

Institut

EDS

Institut Hydro-Québec en environnement,
développement et société
de l'Université Laval

LES CAHIERS DE L'Institut EDS

Série Stratégies du développement durable

Numéro 2, Octobre 2010

SOBRIÉTÉ ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUES EN ARCHITECTURE

Vers une approche intégrée des stratégies
d'économie d'énergie en climat froid

Sous la direction d'André Potvin

Silvestre J. Celis Mercier,
M. Sc. Candidat au doctorat
en architecture
Groupe de recherche en ambiances
physiques

André Potvin
Professeur titulaire à l'École
d'architecture de l'Université Laval



**UNIVERSITÉ
LAVAL**

Institut

EDS

Institut Hydro-Québec en environnement,
développement et société
de l'Université Laval

Coordonnées de l'Institut EDS

Institut Hydro-Québec en environnement,
développement et société

2440, Pavillon des Services, boul. Hochelaga,
local 3800, Université Laval, Québec, G1V 0A6

Téléphone : (418) 656-2723

Télécopieur : (418) 656-7330

Courriel : ihqeds@ihqeds.ulaval.ca

Conception et design: Serge Pelletier

L'INSTITUT EDS

L'Institut EDS (*Institut Hydro-Québec en environnement, développement et société*) regroupe des membres de la communauté universitaire, provenant aussi bien de sciences sociales que de sciences dures ou appliquées, qui partagent un intérêt commun pour la recherche et la formation en environnement, développement et société.

Le mandat de l'Institut est de soutenir la recherche pluridisciplinaire et les synergies entre spécialistes, et de promouvoir une vision d'ensemble sur les questions d'environnement dans la société. L'Institut réalise ou facilite des activités visant l'approfondissement et la diffusion des connaissances, dans le domaine de l'environnement et du développement durable. Afin de faciliter l'atteinte de ces objectifs, la structure se veut souple, rassembleuse et ouverte.

LA RECHERCHE À L'INSTITUT EDS

Les recherches menées à l'Institut s'articulent autour de quatre thématiques :

1. Atténuation, vulnérabilités et adaptation aux changements climatiques
2. Dynamique et gouvernance de la biodiversité;
3. Disponibilité et gestion des ressources hydriques
4. Stratégies du développement durable.

Ces thématiques s'inscrivent dans les champs d'activités prioritaires en environnement et développement durable identifiés dans le plan de développement de la recherche 2006-2010 de l'Université Laval, institution d'attache de l'Institut EDS.

Les Cahiers de l'Institut EDS publient quatre séries consacrées spécifiquement à chacune de ces thématiques et rendent compte des résultats des recherches des membres de l'Institut, notamment celles développées dans le cadre des projets qu'il finance.

Site Internet : www.ihqeds.ulaval.ca



École d'architecture
Faculté d'aménagement et des arts visuels
Vieux Séminaire
1 Côte de la Fabrique
Université Laval
Québec, (Québec), G1K 7P4
Canada

SOBRIÉTÉ ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUES EN ARCHITECTURE

Vers une approche intégrée des stratégies d'économie d'énergie en climat froid

Note de synthèse:

INSTITUT HYDRO-QUÉBEC EN ENVIRONNEMENT, DÉVELOPPEMENT ET SOCIÉTÉ (I EDS)

Silvestre J. Celis Mercier, M. Sc.
Candidat au doctorat en architecture
Groupe de recherche en ambiances physiques

Silvestre Celis Mercier détient une maîtrise en science de l'architecture et poursuit des études doctorales dans le domaine de l'adaptabilité environnementale en architecture à l'Université Laval. Il est chercheur au Groupe de recherche en ambiances physiques (GRAP) spécialisé dans l'intégration des systèmes passifs de contrôle de l'environnement. Il conduit depuis 2007, en collaboration avec des instituts de recherche du gouvernement canadien, des évaluations post-occupationnelles de bâtiments à faible consommation d'énergie en climat froid, dont l'Édifice de la Grande Bibliothèque et la Thomas Wells Elementary School.

Monsieur Celis Mercier est le président de la boîte de consultation en architecture résidentielle bioclimatique ArchiScience.

André Potvin
Professeur titulaire à l'École d'architecture de l'Université Laval

André Potvin est professeur titulaire à l'École d'architecture de l'Université Laval. Il est codirecteur du Groupe de recherche en ambiances physiques (GRAP), membre associé du Centre de recherche en aménagement et développement (CRAD), membre du Conseil du bâtiment durable du Canada (CBDC) et membre régulier de l'Institut EDS. Ses principaux domaines de recherche comprennent l'architecture bioclimatique, la microclimatologie urbaine et l'adaptabilité environnementale. Le professeur Potvin est détenteur d'un doctorat en architecture (Ph.D.) de l'Université Cambridge et d'une maîtrise en architecture (M.Arch.) de l'Université Laval.

SOBRIÉTÉ ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUES EN ARCHITECTURE:

Vers une approche intégrée des stratégies d'économie d'énergie en climat froid

RÉSUMÉ

La nouvelle réalité de la production architecturale exige une approche d'économie d'énergie intégrant des stratégies de sobriété et d'efficacité énergétiques afin de minimiser les impacts négatifs de l'exploitation du bâtiment sur l'environnement, et sans compromettre le confort et la santé des usagers. Les économies d'énergie attribuables aux stratégies de sobriété énergétique relèvent des qualités architecturales du bâtiment ainsi que du comportement de ses occupants. Les économies attribuables aux stratégies d'efficacité énergétique dépendent notamment des technologies utilisées dans les systèmes mécaniques de contrôle environnemental. Quels sont le potentiel d'économie d'énergie et les défis associés à l'intégration des stratégies de sobriété et d'efficacité énergétiques en architecture? Quelles sont les conditions de succès dans un climat froid? Le principal dilemme de l'intégration des stratégies de sobriété et d'efficacité énergétiques est que la première favorise les environnements variables et adaptables par les usagers, alors que la seconde a tendance à favoriser les environnements stables, automatisés et contrôlés par des systèmes mécaniques. Cette note de synthèse conclue qu'une approche globale d'économie d'énergie exige, entre autres mesures, la prise en charge de paramètres architecturaux, technologiques et socioculturels.

ABSTRACT

The new reality of the architectural production requires an approach to energy saving integrating strategies of energy conservation and energy efficiency to minimize the negative impacts of building operation on the environment, without compromising the comfort and health of users. The energy savings attributable to energy conservation strategies depend on the architectural qualities of the building and the behavior of its users. Those attributable to energy efficiency strategies depend on the technologies used in mechanical environmental control systems. What are the potential energy savings and the challenges associated with the integration of energy conservation and energy efficiency strategies in architecture? What are the conditions for success in a cold climate? The main dilemma of integration strategies of energy conservation and energy efficiency is that the former fosters dynamic environments and adaptable by users, while the latter tends to foster stable environments, automated and controlled by mechanical systems. This review concludes that the integration of these approaches requires among others the coverage of architectural, technological and sociocultural parameters.

TABLE DES MATIÈRES

-	Résumé / Abstract	Page 4
1	Problématique	Page 6
2	Confort	Page 7
2.1	Confort normalisé	Page 7
2.1.1.	Méthode conventionnelle	Page 8
2.1.2.	Méthode adaptative	Page 8
2.2.	Évaluations post-occupationnelles	Page 9
2.3.	Ré-humaniser le confort	Page 10
3.	Confort et services de l'énergie	Page 11
3.1.	Sobriété énergétique, efficacité énergétique et approche intégrée	Page 11
3.2.	Scénarios tendanciels et prospectifs de la consommation d'énergie	Page 13
4.	Sobriété énergétique	Page 14
4.1.	Bâtiments verts et sobriété énergétique	Page 15
4.2.	L'utilisateur participatif et responsable	Page 18
4.2.1.	Éduquer l'utilisateur	Page 18
4.2.2.	Supporter l'utilisateur	Page 19
5.	Vers une approche intégrée en climat froid	Page 20
6.	Conclusion	Page 23
7.	Remerciements	Page 23
8.	Bibliographie	Page 24

FIGURES ET TABLEAUX

FIGURE 1	Température de confort dans les espaces ventilés mécaniquement (points blancs) et naturellement (points noirs) (Humphreys, 1978 tiré de Nicol et Humphreys, 2002)	PAGE 7
FIGURE 2	Approche intégrée de l'économie d'énergie.	PAGE 9
FIGURE 3	Scénario énergétique négaWatt (négaWatt, 2006).	PAGE 12
FIGURE 4	Économie d'énergie prévue versus économie mesurée dans des bâtiments certifiés LEED (Turner et Frankel, 2008).	PAGE 14
FIGURE 5	Évaluation de la consommation énergétique.	PAGE 19
TABLEAU 1	Opinion publique sur comment répondre aux besoins énergétiques (adapté de NEETF et Roper, 2002) .	PAGE 16

1 PROBLÉMATIQUE

Le secteur du bâtiment est à l'heure actuelle responsable d'environ un tiers des émissions mondiales de CO₂ liées à la production d'énergie. Dans l'ensemble des pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques, le secteur du bâtiment représente entre 35 et 40 % des émissions de CO₂ provenant de l'utilisation de combustibles fossiles. Cela comprend les émissions directes sur site dues à l'utilisation de gaz naturel et de pétrole (principalement) pour le chauffage, la climatisation et la ventilation des espaces, ainsi que les émissions attribuées à la production de l'électricité consommée dans les bâtiments (Ürge-Vorsatz et coll., 2007). Aujourd'hui, l'urgence de réduire la consommation d'énergie utilisée pour fournir des conditions favorables au confort des usagers nous porte à réfléchir sur une approche intégrée d'économie d'énergie dans l'architecture.

