

Initiative écoÉNERGIE sur l'innovation

Composante de recherche et de développement

Rapport public définitif

Projet EEBE-024 : Bâtiments intelligents à consommation
énergétique nette nulle

Table des matières

1	Sommaire	3
2	Introduction	4
3	Renseignements généraux.....	4
4	Objectifs	5
5	Résultats du projet.....	8
6	Conclusion et suivi	23

1 Sommaire

L'objectif du projet consiste à mener des travaux de recherche complémentaires afin de modéliser le développement dans le cadre du programme de recherche du Réseau stratégique du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette nulle (BICENN) à l'Université Concordia et avec un réseau de partenaires universitaires, en mettant l'accent sur des applications, des essais sur le terrain et des systèmes innovateurs de validation de principe qui permettront d'avancer vers l'atteinte du but d'optimisation de l'efficacité énergétique et d'intégration de technologies d'énergie renouvelable dans les bâtiments, et ce, pour que ces bâtiments répondent aux cibles de consommation énergétique nette nulle.

La publication du livre à la fine pointe du titre « Modelling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings » constitue une réalisation scientifique et technique clé de la tâche 40/Annexe 52 du projet SHC de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Le livre a été publié par Wiley en février 2015 et les coéditeurs sont Athienitis et O'Brien. Le livre comprend des sections fondamentales sur la modélisation et la conception ainsi que quatre études de cas détaillées et bien documentées, dont une portant sur la maison EcoTerra^{MC}. Environ deux tiers du livre ont été rédigés par un groupe composé de dix chercheurs et étudiants au doctorat associés au Réseau stratégique sur les BICENN qui participent à la sous-tâche B de la tâche ci-dessus de l'AIE.

Les participants au projet ont étudié des technologies prometteuses qui permettront l'adoption de bâtiments à consommation énergétique nette zéro ainsi que des systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment ou BIPV/T (*building-integrated photovoltaic/thermal*) des solariums intégrant le stockage thermique passif et actif, le stockage en puits à deux tubes en « u » pour systèmes géothermiques, des systèmes à thermopompe de source solaire et des stratégies de commande prédictive. Les nouveaux concepts de façade photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment, qui éliminent le besoin de capteurs transpirants non vitrés ou UTC (*unglazed transpired collectors*) et utilisent plutôt des entrées décentralisées, ont été élaborés dans le simulateur solaire de l'Université Concordia et font la démonstration d'une conception simplifiée ayant pour résultat une réduction des coûts et une meilleure efficacité thermoélectrique.

La conception de champs de forage géothermique s'appuie sur la détermination des facteurs de réponse thermique à long terme, appelés fonctions G, obtenues à partir de modèles numériques ou analytiques. À l'aide de l'analyse dimensionnelle pour réduire le temps d'essai, un puits de forage à petite échelle a été construit pour valider ces modèles par l'expérience. Les résultats des essais du petit prototype constituent la première validation expérimentale connue des fonctions G. Des prototypes à deux tubes en « u » ont été construits et utilisés pour valider les nouveaux modèles numériques; ces puits de forage sont particulièrement prometteurs pour améliorer l'efficacité des systèmes géothermiques.

De nouveaux algorithmes de commande prédictive ont été élaborés et mis à l'essai dans un bâtiment à système hybride de ventilation. Des algorithmes modélisés ont également été élaborés afin d'optimiser l'utilisation d'énergie solaire et de réduire la demande de pointe dans les bâtiments à consommation énergétique nette nulle et les bâtiments à haut rendement en général.

2 Introduction

Le projet s'est déroulé de 2011 à 2016 aux installations de partenaires. Le projet comptait la participation directe de deux partenaires en plus de celle du promoteur et indirectement, d'une grande partie du Réseau stratégique sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette nulle (BICENN). Le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) a versé une subvention de 5 M\$ sur cinq ans (2011 à 2016) pour un réseau de recherche stratégique au promoteur et à 14 autres universités partenaires. Le Réseau stratégique sur les BICENN a été financé après un examen international et une visite des lieux. Le Réseau stratégique sur les BICENN vise la réalisation d'activités de recherche qui faciliteront l'adoption généralisée d'ici 2030, dans des régions clés du Canada, de concepts de création et de fonctionnement de bâtiments à consommation énergétique nette nulle (BICENN) adaptés aux conditions climatiques et aux pratiques de construction du Canada. De plus, il vise à influencer la politique nationale à long terme sur la conception de bâtiments et de communautés à consommation énergétique nette nulle, en association avec les partenaires du promoteur. Les activités du programme de recherche du Réseau stratégique sur les BICENN sont concentrées sur l'élaboration de modélisations et de méthodes générales tandis que ce projet englobe des activités non financées par le CRSNG qui sont concentrées sur la validation de principe et des essais sur le terrain avant l'étape de démonstration de concepts avancés de construction, étudiés dans le cadre du Réseau stratégique sur les BICENN qui favoriseront l'atteinte de l'objectif d'optimisation de l'efficacité énergétique et d'intégration de technologies d'énergie renouvelable dans les bâtiments, et ce, pour que ces bâtiments répondent aux cibles de consommation énergétique nette nulle.

3 Renseignements généraux

Le Réseau stratégique sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette nulle (BICENN) a pour but principal de faire enquête sur les moyens optimaux d'atteindre une consommation énergétique annuelle nulle en moyenne dans les bâtiments et les quartiers en mettant ensemble des systèmes passifs et des technologies dynamiques pour l'enveloppe des bâtiments comprenant des systèmes d'énergie solaire intégrés aux bâtiments, des fenêtres à haut rendement avec commande active des gains solaires, le stockage thermique saisonnier et à court terme, des systèmes à thermopompe, des technologies de production combinée de chaleur et d'électricité et des commandes intelligentes. Ce faisant, le Réseau stratégique sur les BICENN vise une réduction simultanée et un déplacement optimal des charges de pointe par des méthodes telles que la commande prédictive à l'échelle des bâtiments et des quartiers. Dans la conception et l'exploitation d'un BICENN, il faut aborder un certain nombre de solutions technologiques. Ainsi, il faut une approche multidisciplinaire. Les cinq (5) thèmes de recherche se sont dévoilés après la considération des priorités stratégiques, l'apprentissage dans le cadre du Réseau de recherche du CRSNG sur les bâtiments solaires, la fine pointe de la technologie et l'importance des profils de charge et de production.

Le promoteur joue un rôle clé de direction dans le Réseau en raison de son expertise et son leadership dans le génie du bâtiment au Canada. Il joue un rôle principal dans le développement du Réseau stratégique sur les BICENN comme il l'a fait dans le développement de son prédécesseur, le Réseau de recherche du CRSNG sur les bâtiments solaires. L'enquêteur principal et directeur scientifique du

Réseau stratégique sur les BICENN est professeur au département du génie du bâtiment du promoteur. De plus, le promoteur héberge le secrétariat du Réseau.

4 Objectifs

Il s'agit d'un projet de l'Initiative écoÉNERGIE sur l'innovation, dont le promoteur a assuré la gestion au nom du Réseau stratégique sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette nulle (BICENN), qui favorise l'atteinte de l'objectif d'optimisation de l'efficacité énergétique et d'intégration de technologies d'énergie renouvelable dans les bâtiments, et ce, pour que ces bâtiments répondent aux cibles de consommation énergétique nette nulle. Le projet comporte trois phases qui complètent et développe les projets de recherche et développement (R-D) pris en charge actuellement par le Réseau stratégique sur les BICENN. Les activités de ces projets et les expériences connexes se sont déroulées aux installations d'essai du promoteur, soit le simulateur solaire et enceinte environnementale ou SSEC (Solar Simulator and Environmental Chamber), au Solar Education Centre et au Solar Calorimetry Laboratory de l'Université Queen's, ainsi qu'à l'École Polytechnique. Les activités du programme de recherche du Réseau stratégique sur les BICENN sont concentrées sur l'élaboration de modélisations et de méthodes générales tandis que ce projet englobe des activités non financées par le CRSNG qui sont concentrées sur la validation de principe et des essais sur le terrain avant l'étape de démonstration de concepts avancés de construction, étudiés dans le cadre de l'initiative du Réseau stratégique sur les BICENN. Le projet a quatre objectifs et les travaux du projet sont gérés en trois phases.

4.1 Objectif 1 – *Systèmes d'enveloppe de bâtiments à énergie positive*

L'objectif consistait à caractériser le rendement énergétique de nouveaux concepts de système d'enveloppe, notamment le vitrage avancé et des systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment ou BIPV/T (*building-integrated photovoltaic/thermal*), afin de favoriser les enveloppes à énergie positive qui sont nécessaires aux bâtiments à consommation énergétique nette nulle. Le SSEC du promoteur a servi pour mettre à l'essai des concepts de systèmes actifs pour l'enveloppe du bâtiment dans des conditions environnementales contrôlées et reproductibles. Le projet comprenait la conception et la construction de systèmes pour l'enveloppe de concept novateur, dont les suivants :

- (a) des façades qui intègrent des systèmes photovoltaïques thermiques (PVT) à entrées multiples, éliminant l'absorbeur perforé, réduisant le temps et le coût de l'installation et améliorant la qualité en raison des études techniques préliminaires et de la préfabrication;
- (b) des concepts de toit photovoltaïque thermique qui améliorent l'efficacité globale grâce à des options pour améliorer le transfert thermique et des collecteurs à perte de charge réduite.

