Suivi des performances et simulations calibrées d'un bâtiment résidentiel net zéro énergie

Yannick Allard, Michaël Kummert
École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec

Résumé

Après une brève description du Triplex Abondance Le Soleil, premier bâtiment résidentiel multilogement visant une consommation nette nulle au Canada, et de ses performances énergétiques, cet article décrit le processus de monitoring détaillé et la calibration des simulations réalisées lors de la phase de conception du projet. Le système de monitoring est décrit et discuté. Les résultats obtenus sont discutés, et utilisés pour calibrer les simulations effectuées avec le logiciel TRNSYS.

Cet article permet de tirer des leçons en lien avec les projets de monitoring détaillé et fait des recommandations au sujet des paramètres clef à mesurer pendant la période de monitoring et du niveau de calibration qui offre un meilleur rapport performance/coût.

1 Introduction

Principalement reliée à la prise de conscience du potentiel de réduction des besoins énergétiques opérationnels des bâtiments, l'utilisation d'outils informatiques pour l'analyse énergétique des systèmes mécaniques de bâtiments tend à devenir un incontournable dans tout processus de conception. En réponse à l'utilisation quasi systématique de tels outils informatiques, la question de précision et de validité des résultats obtenus se pose. Comment garantir l'évaluation de la consommation énergétique de bâtiment sous un seuil d'erreur acceptable en minimisant les efforts déployés pour valider ces outils de simulation? La simulation peut-elle jouer un rôle après la phase de conception, lors de la réception des installations et pendant leur fonctionnement?

Le Triplex Abondance Le Soleil, premier bâtiment résidentiel multilogements à consommation nette nulle au Canada, construit en 2009 à Montréal, a grandement bénéficié de l'utilisation de ces outils dans le choix et le dimensionnement de ses systèmes énergétiques. Une installation de monitoring détaillée a été mise en service en 2011. Ceci a permis d'utiliser les premières données mesurées sur le site pour la validation des hypothèses de simulation utilisées au cours de la phase de conception.

Après une brève description du Triplex Le Soleil et de ses performances énergétiques, cette étude porte principalement sur le processus de monitoring détaillé et sur la calibration des simulations réalisées lors de la phase de conception du projet. Plusieurs niveaux de calibration sont utilisés afin de permettre l'évaluation des gains en précision du modèle en fonction du coût (temps, ressources) associé à ce niveau. Dans l'ordre, on retrouve les simulations « de design » qui ont été utilisées lors de la phase de conception et qui sont utilisées comme base de référence pour cette analyse, les simulations calibrées « tel que construit» où les fiches signalétiques des appareils réellement installés sont utilisées, les simulations calibrées, et finalement, « tel qu'exploité» où le comportement des occupants (profil de consommation, point de consigne, etc.) est pris en compte.

2 Description du projet

Le Triplex Abondance Le Soleil est issu de l'initiative de démonstration de maisons durables EQuilibrium (SCHL, 2010), un concours national mené par la Société Canadienne d'Hypothèques et de Logement (SCHL) qui visait à aider des équipes locales à concevoir et à construire 15 maisons à consommation énergétique nette nulle au Canada. Ces maisons à consommation énergétique nette nulle doivent produire autant d'énergie à partir de sources renouvelables que la quantité d'énergie qu'elles utilisent en kWh annuellement. Le bâtiment analysé dans ce document a été conçu par l'équipe «Abondance Montréal», qui a décidé de relever le défi de la consommation énergétique nette nulle dans un environnement urbain. La construction du triplex, immeuble de 3 logements de 80 m² chacun de surface habitable, a été achevé en 2009 et les systèmes de production électrique furent installés en 2010.

Situé dans l'arrondissement de Verdun à Montréal, le Triplex Abondance Le Soleil est, de l'extérieur, similaire aux constructions voisines caractéristiques du tissu urbain local. Les bâtiments résidentiels multiétages en rangée offrent peu de latitude quant aux stratégies de conception solaire passive applicables. Pour pallier à cela, le bâtiment à donc été conçu afin d'obtenir une enveloppe de haute performance. Les murs, les fenêtres et le toit présentent des valeurs de résistance thermique très élevées, respectivement de 7.9 m²-K/W, 1.35 m²-K/W et 12.3 m²-K/W. La qualité de l'enveloppe du bâtiment a également pu être démontrée par le test d'infiltrométrie réalisé pour le bâtiment. Un taux d'infiltration d'air de 0,5 CAH à 50 Pa a été mesuré, soit une valeur 5 fois inférieure au programme provincial Novoclimat qui exige au plus 2,5 CAH.

Système de chauffage, ventilation et climatisation (CVC)

Chaque condominium a son propre système CVC illustré à la Figure 1. Ce système mécanique est principalement composé d'une pompe à chaleur (PAC) géothermique (Carrier 50YDV026JCB30) de 5,8 kW (COP 4,6) de capacité en chauffage et de 7,8 kW (EER 26) en climatisation. Un des avantages de cette PAC provient de son compresseur en volute à deux stages qui permet de fonctionner avec un COP plus élevé à charge partielle. Chacune des PAC est également équipée d'un élément chauffant auxiliaire de 5 kW.