Cette note de synthèse examine diverses stratégies d'économie d'énergie dans le secteur du bâtiment ayant fait l'objet de publications scientifiques. Ces stratégies ont été regroupées en deux catégories : sobriété énergétique et efficacité énergétique. Au sens large, les premières consistent d'une part à optimiser l'architecture de façon à exercer un contrôle passif de l'environnement intérieur et d'autre part, à instaurer chez les occupants des comportements favorables aux économies d'énergie. Les secondes intègrent d'une part l'utilisation d'équipements mécaniques offrant un rapport élevé entre l'énergie finale et l'énergie utile à leur fonctionnement et d'autre part, l'utilisation de systèmes mécaniques munis de composants exploitant l'énergie disponible autour et à l'intérieur du bâtiment afin de réduire l'utilisation d'énergie finale.

Ainsi, l'approche intégrée d'économie d'énergie dans le secteur du bâtiment exposée ci-après regroupe des considérations d'ordres architectural, technologique et socioculturel, notamment le comportement des occupants et leurs attentes de confort.

Ce texte est divisé en quatre sections. La première décrit les concepts de confort selon les principales théories sur le contrôle environnemental. La deuxième section distingue les champs de recherche et d'application de la sobriété énergétique et de l'efficacité énergétique dans l'environnement bâti. Cette section traite du potentiel d'économie d'énergie attribuable à ces deux approches. La troisième section approfondit la notion de sobriété énergétique et décrit les principaux facteurs de sa réussite: l'architecture passive et le comportement responsable et soutenu des usagers. La quatrième section illustre les défis de l'intégration des approches de sobriété et d'efficacité énergétiques dans l'application de stratégies passives dans un climat froid. Cette note de synthèse répond aux questions suivantes :

- En quoi la définition du confort influence-t-elle le choix des stratégies d'économie d'énergie?
- Quels sont les champs d'application des stratégies de sobriété et d'efficacité énergétiques et quel est leur potentiel d'économie d'énergie?
- Qu'est-ce qui motive les usagers de l'architecture à adopter des comportements responsables favorisant leur confort et les économies d'énergie?
- Quels sont les défis particuliers de la sobriété énergétique dans l'application de stratégies passives dans un climat froid?

2 CONFORT

Le confort demeure un concept contesté, controversé et en évolution dans les théories du contrôle environnemental (Healy, 2008). Il existe au moins deux positions théoriques sur le confort : la première suggère qu'il est une situation universellement définissable alors que la seconde soutient qu'il s'agit d'un concept socioculturel sujet à interprétation. Vischer (2008) explique bien la différence entre ces deux positions théoriques. La première est fondée sur la prémisse du déterminisme environnemental qui établit des liens de cause à effet entre le confort, le comportement des usagers et les conditions physiques ambiantes. Cette approche, où le confort et le comportement sont parfaitement prévisibles, a été rapidement adoptée par les organismes normatifs et les professionnels, qui ont vu dans ce déterminisme environnemental une application simple dans la pratique. À l'autre extrême, l'approche du constructivisme socioculturel considère que l'expérience du confort est le résultat de schémas sociaux et n'est pas influencée par les conditions physiques de l'environnement. Si l'environnement physique a un rôle à jouer, c'est seulement au niveau symbolique, comme médiateur des relations sociales.

2.1 CONFORT NORMALISÉ

Le déterminisme environnemental, à la base des fondements théoriques normatifs, définit les conditions acceptables de l'environnement bâti. L'intention des normes est de fournir des données physiques (température, humidité, éclairage, taux de renouvellement de l'air, etc.) assurant la conception d'un environnement optimal pour le confort de la majorité des occupants. Les professionnels ont recours à ces normes pour dimensionner les équipements mécaniques (luminaires, ventilateurs, fournaise, etc.) nécessaires pour atteindre les conditions prescrites et prévoir la demande en énergie du bâtiment durant son occupation. L'analyse de l'ensemble des normes dépasse les objectifs de cette note de synthèse qui s'attarde spécifiquement aux normes régissant la qualité de l'air intérieur.

En Europe, certaines législations adoptent la norme EN15251 du Comité européen de normalisation intitulée Indoor environmental input parameters for design and assessment for energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. En Amérique, la majorité des juridictions recommandent l'application des normes Standard55 et Standard62.1 de l'ANSI/ASHRAE, portant respectivement sur le confort thermique et la qualité de l'air. Ces normes sont conceptuellement similaires et proposent deux méthodes pour la conception de l'environnement thermique :

- la méthode conventionnelle
- la méthode adaptative

La première s'applique aux espaces climatisés mécaniquement et la seconde aux espaces climatisés naturellement.

2.1.1 MÉTHODE CONVENTIONNELLE

Les prescriptions de la méthode conventionnelle sont le résultat d'études en laboratoire basées sur le modèle d'équilibre thermique développé par Fanger (1970). L'objectif des études de laboratoire est de déterminer l'intensité des stimuli thermiques provoquant une sensation thermique neutre chez les sujets. Cette approche présume que l'absence de sensations thermiques équivaut à un état d'esprit satisfait de l'environnement thermique. L'équation du confort issue de ces expériences combine des paramètres physiques (température, humidité, mouvement d'air) et personnels (activité métabolique et habillement des sujets) précis. Avec cette méthode, la température théorique de confort est de l'ordre de 21-23 °C. Dans la pratique, des systèmes mécaniques de conditionnement de l'air sont installés dans de vrais bâtiments afin de reproduire les conditions optimales de confort ainsi déterminées en laboratoire.

2.1.2 MÉTHODE ADAPTATIVE

Les prescriptions de la méthode adaptative sont issues d'études de terrain. Les données fournies par la norme EN15251 sont basées sur les résultats du projet Smart Controls and Thermal Comfort (SCATs) de l'Union européenne (McCartney et Nicol, 2002) alors que celles de la norme ANSI/ASHRAE sont issues du projet Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference (de Dear et coll., 1998). Les principales conclusions de ces recherches sont:

- les occupants des espaces ventilés naturellement se sentent confortables dans des étendues de températures plus larges que les occupants des espaces climatisés mécaniquement;
- la température intérieure de confort, variant entre 18 et 30 °C, est influencée par la température extérieure. La température de confort adaptative est donc fonction de la température extérieure.

Nicol et Humphreys (2002) expliquent cette anomalie par des facteurs contextuels, tels que le climat, la culture et l'expérience thermique des personnes. Les auteurs soutiennent que les environnements ventilés naturellement offrent généralement un plus grand contrôle sur les conditions thermiques et que cette perception de contrôle mène à une

relaxation des attentes thermiques des occupants et à une plus grande tolérance aux variations de température (voir figure 1). La théorie de l'adaptabilité thermique relève donc à la fois de l'approche du déterminisme environnemental et de l'approche du constructivisme socioculturel, décrites en début de section.

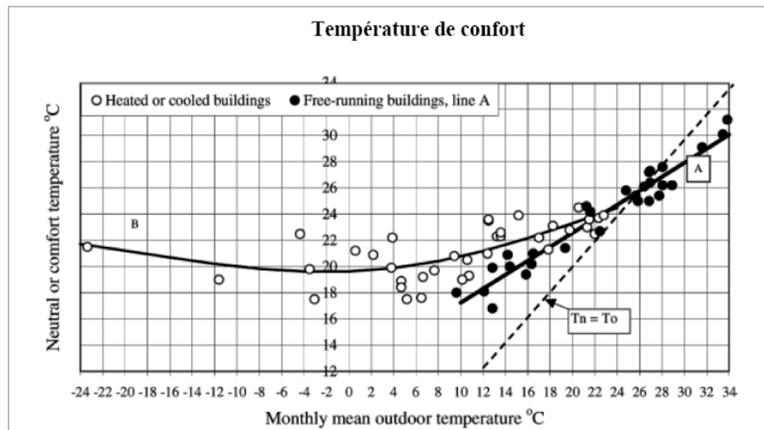


Figure 1

Température de confort dans les espaces ventilés mécaniquement (points blancs) et naturellement (points noirs) (Humphreys, 1978 tiré de NICOL ET HUMPHREYS, 2002)

2.2 ÉVALUATIONS POST-OCCUPATIONNELLES

Les évaluations post-occupationnelles (EPO) consistent à évaluer la performance d'un environnement bâti pour répondre à des besoins de manière effective selon la perception des usagers (Zimmerman et Martin, 2001). Les EPO permettent de valider les directives de conception pour prévoir le confort des usagers et la quantité d'énergie consommée dans le bâtiment durant l'occupation. Les EPO constituent une branche émergente de la recherche scientifique sur l'environnement bâti permettant d'améliorer les conceptions et les techniques de contrôle de l'environnement intérieur à partir d'observations en milieux réels.

Brager et Baker (2009) ont récemment analysé la base de données des évaluations post-occupationnelles réalisées par le Center for the Build Environment de l'Université Berkeley, qui regroupe l'évaluation de 370 bâtiments aux États-Unis, plus de 43 000 questionnaires de sondage compilés et 3,8 millions de données. L'analyse montre que seulement 11% des bâtiments analysés atteignent le seuil d'acceptabilité normatif. Dans l'ensemble, 41% des personnes indiquent un certain niveau d'insatisfaction envers l'environnement thermique. En ce qui concerne la qualité de l'air intérieur, 46 % des répondants ont indiqué être satisfaits de la qualité de l'air, alors que seulement 26% des bâtiments répondent au critère de 80 % d'acceptabilité de la norme en cours. Les auteurs précisent que le taux de satisfaction est plus élevé dans les bâtiments qui offrent la possibilité de ventilation naturelle.