Les deux concepts ont également été appliqués à des concepts de logement dans le Nord. Divers paramètres des configurations ont été suivis afin d'établir la correspondance de chacune des configurations aux critères de consommation énergétique nette nulle d'un bâtiment. Les mesures de ces paramètres ont servi à l'établissement d'indices appropriés du rendement du système d'enveloppe mis à l'essai. Ces indices serviront à valider les modèles et à généraliser les constatations. Les lignes directrices et les modèles qui en sont issus aident les concepteurs à prévoir le rendement énergétique de ces systèmes d'enveloppe à l'étape de la conception schématique.

Les travaux ont été fondés sur les travaux antérieurs de qualité mondiale dans le cadre du Réseau de recherche du CRSNG sur les bâtiments solaires et sur deux projets de démonstration de classe mondiale dirigés par le Réseau – la maison EcoTerra^{MC} avec son système innovateur de toit photovoltaïque thermique intégré au bâtiment et le projet de façade photovoltaïque thermique intégré au bâtiment de la John Molson School of Business à l'Université Concordia. Ils ont tiré avantage de l'établissement du laboratoire SSEC de classe mondiale pour élaborer, modéliser et mettre à l'essai de nouveaux concepts de systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment, y compris une nouvelle conception intégrant des entrées multiples dans les cadres photovoltaïques.

4.2 Objectif 2 – Rénovation de bâtiments urbains à toiture-terrasse pour intégration de solariums, serres et systèmes photovoltaïques thermiques

L'objectif consistait à étudier et à développer des concepts optimaux aux fins de la rénovation de toitures-terrasses pour intégration de systèmes à trois fonctions – solarium, serre et production d'électricité et de chauffage solaire – afin de faciliter l'atteinte d'un rendement énergétique nette nulle. Il s'agissait d'un examen par modélisation, simulation et validation des avantages possibles du concept comme technologie pour faciliter la consommation énergétique nette nulle dans des bâtiments par la production d'électricité et par l'utilisation de la chaleur supplémentaire aux fins du chauffage des bâtiments.

Le prototype d'un système novateur de fenestration intégrant la commande des gains solaires (avec écrans pare-soleil motorisés et ventilation hybride) a été construit aux fins d'essais et de validation dans le SSEC. La conception du système tenait également compte du type et de la quantité de stockage thermique et de la superficie du BCENN afin d'équilibrer la production de chaleur et d'électricité.

L'atteinte de cet objectif donne lieu à une solution prometteuse pour la rénovation des toitures-terrasses de bâtiments existants qui sont souvent mal isolées, ce qui fait d'elles des surfaces de production d'énergie nette qui pourraient contribuer à la conversion de bâtiments existants à des systèmes de consommation énergétique nette nulle.

4.3 Objectif 3 – Intégration de systèmes solaires et de chauffage, ventilation et climatisation d'air (CVCA)

L'objectif consistait à faire des expériences en laboratoire et des essais sur le terrain avant la démonstration de l'intégration de technologies solaires et de systèmes de CVCA en mettant l'accent sur la validation de principe, ce qui n'est pas un élément du programme de recherche du Réseau stratégique sur les BICENN. Deux concepts font l'objet de considération.

Activité 1 : Concepts de systèmes thermiques solaires, photovoltaïques (PV) et photovoltaïques thermiques combinés (PVT) intégrés aux bâtiments : L'étude de panneaux solaires bimodaux intégrés aux bâtiments pour l'eau chaude domestique et le chauffage de l'air et de panneaux solaires de trigénération intégrés aux bâtiments qui, en séquence ou en alternance, chauffent l'eau, assure l'alimentation en air de compensation et produit de l'électricité photovoltaïque – optimisant ainsi la

valeur des toitures et des façades de l'immobilier pour une production maximale d'énergie. L'atteinte de cet objectif offre une solution intégrée pour la production d'eau chaude domestique, d'électricité solaire et de chauffage de l'air frais à partir d'une petite surface de toiture.

Activité 2 : Expériences en laboratoire de validation de principe sur des puits de forage à deux tubes en « u » de petite échelle à deux circuits indépendants : Les systèmes de stockage d'énergie thermique à puits de forage offrent la possibilité de stocker l'énergie solaire ou la chaleur résiduelle sur de longues périodes. L'activité consistait en des expériences en laboratoire de validation de principe sur des puits de forage à deux tubes en « u » de petite échelle à deux circuits indépendants. Ces expériences ont été réalisées à l'École Polytechnique de Montréal dans des installations existantes qui consistaient en un réservoir renfermant environ quatre tonnes de sable de laboratoire ayant des propriétés thermiques connues.

L'objectif a été atteint. Deux prototypes de puits de forage ont fait l'objet des expériences. Le premier des prototypes comportait un seul puits de forage à tube en « u » alors que le second comportait deux tubes en « u » alimentés par deux circuits indépendants. Les expériences ont donné lieu à la validation de modèles numériques des puits de forage. Ces modèles servent à la réalisation de simulations sur des systèmes de stockage d'énergie thermique à puits de forage. Ainsi, les travaux effectués pourraient entraîner des améliorations à la conception de tels systèmes.

4.4 Objectif 4 – Concepts intégrés de conception et de commande de bâtiments à consommation énergétique nette nulle (BCENN)

Les efforts pour atteindre cet objectif étaient concentrés sur la réalisation d'activités de recherche soutenant des approches économiques de conception, de construction et d'exploitation de BCENN et sur la contribution principale du Canada à la rédaction et la publication du recueil de la tâche 40/Annexe 52 (T40A52) du projet SHC (chauffage et climatisation solaires), *Conservation de l'énergie dans les immeubles et les systèmes communautaires* de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) sur la modélisation, le processus de conception et les outils (volume 2).

Activité 1 : Concepts intégrés de conception et de commande de BCENN (maisons et petits bâtiments commerciaux) – créer un modèle de maison à consommation énergétique nette nulle optimale qui combine un système solaire intégré au bâtiment, une conception solaire passive et une thermopompe de source solaire intégrant le stockage thermique. Le modèle intégrera également l'éclairage naturel, la ventilation naturelle et hybride et la commande prédictive.

L'atteinte de ce sous-objectif en particulier favorisera l'adoption par l'industrie de la conception de BCENN et des concepts d'exploitation.

Activité 2 : Stratégies de commande prédictive pour petits bâtiments – élaborer des stratégies robustes de commande prédictive permettant d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire de deux sources : fenêtres munies de dispositifs de commande de l'ombrage et d'un système photovoltaïque thermique intégré aux bâtiments. Le principal défi consiste à gérer la chaleur retenue en évitant de surchauffer l'espace et à stocker l'énergie thermique pour utilisation ultérieure, tout en réduisant la demande de pointe et en optimisant l'électricité acheminée au réseau.

Activité 3 : L'activité prévue à l'origine de création d'un prototype de boîte à outils pour propriétaires de maisons à consommation énergétique nette nulle aux fins de la mise en service continue de la consommation énergétique et des coûts d'une maison a été modifiée pour consister en des études de commande prédictive d'essai en laboratoire et à pleine échelle, étant donné l'impossibilité de trouver une maison qui convenait à l'étude de cas. Une salle d'essai dans le laboratoire du SSEC et l'immeuble du département de génie (EV Building) de l'Université Concordia (ventilation hybride et refroidissement prédictif heuristique) ont été utilisés lors de cette activité.

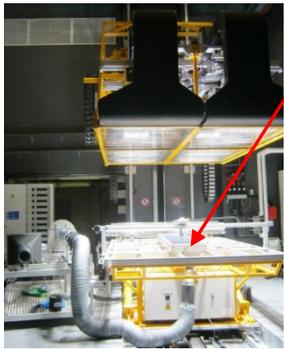
Les stratégies d'exploitation optimale et de commande prédictive élaborées lors des activités 2 et 3 permettront la gestion de la chaleur retenue de manière active et passive tout en réduisant au minimum le surchauffage de l'espace intérieur, ainsi que le stockage de l'énergie thermique pour utilisation ultérieure. Grâce à des options souples de fonction de coût, ces stratégies permettent de maintenir ou d'améliorer le confort thermique tout en réduisant au minimum la facture d'énergie ou la demande de pointe. Les résultats des activités 2 et 3 favoriseront l'adoption plus généralisée par le marché d'approches économiques pour exploiter des bâtiments à consommation énergétique nette nulle à haut rendement.

5 Résultats du projet

5.1 Réalisations du projet

5.1.1 Réalisation 1 : prototypes et modèles novateurs de systèmes d'enveloppe à énergie positive (groupe de l'Université Concordia)

Un bâtiment à consommation énergétique nette nulle a besoin d'une enveloppe à énergie positive. Il doit produire de l'électricité et du chauffage solaires et optimiser l'utilisation de gains solaires passifs. Des prototypes de systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment ou BIPV/T (*building integrated photovoltaic thermal*) ont été conçus, construits et mis à l'essai dans le laboratoire de simulateur solaire et d'enceinte environnementale ou SSEC (Solar Simulator and Environmental Chamber) de l'Université Concordia. Ils comprennent des entrées multiples plutôt qu'une seule prise d'air lors d'études antérieures et sont munis d'instruments. De plus, en collaboration avec l'entreprise partenaire, Centennial Global Solar, une façade semi-transparente photovoltaïque thermique intégrée au bâtiment a été construite sur mesure aux fins d'un solarium ou d'une serre. Des modèles de simulation ont été validés en se fondant sur les essais des prototypes et les modèles validés sont utilisés pour améliorer les concepts. De nouveaux concepts de façade photovoltaïque thermique intégrée au bâtiment ont été élaborés et mis à l'essai dans le laboratoire unique au monde du SSEC de l'Université Concordia (voir la figure 1a). Elles éliminent les capteurs thermiques non vitrés et utilisent plutôt des entrées décentralisées. La figure 1 présente un essai représentatif et la figure 2 présente les principaux résultats, montrant une amélioration du rendement thermique de 10 % lorsque deux entrées sont utilisées (plutôt qu'une) et que le panneau PV est revêtu d'un fond transparent. L'étudiante Tingting Yang a écrit sa thèse doctorale en documentant les expériences détaillées dans le laboratoire du SSEC. Les travaux ont été appliqués à des concepts de logement dans le Nord par l'étudiant au doctorat Ahmed Kayelo.



