plusieurs instruments réglementaires, s'ils n'existent pas déjà, pourraient favoriser l'exploitation judicieuse de l'énergie solaire : plantation ou protection des arbres pour contrer les effets d'îlot de chaleur urbain et la surchauffe des bâtiments en été, interdiction d'interdire l'utilisation de corde ou de support à linge, gestion des ombrages sur les installations solaires des voisins, etc.

Recommandation :

- Entreprendre une réflexion au sujet des plans et des règlements municipaux d'urbanisme pour qu'ils servent d'instruments de promotion de l'utilisation de l'énergie solaire.

5.2.2 L'urbanisme

La planification urbaine établie par les municipalités a une grande influence sur la capacité d'exploiter l'énergie solaire. D'abord, un aménagement déficient peut contribuer à l'effet d'îlot de chaleur urbain caractérisé par une augmentation de la température ressentie dans la ville par rapport à celle ressentie à la campagne. Les bâtiments, les routes, les stationnements, les parcs et la végétation doivent être harmonisés de manière à empêcher que le rayonnement solaire de l'été atteigne les surfaces sur lesquelles il pourrait être emmagasiné. Les économies en termes de problèmes de santé ou d'énergie nécessaire à la climatisation peuvent être considérables.

Afin de favoriser l'implantation des technologies qui tirent profit de l'énergie solaire, l'aménagement urbain doit permettre aux bâtiments d'être orientés convenablement par rapport au parcours du soleil dans le ciel. Cela implique premièrement des rues qui sont disposées dans l'axe est-ouest au lieu de former des cercles ou des zigzags aléatoires comme c'est le cas dans de nombreux nouveaux quartiers. Ainsi, les grandes façades vitrées des bâtiments seraient positionnées face au sud de manière à optimiser les gains thermiques gratuits. Cette disposition des édifices limiterait également les effets d'ombrages sur les bâtiments voisins, ce qui faciliterait l'utilisation de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques et améliorerait leur rendement. Une planification urbaine adéquate permettrait aussi de tirer profit des principes de l'éclairage naturel.

Recommandation :

- Planifier adéquatement l'aménagement urbain de manière à démontrer les avantages que procurent la réduction du phénomène d'îlot de chaleur, l'exploitation de l'énergie solaire passive, active et photovoltaïque et de l'éclairage naturel.

5.2.3 Les projets collectifs

Les municipalités ont le pouvoir de jouer un rôle de catalyseur dans la création de projets collectifs d'exploitation de l'énergie solaire. Partout à travers le monde, les regroupements de citoyens en faveur de l'exploitation du rayonnement solaire se multiplient. L'écoquartier Bedzed, au sud de Londres, rassemble des logements, des bureaux, des commerces et autres locaux qui optimisent l'utilisation de l'énergie solaire passive. Les bâtiments y sont également couverts de cellules photovoltaïques comme c'est le cas pour le village Solarsiedlung, en Allemagne. La communauté de Drake Landing a opté pour les panneaux solaires thermiques afin de chauffer les habitations et fournir l'eau chaude domestique. Ces quelques exemples d'écoquartiers ont en commun l'exploitation collective de l'énergie solaire. Cette approche a l'avantage de diminuer les coûts d'achat, d'installation et d'exploitation des équipements, de partager les risques que de tels projets comportent et de bénéficier de l'énergie produite ou captée à plus grande échelle. Ces écoquartiers améliorent aussi le sentiment d'appartenance des citoyens face à leur ville qui, elle, bénéficie d'une belle réputation pour son engagement envers le développement durable. Les municipalités du Québec pourraient élaborer, au cours des prochaines années, des projets-pilotes en collaboration avec des organismes fédéraux, provinciaux, privés et communautaires. Ces projets pourraient être encouragés par différents

programmes d'aides financières provenant de la Fédération canadienne des municipalités par le Fonds municipal vert, comme ce fut le cas pour Drake Landing, ou encore du ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation.

Recommandation :

- Élaborer, à l'aide de programmes financiers adéquats, des projets-pilotes d'aménagement d'écoquartiers dans lesquels les citoyens bénéficieraient collectivement de l'énergie captée ou produite à partir du rayonnement solaire.

5.3 Au niveau provincial

L'énergie étant de juridiction provinciale, c'est le gouvernement du Québec qui dicte sa propre stratégie énergétique. Différents moyens faisant appel aux industriels, aux entreprises et aux individus pourraient être mis en œuvre pour favoriser l'émergence de l'exploitation de l'énergie solaire. Il s'agit d'une approche innovatrice pour la province puisque, contrairement aux sources d'énergie conventionnelles, les technologies solaires exigent une stratégie de production décentralisée. C'est-à-dire qu'elles ne sont pas gérées par le gouvernement comme c'est le cas pour l'hydroélectricité, par exemple, mais bien par chaque propriétaire d'installations solaires.

5.3.1 La stratégie énergétique du Québec

Dans sa plus récente stratégie énergétique (2006-2015), le gouvernement du Québec souhaite « relancer et accélérer le développement de notre patrimoine hydroélectrique » avec la mise en œuvre de 4 500 MW de nouveaux projets d'ici les cinq prochaines années (MRFN, s. d.e). Cette augmentation de la production servira à répondre à la demande à long terme du marché québécois et à l'exportation. Une approche similaire est en cours pour le développement de l'énergie éolienne. D'un autre côté, les objectifs concernant le développement de l'énergie solaire sont plutôt conservateurs. Le gouvernement entend faire la promotion et le soutien du solaire en « fournissant plus d'information concernant les gains possibles grâce ... au solaire passif » (MRFN, s. d.e). L'Agence de l'efficacité énergétique et Hydro-Québec ont également reçu le mandat de proposer à la Régie de l'énergie un programme de soutien à la production d'énergie solaire. Aucun objectif chiffré n'a donc été défini pour le moment. L'approche québécoise est donc bien timide par rapport à celle très progressiste de l'Allemagne, par exemple, qui présente pourtant un potentiel solaire tout à fait similaire au Québec.