Leeman et Bordass (2007) signalent des taux d'insatisfaction de 70 à 80 % et qu'il est commun de constater que 30 à 40 % des occupants se sentent insatisfaits de leur environnement. Les auteurs remarquent que le taux de satisfaction global envers les bâtiments est généralement plus élevé que le taux de satisfaction envers chacune des composantes de l'environnement. Par exemple, une étude de Heerwagen et coll. (1991) montre que 90% de 268 occupants qui ont participé à une EPO se disent satisfaits de leur environnement de travail, malgré le fait que 40 % se disaient insatisfaits de l'acoustique et 36 % se disaient insatisfaits de l'environnement thermique.

Pour Heerwagen et Zagreus (2005), ce phénomène s'explique par le fait que les composantes sociales de l'environnement sont critiques dans l'expérience que les usagers font de leur environnement bâti et que les bénéfices perçus par ces derniers dépendent des qualités générales plutôt que des qualités spécifiques. Leaman et Bordass (2007) expliquent que les occupants n'ont pas nécessairement besoin d'habiter un espace avec des conditions environnementales optimales de confort, telles que définies par les normes, pour se sentir confortables. Si l'environnement est de bonne qualité, par exemple en offrant des vues agréables vers l'extérieur, poursuivent-ils, et que les personnes comprennent le fonctionnement et l'objectif des dispositifs de contrôle (fenêtres, thermostat, etc.), celles-ci ont tendance à être plus tolérantes lorsque les conditions ne sont pas optimales.

2.3 RÉ-HUMANISER LE CONFORT

Les évaluations post-occupationnelles suggèrent que le cadre conventionnel ne parvient pas à rendre compte de la réalité du confort, qui se conforme rarement à des postulats simples de cause à effet. En se concentrant sur les conditions climatiques optimales de l'environnement bâti, l'approche conventionnelle a tendance à présenter les problèmes et les solutions d'approvisionnement du confort et de consommation énergétique comme étant une question de contrôle technique et de performance énergétique des appareils. L'efficacité énergétique est très importante, certes, mais ce n'est pas suffisant. Shipper et coll. (1989) montrent que la moitié de l'énergie consommée dans le secteur résidentiel dépend des caractéristiques de la maison et des équipements employés, et que le reste s'explique par le comportement des occupants.

Potvin et Demers (2005) réfèrent à la ré-humanisation de l'environnement bâti comme étant un contexte théorique et pratique dans lequel l'utilisateur est « un élément actif possédant les capacités de gérer de manière responsable et efficace son environnement thermique pour autant qu'on lui en donne l'opportunité. » La recherche et le développement du confort ont évolué parallèlement à une période d'innovations technologiques et de déploiement intensif des systèmes mécaniques. Dans ce contexte, le rôle de l'architecte de concevoir des espaces confortables a été remplacé par celui de l'ingénieur thermique, et la responsabilité de contrôler l'environnement a été transférée des mains de l'occupant vers les systèmes automatisés (Cole et Brown, 2009). Les solutions techniques aux problèmes de l'énergie ne pourront réussir à moins que l'interaction entre les usagers et les technologies soit bien comprise (Shippee, 1981).

Dans l'ouvrage *Air Conditioning America : Engineers and the Controlled Environment : 1900-1960*, Cooper (1998) argumente que malgré leurs fondements techniques issus d'une démarche scientifique, les normes de confort sont des constructions sociales qui reflètent les croyances, valeurs, attentes et aspirations de ceux qui les conçoivent. L'auteur montre que les normes s'étendent de façon universelle malgré la grande diversité de climats, de sociétés et de cultures. Dans le même ordre d'idée, Nicol et Humphreys (2010) critiquent le fait que les normes actuelles ont tendance à favoriser les environnements hautement dépendants des services de l'énergie et que cette situation a pu se développer à cause de la nécessité pour l'industrie des systèmes mécaniques de justifier un « produit » défini avec précision, le confort. Pour ces auteurs, le confort n'est pas un produit, mais un objectif que les occupants peuvent atteindre lorsque l'architecture leur offre des opportunités d'adaptation.

3 CONFORT ET SERVICES DE L'ÉNERGIE

La recherche aborde la consommation énergétique comme un problème technique, dépendant principalement de l'efficacité des équipements mécaniques, et un problème social, relié à la culture, au comportement et au style de vie des usagers (Schipper et coll., 1989). Janda (2009) soutient que les occupants jouent un rôle critique, mais peu compris et souvent négligé, dans la consommation énergétique du bâtiment. Elle suggère que l'énergie est consommée par les personnes à travers le véhicule qu'est le bâtiment. Hass et coll. (2008) vont plus loin et affirment que les personnes ne consommeraient pas de l'énergie en-soi, mais plutôt les services de l'énergie. Dans un bâtiment, les services de l'énergie sont fournis en combinant différents intrants d'énergie, technologie, capital humain et physique. Nous nous attardons ici aux services de chauffage, de climatisation et de ventilation. Ces services visent à assurer le confort et la santé des usagers.

3.1 SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE, EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET APPROCHE INTÉGRÉE

La figure 2 illustre l'approche d'économie d'énergie intégrant des stratégies de sobriété et d'efficacité énergétiques en vue d'établir des conditions favorables au confort des occupants.

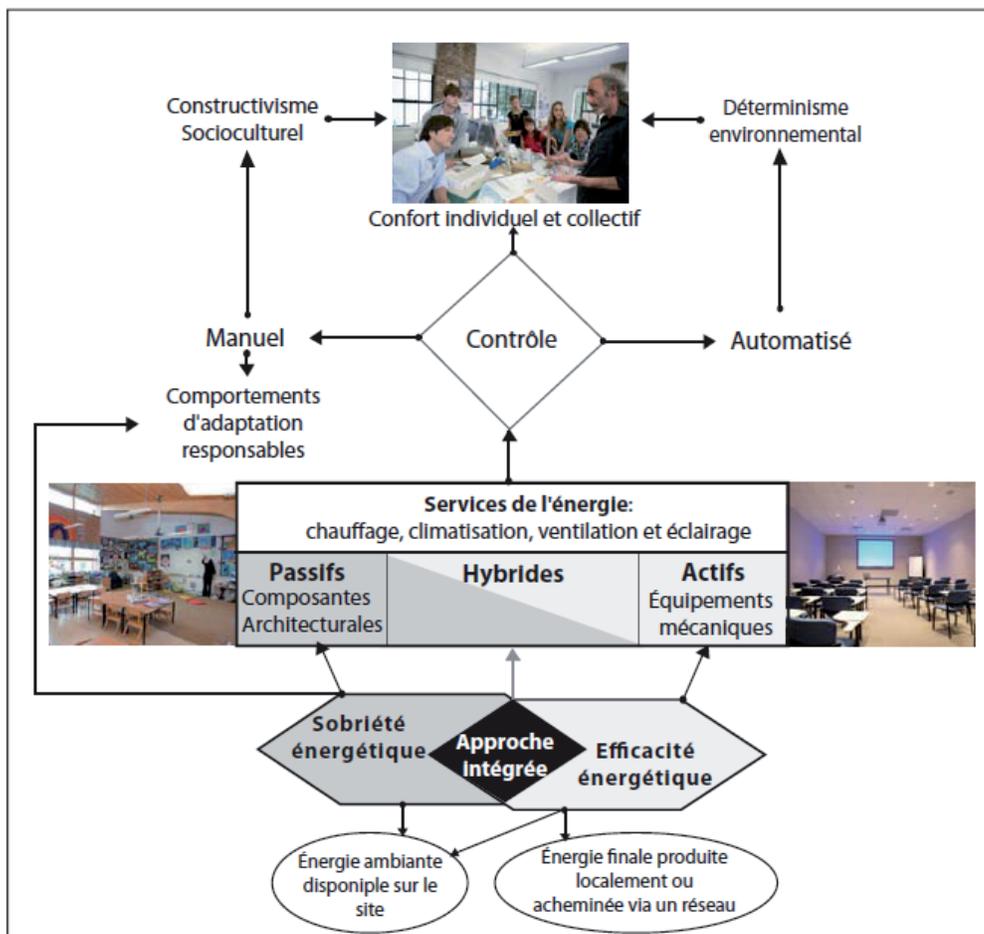


Figure 2 Approche intégrée de l'économie d'énergie.

Dans ce schéma, les services de l'énergie passifs désignent les services fournis par l'entremise de composantes architecturales exploitant l'énergie ambiante disponible sur le site (éclairage naturel, rayonnement solaire et vent). Ce type de service inclut la ventilation naturelle à travers une fenêtre ouvrante et l'éclairage naturel à travers un vitrage. À l'opposé, les services actifs désignent les services de l'énergie fournis par des équipements mécaniques requérant un intrant d'énergie finale pour leur fonctionnement. L'éclairage fourni par une ampoule électrique et le chauffage produit par une chaudière centrale sont inclus dans ce type de service. Actuellement, certains systèmes mécaniques sont munis de composantes capables d'exploiter l'énergie ambiante disponible autour et à l'intérieur du bâtiment afin de réduire l'utilisation d'énergie finale. Tel est le cas des pompes géothermiques qui exploitent la chaleur disponible dans le sol pour préconditionner l'air admis dans le système de chauffage/climatisation et ainsi alléger les charges de conditionnement. En pratique, les espaces intègrent, à différents degrés, des services passifs et des services actifs. Le concept de service hybride désigne les services qui combinent des éléments passifs et des éléments actifs.