Le capteur à air du système photovoltaïque thermique semi-transparent intégré au bâtiment en position horizontale (*l'angle d'inclinaison peut passer d'horizontal à vertical*) sur le principal simulateur solaire



L'enceinte environnementale à deux étages avec le simulateur solaire mobile
Il est possible de construire des salles d'essai dans l'enceinte ou de les passer par une grande porte

Figure 1a. Simulateur solaire et enceinte environnementale (SSEC)

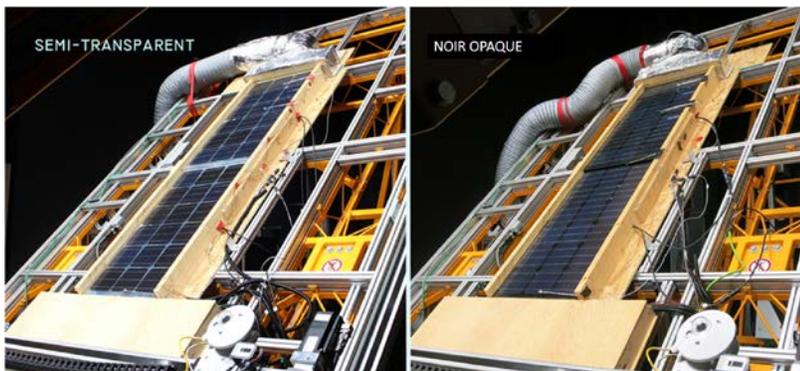


Figure 1b. Système photovoltaïque thermique semi-transparent intégré au bâtiment muni d'entrées multiples (deux ci-dessus), mis à l'essai dans le laboratoire du SSEC (à gauche : à fond transparent; à droite : à fond opaque).

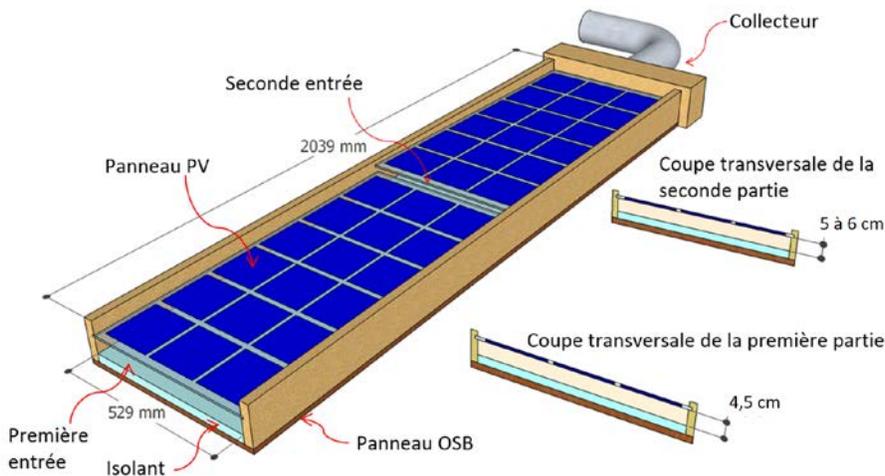


Figure 1c. Schéma du prototype du système photovoltaïque thermique semi-transparent intégré au bâtiment à deux entrées, mis à l'essai dans le SSEC.

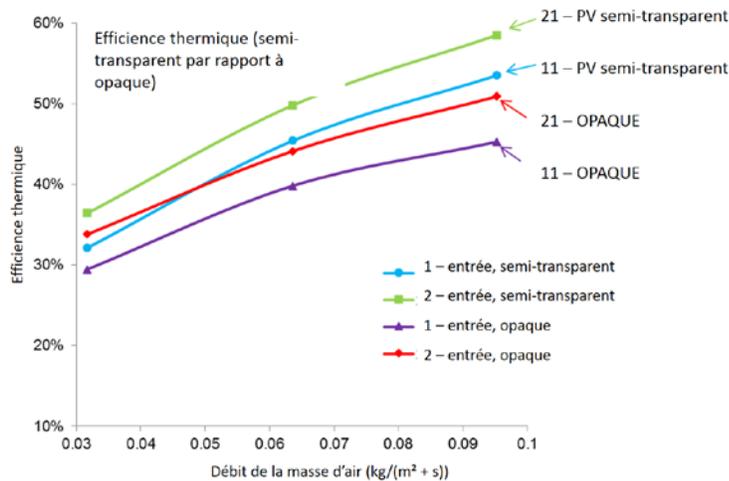


Figure 2. Résultats comparatifs de systèmes PV semi-transparents et opaques à une ou à deux entrées

Résultats clés :

- (a) le développement des installations du SSEC (un laboratoire unique au monde) et des prototypes novateurs de systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment.

5.1.2 Réalisation 2 : élaboration de concepts pour serres et solariums intégrés et systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment

À l'Université Concordia, un modèle de systèmes de fenestration à deux couches orientables pour serres et solariums a été créé (Diane Bastien, étudiante au doctorat en génie du bâtiment, soutenue par une bourse du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies [FQRNT]). Un prototype de salle d'essai a été construit (voir la figure 3) a été construit en partie pour valider le modèle de solarium de Diane, et afin d'élaborer et de mettre à l'essai des stratégies de commande presque optimales pour accroître l'utilisation d'énergie solaire. Il comprend des stores intérieurs et extérieurs motorisés, le chauffage commandé et des matériaux à changement de phase (panneaux Energain de Dupont) en cinq couches dans le mur postérieur. Les matériaux à changement de phase ont servi pour le stockage tant actif que passif (stockage actif avec écoulement de l'air à travers le mur). Le prototype d'espace de serre ou de solarium intégrant un mur en matériaux à changement de phase à charge active et à stores motorisés a été mis à l'essai dans le laboratoire du SSEC. L'étudiante au doctorat, Diane Bastien, a terminé sa thèse et a rédigé deux articles de revue sur des méthodes de conception pour le système de façade et le stockage thermique. De plus, en collaboration avec l'entreprise partenaire, Centennial Global Solar, une façade semi-transparente photovoltaïque thermique intégrée au bâtiment a été construite sur mesure aux fins d'un solarium ou d'une serre. Des modèles de simulation ont été validés en se fondant sur les essais des prototypes et l'étudiant au doctorat, James Bambara, a rédigé et présenté un article pour le congrès eSim 2016.

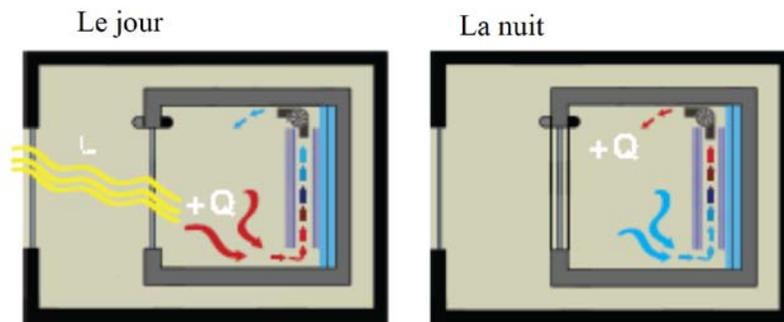


Figure 3. Salle d'essai dans le SSEC pour mettre à l'essai des concepts de solarium et le stockage thermique actif à matériaux à changement de phase.

Cette salle d'essai a également servi à la réalisation d'études de commande prédictive en laboratoire.

Résultats clés :

- (a) Un concept novateur de solarium intégrant un mur en matériaux à changement de phase et des stores intérieurs et extérieurs commandés.

5.1.3 Réalisation 3 : Panneaux solaires photovoltaïques (PV) et héliothermiques (p. ex., photovoltaïques thermiques [PVT] liquides) et thermopompes à poussée solaire Évaluation préliminaire d'un groupe PVT intégré à un toit ventilé

Évaluation PVT (Université Queen's)

L'efficacité de la plupart des panneaux solaires commerciaux convertissant l'énergie solaire en électricité est relativement faible (moins de 20 %). Une grande partie de l'énergie solaire absorbée par les panneaux est gaspillée sous forme de chaleur. Par une journée ensoleillée, les panneaux peuvent atteindre des températures de plus de 70 °C, réduisant ainsi le rendement. Dans un système d'alimentation en air PVT, les modules photovoltaïques sont ventilés par circulation naturelle ou forcée de l'air afin de réduire la température des panneaux et si souhaité, l'air chauffé peut être utilisé pour chauffer l'espace ou l'eau, ou pour préchauffer l'air de ventilation. Au moment du projet, des capteurs PVT à base de liquide convenables n'étaient pas disponibles en Amérique du Nord. Ainsi, le projet a employé des collecteurs liquides et des panneaux PV (ventilés) ont été employés séparément. Afin d'examiner les avantages de panneaux solaires PVT, un dispositif d'essai expérimental a été construit au moyen de deux panneaux solaires de 235 W. Les panneaux ont été montés en colonne à une pente de 22,5 po, directement sur une partie simulée de toit orienté vers le sud. Des fentes horizontales ont été coupées dans les parties supérieures et inférieures du cadre des modules PV afin de permettre à l'air de circuler derrière le panneau PV par convection naturelle ou forcée. Pendant les essais, l'air ambiant était tiré dans le passage de l'air (c.-à-d., le canal d'aération) formé par le panneau PV et la partie de toit. Trois cas principaux ont été étudiés : 1) aucune circulation d'air derrière les panneaux PV (c.-à-d., en conditions de stagnation); 2) la convection naturelle grâce à la flottabilité uniquement dans le canal d'aération; 3) convection forcée (c.-à-d., à l'aide d'un ventilateur pour tirer l'air dans le canal d'aération).