Il ne faut toutefois pas prendre espoir puisque le gouvernement s'engage à faire « sauter certains blocages règlementaires » qui ralentissent la production décentralisée d'électricité. C'est actuellement un frein pour les propriétaires de panneaux photovoltaïques qui ne peuvent vendre leurs surplus à Hydro-Québec. À cet effet, la société d'État devra proposer des conditions permettant aux particuliers et aux entreprises de vendre l'excédent de leur production de moins d'un mégawatt. Encore une fois, ce programme n'en est même pas à ses premiers balbutiements. Pourtant, l'exploitation de l'énergie solaire peut largement contribuer à l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments. D'ailleurs, le gouvernement dit vouloir privilégier « un meilleur usage l'électricité ». Les technologies solaires peuvent justement remplacer la consommation d'électricité pour les applications nécessitant la production de chaleur (chauffage et eau chaude). Cette électricité pourrait alors être utilisée à meilleur escient, améliorant ainsi le bilan énergétique de la région du nord-est de l'Amérique. Le développement de l'énergie solaire aurait aussi l'avantage de créer des emplois non seulement dans les régions éloignées du Québec, mais partout à travers la province.

Recommandation :

- Attribuer plus d'importance aux technologies solaires dans la stratégie énergétique du Québec pour l'atteinte des cibles d'efficacité énergétique des bâtiments et la production de l'énergie alternative.

5.3.2 Les tarifs et aides financières

Il existe un certain décalage entre le prix de vente de l'électricité au Québec et la valeur réelle de cette ressource énergétique sur le marché. Selon les données d'Hydro-Québec, le tarif résidentiel moyen à Montréal au premier avril 2009 se situait à 6,87 ¢/kWh alors qu'il s'élevait à 13,59 ¢/kWh en moyenne dans les grandes villes nord-américaines (Hydro-Québec, 2009b). Cette tarification deux fois moins chère constitue, en quelque sorte, une subvention de la société d'État à la consommation d'électricité des citoyens et des entreprises québécoises. Cette approche affecte également le prix des autres sources d'énergie (gaz naturel et mazout), qui doivent demeurer compétitives. Or, ces tarifs maintenus artificiellement bas reflètent-ils réellement les coûts économiques, environnementaux et sociaux de la production, de la transformation, du transport et de la consommation de l'énergie? Il serait justifié d'en douter.

Au cours des derniers mois, le gouvernement libéral de Jean Charest a ouvert la porte à une possible hausse des tarifs. Cela pourrait mener à une plus grande sensibilisation de la population face aux économies d'énergie. Dans ce contexte, les Québécois seraient doublement gagnants s'ils optaient pour l'efficacité énergétique. D'abord, leur facture d'électricité, de gaz naturel ou de mazout serait moins élevée. Le principal avantage demeure toutefois l'augmentation des exportations d'Hydro-Québec qui génèreraient une hausse importante de ses profits. Dans certaines circonstances, il serait donc pertinent de favoriser l'utilisation des technologies solaires même si elles apparaissent, à première vue, moins rentables que la consommation d'électricité. En effet, la vente des surplus d'Hydro-Québec annulerait le coût de revient plus élevé du solaire par rapport aux tarifs d'électricité payés dans la province.

En plus d'encourager l'efficacité énergétique, un ajustement des tarifs d'électricité, qui créerait probablement un effet d'entraînement sur le coût des combustibles fossiles, favoriserait aussi le développement d'un marché pour les sources d'énergie alternatives. L'exploitation du rayonnement solaire deviendrait alors une option de plus en plus pertinente. Pour réduire leurs frais de chauffage, les propriétaires accorderaient plus d'importance aux avantages d'un bâtiment solaire passif ou aux murs solaires. La proportion importante de l'eau domestique pourrait être produite à l'aide de panneaux solaires thermiques. Finalement, la lumière naturelle réduirait les coûts liés à l'éclairage des édifices commerciaux.

Recommandation :

- Appliquer le principe d'internalisation des coûts économiques, environnementaux, et sociaux de l'énergie afin que les tarifs reflètent mieux les impacts liés à sa production, sa transformation, son transport et sa consommation.

Pour l'instant, les investissements requis pour acquérir des installations solaires (mur solaire, panneaux thermiques et cellules photovoltaïques) et les périodes de retour sur ces investissements sont élevés au Québec. Cela s'explique, d'une part, par le prix important des équipements dont le nombre de vendeurs et d'installateurs est encore relativement faible. D'autre part, tel que mentionné précédemment, les faibles tarifs des sources d'énergie conventionnelles n'avantagent pas les sources d'énergie alternatives. Il est donc tout à fait normal que les pionniers dans le domaine du solaire reçoivent une certaine aide

financière. C'est actuellement le cas pour le projet-pilote de l'Agence de l'efficacité énergétique, qui subventionne les propriétaires en payant la moitié des coûts d'acquisition, d'installation et de garantie de chauffe-eau solaire. Néanmoins, un maximum de 600 propriétaires pourront profiter de cette offre qui se termine le 31 octobre 2010, et cela, peu importe le nombre de systèmes installés (AEE, s. d.a).

Qu'arrivera-t-il après cette date d'échéance? Est-ce qu'un programme d'aide sera prolongé, renouvelé ou encore bonifié? Est-ce que le Québec suivra l'exemple de l'Ontario ou de l'Allemagne en acceptant qu'Hydro-Québec achète à un prix concurrentiel les surplus d'électricité générés par les autoproducteurs? Ce serait à l'avantage de pratiquement tout le monde que de favoriser le développement d'une véritable industrie du solaire. Les propriétaires bénéficieraient d'une aide financière pour réduire leur consommation d'énergie et les frais qui y sont reliés. Hydro-Québec verrait sa demande locale diminuer et augmenterait ses exportations et ses profits. Le Canada observerait une diminution des émissions de GES, de la pollution et des problèmes de santé. Les milieux naturels pourraient également être préservés puisque les projets de nouvelles centrales hydroélectriques ou de parc d'éoliennes deviendraient superflus. Finalement, le développement d'un véritable marché créerait des emplois dans les domaines de l'architecture, de la conception, de l'ingénierie, de la fabrication et de l'installation des technologies solaires. Au cours des années, les programmes d'aide financière deviendraient alors de moins en moins nécessaires puisque les prix des installations chuteraient jusqu'à ce qu'ils soient régis par la loi de l'offre et la demande.

Recommandation :

- Mettre en place des programmes d'aides et d'incitatifs financiers afin d'encourager les entreprises et les particuliers à acquérir des installations qui exploitent l'énergie du soleil et, par conséquent, à développer la filière du solaire.

5.4 Au niveau fédéral

Bien que le développement énergétique revienne à la charge des gouvernements provinciaux, le gouvernement fédéral peut jouer un rôle primordial dans la promotion de l'énergie solaire. Les éléments suivants pourraient favoriser son leadership dans le domaine.