Le schéma illustre que la qualité des services de l'énergie offerts dans un bâtiment est contrôlée par des moyens manuels ou automatisés. Les premiers offrent aux occupants l'opportunité de réaliser des ajustements en fonction de leurs choix individuels et collectifs. À l'opposé, les contrôles automatisés sont programmés pour ajuster la qualité des ambiances physiques en fonction de l'approche conventionnelle du confort basée sur la théorie du déterminisme environnemental et expliquée précédemment. En général, les services passifs offrent aux occupants un plus grand degré de contrôle des ambiances physiques alors que les services actifs favorisent les ajustements automatisés.

Les stratégies d'efficacité énergétique visent essentiellement à :

- réduire l'intrant d'énergie finale utilisée par les équipements de chauffage, ventilation, climatisation et éclairage en augmentant le rapport entre l'énergie finale et l'énergie utile à leur fonctionnement;
- utiliser des systèmes mécaniques munis de composantes qui exploitent l'énergie ambiante disponible autour et à l'intérieur du bâtiment afin de réduire l'utilisation d'énergie finale.

L'énergie finale est extraite des sources d'énergie primaire provenant de ressources énergétiques renouvelables (biomasse, solaire, éolienne, hydraulique, géothermie) et non renouvelables (charbon, pétrole, nucléaire, gaz naturel). L'énergie finale peut être produite localement ou acheminée, via un réseau, à partir d'une centrale de production. L'efficacité énergétique vise aussi à réduire les pertes d'énergie lors de la production et du transport de l'énergie. Aujourd'hui, le rapport entre énergie primaire et énergie finale est inférieur à 66 %, toute source d'énergie confondue (Klinger, 2008). L'énergie utile est la quantité d'énergie reçue par un système pour son fonctionnement, après avoir tenu compte des pertes d'efficacité dans le système interne et externe de distribution de l'énergie (Lechner, 2001).

Les stratégies de sobriété énergétique visent essentiellement à :

- réduire l'usage de l'énergie finale pour chauffer, ventiler, éclairer et climatiser les espaces;
- réduire l'utilisation superflue d'énergie.

Le premier objectif peut être atteint grâce à l'exploitation de diverses solutions de l'architecture passive qui permettent l'utilisation de l'énergie ambiante pour contrôler l'environnement intérieur. Le second objectif de réduction dépend du comportement conscient et responsable des usagers lorsqu'ils ont l'opportunité d'interagir avec les dispositifs de contrôle environnemental.

L'approche intégrée vise à exploiter des éléments actifs et éléments passifs de contrôle environnemental. L'intégration de ces différentes approches est abordée avec plus de détails au chapitre Vers une approche intégrée en climat froid.

3.2 SCÉNARIOS TENDANCIELS ET PROSPECTIFS DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Le scénario Évolution de la demande d'énergie au Québec. Scénario de référence, horizon 2016 rédigé par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du gouvernement québécois « constitue une évaluation de la consommation d'énergie future du Québec la plus probable en considérant le maintien des politiques actuelles ou déjà annoncées ». Le document indique que sur l'ensemble de la période étudiée dans le scénario (2001-2016), les besoins énergétiques globaux du Québec progresseraient à un rythme annuel moyen de 1,2 %. Le taux de croissance annuel moyen dans le secteur tertiaire incluant hôpitaux, écoles, commerces et bureaux est estimé à 1,5%, et pour le secteur résidentiel à 0,3%. Le scénario estime que les besoins énergétiques reliés à l'éclairage, au chauffage et aux appareils électriques augmenteront de 26 % entre 2001 et 2016. Cette augmentation est comparable à l'ordre de grandeur du scénario business as usual de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2007).

Malgré les progrès technologiques réalisés pour utiliser plus efficacement l'énergie et diminuer l'intensité énergétique, la consommation d'énergie s'est accrue au cours du XXe siècle, avec une accélération à partir de 1945 (Klinger, 2008). Plusieurs économistes soutiennent qu'une hausse de l'efficacité énergétique au niveau microéconomique conduit vers un accroissement de l'usage des services de l'énergie et de la consommation énergétique au niveau national ou macroéconomique. Ce phénomène est connu comme l'effet de rebond. Madlener et Alcott (2009) ont recensé des études économiques portant sur la relation entre efficacité énergétique, consommation d'énergie et croissance économique. Malgré les différentes méthodes employées par les chercheurs, les résultats montrent que l'amélioration de l'efficacité énergétique tend à favoriser la croissance économique et, de ce fait, à augmenter la consommation d'énergie. Par exemple, Herring (2006) argumente que l'augmentation de l'efficacité des ampoules électriques a entraîné la réduction du coût de l'éclairage artificiel conduisant à une augmentation de la demande pour ce service et une augmentation de la consommation d'énergie. Cette étape de l'histoire économique est qualifiée de révolution électrique; en raison de l'augmentation de l'efficacité des ampoules, les profits que les fournisseurs d'électricité réalisaient par unité d'énergie vendue ont diminué et la création d'un marché de masse pour les ampoules électriques a permis aux fournisseurs de contrebalancer les pertes financières et même d'accroître leurs profits.

Une étude récente, réalisée par NEGAWATT (2006), présente deux scénarios énergétiques à l'horizon 2050 : un scénario tendanciel, et un scénario « négaWatt pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable », dont l'objectif est d'aboutir à une consommation inférieure à celle de l'année 2000 et de diviser par 4,2 les émissions de dioxyde de carbone de la France par rapport à la même année.

Dans ce scénario, le rapport entre l'énergie primaire et l'énergie finale est augmenté de 66 à 83 % ce qui permettrait de réduire de 62 % la consommation primaire d'énergie en 2050. Ce résultat est obtenu par des moyens de sobriété énergétique, d'efficacité énergétique ainsi que par l'exploitation d'énergies renouvelables.

4 SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE

La définition du concept de sobriété énergétique ne jouit pas d'un consensus universel. Comme il a été suggéré dans le schéma approche intégrée d'économies d'énergie (figure 2), les économies d'énergie résultant de la sobriété énergétique combinent le comportement conscient et responsable de la part des usagers lorsqu'ils ont l'opportunité de gérer l'environnement, et l'exploitation de solutions architecturales qui utilisent l'énergie ambiante pour concevoir et opérer les services environnementaux du bâtiment.

La sobriété énergétique peut être comparée au terme anglophone *energy conservation*, qui désigne une réduction de la consommation d'énergie à travers la diminution de la qualité des services de l'énergie, par exemple en réduisant la température de consigne pour le chauffage (Herring, 2006). Selon Hughes (2009), les économies d'énergie potentielles d'une approche de sobriété énergétique ne sont applicables qu'à court terme en raison de la réduction de la qualité des services de l'énergie et des changements de style de vie qu'elles impliquent. D'un autre côté, Henryson et coll. (2000), qui ont recensé les résultats de principaux programmes d'éducation énergétique citoyenne de différentes organisations de l'Union européenne et du gouvernement suédois, suggèrent que des mesures de sobriété énergétique peuvent réduire la consommation d'énergie à court et à long termes, dans certains cas, à un niveau supérieur à 12 %. Mckeown (2007) argumente que la sobriété énergétique (*energy conservation*) est considérée par la communauté scientifique comme le moyen le plus rapide et économique de combler les besoins énergétiques présents et futurs de manière durable.

Le scénario « négaWatt 2006 » se fonde sur la réduction de la demande d'électricité par différentes actions de sobriété et de réduction des gaspillages. Pour cet organisme, la sobriété énergétique consiste à réduire les gaspillages par des comportements rationnels, et par des choix individuels et sociétaux. Profiter au maximum de la lumière naturelle pour s'éclairer est un exemple illustrant leur concept de sobriété énergétique. En matière d'efficacité, le scénario négaWatt suppose un renouvellement des équipements les plus énergivores. Les consommations d'énergie évitées par la sobriété et l'efficacité sont indiquées dans la figure 3 en négaTwh. Dans ce scénario, la sobriété énergétique génère une diminution de la consommation de 0,2 à 0,4 % par an, selon le secteur concerné.

La sobriété énergétique est parfois perçue de manière péjorative et faisant partie d'un discours moralisateur et anticonsommation, car elle remet en cause un style de vie qualifié de gaspilleur. Herring (2006) argumente que dans la politique américaine, l'idée de progrès et de réduction de la consommation de l'énergie à travers l'efficacité de solutions techniques est socialement acceptée, alors que celle de la sobriété est plus difficilement acceptable. Une enquête menée par Gordon et Mank (1982) a révélé que seulement 10 % des Canadiens se disaient disposés à prendre des mesures de sobriété qui leur demanderaient de changer leur style de vie. La tendance dans l'opinion publique à

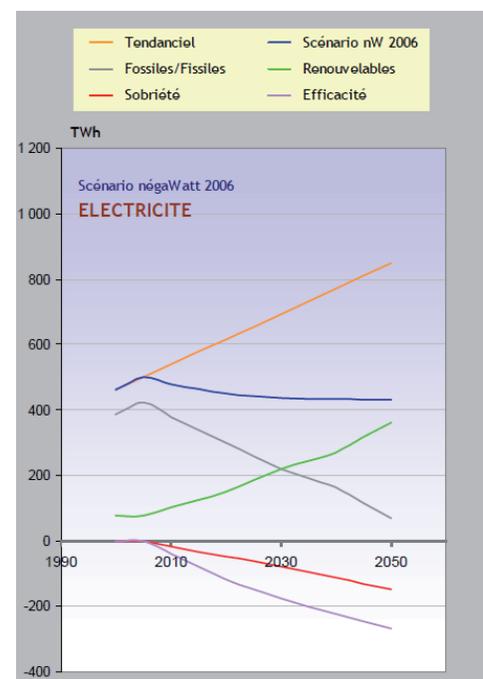


Figure 3

Scénario énergétique négaWatt
(négaWatt, 2006)

rejeter des changements de style de vie explique en partie que les décideurs de politiques énergétiques tendent à écarter consciemment les mesures faisant appel à la sobriété au profit des politiques orientées vers l'efficacité et les technologies (Moezzi, 1998).