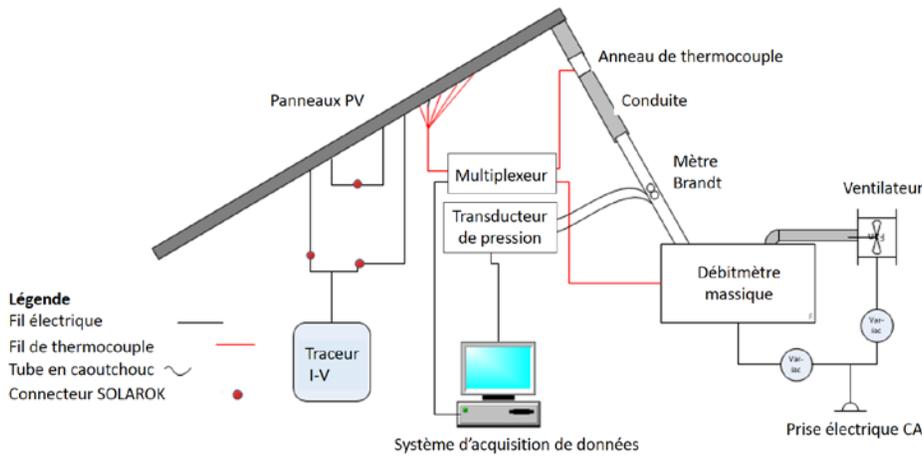


Figure 4. Schéma de l'aménagement expérimental pour évaluer le prototype de système PVT.

L'appareil expérimental et un résumé des résultats des essais sont présentés à la figure 5. Les résultats des expériences montrent une corrélation positive entre le débit et la puissance de sortie thermique (c.-à-d., la chaleur extraite; figure 5 à gauche). Toute circulation de l'air derrière le panneau, y compris par convection naturelle, a augmenté la sortie électrique par rapport à la fermeture des événements (conditions de stagnation). Cependant, les gains en production électrique (figure 5 à gauche) étaient modestes (ou dans la marge d'erreur expérimentale) pour ce qui est d'une croissance de la circulation forcée de l'air. Une constatation importante était la suivante : la consommation d'énergie électrique par le ventilateur (figure 5 à droite) augmente rapidement à mesure que le débit d'air augmente, ce qui neutralise considérablement les gains en sortie électrique. Cette constatation souligne le besoin d'analyse attentive des charges tant électriques que thermiques nécessaires d'une installation PVT en particulier pour optimiser la production d'énergie d'un groupe PVT. Par exemple, au-dessus d'environ 30 pi^3/min , la circulation forcée de l'air a un effet négatif sur la sortie nette d'électricité puisque l'électricité supplémentaire produite est moindre que l'électricité consommée par le ventilateur. Dans un travail connexe, le chercheur postdoctoral S. Hussain a étudié la convection naturelle numériquement dans un canal postérieur de ventilation d'un capteur solaire PVT. À l'aide du logiciel Fluent® de simulation de la dynamique numérique des fluides (DNF) de l'entreprise ANSYS, l'analyse a été mise en œuvre et a considéré le transfert convectif et radiatif de la chaleur; les températures et les taux de transfert thermique (convectif et radiatif) des surfaces d'absorption/PV ont été évalués pour déterminer les dimensions diverses du canal d'écoulement afin d'étudier l'effet du rapport entre la profondeur et la longueur du canal et les valeurs d'émissivité de la surface du canal.

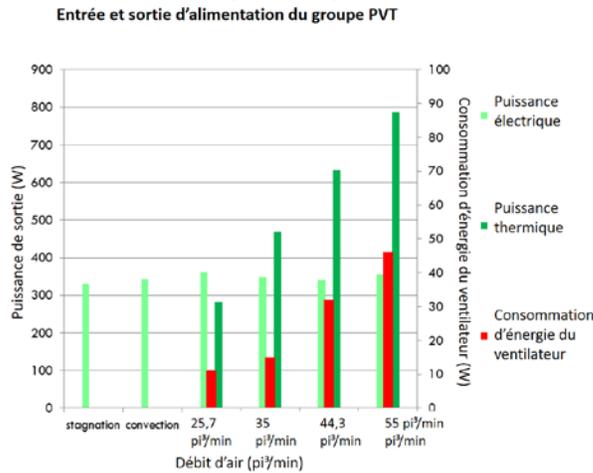


Figure 5. Photo de capteurs PVT sur une simulation de toit et résumé des résultats des expériences

Thermopompes solaires (Université Queen's) En général, l'efficacité de panneaux PV à base de silicone s'accroît à des températures inférieures. Cependant, en considérant les capteurs PVT, il faut des températures plus élevées (p. ex., $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) aux fins d'une énergie thermique utile pour le chauffage des locaux et de l'eau dans des bâtiments. Afin de composer avec l'incompatibilité apparente, une thermopompe peut être utilisée pour s'approvisionner en chaleur à basse température du panneau PVT, assurant ainsi une grande efficacité électrique et thermique PV. La thermopompe peut alimenter la charge thermique ou le stockage thermique en chaleur, captée au moyen du groupe PVT, à température élevée. Sur le plan pratique, pour profiter au maximum de la thermopompe, il semble qu'une thermopompe à base de liquide qui refroidit directement le groupe PV serait la configuration la plus prometteuse. En ce moment, seul un nombre restreint de fournisseurs produisent des capteurs PVT à base de liquide. Toutefois, ce nombre est en croissance. Il est également important d'avoir une thermopompe de taille convenable qui peut fonctionner dans la plage souhaitée de températures et offrir un bon rendement.

Pour répondre au besoin à cet égard, l'Université Queen's a créé un appareil expérimental d'essai pour l'évaluation du rendement de thermopompes au CO_2 à base de liquide. Portia Murray, étudiante de cycle supérieur, a examiné le rendement de diverses thermopompes pour exploitation dans les systèmes énergétiques à poussée solaire. Elle a fait ses études sur une thermopompe commerciale utilisant le réfrigérant R410-A et un prototype de thermopompe au CO_2 en mode transcritique (voir la figure 6). La thermopompe à R410-A fonctionnait bien lorsque la source était de faible température, mais avait de la difficulté à fournir de la chaleur à $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. La thermopompe à CO_2 en mode transcritique fournissait des températures élevées ($> 90\text{ }^{\circ}\text{C}$), mais au prix d'une complexité accrue. Les thermopompes au CO_2 en mode transcritique sont largement disponibles en Asie et leur introduction en Europe est en cours, mais elles ne sont pas disponibles en Amérique du



Figure 6. Prototype de thermopompe au CO_2 en mode transcritique à l'essai à l'Université Queen's.

Nord au moment du présent rapport (2016). Les fabricants en Amérique du Nord ont fait part de leur intérêt à mettre au point des thermopompes au CO₂ en mode transcritique pour des applications résidentielles, mais la disponibilité restreinte de compresseurs convenables semble constituer un obstacle important à la mise au point dans un avenir proche.

Résultats clés :

- (a) Une installation pour la réalisation d'expériences sur la mesure de la sortie électrique et thermique de modules PVT;
- (b) Les résultats d'expériences et de tests effectués sur un groupe PVT à base d'air ventilé aux bords;
- (c) L'élaboration d'un appareil expérimental d'essai pour l'évaluation du rendement de thermopompes au CO₂ à base de liquide et la collecte de données sur le rendement dans des conditions diverses d'exploitation.

Le système énergétique intégré pour la participation d'Équipe Ontario au Décathlon solaire 2013 aux États-Unis :

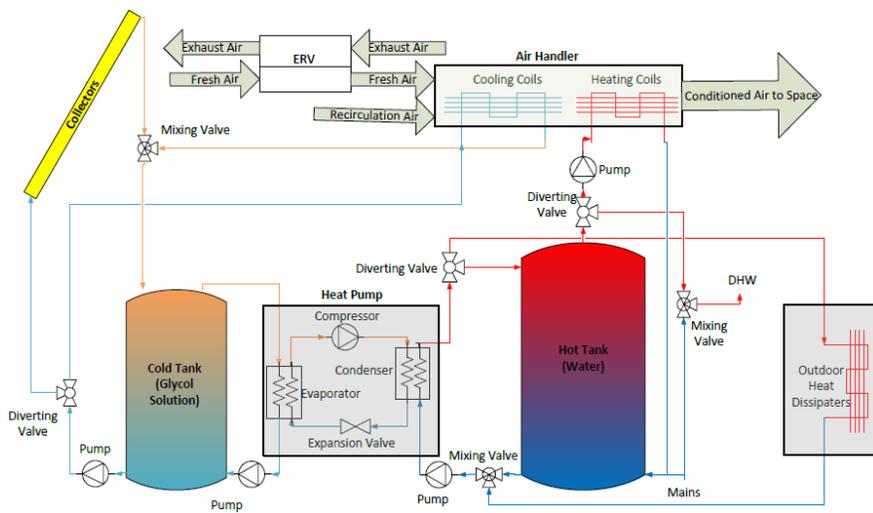
En 2011, la demande de participation d'« Équipe Ontario » (un consortium du collège Algonquin, de l'Université Carleton et de l'Université Queen's) au Décathlon solaire 2013 du département de l'Énergie des États-Unis a été acceptée. L'équipe s'est concentrée sur la mise au point d'un bâtiment à consommation énergétique nette nulle (BCENN) fondé sur un système énergétique à haut rendement. Le système a été modélisé à l'aide de l'outil de simulation TRYNSYS (Transient System Simulation Tool) à l'Université Carleton et à l'Université Queen's. Les résultats des travaux de l'équipe ont relevé le potentiel du couplage de thermopompes et de groupes solaires pour améliorer le rendement du groupe solaire et de la thermopompe. Il a été démontré qu'une approche intégrée à la conception d'un système énergétique pour les BCENN offrirait de nombreux avantages par rapport à un système consistant en des sous-systèmes énergétiques discrets. Le système au complet a été configuré et monté dans un laboratoire de l'Université Queen's, le Solar Calorimetry Laboratory, et exploité en fonction d'entrées thermiques et de charges simulées (voir la figure 7).