5.4.1 Les normes du bâtiment

La majorité des applications de l'énergie solaire trouvent leur utilité dans le domaine du bâtiment, que ce soit aux niveaux résidentiel, commercial ou industriel. Le chauffage, la production d'eau chaude et l'éclairage des bâtiments consomment une part importante de l'énergie à l'échelle nationale. Les organismes gouvernementaux qui relèvent du fédéral, que ce soit Ressources naturelles Canada ou la Société canadienne d'hypothèques et de logement, ont développé une grande expertise au sujet de l'efficacité énergétique et de l'exploitation de l'énergie solaire. Le logiciel de modélisation RETScreen constitue un instrument exceptionnel et est déjà utilisé gratuitement par des milliers de concepteurs partout à travers le monde. Il comporte plusieurs évaluations théoriques et expérimentales sur les différentes technologies solaires. Pourquoi ne pas tirer profit de cette expertise pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments du Canada?

Or, plusieurs normes régissent déjà la construction des bâtiments. C'est le cas du Code national du bâtiment (CNB) de 2005 et du Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments (CMNÉB) de 1997 qui ont été publiés par le Conseil national de recherches Canada. En vertu de la Loi constitutionnelle du Canada, chaque province possède la responsabilité de réglementer le domaine du bâtiment et de faire respecter ses exigences. Néanmoins, le CNB et le CMNÉB servent de références et sont souvent adoptés tels quels par les provinces ou ne sont que légèrement modifiés. Il s'agit donc d'outils hors du commun pour faire la promotion de l'énergie solaire.

Le Conseil national de recherches Canada doit faire preuve d'audace lors de la prochaine révision des codes nationaux. Il prévoyait déjà faire des modifications concernant les enveloppes de bâtiments (murs, fenêtres) (ONE, 2008). Pourquoi ne pas en profiter pour faire la promotion d'une conception solaire passive des bâtiments? Cela pourrait se traduire par des recommandations au niveau de la proportion de fenêtres orientées au sud versus celles orientées au nord. Les notions de masse thermique et de protection contre la surchauffe en été par des auvents ou des avant-toits, par exemple, pourraient également y être incluses. Des directives concernant les installations et l'opération de mur solaire, de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques devraient aussi y être décrites. Finalement, un niveau minimal d'éclairage naturel et un contrôle interactif du taux de luminosité pourraient y être intégrés, notamment pour les bâtiments commerciaux. Toutes

ces mesures d'exploitation du rayonnement solaire permettraient aux bâtiments de présenter une performance énergétique supérieure.

Recommandation :

- Intégrer, dans les prochaines révisions des normes nationales sur le bâtiment, des standards qui favorisent l'exploitation judicieuse de l'énergie solaire passive, qui régissent les technologies solaires actives et photovoltaïques et qui promeuvent l'éclairage naturel.

5.4.2 La réduction des émissions de GES

Même s'il est loin d'atteindre son objectif, le Canada s'est engagé à travers le protocole de Kyoto à diminuer ses émissions de gaz à effet de serre (GES) de 6 % par rapport à l'année 1990. Au moment d'écrire ces lignes, les Conservateurs de Stephen Harper ont révisé cet objectif à 20 % sous le niveau de 2006, soit une réduction de seulement 3 % par rapport à 1990. Une augmentation de l'exploitation de l'énergie solaire permettrait de réduire la part des émissions dues au secteur résidentiel, commercial et institutionnel. En effet, chaque habitation solaire passive, mur solaire, panneau solaire thermique ou photovoltaïque réduit la quantité de combustible fossile brûlé ou d'électricité consommée. Cela engendre directement une diminution des émissions de GES. Pourquoi ne pas encourager, par différent programme d'incitatif, les propriétaires de chauffe-eau au gaz ou au mazout à se munir de système de panneaux solaires thermique, par exemple? Les réductions d'émissions varieraient entre 0,5 et 1 tonne par ménage. Et ce n'est que pour l'eau chaude. Les maisons de la communauté Drake Landing produisent jusqu'à 5 tonnes de moins de GES parce que leur système solaire combine eau chaude et chauffage. Du côté du photovoltaïque, l'installation de panneaux de 1 kW peut réduire les émissions annuelles de gaz carbonique de 1,58 tonne si l'électricité produite remplace celle d'une centrale au charbon, de 1,30 tonne dans le cas de l'huile et de 0,73 tonne pour le gaz naturel (CanmetÉnergie, 2001).

À l'échelle du Québec, le secteur résidentiel, commercial et institutionnel était responsable de 12,5 % du total des émissions de GES en 2006 (MDDEP, 2008). Les bâtiments qui sont chauffés ou qui produisent leur eau chaude à partir de combustibles fossiles y sont plus rares que dans le reste du Canada. L'exploitation de l'énergie n'est pas moins pertinente dans la course contre les changements climatiques, surtout à l'échelle

continentale. L'utilisation des différentes technologies solaires réduit la consommation de combustibles fossiles, mais aussi d'électricité qui peut alors être vendue aux provinces ou aux États voisins. Ces derniers brûleront alors moins de charbon ou de gaz naturel pour produire leur propre électricité ce qui est avantageux pour tout le monde.

Recommandation :

- Considérer les technologies solaires comme une alternative à l'utilisation des combustibles fossiles et comme source d'énergie complémentaire à l'électricité dans la lutte contre les changements climatiques.

5.5 Le sommaire des recommandations

Les lignes suivantes reprennent sous forme de synthèse les recommandations qui ont été formulées dans les sections précédentes. Elles se veulent des suggestions afin de promouvoir le rayonnement solaire et de favoriser l'émergence des technologies tirant profit de cette source d'énergie gratuite, renouvelable et peu polluante.

Au niveau citoyen, commercial et industriel

- Poursuivre et accentuer les efforts d'éducation et de sensibilisation du grand public et des professionnels au sujet des bénéfices de l'exploitation judicieuse de l'énergie solaire.
- Étudier personnellement, à titre de propriétaire ou d'employé d'une entreprise, les multiples opportunités qu'offre l'exploitation du rayonnement solaire pour permettre aux bâtiments d'atteindre un haut niveau d'efficacité énergétique et pour diminuer les frais associés à l'achat d'énergie.
- Oser faire figure de pionnier dans la production décentralisée d'électricité par l'utilisation de technologies solaires photovoltaïques sur sa propriété.

Au niveau municipal

- Entreprendre une réflexion au sujet des plans et des règlements municipaux d'urbanisme pour qu'ils servent d'instruments de promotion de l'utilisation de l'énergie solaire.