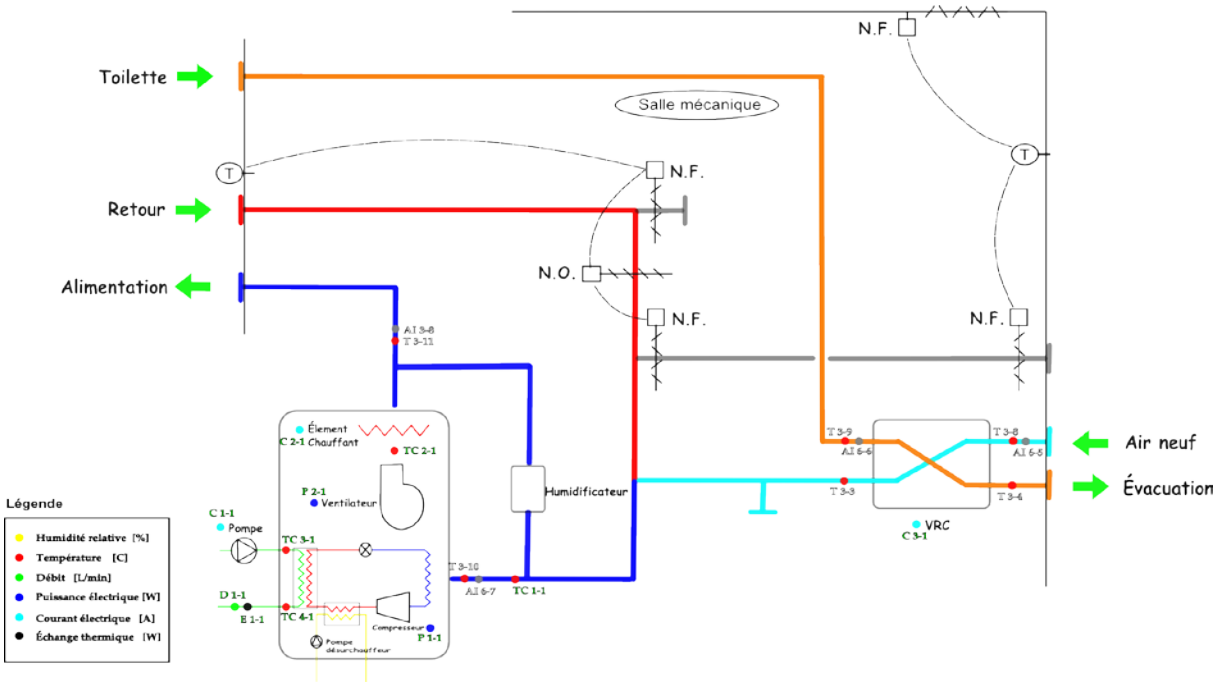

Figure 1: Schéma conceptuel du système CVC en période de climatisation normale

De plus, les trois PAC sont reliées au même échangeur géothermique, soit 2 puits de 70 m de profondeur où un mélange 75 % eau et 25 % glycol circule à l'intérieur d'un conduit simple en U.

Ensuite, un ventilateur récupérateur de chaleur (VRC) (Lifebreath 95max) de 75 % d'efficacité (à 0 ˚C avec un débit d'air de 30 L/s) est utilisé.

Finalement, pour limiter la charge de climatisation en période de température extérieure clémente (entre 10 ˚C et 15 ˚C), un système de refroidissement « gratuit » par ventilation forcé est mis en route. Ce système fait circuler un plus grand débit d'air frais à l'intérieur des logements par le biais du ventilateur des PAC. Dans ces conditions, le circuit de ventilation normal court-circuite le VRC par l'ajustement spécifique de volets motorisés (voir Figure 1).

Système de production d'eau chaude domestique (ECD)

Un système centralisé est utilisé pour la production d'ECD pour l'ensemble du bâtiment. Il est composé en premier lieu de deux récupérateurs de chaleur des eaux grises (RCEG) (PowerpipeMD R3-36 et R3-60) reliés en série. Les trois douches alimentent ces RCEG, mais seuls les 2 étages supérieurs alimentent le RCEG supérieur en raison des contraintes de hauteur disponible (voir Figure 2). Ces RCEG préchauffent l'eau froide domestique (EFDP) utilisée par les douches et celle circulant dans le reste du système d'ECD.

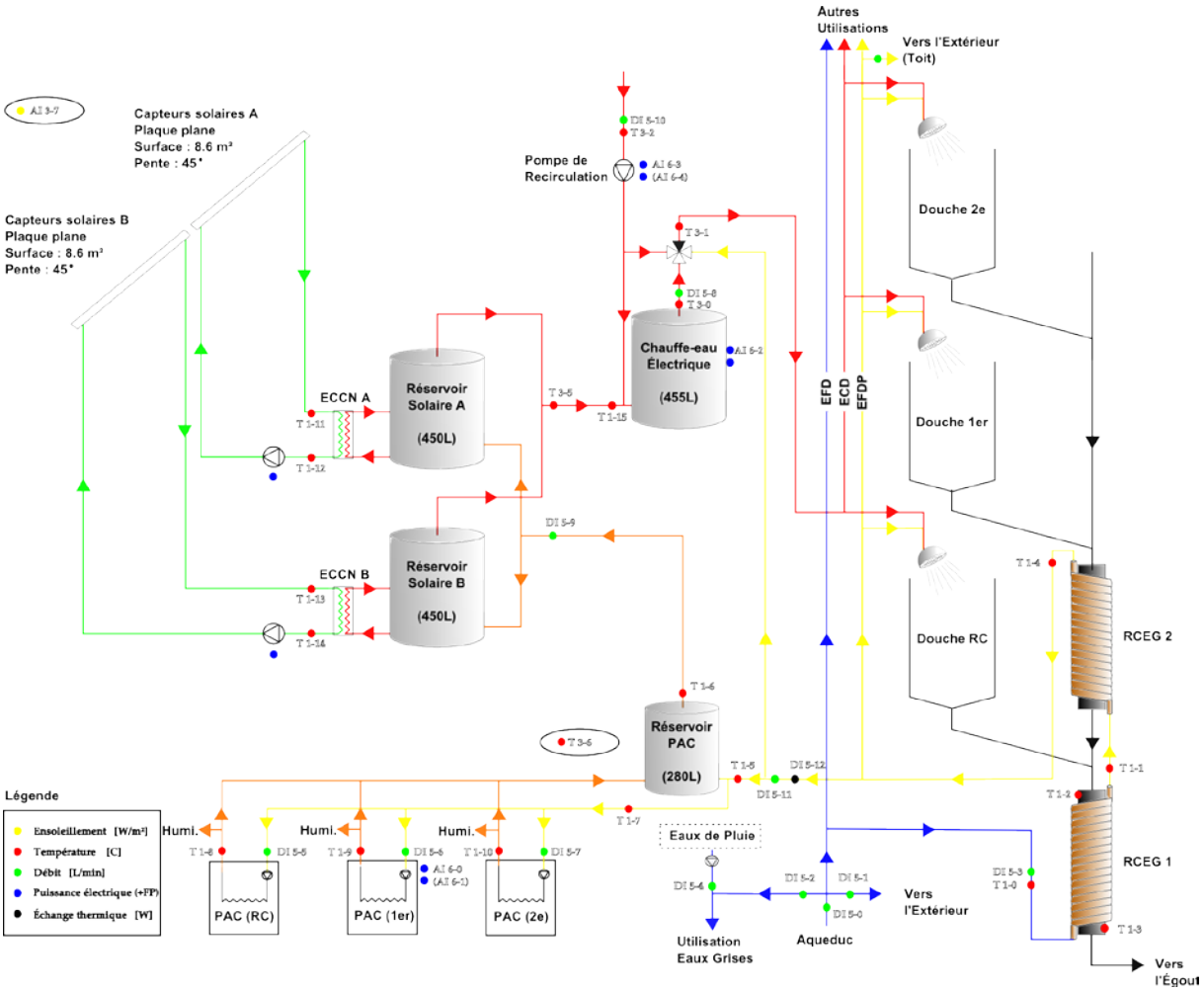

Figure 2: Schéma conceptuel du système d'ECD

Par la suite, un premier réservoir de préchauffage de 280 L (Giant 172ETE-9G7M) est utilisé pour emmagasiner l'énergie produite par les trois désurchauffeurs des PAC. De manière plus détaillée, le désurchauffeur est un échangeur de chaleur situé entre le compresseur et le condensateur qui permet de récupérer l'énergie de la PAC avant qu'elle soit envoyée dans l'échangeur géothermique en mode climatisation, où de produire celle-ci avec un COP élevé en mode chauffage.