Le système énergétique intégré est un système avancé prévu pour les BCENN à haut rendement. Construit sur une petite thermopompe à poussée solaire liquide à liquide, il utilisait un petit réservoir (270 L) de stockage à froid comme source et acheminait de la chaleur à un réservoir de stockage (450 L) à chaud (voir la figure 7). Le système fournissait de l'eau chaude pour répondre aux besoins d'eau chaude domestique et de chauffage des locaux ainsi que de l'eau froide aux fins du conditionnement de l'air et de la déshumidification. Dans le système, les capteurs solaires thermiques fournissaient de la chaleur au stockage à froid au besoin. Les capteurs fonctionnaient à haute efficacité en raison de la thermopompe, qui réduisait la température du fluide thermodynamique des capteurs. De plus, les capteurs solaires servaient à augmenter la température du stockage à froid et par conséquent, la thermopompe pouvait fonctionner à un coefficient de performance plus élevé à certains moments de l'année. Après la réalisation des essais, le système a été monté dans le bâtiment prévu pour la participation d'Équipe Ontario au Décathlon solaire au collège Algonquin, à Ottawa. La maison a été munie d'un groupe PV de 7 kW (connecté au réseau), distinct du système énergétique intégré. À l'origine, l'intégration des capteurs solaires thermiques et du groupe PV en un seul groupe PVT était prévue. Par contre, faute d'un capteur PVT convenable, les fonctions d'électricité et

de chauffage solaires ont été assurées de groupes distincts au toit et montés sur le mur. La maison complète du nom ECHO a ensuite été transportée et montée à Irvine, en Californie, afin de participer au Décathlon solaire 2013 et de faire concurrence à 19 autres participants dans 10 catégories (voir la figure 8a). La maison ECHO a remporté le premier prix dans les catégories « Ingénierie », « Équilibre énergétique » et « Eau chaude » et le deuxième prix dans la catégorie « Abordabilité ».

Résultats clés :

- (a) La conception et la modélisation d'une maison à consommation énergétique nette nulle à haut rendement, conçue pour le climat canadien;
- (b) La modélisation détaillée, l'établissement des spécifications et la mise en essai en laboratoire d'un système énergétique intégré;
- (c) La construction d'un prototype de maison et l'évaluation de cette dernière dans le cadre du Décathlon solaire 2013 du département de l'Énergie des États-Unis.



ENGLISH	FRENCH	ENGLISH	FRENCH
Collectors	<i>Capteurs</i>	DHW	<i>Eau chaude domestique</i>
Exhaust Air	<i>Air d'évacuation</i>	Mixing Valve	<i>Robinet mélangeur</i>
Fresh Air	<i>Air frais</i>	Hot Tank (Water)	<i>Réservoir de stockage à chaud (eau)</i>
ERV	<i>VRE</i>	Heat Pump	<i>Thermopompe</i>
Recirculation	<i>Recirculation</i>	Compressor	<i>Compresseur</i>
Mixing Valve	<i>Robinet mélangeur</i>	Condenser	<i>Condenseur</i>
Air Handler	<i>Appareil de traitement de l'air</i>	Evaporator	<i>Évaporateur</i>
Cooling Coils	<i>Serpentins de refroidissement</i>	Expansion Valve	<i>Détendeur</i>
Heating Coils	<i>Serpentins de chauffage</i>	Pump	<i>Pompe</i>
Conditioned Air to Space	<i>Air conditionné vers l'espace habitable</i>	Cold Tank (Glycol Solution)	<i>Réservoir de stockage à froid (solution de glycol)</i>
Pump	<i>Pompe</i>	Mains	<i>Tuyaux principaux</i>
Diverting Valve	<i>Inverseur</i>	Outdoor Heat Dissipaters	<i>Dissipateur de chaleur</i>

Figure 7. Schéma du système énergétique intégré de la maison ECHO pour le Décathlon solaire 2013 aux États-Unis.



Figure 8a. La maison ECHO en Californie lors du Décathlon solaire 2013



Figure 8b. Le déménagement de la maison de démonstration de l'ECSQ à un nouveau laboratoire à des fins de contrôle.

Maison de démonstration

La maison de démonstration de l'équipe de conception solaire de Queen's a été déménagée à un site permanent afin d'être munie d'un système énergétique intégré et d'un système PV autonome aux fins de démonstration et de contrôle à long terme (voir la figure 8b). Le système PV et le stockage par batterie ont été montés et mis en service.

Résultats clés :

- (a) L'établissement d'une maison de démonstration et d'essai hors réseau et énergétiquement autonome;
- (b) Le contrôle en ligne d'un système énergétique intégré à poussée solaire hors réseau.

5.1.4 Réalisation 4 : la conception, construction et mise à l'essai de prototypes de puits de forage et la création de modèles

Dans le cadre de ce projet, deux prototypes de puits de forage à petite échelle ont été construits et mis à l'essai. Ces prototypes ont été insérés dans un réservoir de sable existant dont les propriétés thermiques étaient connues. Les instruments de mesure (débitmètre, thermomètre) ont été étalonnés et les installations en général ont été mises en service.

La validation expérimentale, pour la première fois à notre connaissance, des facteurs de réponse thermique ou fonctions G constitue la principale réalisation du premier des prototypes. La figure 9 présente un schéma du premier des prototypes et des résultats de la validation. Comme il est présenté dans la figure à sa droite, la courbe théorique des fonctions G et les résultats des expériences correspondent bien et sont dans la marge d'erreur expérimentale.

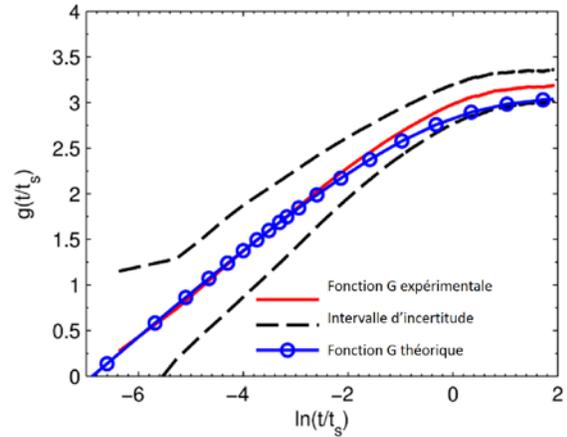
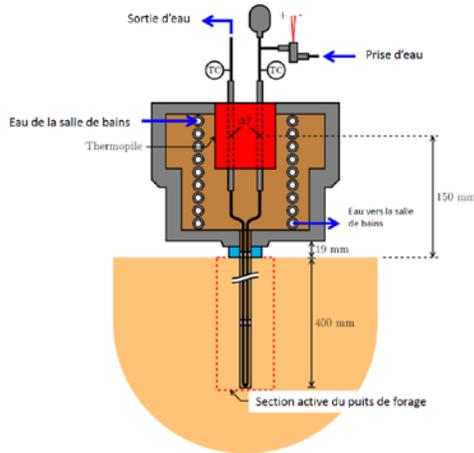


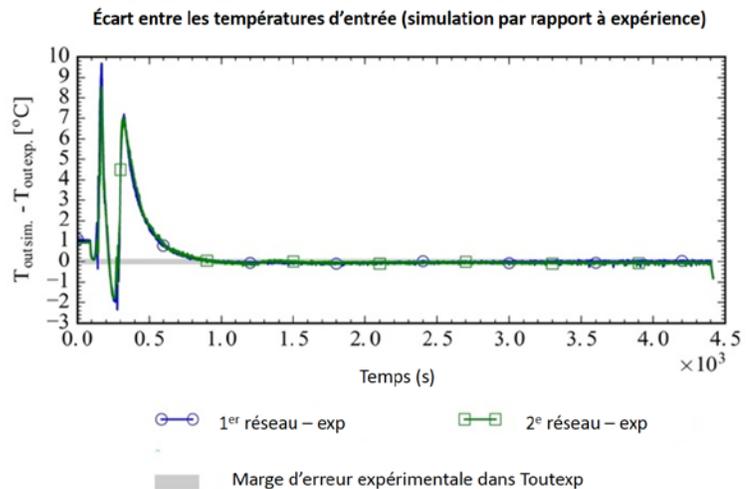
Figure 9. 1^{er} prototype de puits de forage