- Planifier adéquatement l'aménagement urbain de manière à démontrer les avantages que procurent la réduction du phénomène d'îlot de chaleur, l'exploitation de l'énergie solaire passive, active et photovoltaïque et de l'éclairage naturel.
- Élaborer, à l'aide de programmes financiers adéquats, des projets-pilotes d'aménagement d'écoquartiers dans lesquels les citoyens bénéficieraient collectivement de l'énergie captée ou produite à partir du rayonnement solaire.

Au niveau provincial

- Attribuer plus d'importance aux technologies solaires dans la stratégie énergétique du Québec pour l'atteinte des cibles d'efficacité énergétique des bâtiments et la production de l'énergie alternative.
- Appliquer le principe d'internalisation des coûts économiques, environnementaux, et sociaux de l'énergie afin que les tarifs reflètent mieux les impacts liés à sa production, sa transformation, son transport et sa consommation.
- Mettre en place des programmes d'aides et d'incitatifs financiers afin d'encourager les entreprises et les particuliers à acquérir des installations qui exploitent l'énergie du soleil et, par conséquent, à développer la filière du solaire.

Au niveau fédéral

- Intégrer, dans les prochaines révisions des normes nationales sur le bâtiment, des standards qui favorisent l'exploitation judicieuse de l'énergie solaire passive, qui régissent les technologies solaires actives et photovoltaïques et qui promeuvent l'éclairage naturel.
- Considérer les technologies solaires comme alternative à l'utilisation des combustibles fossiles et comme source d'énergie complémentaire à l'électricité dans la lutte contre les changements climatiques.

CONCLUSION

Le Québec est l'un des chefs de file mondiaux dans la production d'énergie à partir de sources renouvelables, en grande partie grâce à l'hydroélectricité. Néanmoins, la consommation énergétique dans la province se situe parmi les plus élevées au monde par habitant. De plus, les besoins croissants en énergie de toutes sortes engendrent des conséquences négatives sur l'environnement, mais également sur l'économie de la province et sur la qualité de vie de ses habitants. À cet égard, le rayonnement solaire constitue une source d'énergie alternative qui connaît une véritable révolution à travers le monde puisqu'elle possède de nombreux avantages. Elle demeure toutefois méconnue dans la province et plusieurs de ses caractéristiques sont souvent victimes de scepticisme. L'objectif de cet essai consistait donc à décrire les différentes technologies solaires afin d'établir leurs spécifications.

Les renseignements contenus dans ce travail ont d'abord démontré le potentiel exceptionnel et encore inexploité de l'énergie solaire. En effet, le sud du Québec reçoit, malgré le climat froid en hiver, un taux de rayonnement comparable à celui des grandes puissances mondiales dans le domaine de l'énergie solaire. Les diverses méthodes permettant de tirer profit de la chaleur et de la lumière du soleil ont également été présentées (solaire passif, actif, thermodynamique, photovoltaïque et éclairage naturel). Ces descriptions ont permis d'établir leur faisabilité technique, leur rentabilité énergétique et leurs impacts environnementaux, économiques et sociaux. Finalement, une analyse comparative basée sur des critères de développement durable a mis en perspective l'énergie solaire et la complémentarité de cette énergie par rapport aux autres types d'énergie renouvelables (hydraulique, éolienne, géothermique et biomasse). Ainsi, la grille d'analyse a démontré les avantages et les faiblesses de l'exploitation de l'énergie solaire.

Une des utilisations optimales et relativement simples de l'énergie solaire est la conception solaire passive des bâtiments. Plusieurs principes du solaire passif visant à réduire les frais de chauffage peuvent être intégrés à des projets de nouvelles constructions sans trop de surcoûts et sans impacts significatifs sur l'environnement. L'utilisation de mur solaire s'avère aussi une excellente solution du point de vue environnemental et économique pour diminuer la charge de chauffage des nouveaux bâtiments et des bâtiments existants. Les panneaux solaires thermiques, très populaires dans de nombreux pays à travers le monde, peuvent être utilisés pour combler la majorité

des besoins en chauffage et en eau chaude domestique. Des systèmes similaires avec concentrateurs paraboliques peuvent aussi constituer des équipements de réduction de la consommation en énergie dans le milieu industriel. Toutes ces applications de l'énergie solaire visent, entre autres, à diminuer la demande en combustibles fossiles afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Aussi, le rayonnement solaire constitue une forme d'énergie qui est complémentaire à l'électricité et qui peut même la remplacer afin qu'elle serve à de meilleures fonctions énergétiques, économiques et politiques que la production de chaleur. Enfin, les entreprises auraient tout avantage à profiter au maximum de la lumière naturelle pour améliorer l'environnement des occupants et réduire les frais d'éclairage et d'opération.

Néanmoins, l'énergie solaire ne possède pas que des avantages. Le coût encore élevé de ces systèmes de production d'eau chaude crée une longue période de retour sur l'investissement. Ils peuvent aussi devenir des éléments inesthétiques s'ils sont mal intégrés aux bâtiments. L'utilisation à grande échelle des technologies qui exploitent l'énergie du solaire pour la transformer en électricité est difficilement justifiable au Québec. Les centrales solaires thermodynamiques seraient peu performantes et surtout beaucoup moins rentables que les centrales hydroélectriques ou les éoliennes. Il s'agit donc d'une forme d'exploitation de l'énergie solaire mal adaptée pour la province. Les faibles tarifs d'électricité et le caractère relativement peu polluant de sa production à partir d'énergie hydraulique réduisent également la pertinence de l'utilisation répandue de panneaux photovoltaïques. Il s'agit néanmoins d'une excellente alternative pour combler les besoins en électricité des bâtiments isolés ou des appareils qui ne peuvent être branchés au réseau d'alimentation.

Finalement, puisqu'il est, à de nombreux égards, dans l'intérêt du Québec d'exploiter davantage l'énergie solaire, plusieurs recommandations ont été formulées. Chaque citoyen, entreprise ou industrie doit être davantage sensibilisé au sujet des multiples possibilités d'économie d'énergie que permet l'exploitation judicieuse de l'énergie solaire. Ce sont eux qui doivent d'abord faire preuve d'audace et de vision en choisissant cette forme d'énergie. Ils appliqueront ensuite de la pression sur les élus des différents paliers de gouvernement. Les municipalités peuvent jouer un rôle primordial dans la promotion et l'émergence de l'exploitation judicieuse de l'énergie solaire. Les règlements doivent être passés en revue pour ne pas être un frein à l'utilisation de technologies solaires, mais bien

en favoriser l'émergence. Les plans d'aménagement des villes doivent réduire la création d'îlots de chaleur urbains, dont les conséquences sont majeures sur la santé de la population et sur la demande en énergie pour la climatisation. Ils doivent aussi faire en sorte que les bâtiments soient orientés et positionnés convenablement par rapport au parcours du soleil dans le ciel. Les municipalités peuvent également faire office de catalyseur dans la création de projets collectifs d'exploitation de l'énergie solaire dans des écoquartiers.