En réalité, la sobriété énergétique ne constitue pas un discours moraliste, mais consiste plutôt en une approche d'économie d'énergie compatible, voire indissociable, avec l'efficacité énergétique pour répondre à la demande de confort dans l'environnement bâti. Rappelons que les stratégies d'efficacité énergétique visent essentiellement à réduire l'intrant d'énergie requis pour le fonctionnement des équipements de chauffage, ventilation, climatisation et éclairage. La sobriété énergétique vise à éliminer l'usage superflu de ces équipements sans compromettre le confort des usagers du bâtiment.

4.1 BÂTIMENTS VERTS ET SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE

La sobriété énergétique connaît un renouveau avec l'émergence des pratiques vertes en architecture. Elle consiste à exploiter l'ensemble des composantes architecturales du bâtiment pour créer des environnements confortables, salubres et, dans la mesure du possible, indépendants de l'énergie produite à partir de ressources naturelles renouvelables et non renouvelables. La sobriété énergétique favorise donc une revalorisation de l'architecture bioclimatique où :

- les équipements mécaniques sont utilisés uniquement pour fournir les apports auxiliaires d'énergie dans les situations climatiques extrêmes lorsque les stratégies de contrôle passif, telles que ventilation naturelle, climatisation passive, éclairage naturel, ne permettent pas d'établir des conditions environnementales confortables;
- la diversité environnementale est riche à travers l'espace et le temps. Les conditions environnementales se modifient en fonction des variations quotidiennes et saisonnières extérieures, et ces variations sont plus importantes que dans les bâtiments étanches et mécanisés;
- les usagers ont la possibilité de manipuler différents types de dispositifs de contrôle : fenêtres ouvrantes, rideaux, ventilateurs de plafond, interrupteurs d'éclairage et tout autre type de contrôles manuels accessibles.

De nouvelles pratiques émergent en architecture afin de concevoir des bâtiments dont la performance environnementale et énergétique est supérieure à celle des constructions conventionnelles. Le nouveau paradigme architectural est caractérisé par la spécialisation des métiers de l'architecture, l'intégration de l'utilisateur comme un élément actif sur la performance environnementale et énergétique de l'environnement bâti, l'adoption de méthodes de conception intégrée et, tel que décrit précédemment, le recours indispensable aux évaluations post-occupationnelles pour alimenter la conception de nouveaux bâtiments et améliorer l'opération des bâtiments existants. Les méthodes de conception intégrée regroupent les responsables de la conception et construction du bâtiment – architectes, ingénieurs, paysagistes, constructeurs, consultants financiers, etc. – afin de générer un consensus multidisciplinaire sur les critères de performance que le bâtiment devra atteindre. Le débat entre les différents experts permet d'évaluer les conséquences potentielles des systèmes structuraux, mécaniques, électriques et architecturaux, ainsi que des stratégies de contrôle proposées sur le confort des usagers et les dépenses énergétiques du bâtiment (Cole et coll., 2008).

Les bâtiments verts visent une qualité de l'environnement intérieure supérieure et une consommation énergétique inférieure aux bâtiments conventionnels. Des institutions ont créé des méthodes d'évaluation et de conception pour les bâtiments verts, dont les méthodes Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) et Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM). Les certifications du même nom visent entre autres à assurer la mise en place de techniques pour la gestion responsable de l'eau et des déchets, favoriser le transport durable, assurer une bonne qualité de l'environnement intérieur et réduire la consommation d'énergie comparativement aux bâtiments conventionnels.

Dans la pratique, les bâtiments verts ne consomment pas toujours moins d'énergie que prévu. D'après une étude réalisée en 2007 par le New Building Institute (voir figure 4), 30% des bâtiments LEED performant mieux que prévu, 45% ont une performance comparable aux prévisions et 25% consomment plus d'énergie qu'un bâtiment conventionnel de référence (Turner et Frankel, 2008). Newsham et coll. (2009) ont recensé l'ensemble des évaluations post-occupationnelles sur la performance énergétique de bâtiments verts et évalué la consommation de 100 bâtiments portant la certification LEED. L'analyse montre que globalement, ces bâtiments consomment de 18-39 % moins d'énergie par unité de plancher que les bâtiments conventionnels équivalents. Toutefois, l'analyse révèle qu'entre 28 et 35 % de ces bâtiments consomment plus d'énergie que leurs équivalents conventionnels.

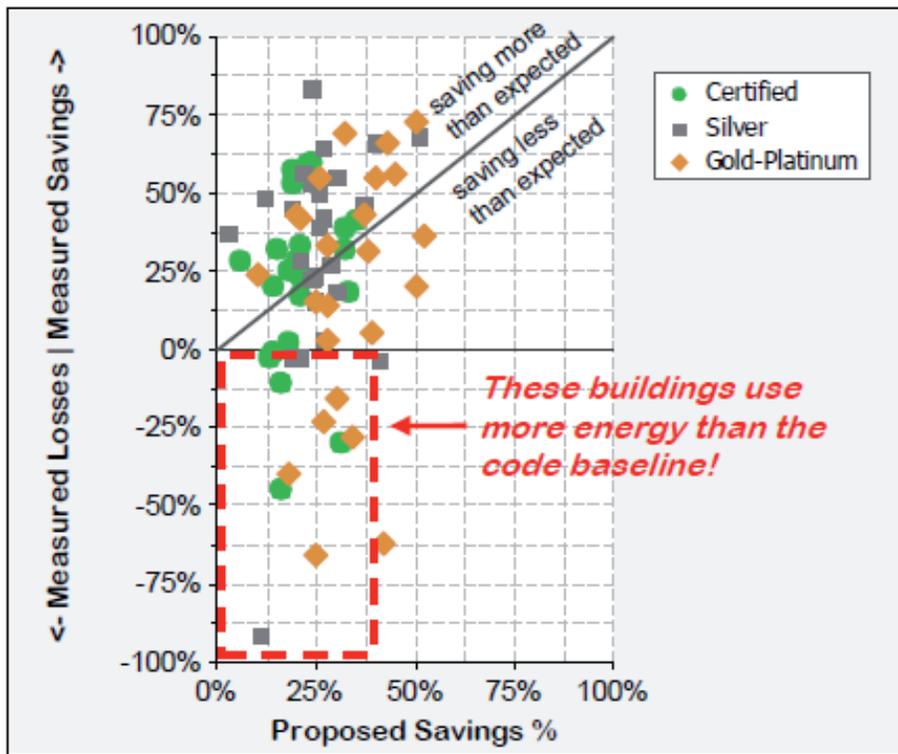


Figure 4

Économie d'énergie prévue versus économie mesurée dans des bâtiments certifiés LEED (Turner et Frankel, 2008).

Pour ces auteurs, la différence entre les consommations énergétiques prévue et réelle s'explique principalement par les facteurs suivants:

- les heures d'occupation diffèrent entre la prévision et la réalité ;
- le bâtiment construit diffère de la conception ;
- les technologies expérimentales ne procurent pas les résultats escomptés ;
- les charges des appareils électroniques ne sont pas bien estimées;
- le manque de connaissance des usagers sur l'opération des systèmes;
- la complexité des systèmes de gestion de l'environnement.

Le rapport *The Costs and Financial Benefits of Green Buildings* (Kats et coll., 2003) produit pour le gouvernement de la Californie recense les résultats d'études traitant du lien entre la qualité de l'environnement intérieur et le confort, la santé et la productivité d'usagers d'édifices à bureaux. L'étude suggère que le principal avantage financier des bâtiments verts n'est pas les économies d'énergie, mais plutôt l'augmentation de la productivité et de la santé des occupants en raison d'une meilleure qualité de l'environnement intérieur. Le rapport montre en effet que le coût de l'énergie par surface de plancher des édifices non-résidentiels est relativement faible comparativement au salaire des employés, lequel représente 90 % des coûts globaux annuels d'opération. Certaines mesures de sobriété énergétique adoptées dans les bâtiments verts, telles que l'éclairage naturel et la possibilité de contrôler le mouvement de l'air, permettent d'augmenter la productivité des usagers, de réduire l'absentéisme, le nombre de démissions et le phénomène du syndrome du bâtiment hermétique. Ce syndrome comprend les symptômes qui se manifestent chez l'occupant lorsque l'air présente de hauts niveaux de polluants biologiques ou chimiques, notamment responsables de maux de tête, sécheresse des yeux ou de la gorge, irritation du nez, étourdissement, etc. Le syndrome du bâtiment hermétique se distingue des maladies reliées au bâtiment, telle que l'amiantose, parce que les symptômes disparaissent lorsque l'occupant quitte l'espace (Vance et Weissfeld, 2007). Les recherches montrent que les occupants des espaces ventilés ou climatisés mécaniquement sont plus à risque de développer des symptômes reliés au syndrome du bâtiment hermétique que les occupants des espaces ventilés naturellement (Jaakkola et Miettinen, 1995; Redlich et coll., 1997; Roulet, 2004). Il a été démontré que des centaines de milliards de dollars seraient économisés si la qualité de l'environnement intérieur des édifices à bureaux américains était améliorée (Kats et coll., 2003).