Suite à cela, deux systèmes solaires reliés en parallèle, composé chacun de trois capteurs plans (SOLENSI-TL-ST-01) reliés en parallèle, d'un échangeur de chaleur à convection naturel et d'un réservoir de 455 L (Giant ISO-1100) sont utilisés. Les capteurs plans de 2,874 m chacun sont orientés suivant la face sud-est du bâtiment (c.-à-d. 22 °) et incliné à 40 °. Un mélange de 50 % de propylène glycol USP/EP et de 50 % d'eau déminéralisée est utilisé comme fluide caloporteur dans la boucle solaire.

Finalement, un chauffe-eau électrique conventionnel (Giant 1122B-1-6) de 455L avec deux éléments chauffant de 6 kW chacun est utilisé comme système auxiliaire, dans la mesure où les autres systèmes ne parviendraient pas à répondre à la demande. À la sortie du circuit de production d'ECD, une vanne de mélange thermostatique (Leonard TM-420A) est utilisée, par mesure de sécurité, afin de limiter la température d'alimentation d'ECD.

De plus, par souci de confort des occupants et d'économie d'eau potable, une pompe de recirculation (Armstrong ASTRO-30B) d'ECD est utilisée. Celle-ci est contrôlée par une sonde de température, située sur la tuyauterie à la fin de la boucle de retour, qui active la pompe lorsque la température de l'eau devient inférieure à 29°C et l'arrête lorsque celle-ci devient supérieure à 40°C. De plus, ce dispositif permet de limiter l'utilisation de la pompe suivant un horaire journalier défini par intervalles de 15 minutes.

Système de production électrique

L'énergie électrique est produite par un champ de 60 panneaux solaires photovoltaïques (PV) (Centennial Solar CS230) pour une puissance total installée de 13,8 kW. Les panneaux solaires photovoltaïques sont orientés suivant la face sud-est du bâtiment (c.-à-d. 22 °) et incliné à 30° par rapport à l'horizontal. L'ensemble du champ de panneaux solaires photovoltaïques est divisé en trois sections de 20 panneaux reliés chacune à un onduleur (Solectria Renewables PVI 5000) de 96 % d'efficacité.

L'alimentation du bâtiment en courant alternatif est prise en charge par ce système et par le réseau électrique d'Hydro-Québec au moyen d'un raccordement en mode mesurage net. Le mesurage net permet un échange électrique bidirectionnel avec le réseau, c.-à-d. que les surplus de production d'énergie peuvent être envoyés au réseau et que les manques seront puisés de celui-ci.

3 Installation de monitoring

Le Triplex Abondance se voulait être un projet de démonstration pouvant être utilisé pour évaluer la performance des stratégies utilisées dans la conception d'un bâtiment à consommation nette nulle. Il était donc bien défini à la phase de conception qu'un monitoring, pour une période minimale d'une année, serait réalisé sur ce projet. Vu l'ampleur du projet de monitoring et les coûts associés, le monitoring complet du bâtiment a été sous-divisé et pris en charge par différents organismes. Cette juxtaposition d'acteurs ayant des objectifs bien spécifiques pour la collecte de données sur ce site (vue d'ensemble de la consommation énergétique du bâtiment, performance des PAC, performance du système PV, performance du système de production d'ECD) a mené au système de monitoring actuel, un système fragmenté n'ayant aucune uniformisation dans le format d'enregistrement des données. Tantôt, les relevés sont effectués manuellement et ce à intervalles réguliers, tantôt les données

sont extraites des différents systèmes d'acquisition suivant un logiciel propre pour chaque type.

Les principaux points de mesures réalisées pour les systèmes CVC et d'ECD sont représentés sur les Figure 1 et Figure 2 à l'aide de points colorés suivant la nature de la mesure. Pour les systèmes électriques du bâtiment des relevés hebdomadaires sont effectués à partir de l'information prélevée sur les compteurs électriques et les onduleurs du système PV.

Leçons apprises

Une meilleure planification de la mise en service de cette installation de monitoring aurait pu apporter d'énormes bénéfices en termes de coût du système et d'efficacité dans la gestion et le traitement des données mesurées.

Coût du système

Dans un premier temps, le manque de coordination initiale entre les différents organismes a amplifié de manière significative le nombre d'équipements de mesure (sondes et systèmes d'acquisition), ayant comme résultat d'augmenter les coûts du système sans apporter de réel gain d'information au niveau du monitoring. Idéalement, le choix initial des équipements de monitoring aurait dû être fait de manière à répondre aux besoins les plus restrictifs de chacun des organismes, permettant ainsi d'éliminer certains équipements redondants.

Dans un second temps, le coût non négligeable associé à l'installation des équipements de mesure peut être grandement diminué lorsque cette étape est réalisée durant la construction du bâtiment. Idéalement dans un tel projet, le plan de monitoring et l'achat des équipements de mesure nécessaires devraient être réalisés avant le début de la construction du bâtiment. Ce qui du même coup élimine les contraintes de positionnement des équipements pour des raisons d'accessibilité.

Gestion de l'information

Plusieurs stratégies auraient pu être mises de l'avant afin d'améliorer la gestion de la collecte et du traitement des données. Dans ce cas-ci, le fait d'avoir une installation de monitoring fragmentée complique le traitement des données puisque plusieurs sources différentes d'informations doivent être traitées suivant une méthodologie propre à chacune. De plus, l'utilisation de divers capteurs de mesures ayant chacun leurs spécifications propres vient ajouter en complexité à cette étape de traitement de données. L'utilisation d'un système d'acquisition de données centralisé et l'uniformisation des différents capteurs de mesure permettraient de grandement faciliter le traitement des données prélevées sur le site.