De côté provincial, la stratégie énergétique du Québec devrait renforcer le rôle du rayonnement solaire comme outil dans l'atteinte des cibles d'efficacité énergétique et la production d'énergie alternative. Les programmes d'aide financière, la tarification de l'électricité et le système de crédit ou d'achat de l'énergie produite de façon décentralisée devraient être revus de manière à suivre le courant mondial et à favoriser l'autoproduction. L'énergie solaire utilisée notamment pour le chauffage, la production d'eau chaude et l'éclairage remplacerait alors les combustibles fossiles, mais surtout l'électricité dont les surplus pourraient être exportés aux États voisins. Les effets seraient positifs à la fois sur l'économie de la province et sur la réduction de la pollution atmosphérique à l'échelle continentale. Le plafonnement ou même la réduction de la demande en électricité permettrait aussi de préserver intacts les milieux naturels du Québec puisque les projets de nouvelles centrales hydroélectriques ou de parcs éoliens perdraient leur nécessité. Finalement, le gouvernement fédéral pourrait contribuer à promouvoir les technologies solaires par le renforcement des normes du bâtiment. Cette approche permettrait aux secteurs résidentiel, commercial et industriel de diminuer leurs frais d'opération et de réduire leur consommation d'énergie et leurs émissions de gaz à effet de serre.

Le grand potentiel encore inexploré de l'énergie solaire constitue donc pour le Québec une opportunité exceptionnelle. Cette énergie est abondante, gratuite et renouvelable. La croissance de son exploitation engendrerait des effets positifs sur l'environnement, l'économie et le social. Ainsi, une plus grande utilisation du rayonnement solaire permettrait au Québec d'accentuer son image de chef de file en Amérique du Nord dans la recherche d'efficacité énergétique, la production d'énergie renouvelable et l'application des principes du développement durable.

RÉFÉRENCES

- 3e habitat. (s. d.). Le chauffe-eau solaire. *In* 3e habitat. *Site de 3e habitat.fr*, [En ligne]. <http://www.3ehabitat.fr/chauffe-eau-solaire/chauffe-eau-solaire/> (Page consultée le 28 novembre 2009).
- Agence France Presse (AFP) (2008). Une centrale solaire dans chaque région française d'ici 2011. *In* Cyberpresse. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/environnement/dossiers/energies-alternatives/200811/17/01-801538-une-centrale-solaire-dans-chaque-region-francaise-dici-2011.php> (Page consultée le 22 novembre 2009).
- Association provinciale des constructeurs d'habitations du Québec (APCHQ) (2008). *Le guide des options écologues*. Association provinciale des constructeurs d'habitations du Québec, 47 p.
- Audet, I. (2006). 25 idées pour aider la planète. *In* Cyberpresse. Mon toit. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://montoit.cyberpresse.ca/habitation/200602/13/01-868628-25-idees-pour-aider-la-planete.php> (Page consultée le 25 novembre 2009).
- Autan solaire. (s. d.). Capteur solaire hautes performances. *In* Autan Solaire. *Site de Autan Solaire*, [En ligne]. http://www.autan-solaire.fr/capteur_thermique.htm (Page consultée le 14 novembre 2009).
- Baril, H. (2008). L'énergie de l'avenir – de l'eau, du vent et beaucoup de soleil. *La Presse*, 12 janvier, p. La Presse affaires 3.
- Baril, H. (2009). Projets éoliens communautaires: féroce concurrence. *In* Cyberpresse. La Presse Affaires. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://lapresseaffaires.cyberpresse.ca/economie/energie-et-ressources/200905/26/01-859787-projets-eoliens-communautaires-feroce-concurrence.php> (Page consultée le 17 décembre 2009).
- Beaudin, É. (2008). Chauffe-eau nouvelle génération. *In* La vie en vert. Reportage. *Site de Télé-Québec*, [En ligne]. <http://vievenvert.telequebec.tv/occurrence.aspx?id=361> (Page consultée le 12 décembre 2009).
- Beaudin, É. (2009). Géothermie. *In* La vie en vert. Reportage. *Site de Télé-Québec*, [En ligne]. <http://vievenvert.telequebec.tv/occurrence.aspx?id=546> (Page consultée le 12 décembre 2009).
- Bergeron, U. (2006). Géothermie - Le manteau chaud de la Terre. *In* Le Devoir. *Site de Le Devoir*, [En ligne]. <http://www.ledevoir.com/societe/104508/geothermie-le-manteau-chaud-de-la-terre> (Page consultée le 15 décembre 2009).

- Bérubé, N. (2008). Environnement: l'Eldorado des écolos. In Cyberpresse. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/dossiers/presidentielle-america/200810/18/01-30649-environnement-leldorado-des-ecolos.php> (Page consultée le 18 novembre 2009).
- Bérubé, N. (2009). Les centrales solaires d'Obama dans la ligne de mire des écolos. In Cyberpresse. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/international/correspondants/200910/23/01-914177-les-centrales-solaires-dobama-dans-la-ligne-de-mire-des-ecolos.php> (Page consultée le 18 novembre 2009).
- BFI Canada. (s. d.). Pour Un Avenir Durable. In BFI Canada. À propos de nous. *Site de BFI Canada*, [En ligne]. <http://www.bficanada.com/French/AProposdeNous/Temoignages/PourUnAvenirDurable/default.aspx> (Page consultée le 17 décembre 2009).
- Bonneau, D. (2009). Ils produisent leur propre électricité. In Cyberpresse. Mon toit. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://montoit.cyberpresse.ca/habitation/conseils/200909/09/01-900093-ils-produisent-leur-electricite.php> (Page consultée le 22 novembre 2009).
- BP. (2009). *BP Statistical Review of World Energy June 2009*. Londres, BP, 45 p.
- Canada. CanmetÉnergie (2001). Photovoltaïque pour les bâtiments : opportunités pour le Canada. In Ressources naturelles Canada. *Publications*, [En ligne]. <http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fra/publications.html?2001-123> (Page consultée le 1 janvier 2009).
- Canada. CanmetÉnergie (2009). *Études de cas d'énergie communautaire: La communauté à énergie solaire Drake Landing Okotoks, AB*. Ressources naturelles Canada, 5 p.
- Canada. Office national de l'énergie (ONE) (2008). *Dossier énergie*. Office national de l'énergie, 2 p.
- Canada. Ressources naturelles Canada (RNCAN) (2004). *Guide du consommateur : L'achat de portes et fenêtres à bon rendement énergétique*. Gatineau, Ressources naturelles Canada, 56 p.
- Canada. Ressources naturelles Canada (RNCAN) (2006). *Perspectives énergétiques du Canada : scénario de référence de 2006*. Ottawa, Ressources naturelles Canada, 218 p.