La performance des bâtiments verts dépend en grande partie de la variation et de la diversité des conditions de l'environnement intérieur, et de l'interaction entre les usagers, ainsi que l'utilisateur et le bâtiment, afin de s'adapter à des besoins et des conditions extérieures changeantes (Cole et Brown, 2009). Mais, qu'est-ce qui motive les usagers à utiliser les services environnementaux de manière bénéfique pour leur confort et les économies d'énergie?

4.2 L'USAGER PARTICIPATIF ET RESPONSABLE

Selon Goetz et coll. (2009), l'architecture est un geste immobile et suspendu qui ne prend sens qu'en réponse aux gestes de ses habitants. Vischer (2008) argumente que le comportement humain est influencé par l'environnement dans lequel il se réalise, mais qu'il n'est pas déterminé par celui-ci. Il est clair, souligne-t-elle, que dans une situation donnée, le comportement des usagers n'est pas seulement influencé par les conditions de l'espace, mais aussi par leurs sentiments, intentions, attitudes et attentes, de même que par le contexte socioculturel.

4.2.1 ÉDUCER L'USAGER

Informé et éduqué les usagers sur la manière d'opérer de façon efficiente les services environnementaux du bâtiment offre un potentiel majeur d'économie d'énergie. En pratique, très peu d'usagers connaissent la manière dont les services environnementaux fonctionnent et malheureusement peu de recherches sont effectuées pour comprendre ce qui motive les usagers à agir de manière responsable pour leur confort et les économies d'énergie dans l'environnement bâti. L'éducation est essentielle pour atteindre l'objectif d'un monde plus durable (UNESCO, 2005). Le but de l'éducation environnementale est d'augmenter le niveau de conscience et de sensibilité envers l'environnement et les problèmes auxquels font face les individus. À travers l'expérience, l'éducation environnementale vise à encourager des valeurs, des attitudes et des comportements responsables envers l'environnement ainsi qu'à développer l'habileté à identifier et à résoudre des problèmes reliés à l'environnement (UNESCO, 1978).

Que doivent apprendre les usagers sur leur bâtiment et comment doivent-ils l'apprendre? Janda (2009) argumente que les citoyens devraient être formés, dès l'éducation primaire, à habiter et à interagir avec le bâtiment de manière à consommer moins d'énergie. L'auteure argumente que beaucoup d'efforts sont mis pour former des professionnels du bâtiment à réduire la demande énergétique, mais que l'éducation aux questions énergétiques devrait s'étendre au grand public, qui représente 99,3 % des usagers dans le secteur du bâtiment. McKeown (2007) soutient que les programmes scolaires en sciences sociales devraient traiter d'avantage le thème de l'énergie, particulièrement dans l'étude des sociétés contemporaines.

Un sondage récent de la National Environmental Education and Training Foundation (NEETF et Roper, 2002) montre que 89% de la population échoue un examen de base sur l'énergie. À la question « Les scientifiques soutiennent que le moyen le plus rapide et à faible coût de combler nos besoins en énergie est de... », seulement 39% des participants répondent correctement: promouvoir la sobriété énergétique. Près de la moitié des répondants croient que la solution réside dans la construction d'un plus grand nombre de centrales de production d'énergie. Le rapport conclut que le manque de connaissances sur le thème de l'énergie est un risque majeur pour le futur énergétique des États-Unis.

Les scientifiques soutiennent que le moyen le plus rapide et à faible coût de répondre à nos besoins en énergie est de...		Nombre de réponses (%)
Promouvoir la sobriété énergétique		39
Produire autre type d'énergie	Développer toutes les sources possibles de pétrole et de gaz naturel	16
	Construire des centrales nucléaires	14
	Développer plus de centrales hydroélectriques	13
Ne sais pas		18

Tableau 1

Opinion publique sur comment répondre aux besoins énergétiques (adapté de NEETF et Roper, 2002)

Les méthodes d'éducation dans le but de réduire la consommation d'énergie peuvent se regrouper en trois catégories : passive, hands-on et feedback. La première utilise des campagnes médiatiques, principalement à travers des brochures et la télévision, pour sensibiliser les individus aux problèmes de l'énergie et tenter de les persuader d'adopter des mesures de sobriété. Les méthodes hands-on présentent deux phases. La première consiste à informer les participants de l'influence de leurs comportements sur l'environnement. Durant la seconde phase, les participants sont suivis dans leur quotidien et encouragés à porter des actions pro-sobriété. La pratique montre qu'en général, les méthodes hands-on, où l'apprentissage se fait par l'expérience de la tâche, donnent de meilleurs résultats à court et long termes que la méthode passive (Shippee, 1981; Henryson et coll., 2000). Le feedback est une méthode d'information où l'utilisateur peut consulter sur un écran et de manière quasi instantanée sa consommation d'énergie ou la quantité d'énergie produite par des systèmes photovoltaïques ou éoliens installés dans le bâtiment. Selon Darby (2006), le principal avantage des méthodes feedback est de rendre le concept d'énergie plus visible et plus compréhensible pour les occupants. Cette auteure suggère que les occupants apprennent ainsi à mieux contrôler l'énergie et génèrent des économies d'énergie variant entre 5 et 15 %.

4.2.2 SUPPORTER L'USAGER

McKeown (2007), dans *Energy Myth Two – The Public is well informed about energy*, a examiné le résultat de différents sondages réalisés aux États-Unis dans le but de connaître le niveau de connaissance énergétique de la population et les aspects qui influencent leur littéracie environnementale, c'est-à-dire l'aptitude à comprendre et à utiliser l'information acquise à l'école, dans les médias, les lectures personnelles, avec des membres de la famille ou des amis, et au cours d'une grande gamme d'expériences personnelles et professionnelles, en vue de manifester des comportements concrets et responsables envers l'environnement et les économies d'énergie. L'auteure montre que la littéracie environnementale ne dépend pas uniquement de l'éducation, des valeurs, de la connaissance et de la conscience environnementale des individus. La recherche d'un certain statut social, un aménagement urbain contraignant, les déplacements pour le travail, la recherche d'économie de temps et les contraintes de circonstances sont autant de facteurs qui expliquent des comportements irresponsables envers l'environnement, bien que la personne soit informée de l'impact négatif de ses choix. McKeown conclut que l'éducation doit être combinée avec d'autres pratiques telles que des politiques urbaines et de transport pouvant supporter un style de vie moins consommateur. Ce principe pourrait s'appliquer à l'échelle du bâtiment, où l'organisation devrait aussi supporter les usagers voulant agir afin de réduire la consommation d'énergie, par exemple en permettant une tenue vestimentaire plus souple.

Une étude récente de Cole et Brown (2009) montre que dans l'environnement bâti certains comportements favorables à l'amélioration du confort et aux économies d'énergie peuvent être limités par le contexte. La complexité, l'inaccessibilité ou la mauvaise réponse des dispositifs de contrôle environnemental (fenêtres, ventilateurs, commutateurs, etc.) pour renverser une situation inconfortable peut démotiver les usagers d'employer ces dispositifs. En général, les usagers aiment pouvoir agir sur leur environnement. La clarté et la simplicité des dispositifs de contrôle ainsi que leur capacité à créer un environnement qui supporte l'utilisateur dans les tâches qu'il réalise favorisent leurs utilisations (Leaman et Bordass, 2007).

5 VERS UNE APPROCHE INTÉGRÉE EN CLIMAT FROID

Quels défis doit relever la sobriété énergétique appliquée au secteur du bâtiment, dans un climat dominé par les besoins en chauffage comme celui du Québec? Est-il avantageux de ventiler naturellement un bâtiment en période hivernale? Au Québec, la riche diversité du climat de type continental (été chaud humide et hiver froid) est souvent perçue comme une contrainte pour la ventilation naturelle.

Dans le but de réduire les charges de chauffage, le programme Novoclimat de l'Agence de l'efficacité énergétique du Québec exige, entre autres, la mise en place d'une isolation supérieure et d'une enveloppe étanche aux infiltrations d'air. Pour contrer le manque de renouvellement d'air frais, la maison doit être munie d'un système mécanique de ventilation et récupération de chaleur. Ce dernier doit répondre aux exigences d'efficacité de l'Agence. Selon cette dernière, les économies annuelles en coûts de chauffage d'une maison Novoclimat sont d'au moins 25 % comparativement à une maison conventionnelle.

Brager et Baker (2009) ont récemment évalué le confort des occupants de 12 bâtiments hybrides. Les résultats montrent que le niveau de satisfaction envers l'environnement thermique et la qualité de l'air intérieur a tendance à être moins élevé dans les bâtiments localisés dans un climat froid (Chicago et Colombie-Britannique) que dans ceux localisés dans un climat chaud (Californie). Les personnes habitant des climats froids, expliquent-ils, ont moins tendance à ouvrir les fenêtres, particulièrement en hiver. La principale source d'insatisfaction en hiver est le manque d'air frais et d'humidité dans l'air. Toutefois, le niveau de satisfaction vis-à-vis des conditions thermiques et de qualité d'air s'est révélé significativement plus élevé dans les bâtiments hybrides que dans ceux hermétiques et climatisés mécaniquement. L'analyse de Brager et Baker ne compare pas la consommation d'énergie dans les bâtiments hybrides et mécaniques. D'ailleurs, peu d'études montrent l'avantage de la ventilation naturelle en milieu nordique. Or, Shorte et Lomas (2007) suggèrent que les bâtiments non résidentiels qui intègrent de la ventilation naturelle dans un climat de type continental consommeraient 43 % moins d'énergie que les bâtiments conventionnels.