Fiabilité du système

Aucun des équipements de mesure retenus ne s'est avéré infaillible. Dans certains cas, certaines valeurs irréalistes ont été enregistrées, et dans d'autres cas le système d'acquisition a tout simplement arrêté la collecte des données. Cette réalité montre l'intérêt d'avoir un système de gestion de panne, tant au niveau du système d'acquisition qu'au niveau des capteurs de mesure. En fait, plusieurs stratégies peuvent être utilisées pour augmenter la fiabilité du système en rendant l'analyse de données moins vulnérable aux défaillances du monitoring.

- l'utilisation de capteurs offrant à la fois un signal de sortie et un affichage local (par ex. totalisateur) pouvant être relevés à intervalle régulier peut permettre de récupérer un minimum d'informations utiles pour cette période;

- l'utilisation d'un système de gestion de défaillance automatisé du système de monitoring peut réduire considérablement la durée des intervalles de données manquantes.

Malgré toutes ces précautions, la défaillance d'une composante de la chaîne de mesure peut survenir ponctuellement et par conséquent induire une erreur sur cette mesure. Les résultats doivent donc être analysés avec soin afin d'identifier et de traiter ces erreurs de mesures

4 Audit énergétique

Bien qu'à ce jour les données relevées sur le site ne couvrent pas une année complète, elles peuvent tout de même donner de précieuses informations quant à la performance réelle des différents systèmes mécaniques mis en place. Les sections suivantes relatent donc de la performance des différents systèmes mécaniques du Triplex Abondance Montréal suite à l'analyse des données de obtenues lors du processus de monitoring.

Système de chauffage, ventilation et climatisation

Tableau 1: Bilan énergétique mensuel des systèmes CVC (en kWh)

		Juil.	Août	Sept.	Oct.	Total
Consommation	PAC_{RC}	35,266	43,863	**nd**	12,297	91,425
	PAC_1^{er}	171,502	143,548	91,269	21,728	428,04
	PAC_2^{e}	212,244	185,833	95,746	25,805	519,62
	Total	**419,012**	**373,243**	**187,015**	**59,830**	**1039,1**
	VRC_{RC}	9,830	11,081	11,510	10,999	43,421
	VRC_1^{er}	7,815	7,335	7,067	7,714	29,930
	VRC_2^{e}	10,555	8,326	12,207	15,106	46,194
	Total	**28,200**	**26,743**	**30,782**	**33,819**	**119,54**
Total		**447,212**	**399,986**	**217,798**	**93,649**	**1158,6**

Étant donné que les données du monitoring plus détaillé pour ce sous système ne sont pas encore disponibles, le manque d'information concernant l'état dans lequel opèrent ces différents systèmes CVC (température, humidité relative, période de fonctionnement, etc.) rend difficile l'analyse des mesures de consommation énergétique de ceux-ci. Malgré cela, il est possible de constater une forte dépendance de la consommation énergétique des PAC en fonction du mois de l'année (c.-à-d. la charge en climatisation du bâtiment). À ce stade-ci il est difficile de quantifier l'importance relative des paramètres liés aux occupants (présence ou non, points de consigne) et des différences physiques entre les appartements (lien thermique avec le sous-sol, ombrage plus important). Un fonctionnement anormal de la PAC du RDC ne peut pas être exclu puisque des défaillances ponctuelles (dont un givrage complet de l'évaporateur) ont été constatées. Les VRC ont une consommation d'électricité relativement constante, vraisemblablement liée à leur profil d'utilisation et aux pertes de charges dans les différents circuits.

Système de production d'ECD

Tableau 2: Bilan énergétique mensuel du système ECD (en kWh)

		Juil.	Août	Sept.	Oct.	Total
Consommation	ECD	257,8	200,0	235,5	260,8	953,6
	EFDP	18,8	34,1	35,9	39,5	128,3
	Pertes	320,6	386,9	402,8	443,6	1515,8
	Pompes	39,3	51,0	49,5	51,1	190,9
Production	RCEG	45,5	60,7	83,7	105,1	301,2
	Désurchauffeur	3,4	0	2,2	4,9	10,6
	Solaire thermique	0	0	0	0	0
	Chauffe-eau	548,3	560,3	588,3	633,9	2330,8
	Total	597,2	621,0	674,2	743,9	2650,2
	ECD (Litres)	8123	6998	7708	7753	
	$T_{aqueduc}$ (°C)	20,6	21,8	20,7	17,1	
	$T_{ambiante}$ (°C)	25,6	26,2	25,7	23,7	

La Figure 3 compare les volumes d'eau consommés et les consommations électriques pour des périodes équivalentes avec et sans pompe de recirculation. Tout d'abord, il est à noter que l'ensemble des pertes en attente du système est supérieur à la demande énergétique totale pour l'ECD. Ces pertes en attente sont principalement liées aux pertes du chauffe-eau et de la boucle de recirculation, seuls éléments dont la température est supérieure à la température ambiante de la salle mécanique. De plus, la différence de valeur entre les pertes en attente pour le mois de juillet et les autres mois est liée au fait que la pompe de recirculation a été désactivée pour une période de 7 jours. Vu l'impact énergétique significatif de l'ajout de l'utilisation de la boucle de recirculation, une analyse plus approfondie a été effectuée sur cet élément.

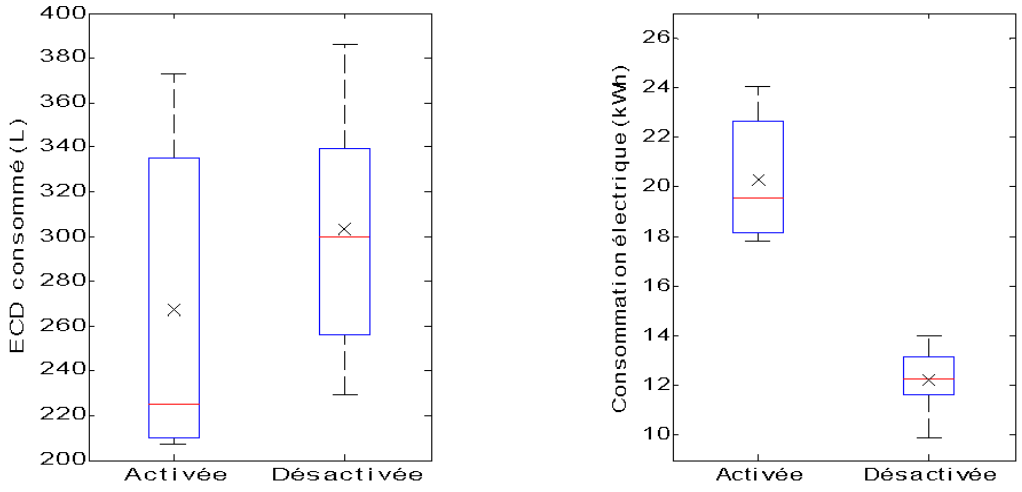

Figure 3 : Comparaison journalière du volume d'ECD consommé et de la consommation électrique du chauffe-eau en fonction du fonctionnement de la pompe de recirciluation