- Canada. Ressources naturelles Canada (RNCa) (2009a). Mesures d'efficacité énergétique - Résidentiel - Chauffage solaire passif / Canada (Toronto). In Ressources naturelles Canada. *RETScreen International*, [En ligne]. http://www.retscreen.net/fr/case_studies_psh_canada_toronto.php (Page consultée le 14 novembre 2009).
- Canada. Ressources naturelles Canada (RNCa) (2009b). Mesures d'efficacité énergétique - Résidentiel - Chauffage solaire passif / Allemagne. Ressources naturelles Canada. *RETScreen International*, [En ligne]. http://www.retscreen.net/fr/case_studies_psh_germany.php (Page consultée le 26 décembre 2009).
- Canada. Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) (2007). *Analyse des murs de masse visant les habitations*. Ottawa, Société canadienne d'hypothèques et de logement au Canada, 6 p.
- Canada. Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) (s. d.a). *L'énergie solaire pour les bâtiments*. Ottawa, Société canadienne d'hypothèques et de logement au Canada, 33 p.
- Canada. Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) (s. d.b). Les systèmes photovoltaïques. In Société canadienne d'hypothèques et de logement. [En ligne]. http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/co/enlo/efenreco/efenreco_003.cfm (Page consultée le 21 novembre 2009).
- Canada. Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE) (2009). *Dans l'engrenage du changement : Efficacité énergétique dans le secteur des bâtiments commerciaux du Canada*. Ottawa, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 93 p.
- Canada. Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC) (2002). *Daylighting Guide for Canadian Commercial Buildings*. Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 86 p.
- Cardinal, F. (2007). *Le mythe du Québec vert*. Montréal, Les Éditions Voix parallèles, 206 p.
- Cardinal, F. (2009). Six projets d'usine de compostage sur les rails à Montréal. In Cyberpresse. Environnement. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/environnement/200911/17/01-922322-six-projets-dusine-de-compostage-sur-les-rails-a-montreal.php> (Page consultée le 14 novembre 2009).
- Claret, R. et Groult, J-M. (2008). *Se chauffer autrement*. Lons-le-Saunier, Les Éditions Eugen Ulmer, 143 p.

- Climate Navigator. (s. d.). Passive solar. In Climate Navigator. Passive solar. *Site de Climate Navigator*, [En ligne]. http://www.climatenavigator.org/wiki/Passive_solar (Page consultée le 14 novembre 2009).
- Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) (s. d.). *Near Net-Zero Energy ÉcoTerra™ Home Demonstration Project*. Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, 12 p.
- Conseil européen des énergies renouvelables (EREC) (2007). *Révolution énergétique – Vers un avenir énergétique propre et durable*. Pays-Bas, Édition PrimaveraQuint, 24 p.
- Corriveau, J. (2008). Montréal - Les îlots de chaleur se multiplient. In *Le Devoir*. *Site de Le Devoir*, [En ligne]. <http://www.ledevoir.com/politique/villes-et-regions/176947/montreal-les-ilots-de-chaleur-se-multiplient> (Page consultée le 23 novembre 2009).
- Côté, C. (2009). La chaleur urbaine gagne la banlieue. In *Cyberpresse*. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/actualites/quebec-canada/sante/200908/16/01-893079-la-chaleur-urbaine-gagne-la-banlieue.php> (Page consultée le 23 novembre 2009).
- Demers, C. et Potvin, A. (2004). Le chauffage solaire passif comme stratégie bioclimatique, *Esquisses, Ordre des Architectes du Québec*, vol. 15, n° 1, p. 1-2.
- Dessus, B. (1999). *Énergie, un défi planétaire*. Paris, Éditions Belin, 208 p.
- Dupuy, G. (2008). *Habitat sain et écologique*. Montréal, Les Éditions Quebecor, 284 p.
- Ecosources. (s. d.). Le solaire thermodynamique. In *Ecosources*. *Energie solaire*. *Site de Ecosources.info*, [En ligne]. http://www.ecosources.info/energies_renouvelables/Energie_solaire_thermodynamique (Page consultée le 18 novembre 2009).
- Ékopédia. (2009). Mur Trombe. In *Ékopédia*. *Site de Ékopédia*, [En ligne]. http://fr.ekopedia.org/Mur_trombe (Page consultée le 14 novembre 2009).
- Francoeur, L-J. (2004). La géothermie, l'inconnue la plus rentable. In *Le Devoir*. *Site de Le Devoir*, [En ligne]. <http://www.ledevoir.com/societe/61420/la-geothermie-l-inconnue-la-plus-rentable> (Page consultée le 14 décembre 2009).
- Francoeur, L-J. (2008). Touche pas à ma corde à linge! In *Le Devoir*. *Site de Le Devoir*, [En ligne]. <http://www.ledevoir.com/politique/canada/173051/touche-pas-a-ma-corde-a-linge> (Page consultée le 25 novembre 2009).