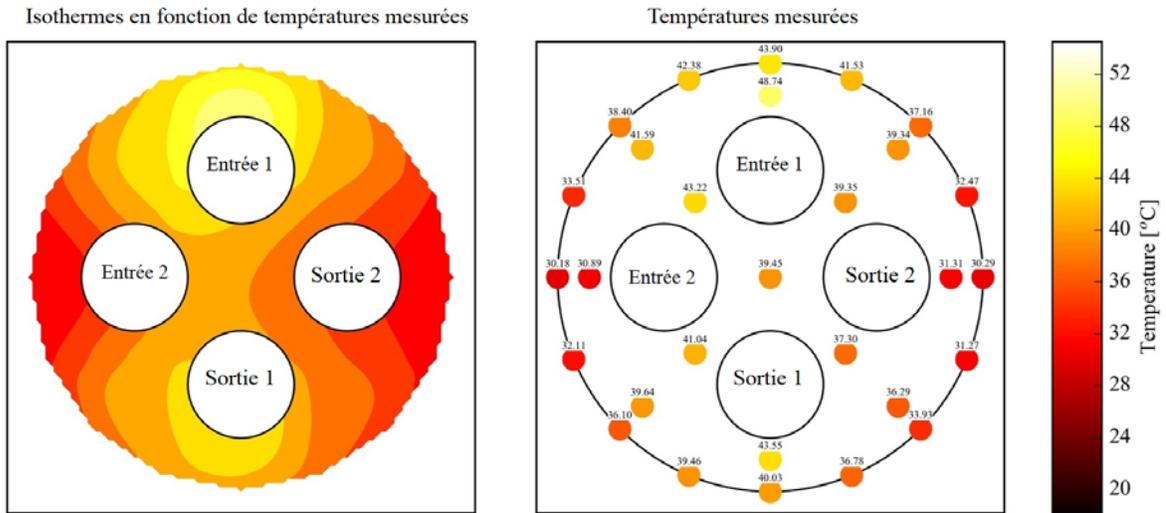
Comparaison des fonctions G obtenues par analyse et par expérience

Pour le second prototype, des mesures précises ont été obtenues à partir d'un puits de forage à quatre tuyaux (deux tubes en « u ») à deux circuits indépendants fonctionnant dans des conditions transitoires. Le prototype est fait de céramique afin de pouvoir y percer des trous pour le placement précis de thermocouples. Comme il est présenté dans la figure 10a ci-dessous, le second prototype est inséré dans le réservoir de sable. La figure 10b présente une comparaison des résultats obtenus d'un modèle numérique et des résultats obtenus d'expériences pour les deux circuits (réseau 1 et réseau 2 dans la figure). Après une période initiale où il y a eu des écarts, les résultats du modèle numérique correspondent aux résultats obtenus d'expériences dans la marge d'erreur expérimentale. Enfin, la figure 10c présente des isothermes obtenues de mesures de la température au plan horizontal à mi-hauteur. Ces derniers résultats sont d'une très grande valeur pour la validation du modèle de puits de forage à quatre tuyaux et à deux circuits indépendants.



b)





c)

- a) Le second prototype de puits de forage inséré dans le réservoir de sable
- b) La différence entre la température d'entrée prévue par un modèle numérique et les résultats d'expériences pour les deux circuits (le réseau 1 et le réseau 2)
- c) Les mesures de température et les isothermes correspondantes au plan horizontal à mi-hauteur du puits de forage

Figure 10. Le prototype de puits de forage à deux tubes en « u »

Résultats clés :

- a) Une installation de classe mondiale pour l'étude du comportement transitoire de puits de forage géothermiques.

5.1.5 Réalisation 5 : l'élaboration de concepts intégrés de conception et de commande de bâtiments à consommation énergétique nette nulle (BCENN)

La publication du livre à la fine pointe du titre « **Modelling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings** » constitue une réalisation scientifique et technique clé de la tâche 40/Annexe 52 du projet SHC de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Publié par Wiley en février 2015, le livre a été coédité par le professeur Andreas Athienitis (Université Concordia) et Liam O'Brien (professeur adjoint à l'Université Carleton, diplômé de l'Université Concordia et du Réseau stratégique sur les BICENN). Le livre comprend des sections fondamentales sur la modélisation et la conception, ainsi que quatre études de cas détaillées et bien documentées, dont une portant sur la maison EcoTerra^{MC}. Environ deux tiers du livre ont été rédigés par un groupe composé de dix chercheurs et étudiants au doctorat associés au Réseau stratégique sur les BICENN qui participent à la sous-tâche B de la tâche ci-dessus de l'AIE.

Le livre constitue une référence importante de concept pour les concepteurs de bâtiments et les cours universitaires avancés dans le domaine. Il a été bien reçu par la communauté internationale. Le livre fait avancer la fine pointe de la technologie pour la conception de BCENN sous un leadership canadien. Il comprend une étude de cas clé de maison à consommation énergétique nette nulle au Canada – la maison EcoTerra^{MC}, comprenant des considérations de modélisation et d’optimisation; la maison est munie d’un toit photovoltaïque thermique intégré au bâtiment, d’une thermopompe géothermique et d’une dalle en corps creux activement chargée. Un chapitre du livre porte sur les questions d’interaction entre les BCENN et le réseau et sur la commande prédictive aux fins de l’amélioration de la correspondance des charges et des profils de production. Une étude de cas sur l’optimisation fondée sur la maison EcoTerra^{MC} comme archétype a donné lieu à la production de lignes directrices sur les plages variables optimales de concept (fenestration, système PV, etc.) qui ont été publiées dans un article (Bucking, Athienitis et Zmeureanu, 2014) primé par l’American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

Des avancées considérables dans la commande prédictive pour les bâtiments à haut rendement ont été réalisées grâce à la recherche à l’Université Concordia (Athienitis, Zmeureanu, Stathopoulos) et à l’École Polytechnique (Kummert). Des algorithmes de commande prédictive heuristique ont été mis au point et à l’essai pour des zones intégrant le stockage thermique actif intégré au bâtiment. À l’Université Concordia, des stores motorisés ont été installés (en collaboration avec l’entreprise Regulvar) dans des sections d’essai de l’immeuble du département de génie afin de mettre à l’essai des stratégies de commande qui tiennent compte des besoins d’éclairage naturel et de la commande des gains solaires. Les stratégies de commande prédictive élaborées pourront être appliquées (après des modifications appropriées) à des bâtiments résidentiels et professionnels. Certaines des stratégies de commande ont été mises à l’essai dans une salle d’essai au laboratoire du SSEC (voir la figure 3).

Une étude de cas importante sur la commande prédictive (heuristique) portait sur l’immeuble du département de génie de l’Université Concordia – un bâtiment à haute densité de 17 étages muni de grilles d’entrée motorisées sur deux façades opposées, faisant entrer l’air au centre du bâtiment pour évacuation par un atrium à l’aide de ventilateurs à vitesse variable installés sur le toit, munis d’instruments particuliers et mis en service en 2016 (voir la figure 11). Des lignes directrices ont été établies pour la ventilation hybride du bâtiment et en particulier, le refroidissement préalable la nuit au moyen de l’air frais de l’extérieur (Yuan et coll., 2016).

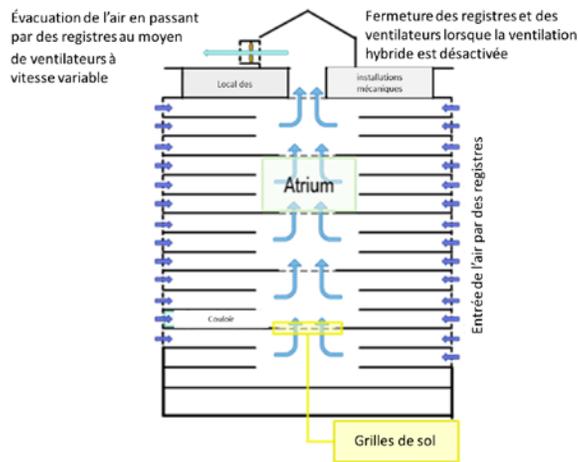


Figure 11. Schéma du système de ventilation hybride de l'immeuble du département de génie (EV Building).

La démonstration de l'emploi de stratégies de commande prédictive à l'aide de modèles (CPM) adaptées aux petits bâtiments résidentiels et commerciaux était une réalisation clé à l'École Polytechnique. Des modèles espace-état simplifiés ont été créés et intégrés aux stratégies de CPM et les stratégies de commande ont été mises à l'essai par la simulation de bâtiments réels.

Les stratégies de CPM contribuent de manière importante à l'adoption plus générale par le marché de bâtiments à consommation énergétique nette nulle et à haut rendement puisque les critères souples d'optimisation de ces bâtiments permettent de satisfaire aux besoins des propriétaires des bâtiments, mais également à ceux des opérateurs de réseau par l'optimisation de l'électricité en provenance ou à destination du réseau. Un exemple de cette souplesse est présenté à la figure 12 pour un bâtiment résidentiel représentatif chauffé à l'électricité (chauffage par résistance ou thermopompe). À la place d'un critère classique d'optimisation (p. ex., réduire au minimum les coûts de fonctionnement et l'inconfort), la stratégie de CPM a été employée pour réduire au minimum l'électricité provenant du réseau pendant des périodes de pointe (représentées par les zones jaunes) tout en maintenant le confort thermique dans une plage acceptable. Dans ce cas-ci, il s'agissait du maintien de la température des espaces habitables (ligne magenta) entre les seuils inférieur et supérieur (lignes pointillées bleu clair), établis pour des périodes habitées et non habitées. Ainsi, la demande de chauffage (et d'électricité provenant du réseau) est de pratiquement zéro pendant la période de pointe.

Les stratégies de CPM élaborées répondent à l'un des principaux défis dans l'exploitation de bâtiments à consommation énergétique nette nulle intégrant la collecte d'énergie solaire électrique et thermique passive et active : la gestion de la chaleur retenue en évitant de surchauffer l'espace intérieur, le stockage d'énergie thermique pour utilisation ultérieure, la réduction de la demande de pointe et l'optimisation de l'électricité acheminée au réseau.