À la lumière des résultats présentés à la Figure 3, il est raisonnable de croire au potentiel de réduction de consommation d'ECD associé à l'utilisation d'une boucle de recirculation, bien que les données présentées ci-dessus soient également soumises aux variations d'occupation du bâtiment pour cette période. Par contre, l'impact énergétique négatif de l'utilisation de la pompe de recirculation semble être beaucoup plus important. En effet, bien que la consommation d'ECD soit supérieure pendant la période sans recirculation, la consommation électrique du chauffe-eau a chuté de 40 %, et à cela s'ajoute l'économie associée à la consommation électrique de la pompe de recirculation (1,65 kWh/jour). Il est à noter que le monitoring a montré que le contrôleur de la pompe de recirculation ne fonctionne pas selon les spécifications (fonctionnement en permanence).

La production énergétique des deux RCEG est directement liée à l'utilisation des douches. Comme ils préchauffent l'eau froide envoyée dans le chauffe-eau mais aussi vers les douches elles-mêmes, les RCEG ont un impact sur la consommation énergétique à la fois en en réduisant le débit d'ECD passant à travers le chauffe-eau et en augmentant la température d'entrée du chauffe-eau. Au Tableau 2, on remarque également l'influence de la température de l'aqueduc sur la production des RCEG. Pour le mois d'octobre, où la température de l'aqueduc est plus faible, correspond la plus grande production énergétique des RCEG.

La production des désurchauffeurs est pratiquement inexistante, et ce, même pour la période de pointe en climatisation. Cette réalité s'explique par le fait que les systèmes utilisant le R-410 comme réfrigérant offrent une température de gaz chaud, à la sortie du compresseur, plus faible, donc un potentiel de chaleur disponible moins élevé pour les désurchauffeurs. Le potentiel de chaleur est donc principalement lié à la température de l'eau glycolée provenant de l'échangeur géothermique.

La mise en service du système de chauffage de l'eau par capteur solaire thermique a été interrompue à deux reprises pour cause de fuite dans la boucle d'eau glycolée. Le système est donc à l'arrêt et n'a donc jamais vraiment été fonctionnel. Originalement, le dimensionnement de ce système prévoyait répondre à la totalité des besoins ECD pour cette période de l'année. Pour le système installé au Triplex Abondance, les températures maximales enregistrées par les contrôleurs des systèmes solaires thermiques portent à croire que ceux-ci sont entrés en stagnation et que les réservoirs de dilatation étaient sous dimensionnés pour ces conditions de température élevée

Le chauffe-eau électrique, qui ne devait être qu'un élément d'appoint dans ce système de production d'ECD, vient en grande partie combler le déficit laissé par l'arrêt du système solaire thermique. À cela vient s'ajouter l'utilisation d'une boucle de recirculation d'ECD raccordée directement au chauffe-eau, ce qui exerce une demande additionnelle à celui-ci puisqu'il devient le seul équipement utilisé pour compenser les pertes associées à la tuyauterie. Pour toutes ces raisons, la consommation électrique réelle du chauffe-eau représente plus de 75 % de la consommation totale du système de production ECD, de quoi mettre en doute le choix et la complexité du système actuel.

Systèmes électriques

À première vue (Tableau 3), il serait facile de conclure sur le fait que le Triplex Abondance ne pourra atteindre son objectif de consommation énergétique nette nulle pour l'année en cours. En théorie, la période estivale devrait être la principale période de stockage énergétique vers le réseau, c.-à-d. avec un bilan positif. La réalité est un peu plus complexe, bien que la consommation énergétique ait été supérieure à la production pour cette période, la consommation énergétique liée aux activités de construction associées à la phase II de ce projet immobilier est incluse dans la consommation énergétique des espaces communs. Ces

activités temporaires surestiment la consommation globale du bâtiment et décalent le bilan actuel sous le seuil de consommation énergétique nette nulle.

Tableau 3: Bilan énergétique mensuel du réseau électrique (en kWh)

		Juil.	Août	Sept.	Oct.	Total
Consommation	RC	405	352	346	243	1346
	1er	450	300	357	187	1294
	2e	521	436	376	365	1698
	Espace commun	1317	1287	1495	1671	5770
	Total	**2693**	**2375**	**2574**	**2466**	**10108**
Production	PV 1	592,8	504,2	404,6	315,7	1817,3
	PV 2	588,5	0,0	0,0	0,0	588,5
	PV 3	639,1	541,1	433,4	339,1	1952,7
	Total	**1820,4**	**1045,3**	**838,0**	**654,8**	**4358,5**
	Heures ensoleillement	453	413	360	304	1530
Bilan		**-873**	**-1330**	**-1736**	**-1811**	**-5750**

Il est plus facile de conclure quant à l'importance du bon fonctionnement des systèmes de production électrique. En effet, la panne d'un des systèmes photovoltaïques à la fin juillet, vient sérieusement compromettre le bilan global du système. Pour cette période, où seulement 2/3 des capteurs photovoltaïques sont opérationnels, la production électrique ne parvient même pas à combler la consommation énergétique des 3 logements. Au final, on remarque que l'atteinte des objectifs de consommation énergétique nette nulle repose au minimum sur le bon fonctionnement des systèmes mécaniques mis en place. D'où l'importance d'avoir des outils de diagnostic permettant d'identifier les écarts entre la performance réelle des systèmes et celle attendue.

5 Méthodologie de calibration

La calibration peut améliorer grandement les résultats de simulations en corrigeant certains éléments associés à l'une des principales sources d'erreur, soit la validité des paramètres d'entrée de la simulation. Dans cette catégorie on retrouve principalement l'incertitude même associée aux paramètres d'entrée (climat, comportement des occupants, etc.) et les erreurs des utilisateurs dans l'écriture des paramètres de simulation. D'autres sources d'erreurs peuvent venir affecter la précision des résultats de simulation obtenus : les simplifications utilisées par le modèle, ou bien la robustesse des algorithmes utilisés par celui-ci, peuvent avoir un impact significatif sur les résultats obtenus. Ces éléments sont intrinsèques à l'outil de simulation utilisé et ne sont donc pas influencés par le processus de calibration, à moins que celui-ci ne comprennent également le choix entre des modèles différents disponibles. L'objectif premier de la calibration est d'obtenir un modèle final acceptable capable de prédire, à l'intérieur d'une marge d'erreur donnée, la performance énergétique du bâtiment en question.