- Gaillard, M. (2008). *L'énergie du Soleil : Construire aujourd'hui l'environnement de demain*. Paris, le cherche midi, 118 p.
- Greenline. (s. d.). Solarsiedlung by Rolf Disch. In Greenline. Architecture. *Site de Greenline*, [En ligne]. <http://greenlineblog.com/2008/01/solarsiedlung-by-rolf-disch/> (Page consultée le 28 novembre 2009).
- Guide Perrier. (s. d.a). Rénovation : ajouter la géothermie au chauffage central eau chaude. In Guide Perrier. *Site de Les Guides Perrier.com*, [En ligne]. <http://www.guideperrier.com/article1318/Renovation-ajouter-la-geothermie-au-chauffage-central-eau-chaude> (Page consultée le 15 décembre 2009).
- Guide Perrier. (s. d.b). Un système électrique autonome pour résidence. In Guide Perrier. *Site de Les Guides Perrier.com*, [En ligne]. <http://www.guideperrier.com/article1444/Un-systeme-electrique-autonome-pour-residence> (Page consultée le 13 janvier 2009).
- Guilbeault, S. (2009). *Alerte! : Le Québec à l'heure des changements climatiques*. Montréal, Éditions du Boréal, 246 p.
- Hydro-Québec. (2005). *Rendement de l'investissement énergétique des options de production d'électricité*. Hydro-Québec, 5 p.
- Hydro-Québec. (2009a). *Rapport de développement durable 2008*. Hydro-Québec, 40 p.
- Hydro-Québec. (2009b). *Comparaison des prix de l'électricité dans les grandes villes nord-américaines : Tarifs en vigueur le 1er avril 2009*. Hydro-Québec, 77 p.
- Hydro-Québec. (s. d.a). Questions et réponses sur l'option de mesurage net pour les autoproducteurs. In Hydro-Québec. *Option de mesurage net : Autoproduction*. [En ligne]. <http://www.hydroquebec.com/tarifs/autoproduction/faq.html> (Page consultée le 22 novembre 2009).
- Hydro-Québec. (s. d.b). Témoignages : Des initiatives concrètes. In Hydro-Québec. *Option de mesurage net : Autoproduction*. [En ligne]. <http://www.hydroquebec.com/tarifs/autoproduction/temoignages.html> (Page consultée le 22 novembre 2009).
- Hydro-Québec. (s. d.c). Géothermie : Avantages. In Hydro-Québec. *Site de Hydro-Québec*. [En ligne]. <http://www.hydroquebec.com/residentiel/geothermie/index.html> (Page consultée le 12 décembre 2009).

- Hydro-Québec. (s. d.d). Votre chauffe-eau : question de prévention. *In* Hydro-Québec. Clients résidentiels. [En ligne].
http://www.hydroquebec.com/conseils_chauffe_eau/index.html (Page consultée le 12 décembre 2009).
- Hydro-Québec. (s. d.e). Repères pour mieux comprendre la complémentarité. *In* Hydro-Québec. Comprendre. *Site de Hydro-Québec*, [En ligne].
<http://www.hydroquebec.com/comprendre/eolienne/reperes-comprendre-complementarite.html> (Page consultée le 22 novembre 2009).
- Ideesmaison.com. (s. d.). Orientation de sa maison: Pièces et Ouvertures. *In* Ideesmaison.com. Construction. *Site de Ideesmaison.com* [En ligne].
<http://www.ideesmaison.com/Construction/Plans-de-maisons/Repartir-ses-pieces-et-ouvertures/Orienter-ses-pieces.html> (Page consultée le 14 novembre 2009).
- Institut du monde arabe (IMA) (2006). Pétrole, énergie solaire et nucléaire dans le monde arabe. *In* Institut du monde arabe. [En ligne].
http://www.imarabe.org/aujourd'hui/actualites_popup.php?i=47 (Page consultée le 21 novembre 2009).
- La Presse Canadienne. (2008a). Montréal songerait à se doter de fondeuses à neige. *In* Branchez-vous!. *Site de Branchez-vous!*, [En ligne].
http://www.matin.gc.ca/articles/20080318092403/montreal_songerait_doter_fondeuses_neige.html (Page consultée le 23 novembre 2009).
- La Presse Canadienne. (2008b). Énergie solaire - REC investit plus d'un milliard à Bécancour. *In* Le Devoir. *Site de Le Devoir*, [En ligne].
<http://www.ledevoir.com/economie/202927/energie-solaire-rec-investit-plus-d-un-milliard-a-becancour> (Page consultée le 17 décembre 2009).
- Lafrance, G. (2002). *La boulimie énergétique, suicide de l'humanité?* Sainte-Foy (Québec), Éditions MultiMondes, 272 p.
- Lhomme, J-C. (2001). *Les énergies renouvelables : histoire, état des lieux et perspectives*. Paris, Delachaux et Niestlé, 190 p.
- Marciano, C. (2008). 20% de renouvelables en 2020: les Européens touchent au but. *In* Cyberpresse. Environnement *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne].
<http://www.cyberpresse.ca/environnement/200812/04/01-807400-20-de-renouvelables-en-2020-les-europeens-touchent-au-but.php> (Page consultée le 8 septembre 2009).

- Moreault, E. (2008). Énergie à partir de la biomasse: Québec accusé d'improviser. *In* Cyberpresse. Environnement. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/le-soleil/actualites/environnement/200810/09/01-28178-energie-a-partir-de-la-biomasse-quebec-accuse-dimproviser.php> (Page consultée le 17 décembre 2009).
- Ontario (2009). L'Ontario facilite et accélère la transition vers l'énergie verte. *In* Ontario. Salle de presse. Site du gouvernement de l'Ontario. [En ligne]. <http://news.ontario.ca/mei/fr/2009/09/bkg-2-20090924.html> (Page consultée le 21 novembre 2009).
- Pentian Construction. (s. d.). Héritage Sur Le Lac - Pierrefonds (Phase I). *In* Pentian Construction. Projets. *Site de Pentian Construction*, [En ligne]. <http://pentian.ca/fr/projects/view/heritage-sur-le-lac> (Page consultée le 14 novembre 2009).
- Perreault, M. (2009). Pas de solaire dans ma cour. *In* Cyberpresse. Environnement. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/environnement/200911/06/01-919158-pas-de-solaire-dans-ma-cour.php> (Page consultée le 30 décembre 2009).
- Perrier, Y. (2008). Un chauffe-eau plus efficace et plus durable. *In* Cyberpresse. Mon toit. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://montoit.cyberpresse.ca/renovation/entretien-de-la-maison/200712/28/01-871305-un-chauffe-eau-plus-efficace-et-plus-durable.php> (Page consultée le 14 décembre 2009).
- Pilon, S. (2008). Éolienne domestique. *In* La vie en vert. Reportage. *Site de Télé-Québec*, [En ligne]. <http://vieenvert.telequebec.tv/occurrence.aspx?id=237> (Page consultée le 15 décembre 2009).
- Pinyon deSign. (s. d.). Landscape Design that Saves Energy. *In* Pinyon design. Permaculture Design Principle 4. *Site de Pinyon design*, [En ligne]. <http://www.pinyondesign.com/permaculture/p4-energy%20efficiency.html> (Page consultée le 1er novembre 2009).
- Planet Air. (s. d.). L'énergie solaire. *In* Planet Air. *Site de Elephorm et Alsacrations*. [En ligne]. <http://planet-air.fr/solaire.php?PHPSESSID=97439cd77d869f92232544227e98c2c1> (Page consultée le 16 janvier 2009).
- Quaschnig, V. (s. d.). Solar thermal power plants. *In* Volker Quaschnig. Regenerative Energien und Klimaschutz. [En ligne]. <http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals2/index.php> (Page consultée le 21 novembre 2009).