Les résultats de ces études récentes effectuées en climat froid soulèvent des questions sur les avantages et les limites des différentes approches de contrôle environnemental au point de vue des économies d'énergie, du confort des occupants et du rôle du comportement des occupants sur la performance environnementale et énergétique de l'architecture. La figure 5 montre les résultats d'une étude paramétrique visant à évaluer la consommation d'énergie pour le chauffage, la ventilation et la climatisation d'un édifice scolaire localisé en climat froid en fonction de trois approches d'économie d'énergie et de contrôle environnemental présentées à la figure 2 :

- Sobriété énergétique et contrôle manuel : ventilation naturelle fournie par des fenêtres ouvrantes et contrôlée par des occupants sur une base annuelle (barres gris pâles). Dans cette approche, le confort thermique est évalué avec la méthode adaptative du confort.
- Efficacité énergétique et contrôle automatisé : ventilation et climatisation fournies par des équipements mécaniques et contrôlées automatiquement sur une base annuelle (barres noires). Dans cette approche, le confort thermique est évalué avec la méthode conventionnelle du confort.
- Intégrée, contrôle automatisé et manuel : ventilation hybride intégrant ventilation naturelle contrôlée manuellement durant la période de climatisation et ventilation mécanique automatisée durant la période de chauffage (barre gris foncé).

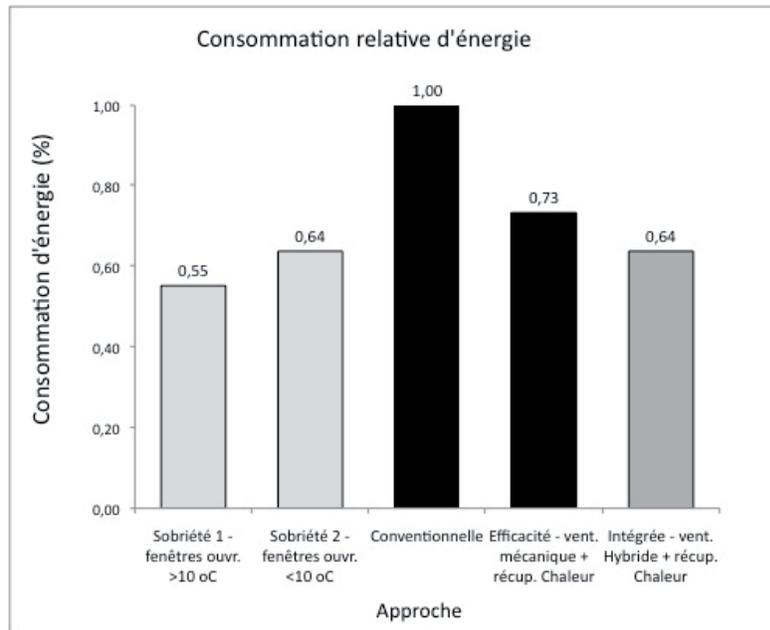


Figure 5

Évaluation de la consommation énergétique en fonction de trois approches d'économie d'énergie.

Les simulations ont été réalisées par l'auteur avec le logiciel de simulation thermodynamique iesve5.9 et en utilisant le fichier climatique de la ville de Québec. L'approche sobriété énergétique comporte deux scénarios. Dans le premier, les fenêtres s'ouvrent uniquement lorsque la température extérieure est supérieure à 10 oC (30 % du temps d'occupation). Le deuxième scénario suppose que les occupants ouvrent les fenêtres durant les pauses, même lorsque la température est inférieure à 10 oC, afin de renouveler l'air. Les résultats suggèrent que l'ouverture des fenêtres en période de chauffage augmente de 12 % la consommation d'énergie comparativement au premier scénario. L'approche efficacité énergétique comporte aussi deux scénarios. Dans le premier, l'espace est ventilé, climatisé et chauffé avec un système mécanique conventionnel sur une base annuelle. Dans le deuxième, la consommation d'énergie est diminuée de 22 % après l'ajout d'un récupérateur de chaleur. Les scénarios sobriété énergétique consomment moins d'énergie que les scénarios efficacité énergétique. Cette différence s'explique principalement par l'utilisation incontournable d'équipements mécaniques afin de répondre aux critères du confort conventionnel. Toutefois, les scénarios efficacité énergétique supposent une qualité d'air optimale, particulièrement durant l'hiver. L'approche intégrée suppose l'utilisation d'un système hybride intégrant un contrôle mécanique et automatisé en période de chauffage et un contrôle architectural et manuel en période de climatisation. D'après les résultats, la consommation d'énergie de l'approche intégrée est comparable au scénario sobriété énergétique et de 31 % inférieure au scénario conventionnel. Les résultats de cette simulation simplifiée soulèvent trois questions principales :

- l'approche sobriété énergétique suppose une amélioration de la qualité de l'air en période hivernale comparativement au premier scénario où les fenêtres demeurent fermées, mais laisse des doutes quant au confort thermique des occupants en période hivernale;
- l'approche efficacité énergétique présume un confort optimal sur une base annuelle, mais une consommation d'énergie plus élevée étant donné que l'évaluation du confort est basée sur l'approche conventionnelle (voir chapitre 2) ;
- en combinant des éléments de sobriété et d'efficacité énergétique, l'approche intégrée offre un environnement confortable dont la performance dépend à la fois des systèmes mécaniques, du comportement responsable des occupants et d'une évaluation du confort basée sur le modèle adaptatif.

En raison du climat froid, la principale source de consommation d'énergie du bâtiment simulé est le chauffage. Les résultats suggèrent que pour ce type de climat l'approche intégrée offre le plus de potentiel pour ce qui est des économies d'énergie et du confort des occupants. En pratique, l'approche efficacité énergétique a cependant tendance à être adoptée par les professionnels. Cela, d'une part en raison des contraintes normatives, mais aussi du manque de données de terrain montrant les avantages environnementaux et énergétiques des bâtiments ventilés naturellement sur une base annuelle ou saisonnière. L'amélioration de la conception des bâtiments et de leur mode d'opération dépend en grande partie de l'apprentissage issu d'évaluations post-occupationnelles basées sur des méthodes d'évaluation exhaustives permettant de recueillir et d'analyser un éventail large de mesures comportementales, contextuelles, sociales et physiques.

6 CONCLUSION

L'objectif principal de cette note de synthèse était d'explorer le potentiel, les limites, l'applicabilité et les défis liés à l'intégration des stratégies de sobriété énergétique et d'efficacité énergétique pour réduire la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment tout en maintenant des conditions favorables au confort des usagers. Les stratégies de sobriété énergétique regroupent les mesures d'optimisation de l'architecture visant à créer des environnements sains, confortables et à faible consommation énergétique, de même que les mesures comportementales favorables aux économies d'énergie. Les stratégies d'efficacité énergétique incluent l'utilisation d'équipements mécaniques offrant un rapport élevé entre l'énergie finale et l'énergie utile à leur fonctionnement, ainsi que de systèmes mécaniques munis de composantes exploitant l'énergie disponible autour et à l'intérieur du bâtiment afin de réduire l'utilisation d'énergie finale.

La nouvelle réalité de la production architecturale est caractérisée en outre par l'adoption d'approches de conception intégrée qui combinent des éléments de sobriété et d'efficacité énergétiques, le recours indispensable aux évaluations post-occupationnelles afin de valider les hypothèses des concepteurs et d'améliorer l'opération des bâtiments existants, ainsi que l'évaluation qualitative, quantitative et technique du confort. Une architecture répondant aux besoins de santé et de confort des usagers tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement doit entre autres:

adopter une approche de conception du contrôle de l'environnement intérieur qui tient compte des aspects physiques, socioculturels et dynamiques du confort;

concevoir des bâtiments où les équipements mécaniques ne sont utilisés que pour parfaire l'environnement créé par des stratégies de contrôle passif, telles que la ventilation et l'éclairage naturels des espaces, et non l'inverse;

éduquer les usagers quant aux moyens d'interagir entre eux et avec l'architecture afin de créer un environnement confortable et salubre, et de favoriser les économies d'énergie. L'éducation doit être accompagnée de moyens de contrôle simples, compréhensibles et efficaces, ainsi que d'un support organisationnel;

développer la recherche sur la performance environnementale et énergétique des bâtiments qui exploitent des stratégies de contrôle passif, afin de subvenir aux besoins de confort des usagers en climat québécois, un climat riche en diversité et caractérisé par des fluctuations importantes variant entre le froid-sec hivernal et le chaud-humide estival.

7 REMERCIEMENTS

L'auteur de ce texte remercie l'Institut Hydro-Québec en environnement, développement et société (Institut EDS) pour la bourse octroyée pour réaliser cette note de synthèse ainsi que les précieux commentaires et suggestions des professeurs André Potvin et Marie-Claude Dubois de l'École d'architecture de l'Université Laval.