Dans la majorité des cas, la comparaison des résultats de simûlation (y_i) et des données mesurées (y_i) est représentée sous 2 formes : l'erreur de biais moyenne normalisée (EBMN) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CVEQM), où n représente le nombre de points de comparaison, p le nombre de paramètres (c.-à-d. p = 1 dans notre cas) a$\bar{n}$alysés et y la valeur moyenne.

$$EBMN = 100 \times \frac{1}{\bar{y}} \times \frac{\sum^{n}(y_i - \hat{y}_i)}{n - p} \quad (1) \qquad CVEQM = 100 \times \frac{1}{\bar{y}} \times \sqrt{\frac{\sum^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}} \quad (2)$$

De plus, l'ASHRAE Guideline 14-2002 fixe des limites minimales à respecter, pour le EBMN et CVEQM, afin garantir la qualité du modèle calibré utilisé. Le EBMN et CVEQM ne devraient pas dépasser 5 % et 15 % respectivement pour un modèle calibré sur une base mensuelle (n = 12), et 10 % et 30 % pour un modèle calibré sur une base horaire (n = 8760). Aucune raison spécifique n'est mentionnée pour justifier le choix de ces limites. L'application de celles-ci pour garantir la qualité d'un modèle doit donc être faite avec discernement.

Niveau de raffinement

Pour la suite de l'analyse, seules les simulations du système de production d'ECD ont été utilisées. En commençant avec résultats de la simulation « de design », où une description détaillée peut-être consultée (Picard et al., 2007), la calibration s'effectue par niveau de raffinement successif. Le tableau ci-dessous résume ces principales modifications.

Tableau 4: Principales modifications associées aux différents niveaux de raffinement

Simulation calibrée	Modifications
« tel que construit »	• Modifications des paramètres en fonction des fiches signalétiques • Ajout de la boucle de recirculation et la tuyauterie • Modification de la configuration (douche / RCEG) • Utilisation d'un modèle de réservoir qui prend en compte l'influence du phénomène de déstratification
« tel que construit (avec défaillance) »	• Arrêt des systèmes solaires thermiques • Fonctionnement en continu de la pompe de recirculation
« tel qu'opéré »	• Utilisation des paramètres d'entrée présentée à la section suivante

Paramètres d'entrées pour la calibration « tel qu'opéré »

Profil de consommation

Le profil moyen d'ECD du Triplex Abondance a été comparé à divers profils résidentiels moyens de consommation d'ECD couramment utilisé pour l'analyse de performance des systèmes ECD résidentiels (Figure 4) (Fairey & Parker, 2004). Étant donné l'utilisation de l'heure normale pour la présentation de données, les profils de consommation d'ECD normalisés présentés à la Figure 4 ont été décalés d'une heure. Deux principales différences entre les profils normalisés et celui du Triplex Abondance peuvent être identifiées. Tout d'abord, bien qu'en général la pointe de consommation matinale ECD soit bien représentée temporellement, celle-ci est sous-estimée pour l'ensemble des profils normalisés. Ensuite, la période de consommation d'ECD de fin de soirée pour le Triplex Abondance est surestimée par les profils normalisés. De plus, ceux-ci n'offrent pas une bonne représentation temporelle de cette pointe de fin de journée, en réalité, la 2^{e} pointe de consommation d'ECD du Triplex Abondance survient à des heures beaucoup plus tardives. Il est à noter, par contre, que le profil moyen d'ECD du Triplex Abondance est basé uniquement sur 4 mois d'observation; celui-ci peut donc ne pas tenir de certaines variations saisonnières.

Une des limitations majeures dans l'utilisation des profils moyens de consommation d'ECD pour les simulations énergétiques est associée à la perte d'information concernant les variations du profil de consommation sur une base journalière. Également, l'utilisation d'un profil de consommation moyen horaire pose un problème quant à la représentation du profil de consommation pour une plus grande résolution temporelle. Pour ces deux raisons, l'utilisation d'outils permettant de générer artificiellement des profils de consommation d'ECD, comme DHWcalc (Ulrike & Klaus, 2005), pour la période et la résolution temporelle désirée, permet d'obtenir un profil plus près de la réalité. Pour la période à l'étude, la Figure 5 offre une représentation statistique horaire des demandes d'ECD générées par DHWcalc. On remarque que le profil utilisé lors de la phase de conception représente bien le phénomène observé en pratique, où la valeur moyenne horaire ne correspond pas à une demande de petit volume d'ECD pour cet intervalle de temps, mais plutôt des évènements de plus grande consommation dont la fréquence journalière est plus faible. Ceci est principalement illustré par le grand nombre de données discordantes pour les heures de faible consommation. Par contre, en comparant (Figure 5) le profil de consommation d'ECD horaire moyen du Triplex Abondance (courbe noire) et de celui utilisé lors de la phase de conception (courbe bleue), on remarque des profils très distincts pour la représentation de la pointe de consommation d'ECD de début de journée. Ce qui est principalement lié aux valeurs de probabilité d'obtenir un évènement d'eau chaude pour chaque intervalle de temps utilisé lors de la phase de conception. On peut donc penser que le profil généré avec DHWCalc aurait pu être plus réaliste avec une meilleure connaissance des probabilités horaires moyennes.

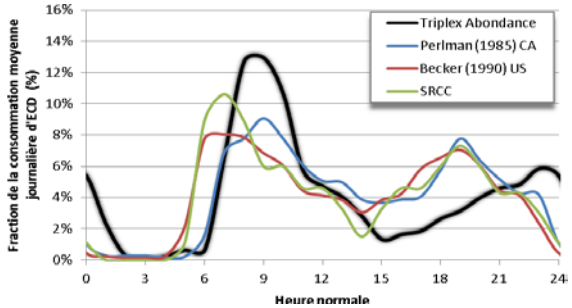

Figure 4: Différents profils horaires de consommation d'ECD dans le secteur résidentiel comparés à celui mesuré au Triplex Abondance