- Québec. Agence de l'efficacité énergétique (AEE) (s. d.a). Chauffe-eau solaires domestiques. *In* AEE. *Site de l'Agence de l'efficacité énergétique*, [En ligne]. <http://www.aee.gouv.qc.ca/innovation-technologique/chauffe-eau-solaires-domestiques> (Page consultée le 22 octobre 2009).
- Québec. Agence de l'efficacité énergétique (AEE) (s. d.b). Novoclimat. *In* AEE. *Site de l'Agence de l'efficacité énergétique*, [En ligne]. <http://www.aee.gouv.qc.ca/mon-habitation/novoclimat/> (Page consultée le 28 octobre 2009).
- Québec. Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) (2006). *Projet de développement d'un parc éolien dans la MRC de Matane par le Groupe Axor inc.*. Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 84 p.
- Québec. Institut de la statistique (s. d.). Répartition de la consommation générale d'électricité dans les résidences. *In* Institut de la statistique. *Besoin de stats? Site de l'Institut de la statistique*, [En ligne]. http://www.stat.gouv.qc.ca/jeunesse/ress_naturelle/residence.htm (Page consultée le 25 octobre 2009).
- Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (2005a). *Énergie au Québec - Édition 2004*. Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 127 p.
- Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (2005b). *Évolution de la demande d'énergie au Québec : scénario de référence, horizon 2016*. Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 46 p.
- Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (2008). *La valorisation de la biomasse forestière : un plan d'action*. Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 23 p.
- Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (s. d.a). Consommation total d'énergie. *In* MRNF. *L'énergie. Site du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune*, [En ligne]. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-consommation-energie.jsp> (Page consultée le 22 octobre 2009).
- Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (s. d.b). Consommation d'énergie par secteur. *In* MRNF. *L'énergie Site du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune*, [En ligne]. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-consommation-secteur.jsp> (Page consultée le 25 octobre 2009).

- Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (s. d.c). Énergie éolienne. *In* MRNF. L'énergie *Site du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune*, [En ligne]. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/energie/eolien/index.jsp> (Page consultée le 17 décembre 2009).
- Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (s. d.d). Production d'électricité. *In* MRNF. L'énergie *Site du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune*, [En ligne]. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-production-electricite.jsp> (Page consultée le 17 décembre 2009).
- Québec. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (s. d.e). *L'énergie pour construire le Québec de demain : La stratégie énergétique du Québec 2006-2015 : Sommaire*. Gouvernement du Québec. 15 p.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (2008). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2006 et leur évolution depuis 1990*. Gouvernement du Québec. 14 p.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (s. d.a). La visite à Cap-Rouge... et la fondeuse géothermique. *In* MDDEP. *Site du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs*, [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/jeunesse/chronique/2004/0402-visite.htm#courriel> (Page consultée le 22 novembre 2009).
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) (s. d.b). Le chauffage au bois. *In* MDDEP. Air. *Site du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs*, [En ligne]. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/air/chauf-bois/index.htm> (Page consultée le 6 décembre 2009).
- Québec. Thésaurus de l'activité gouvernementale (s. d.) Énergie renouvelable. *In* Thésaurus de l'activité gouvernementale. Fiche du terme. *Site de Thésaurus de l'activité gouvernementale*, [En ligne]. <http://www.thesaurus.gouv.qc.ca/tag/terme.do?id=4848> (Page consultée le 29 novembre 2009).
- Radio-Canada. (2009a). Une première turbine mise à l'eau. *In* Radio-Canada. *Site de Radio-Canada*, [En ligne]. <http://www.radio-canada.ca/regions/atlantique/2009/11/13/002-NE-turbine-fundy.shtml> (Page consultée le 29 novembre 2009).
- Radio-Canada. (2009b). Vandal vilipendé par l'opposition. *In* Radio-Canada. *Site de Radio-Canada*, [En ligne]. <http://www.radio-canada.ca/nouvelles/Politique/2009/10/06/002-hydro-plan-vandal.shtml> (Page consultée le 31 décembre 2009).

- Regroupement national des conseils régionaux de l'environnement du Québec (RNCREQ) (2009). *Chalets et lieux de villégiature : Guide des énergies renouvelables*. Montréal, Regroupement national des conseils régionaux de l'environnement du Québec, 43 p.
- SolarWall. (s. d.). Chauffage de l'air SolarWall. In SolarWall. [En ligne]. <http://solarwall.com/fr/produits/chauffage-de-lair-solarwall/comment-ca-marche.php> (Page consultée le 14 novembre 2009).
- Tanguay, F et Desjardins J. (2009). *Manifestement vert*. Montréal, Les Éditions du Trécaré, 239 p.
- Thériault, C. (2009). Panneaux solaires à Ste-Anne-des-Monts: réponse espérée dans un mois. In Cyberpresse. Environnement. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://www.cyberpresse.ca/le-soleil/actualites/environnement/200909/13/01-901359-panneaux-solaires-a-ste-anne-des-monts-reponse-esperee-dans-un-mois.php> (Page consultée le 17 décembre 2009).
- Thibaudeau, C. (2008). Étudier la course du soleil. In Cyberpresse. Mon toit. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://montoit.cyberpresse.ca/habitation/200911/02/01-917539-etudier-la-course-du-soleil.php> (Page consultée le 9 novembre 2009).
- Tison, M. (2006). Chauffe-eau: louer ou acheter? Mazout, électricité ou gaz? In Cyberpresse. La presse affaire. *Site de Cyberpresse inc.*, [En ligne]. <http://lapresseaffaires.cyberpresse.ca/economie/200901/06/01-676983-chauffe-eau-louer-ou-acheter-mazout-electricite-ou-gaz.php> (Page consultée le 14 décembre 2009).
- Tregouët, R. (2007). L'Allemagne mise sur l'énergie solaire. In notre-planète.info. Actualité. *Site de notre-planète.info*. [En ligne]. http://www.notre-planete.info/actualites/actu_1174_Allemagne_mise_energie_solaire.php (Page consultée le 9 janvier 2009).