8 BIBLIOGRAPHIE

- AIE.** (2007). World Energy Outlook 2007. Agence Internationale de l'Énergie.
- Brager, G., & Baker, L.** (2009). Occupant satisfaction in mixed-mode buildings. *Building Research & Information*, 37(4), 369-380.
- Cole, R. J., Brown, J., & O'shea, M.** (2009). Human and Automated Intelligence in Comfort Provisioning. Dans *Proceedings of the 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Présenté au Architecture, Energy and the Occupant's Perspective*, Quebec City, Canada.
- Cole, R. J., Robinson, J., Brown, Z., & O'shea, M.** (2008). Re-contextualizing the notion of comfort. *Building Research & Information*, 36(4), 323-336.
- Cooper, G.** (2002). *Air-Conditioning America: Engineers and the Controlled Environment, 1900-1960*. JHU Press.
- Darby, S.** (sans date). *The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption*. University of Oxford: Environmental Change Institute.
- de Dear, R., Brager, G., & Cooper, D.** (1998). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference (Final Report No. ASHRAE RP-884)*. Sydney: MRL.
- Fanger, P. O.** (1970). *Thermal comfort : analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press.
- Goetz, B., Madec, P., & Younès, C.** (2009). *L'indéfinition de l'architecture: un appel*. Editions de La Villette.
- Gordon, H. G., & Randolph, B.** (1982). Consumer energy conservation policy in Canada : Behavioural and institutional obstacles. *Energy Policy*, 10(3), 212-224.
- Haas, R., Nakicenovic, N., Ajanovic, A., Faber, T., Kranzl, L., Müller, A., & Resch, G.** (2008). Towards sustainability of energy systems: A primer on how to apply the concept of energy services to identify necessary trends and policies. *Energy Policy*, 36(11), 4012-4021.
- Healy, S.** (2008). Air-conditioning and the 'homogenization' of people and built environments. *Building Research & Information*, 36(4), 312 - 322.
- Heerwagen, J., Loveland, J., & Diamond, R.** (1991). *Post Occupancy Évaluation of Energy Edge Buildings*. University of Washington: Center for Planning and Design.
- Heerwagen, J., & Zagreu Leah.** (2005). *The human Factors of Sustainable building design: post-occupancy evaluation of the Philip Merrill Environmental Center, Annapolis, MD (p. 26)*. U.S. Department of Energy, Building Technology Program.
- Henryson, J., Hakansson, T., & Pyrko, J.** (2000). Energy efficiency in buildings through information - Swedish perspective. *Energy Policy*, 28(3), 169-180.

- Herring, H.** (2006). Energy efficiency--a critical view. *Energy*, 31(1), 10-20.
- Hughes, L.** (2009). The four []R's of energy security. *Energy Policy*, 37(6), 2459-2461.
- Jaakkola, J. J. K., & Miettinen, P.** (1995). Type of Ventilation System in Office Buildings and Sick Building Syndrome. *American Journal of Epidemiology*, 141(8), 755 -765.
- Janda, K. B.** (2009). Building Don't Use Energy: People Do. Dans Proceedings of the 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Présenté au Architecture, Energy and the Occupant's Perspective, Quebec City, Canada.
- Kats, G., Alevantais, L., Bernam, A., Mills, E., & Perlman, J.** (2003). The Costs and Financial Benefits of Green Buildings. California: California's Sustainable Building Task Force.
- Klinger, T.** (2008). Géopolitique de l'énergie. Studyrama.
- Leaman, A., & Bordass, B.** (2007). Are users more tolerant of 'green' buildings? *Building Research & Information*, 35(6), 662-673.
- Lechner, N.** (2001). Heating, cooling, lighting: design methods for architects. Wiley.
- Madlener, R., & Alcott, B.** (2009). Energy rebound and economic growth: A review of the main issues and research needs. *Energy*, 34(3), 370-376.
- McCartney, K. J., & Fergus Nicol, J.** (2002). Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, 34(6), 623-635.
- Mckeown, R.** (2007). Energy Myth Two – The Public is Well Informed About Energy. Dans B. Sovacool & M. Brown (Éd.), *Energy and American Society – Thirteen Myths* (Benjamin K. Sovacool and Marilyn A. Brown., p. 51-74). Netherlands: Springer.
- Moezzi, M.** (1998). The predicament of efficiency. Dans Proceedings of the 1998 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Washington, DC.
- MRNF.** (2005). Évolution de la demande d'énergie au Québec - Scénario de référence, horizon 2016. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec.
- NEETF et Roper.** (2002). Americans' Low "Energy IQ" A Risk to Our Energy Future: Why America Needs a Refresher. The National Environmental Education & Training Foundation - Roper ASW.
- NEGAWATT.** (2006). Scénario négaWatt 2006 pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable. Association négaWatt.
- Newsham, G. R., Mancini, S., & Birt, B. J.** (2009). Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but... *Energy and Buildings*, 41(8), 897-905.

- Nicol, F., & Humphreys, M.** (2010). Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. *Building and Environment*, 45(1), 11-17.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A.** (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563-572.
- Potvin, A., & Demers, C.** (2005). La ventilation naturelle dans le contexte québécois. Esquisses, bulletin d'information de l'Ordre des Architectes du Québec, 16(1), 22-24.
- prEN 15251.** (2006). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R.** (1997). Sick-building syndrome. *LANCET*, 349(9057), 1013-1016.
- Roulet, C.** (2004). Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments. PPUR presses polytechniques.
- Schipper, L., Bartlett, S., Hawk, D., & Vine, E.** (1989). Linking Life-Styles and Energy Use: A Matter of Time? *Annual Review of Energy*, 14(1), 273-320.
- Shippee, G.** (1981). Energy conservation and the role of the social sciences. *Energy Policy*, 9(1), 32-38.
- Short, C. A., & Lomas, K. J.** (2007). Exploiting a hybrid environmental design strategy in a US continental climate. *Building Research & Information*, 35(2), 119 - 143.
- Turner, C., & Frankel, M.** (2008). Energy Performance of LEED® for New Construction Buildings (Final Report). Washington DC: U.S. Green Building Council.
- UNESCO.** (1978). Final Report of the Intergovernmental Conference on Environmental Education (Final Report). Paris: UNESCO.
- UNESCO.** (2005). The UN Decade of Education for Sustainable Development 2005-2014 international implementation scheme (Draft). Brazil: UNESCO.
- Ürge-Vorsatz, D., Harvey, L. D. D., Mirasgedis, S., & Levine, M. D.** (2007). Mitigating CO2 emissions from energy use in the world's buildings. *Building Research & Information*, 35(4), 379 - 398.
- Vance, P. H., & Weissfeld, A. S.** (2007). The controversies surrounding sick building syndrome, 29(10), 73-76.
- Vischer, J. C.** (2008). Towards a user-centred theory of the built environment. *Building Research & Information*, 36(3), 231-240.
- Zimmerman, A., & Martin, M.** (2001). Post-occupancy evaluation: benefits and barriers. *Building Research & Information*, 29(2), 168 - 174.
- Moezzi, M.** (1998). The predicament of efficiency. Dans Proceedings of the 1998 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Washington, DC.

- MRNF.** (2005). Évolution de la demande d'énergie au Québec - Scénario de référence, horizon 2016. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec.
- NEETF et Roper.** (2002). Americans' Low "Energy IQ" A Risk to Our Energy Future: Why America Needs a Refresher. The National Environmental Education & Training Foundation - Roper ASW.
- NEGAWATT.** (2006). Scénario négaWatt 2006 pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable. Association négaWatt.
- Newsham, G. R., Mancini, S., & Birt, B. J.** (2009). Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but... Energy and Buildings, 41(8), 897-905.
- Nicol, F., & Humphreys, M.** (2010). Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. Building and Environment, 45(1), 11-17.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A.** (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. Energy and Buildings, 34(6), 563-572.
- Potvin, A., & Demers, C.** (2005). La ventilation naturelle dans le contexte québécois. Esquisses, bulletin d'information de l'Ordre des Architectes du Québec, 16(1), 22-24.
- prEN 15251.** (2006). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Comité Européen de Normalisation, Brussels.
- Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R.** (1997). Sick-building syndrome. LANCET, 349(9057), 1013-1016.
- Roulet, C.** (2004). Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments. PPUR presses polytechniques.
- Schipper, L., Bartlett, S., Hawk, D., & Vine, E.** (1989). Linking Life-Styles and Energy Use: A Matter of Time? Annual Review of Energy, 14(1), 273-320.
- Shippee, G.** (1981). Energy conservation and the role of the social sciences. Energy Policy, 9(1), 32-38.
- Short, C. A., & Lomas, K. J.** (2007). Exploiting a hybrid environmental design strategy in a US continental climate. Building Research & Information, 35(2), 119 - 143.
- Turner, C., & Frankel, M.** (2008). Energy Performance of LEED® for New Construction Buildings (Final Report). Washington DC: U.S. Green Building Council.
- UNESCO.** (1978). Final Report of the Intergovernmental Conference on Environmental Education (Final Report). Paris: UNESCO.
- UNESCO.** (2005). The UN Decade of Education for Sustainable Development 2005-2014 international implementation scheme (Draft). Brazil: UNESCO.
- ürge-Vorsatz, D., Harvey, L. D. D., Mirasgedis, S., & Levine, M. D.** (2007). Mitigating CO₂ emissions from energy use in the world's buildings. Building Research & Information, 35(4), 379 - 398.

- Vance, P. H., & Weissfeld, A. S.** (2007). The controversies surrounding sick building syndrome, 29(10), 73-76.
- Vischer, J. C.** (2008). Towards a user-centred theory of the built environment. *Building Research & Information*, 36(3), 231-240.
- Zimmerman, A., & Martin, M.** (2001). Post-occupancy evaluation: benefits and barriers. *Building Research & Information*, 29(2), 168 - 174.