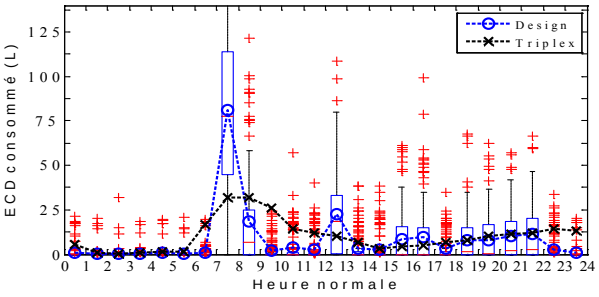

Figure 5: Comparaison du profil horaire moyen de consommation d'ECD utilisé pour la simulation de design avec celui mesuré au Triplex Abondance

Température de l'eau de l'aqueduc

L'influence de la température de l'eau de l'aqueduc sur la consommation et la performance des systèmes a également été évaluée. En général, sur la Figure 6, la température journalière mesurée (courbe noire), correspond à un degré près aux données compilées en 2003 pour Montréal (courbe bleue) (Marcoux & Dumas, 2004). On remarque toutefois une différence moyenne de 2 ˚C entre ces deux courbes pour le mois d'août (c.-à-d. du 213^{e} au 243^{e} jour). Pour une consommation journalière moyenne de 225 L/jour pour cette période, cette différence de température peut représenter une différence de 5 % dans l'évaluation de la consommation énergétique associée à l'ECD.

Température de la salle mécanique

Étant donné qu'aucun système de conditionnement de l'air n'est utilisé pour contrôler la température de l'air dans la salle mécanique de ce bâtiment, celle-ci est soumise à de fortes variations annuelles de température. L'influence de cette température joue un rôle important dans l'évaluation des pertes thermiques associées aux différents composants du système de

production d'ECD. Il est donc possible d'observer sur la Figure 7 une différence significative entre la température ambiante journalière moyenne de la salle mécanique et la valeur par défaut utilisée pour la simulation de conception.

Production énergétique des désurchauffeurs

La production énergétique des désurchauffeurs repose principalement sur le fonctionnement des PAC. Pour cette raison, lors de la phase des simulations de conception du bâtiment, un fichier basé sur le fonctionnement des PAC, résultats de la simulation des systèmes CVC, et sur le potentiel de production d'énergie pour l'eau chaude provenant des données du fabricant a été généré afin de simuler la production des désurchauffeurs. Pour cette raison, l'apport réel mesuré pour les désurchauffeurs a été utilisé comme fichier d'entrée pour ce composant afin d'éliminer l'influence de la précision des résultats de simulation des systèmes CVC.

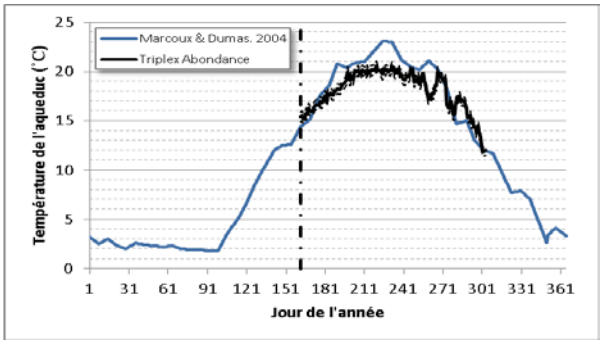

Figure 6: Comparaison de la température de l'aqueduc utilisée pour la simulation de design avec celle mesuré au Triplex Abondance

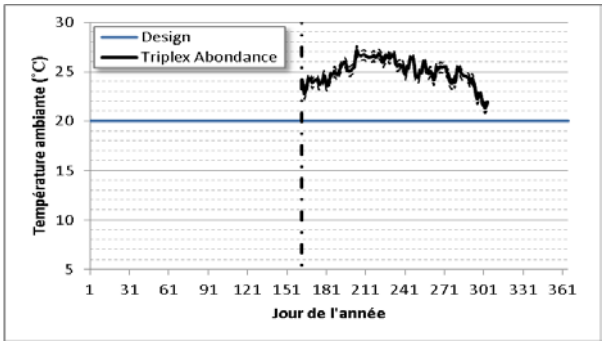

Figure 7: Comparaison de la température ambiante utilisée pour la simulation de design avec celle mesurée au Triplex Abondance

Limite de la calibration

Étant donné que le modèle calibré ne pourra obtenir de meilleur EBMN et CVEQM que ceux liés à l'incertitude des données, il y a donc tout intérêt pour le processus de calibration d'avoir accès à des données mesurées de qualité. À l'aide des règles de propagation d'incertitude, présenté dans l'ASHRAE Guideline 2-2010, le EBMN et CVEQM présentés ci-dessous ont été calculés suivant l'incertitude associée à chacune des mesures mensuelles.

Tableau 5: EBMN et CVEQM associés aux bilans mensuels mesurés du système de production d'ECD

		EBMN	CVEQM
Consommation	ECD	4	4
	EFDP	36	48
	Pertes	11	12
	Pompes	9	9
Production	RCEG	13	13
	Désurchauffeu	35	42
	Solaire	0	0
	Chauffe-eau	2	2

Comme on peut voir au Tableau 5, il n'existe pratiquement aucune différence entre les valeurs de EBMN et de CVEQM. Ceci s'explique par le fait que la plage de mesure actuellement disponible ne couvre pas une année complète. Dans ce cas précis, où seulement 4 mois de mesures sont utilisés, l'EBMN est surestimée. Plus précisément, le fait d'utiliser une année complète de mesure permet de bénéficier d'une certaine complémentarité des erreurs et ainsi diminuer l'EBMN. Pour cette raison, il est difficile dans ce cas-ci d'utiliser directement le critère maximal de 5 % définit par l'ASHRAE pour évalué l'EBMN sur une base mensuelle.

6 Résultats

À l'aide des Figure 8 et Figure 9, l'évolution des deux critères, l'EBMN (trait plein) et le CVEQM (trait pointillé), utilisés pour évaluer la qualité des résultats de différents niveaux de calibration sont présenté, dans un premier temps pour la consommation électrique du système (pompes, chauffe-eau électrique) et dans un deuxième temps pour le bilan énergétique des composants du système.