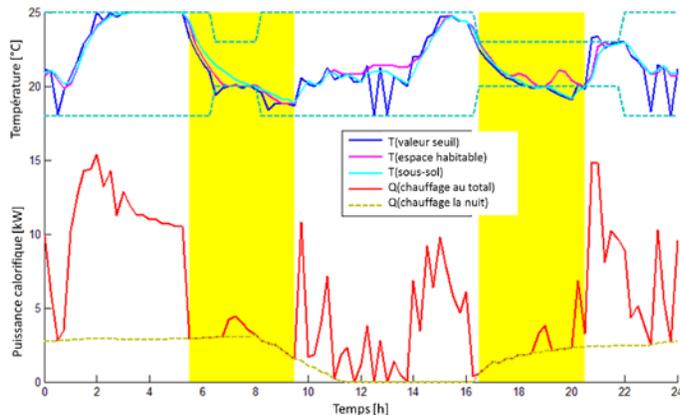


Figure 12. Exemple de résultats de CPM pour réduire au minimum l'électricité provenant du réseau pendant des périodes de pointe.

5.2 Avantages

5.2.1 Avantage 1 : Amélioration de l'efficacité énergétique et exploitation de l'énergie solaire dans des bâtiments

Les nouveaux concepts, méthodes de conception, modèles et stratégies de commande de BCENN élaborés dans le cadre de ce projet contribueront à la réduction considérable de la consommation d'énergie et de la demande d'électricité de pointe. Au Canada, les bâtiments des commerces et à vocation institutionnelle représentent à eux seuls 14 % de la consommation finale d'énergie alors que le secteur résidentiel représente 17 % de la consommation secondaire d'énergie. L'amélioration du rendement de l'enveloppe des bâtiments et l'adoption de systèmes à énergie positive rendront ces bâtiments beaucoup plus éconergétiques et réduiront les émissions de gaz à effet de serre attribuées au secteur.

5.2.2 Avantage 2 : Soutien d'entreprises canadiennes et du développement de la technologie

Les travaux à cet égard donnent à l'industrie au Canada un avantage concurrentiel pour la mise au point de produits durables de construction et de systèmes énergétiques intégrés pour le Canada et pour exportation, contribuant ainsi à la création d'emploi et au développement économique. Le projet a fait participer plusieurs entreprises canadiennes directement (p. ex., Regulvar, Centennial Global Solar, Internat Consultants) ou par l'intermédiaire du Réseau stratégique sur les BICENN (p. ex., Hydro Québec, Canadian Solar, Unicel). Ces entreprises ont acquis une expertise unique par leur collaboration au projet ou par l'embauche d'étudiants de cycle supérieur ayant travaillé sur le projet.

5.2.3 Avantage 3 : Développement des connaissances au soutien de règlements assurant l'adoption de la technologie pour des BCENN

Les travaux à cet égard ont donné lieu à de meilleures connaissances qui contribueront à la conception et à l'exploitation économique de BCENN. Les connaissances acquises comprennent les suivantes : des modèles détaillés pour de nouvelles technologies, dont celles de systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment et à entrées multiples permettant de produire de

l'électricité et de la chaleur utile; des systèmes énergétiques intégrés faisant appel à des thermopompes, à l'énergie solaire et à la récupération de la chaleur aux fins de l'efficacité énergétique; des puits de forage à deux tuyaux en « u » qui rendent les systèmes géothermiques plus efficaces; de nouveaux systèmes de stockage et concepts pour solariums et serres; des stratégies de commande prédictive pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire tout en réduisant la demande d'électricité de pointe.

5.2.4 Avantage 4 : Puits de forage novateurs à deux tuyaux en « u » – nouveaux concepts et modèles

Le travail d'évaluation effectué dans le cadre de cette étude fera en sorte que les concepteurs de puits de forage feront davantage confiance aux modèles de puits de forage. Grâce aux connaissances acquises, les ingénieurs peuvent concevoir des champs de puits plus efficaces et rentables. De plus, les données obtenues sur les puits de forage à quatre tuyaux et à deux circuits indépendants prouvent que le concept fonctionne et qu'il peut servir dans les systèmes de stockage d'énergie thermique à puits de forage de prochaine génération.

5.2.5 Avantage 5 : Amélioration de l'exploitation et de l'interaction avec le réseau

Les bâtiments à consommation énergétique nette nulle offrent des avantages bien documentés pour ce qui est de l'efficacité énergétique et des coûts d'exploitation. En revanche, ils peuvent avoir une incidence négative sur le réseau d'électricité s'ils sont exploités en fonction de stratégies simples et réactives de commande. Des stratégies prédictives optimisées qui peuvent être intégrées à une infrastructure en communication (comprenant des compteurs et des thermostats intelligents) sont nécessaires pour favoriser l'acceptation du produit par le marché et l'adoption des concepts et des configurations de bâtiments à consommation énergétique nette nulle. De plus, elles ouvrent la porte à une performance environnementale encore meilleure par l'optimisation en temps réel en tenant compte de l'incidence sur l'environnement variable dans le temps (p. ex., les émissions de CO₂), de la production et la distribution d'électricité. Les réalisations de ce projet ont démontré qu'il est possible d'élaborer et de mettre en œuvre de telles stratégies avec succès.

5.3 Objectifs relatifs à la technologie ou le développement des connaissances

Conception avancée de BCENN et concepts d'optimisation

Les travaux ont donné lieu à des concepts avancés de bâtiments à consommation énergétique nette nulle (BCENN); à titre d'exemple, la maison EcoTerra^{MC} – l'une des quatre études de cas présentées en beaucoup de détails dans le livre mentionné ci-dessus de l'AIE (T40A52). De plus, les travaux du groupe de l'Université Concordia ont été appliqués à la conception de la bibliothèque municipale de Varennes, le premier BCENN à vocation institutionnelle au Canada (dont l'énergie est produite par le bâtiment) à système solaire intégré sur le toit. Les deux projets orientent l'avenir vers l'adoption généralisée des concepts de BCENN dans de nouveaux bâtiments au Canada, fondés sur l'exploitation de systèmes photovoltaïques intégrés au bâtiment et de systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment (BIPV/T), des concepts solaires passifs à systèmes optimisés d'éclairage naturel, des thermopompes (géothermiques ou à source d'air) et du stockage thermique intégré au bâtiment. Les nouvelles connaissances sont diffusées à l'échelle nationale par l'entremise du Réseau stratégique

sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette nulle (BICENN) et des congrès eSim, et à l'échelle internationale par l'entremise des tâches de l'AIE, du groupe d'experts sur les BCENN de la Coopération économique Asie-Pacifique (APEC) et dont le professeur Athienitis est l'un des principaux dirigeants, ainsi que de la participation aux congrès et aux comités techniques de l'ASHRAE, aux congrès sur l'énergie solaire et aux congrès internationaux de l'IBPSA (International Building Performance Simulation Association).

Systèmes photovoltaïques thermiques novateurs intégrés au bâtiment

La mise au point de nouveaux systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment à entrées multiples élimine le besoin de capteurs transpirants non vitrés tout en assurant l'efficacité thermique. Des projets de démonstration sur des bâtiments publics et à vocation institutionnelle sont considérés. De plus, il faut plus de recherche et développement pour que des panneaux PV cadrés et sans cadre soient intégrés dans des murs rideaux ainsi que des toits avec l'option de récupération de la chaleur, mais également de ventilation naturelle lorsque le chauffage n'est pas nécessaire.

Modèles de puits de forage et concepts nouveaux

Le projet a contribué à l'avancement des connaissances scientifiques sur les puits de forage géothermiques. D'abord, il a été démontré que la réponse thermique des puits de forage (également appelée fonction G), normalement obtenue numériquement ou par analyse, peut être reproduite dans des expériences. À notre connaissance, aucun autre groupe de recherche n'a effectué une telle validation des fonctions G. De plus, les travaux de validation sur les puits de forage à quatre tuyaux ont donné lieu à une base de données de mesures sur le comportement transitoire de puits de forage géothermiques qui pourrait servir à d'autres groupes de recherche au Canada et à l'étranger, et à l'industrie sous forme de guides de conception de l'ASHRAE et d'autres publications.

Algorithmes prédictifs et de commande prédictive à l'aide de modèles (CPM)

Les stratégies de CPM élaborées et les bancs d'essai de simulation (à l'Université Concordia et à l'École Polytechnique) représentent un avancement important des connaissances. Les critères souples d'optimisation permettent de montrer la valeur de la CPM à des intervenants divers, d'exploitants de bâtiments à des services publics en passant par des entreprises de commande. Ils donneront lieu à des projets de suivi pour mettre au point la technologie et la faire adopter par l'industrie, favorisant ainsi l'acceptation par le marché de bâtiments à consommation énergétique nette nulle.

6 Conclusion et suivi

Les résultats clés du projet comprennent les suivants :

1. La publication du livre à la fine pointe du titre « Modelling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings » constitue une réalisation scientifique et technique clé de la tâche 40/Annexe 52 du projet SHC de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Le livre comprend des sections fondamentales sur la modélisation et la conception de bâtiments à consommation énergétique nette nulle (BCENN) ainsi que quatre études de cas détaillées et bien documentées, dont une portant sur la maison EcoTerra^{MC}. La formation d'environ six étudiants au doctorat est un résultat à plus long terme. Ces étudiants ont acquis une expertise

approfondie dans le domaine et sont actuellement chercheurs ou professeurs d'universités canadiennes.