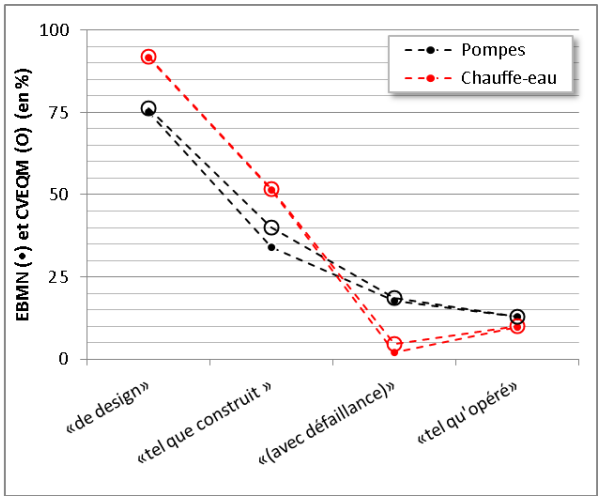

Figure 8: Évolution de l'EBMN et du CVEQM suivant le niveau de raffinement de la calibration pour les résultats de consommation électrique du système de production d'ECD

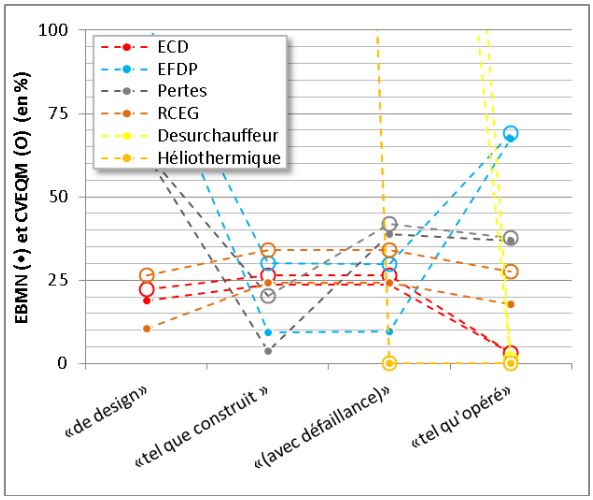

Figure 9: Évolution de l'EBMN et du CVEQM suivant le niveau de raffinement de la calibration pour les résultats de production et consommation énergétique des composants du système de production d'ECD

À la lumière des résultats présentés à la Figure 8, il est possible d'augmenter significativement la qualité des résultats de simulation, et ce, avec un minimum d'investissement en terme de coût et de temps. En effet, un gain en précision des résultats est remarquable pour chacun des niveaux de raffinement, en plus d'obtenir pour l'EBMN et le CVEQM des valeurs près de leur limite théorique associée à l'incertitude de mesure. Dans ce cas-ci, il est donc possible d'obtenir de bons résultats en ayant seulement modifié la simulation de design suivant les données des fiches signalétiques des appareils du système de production d'ECD et en ajoutant les paramètres d'entrée liées au profil de consommation du système (débit d'ECD, température de l'aqueduc et température ambiante) mesuré sur le site.

Il est intéressant de noter que les résultats de simulation pour la consommation électrique du chauffe-eau semblent être meilleurs pour la simulation « tel que construit (avec défaillance) ». Ceci est principalement dû à une combinaison de facteurs (température ambiante, température aqueduc, profil de consommation) qui influence positivement le résultat final de la simulation. Il est donc fort probable que, sur une base annuelle, les effets positifs de cette combinaison de facteurs ne puissent être observables.

Les résultats de la Figure 9 montrent que malgré l'augmentation de la qualité des résultats de la consommation électrique globale de la simulation (Figure 8), la qualité des résultats représentant l'apport de chacun des différents composants ne semble pas être significativement affectée par ces niveaux de raffinement de calibration. En effet, à l'exception des éléments (désurchauffeurs, systèmes solaires thermiques) qui ont été éliminés du processus de calibration pour différentes raisons, il n'existe pratiquement aucun effet positif notable sur les RCEG et les pertes (réservoir d'entreposage et tuyauterie). Dans ce cas-

ci, les résultats de simulation offrent un niveau de détail insuffisant afin de suivre adéquatement la performance de chacun sous système. La calibration devra nécessairement faire l'objet d'un processus beaucoup plus complexe où chacun des composants est calibré de manière indépendante.

Il est à noter sur la Figure 9 que le gain apparent en précision des résultats pour les pertes de système d'ECD pour la simulation calibrée « tel que construit » provient du fait que les pertes des systèmes solaires thermiques sont prises en compte, ce qui en réalité est erroné puisque ces systèmes étant hors d'état de marche les pertes de ceux-ci sont pratiquement nulles.

7 Conclusions

Cet article permet tout d'abord de mettre en évidence l'importance du plan de monitoring dans l'optimisation des coûts et de l'efficacité de traitement de l'information pour un projet de monitoring d'envergure, et plus particulièrement, lorsque plusieurs intervenants sont impliqués. Par la suite, l'audit énergétique du Triplex Abondance met en perspective le fait que l'atteinte des objectifs de consommation énergétique nette nulle repose au minimum sur le bon fonctionnement des systèmes mécaniques mis en place. Il est donc primordial d'avoir un outil de suivi de performance du système et de diagnostic des pannes. Pour le moment, l'arrêt de système solaire thermique, la défaillance du contrôleur de la pompe de recirculation d'ECD, ainsi que l'arrêt d'une portion du système solaire PV ne permettent pas l'atteinte de cet objectif d'un bilan énergétique net nul pour le Triplex Abondance. Finalement, il a été démontré qu'il est relativement simple d'obtenir des résultats de simulation de qualité pour la consommation totale du système de production d'ECD en n'utilisant que les données des fiches signalétiques des équipements et des mesures associées au profil de consommation de l'ECD. Par contre, pour obtenir des résultats de qualité au niveau de chacun des composants, le processus de calibration nécessite beaucoup plus de ressources en termes d'équipements et de temps d'analyse.

8 Références

ASHRAE Guideline 2-2010, *Engineering analysis of experimental data*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2010.

ASHRAE Guideline 14-2002. *Measurement of energy and demand savings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., Atlanta; 2002

Fairey, P. & Parker, D., A Review of Hot Water Draw Profiles Used in Performance Analysis of Residential Domestic Hot Water Systems, Florida Solar Energy Center, 2004.

Marcoux, C., & Dumas, C. (2004), Température de l'eau dans l'aqueduc de Montréal, tiré de http://www.ashrae-mtl.org/text_pdf/aqueduc_94-04.zip

Picard, D., Bernier, M. & Charneux, R., *Domestic hot water production in a net zero energy triplex in Montreal*, 2nd Canadian Solar Building Conference, Calgary, 2007.

SCHL (2010), *Initiative de démonstration de maisons durables EQuilibrium*^{MC}, tiré de http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/prin/dedu/maeq/index.cfm

Ulrike, J. & Klaus V. *DHWcalc: Program to generate domestic hot water profiles with statistical means for user defined conditions*, ISES Solar World Congress, Orlando, 2005.