2. Le simulateur solaire de l'Université Concordia a été le lieu de la mise au point et à l'essai de nouveaux concepts de systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment qui éliminent le besoin de capteurs transpirants non vitrés et qui font plutôt appel à des entrées décentralisées. Ces systèmes ont combiné l'efficacité électrique et thermique jusqu'à environ 60 % et permettent l'optimisation des configurations de concepts pour des BCENN.
3. La conception de champs de forage géothermique s'appuie sur la détermination des facteurs de réponse thermique à long terme, également appelés fonctions G, obtenus normalement à partir de modèles numériques ou analytiques. La première validation connue par expérience de fonctions G a été réalisée. Des prototypes de puits de forage à deux tubes en « u » ont été construits et ont servi à valider de nouveaux modèles numériques. Ces modèles permettent de concevoir et de dimensionner les systèmes géothermiques de manière plus exacte.
4. De nouveaux concepts et des stratégies optimales de fonctionnement des solariums et des serres à l'aide de stores intérieurs et extérieurs motorisés et de stockage thermique à matériaux à changement de phase ont été élaborés.
5. Il y a eu la modélisation de configurations novatrices de systèmes énergétiques intégrés combinant des capteurs photovoltaïques thermiques (PVT) à base de liquide avec une thermopompe fonctionnant entre un réservoir de stockage à chaud et à froid. Une configuration simple a été mise en œuvre lors du Décathlon solaire.
6. De nouveaux algorithmes de commande prédictive ont été élaborés et mis à l'essai dans un bâtiment à système hybride de ventilation. Des algorithmes modélisés ont également été élaborés afin d'optimiser l'utilisation d'énergie solaire et de réduire la demande de pointe dans les bâtiments à consommation énergétique nette zéro et les bâtiments à haut rendement.

6.1 Prochaines étapes

Concepts et modèles intégrés destinés aux bâtiments à consommation énergétique nette nulle (BCENN) et l'exploitation optimale de ces derniers (Université Concordia)

1. **R-D** : La prochaine étape dans le domaine comprend la conception et la construction d'une **petite maison d'essai modulaire** (au campus Loyola de l'Université Concordia) pour remplacer la maison d'essai du Décathlon solaire 2005. La maison aura une façade reconfigurable et offrira la souplesse d'utiliser divers systèmes énergétiques (toit et façade photovoltaïque thermique intégrés au bâtiment, fenêtres PV semi-transparentes, thermopompes de configurations diverses) pour valider, mettre à l'essai et élaborer des configurations de BCENN. En parallèle, une équipe de l'Université Concordia et de l'Université McGill (Équipe Montréal) participe au Décathlon solaire 2017 en Chine. Elle mettra à l'essai quelques-uns de ses concepts, y compris l'intégration d'études sur les véhicules électriques/véhicules hybrides électriques rechargeables et les profils de charge et de production.
2. **Études de cas et projets de démonstration innovateurs sur les BCENN** : En se fondant sur les expériences de la maison EcoTerra^{MC} et plus récemment, la bibliothèque de Varennes, le premier BCENN (dont l'énergie est produite par le bâtiment) à vocation institutionnelle au Canada, plusieurs nouveaux projets font l'objet de discussions comme études de cas ou démonstrations innovatrices possibles liées à un nouveau réseau qui suivra le Réseau

stratégique sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette nulle. De plus, des projets de communautés intelligentes à consommation énergétique nette nulle sont considérés.

Systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment et configurations d'enveloppes à énergie positive (Université Concordia)

Des prototypes en laboratoire d'enveloppes à systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment à base d'air et à entrées multiples (sans capteur thermique non vitré) ont été mis au point et modélisés au laboratoire de simulateur solaire et d'enceinte environnementale ou SSEC (Solar Simulator and Environmental Chamber) de l'Université Concordia. Ensuite, des prototypes à échelle réelle seront mis à l'essai dans la maison d'essai prévue et dans une salle d'essai extérieure existante. Les prochaines étapes comprennent la mise à l'essai des prototypes de systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment à panneaux PV encadrés et sans cadre pour des façades et des murs rideaux et de systèmes connectés à des thermopompes air-eau, où l'air chauffé du système photovoltaïque thermique intégré au bâtiment constitue la source de chaleur. Des discussions ont été entamées avec un fabricant de murs rideaux et une entreprise de maisons modulaires sur la commercialisation de la technologie et les diverses options connexes. L'Université Concordia a émis une déclaration d'invention pour la configuration comprenant des entrées dans les cadres PV.

La bibliothèque de Varennes attire beaucoup d'intérêt et constitue un laboratoire vivant où mettre à l'essai et démontrer un concept réaliste de BCENN ainsi qu'informer le public et l'industrie du bâtiment. Elle a également servi de moyen de transfert de la technologie pour ce qui est d'une grande partie des connaissances du Réseau stratégique sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette nulle sur la conception et la modélisation de tels bâtiments. Certains éléments de la bibliothèque de Varennes pourraient faire l'objet d'améliorations lors d'une démonstration de BCENN à l'avenir, notamment un toit à système photovoltaïque thermique intégré au bâtiment qui pourrait produire de l'énergie supplémentaire pour chauffer les bâtiments environnants (par exemple, la chaleur du système photovoltaïque thermique intégré au bâtiment de la bibliothèque pourrait servir à chauffer la piscine municipale adjacente).

Il est prévu que les technologies de systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment¹ représenteront l'un des segments de l'industrie solaire qui croît le plus rapidement : des installations produisant jusqu'à 4,6 GW sont prévues jusqu'en 2017. L'entreprise RnR Market Research prévoit que le marché de ces technologies croîtra jusqu'à 9 G\$ en 2019 et à 26 G\$ d'ici 2022 à mesure que davantage de produits photovoltaïques thermiques sont mis au point et entièrement intégrés et multifonctionnels, notamment des systèmes PV semi-transparents et des systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment.

¹ RnR Market Research. *BIPV Market Worth \$26 Billion by 2022 Says a New Research Report on BIPV Technologies and Markets for 2015-2022*, 18 août 2018, consulté au site Web de PR Newswire : <http://www.prnewswire.com/news-releases/bipv-market-worth-26-billion-by-2022-says-a-new-research-report-on-bipv-technologies-and-markets-for-2015-2022-522139451.html>

Erbium Consulting, un groupe de titulaires d'une maîtrise en administration des affaires de technologies du génie l'Université de Waterloo, a travaillé avec l'Université Concordia sur des voies de commercialisation et des options pour les technologies de systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment et sur leur intégration aux BCENN, en traitant notamment de questions de PI et en réalisant des démonstrations et des essais sur le terrain. Plus de détails sur leurs conclusions peuvent être consultés.

Système énergétique intégré dans la maison de démonstration de l'ECSQ (Université Queen's)

Une partie du groupe PV existant pourrait être remplacée par un groupe entièrement photovoltaïque thermique (PVT) à base de liquide raccordé au système énergétique intégré. Au moment de ce projet, des capteurs PVT à base de liquide convenables n'étaient pas disponibles en Amérique du Nord (ils le sont en Europe). Les travaux à l'avenir comprendront des efforts pour encourager les fabricants canadiens de panneaux PV à offrir des panneaux PVT.

Concepts et modèles de puits de forage (École Polytechnique)

R-D : La prochaine étape consiste à entièrement exploiter les deux prototypes afin de produire plus de données en fonction de conditions d'exploitation différentes pour mieux comprendre le comportement thermique de puits de forage géothermiques. Un certain nombre de publications scientifiques est également prévu afin de diffuser les connaissances acquises au cours de ce projet. D'abord, une publication décrira le concept unique du second prototype. Une deuxième publication portera sur la validation de modèles représentant des puits de forage à quatre tuyaux à deux circuits indépendants.

Les puits de forage à deux tuyaux en « u » sont utilisés régulièrement en Europe. Le centre Grant-Harvey à Fredericton exploite un système à deux tuyaux en « u » à deux circuits indépendants (charge - décharge) comme celui faisant l'objet d'étude dans le cadre du projet. Les travaux en cours et la poursuite prévue de ces travaux feront en sorte que les concepteurs en Amérique du Nord auront la confiance de s'en servir. Ils seraient particulièrement intéressants dans des systèmes de stockage d'énergie thermique à puits de forage comme celui de la communauté solaire Drake Landing.

La **mise en œuvre de stratégies de commande prédictive** aura lieu dans des bâtiments résidentiels réels et dans des BCENN tels que la bibliothèque de Varennes. Les résultats de la recherche à cet égard serviront lors d'essais sur le terrain pour en démontrer l'utilité à des intervenants (propriétaires de bâtiments, entreprises de commande, services publics) et les algorithmes seront développés davantage pour comprendre la gestion du stockage d'électricité.

L'aide que le gouvernement fédéral peut fournir

1. L'adoption de technologies de bâtiments à consommation énergétique nette nulle (BCENN) et la réalisation de projets de démonstration dans des bâtiments du gouvernement, liée à des activités de recherche et de contrôle à long terme; un fort programme de diffusion à l'intention des constructeurs et de la communauté de conception est également nécessaire;

2. L'offre de mesures d'incitation à l'adoption et au développement continu de technologies transformatrices, notamment celle des systèmes photovoltaïques thermiques intégrés au bâtiment liés à des thermopompes et des systèmes géothermiques avancés;
3. La prestation de programmes de financement pour la recherche continue sur les BCENN et les technologies habilitantes ayant un volet robuste de formation comme le Réseau stratégique du CRSNG sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette nulle; la formation de personnel hautement qualifié (PHQ) est essentielle à la transformation des industries de l'énergie et du bâtiment. Le Réseau stratégique sur les bâtiments intelligents à consommation énergétique nette nulle a formé plus de 120 personnes hautement qualifiées qui se sont jointes à des universités à titre de professeurs (au moins 10) et à des organismes ou laboratoires du gouvernement et de l'industrie, notamment CanmetÉNERGIE et la Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL).