LA MODÉLISATION DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES DE BÂTIMENT UN OUTIL DE DÉCISION

Laurier Nichols, ing.
Dessau-Soprin
Montréal (Québec)
Laurier.nichols@dessausoprin.com

1. RÉSUMÉ

En première partie, ce document présente globalement les résultats d'une étude préliminaire qui a permis d'intéresser les administrateurs d'une commission scolaire d'opter pour un concept de mécanique offrant une meilleure performance énergétique. La modélisation du fonctionnement du bâtiment a fourni des indications crédibles en comparant les coûts globaux annuels pour diverses sources d'énergie en utilisant les différents tarifs en vigueur au moment de l'étude. Cette démarche a été à l'origine du processus décisionnel qui a conduit au choix d'un système de chauffage avec thermopompes géothermiques.

Les systèmes de chauffage, ventilation, réfrigération et de conditionnement de l'air (CVCA et R) ont une incidence majeure sur la consommation énergétique d'un bâtiment. Non seulement faut-il choisir un équipement qui permettra de rencontrer la charge maximale de conception, mais il faut s'assurer que l'équipement pourra conserver une efficacité intéressante à charge partielle. La charge usuelle d'un bâtiment, que ce soit en chauffage ou en refroidissement, se situe généralement en deçà de 50 % de la charge maximale. On comprend l'importance de choisir des équipements qui seront performants lorsqu'ils seront sollicités à un niveau de charge bien en deçà de leur puissance maximale. La présentation permettra de visualiser les résultats d'une modification de la courbe de performance pour un projet où on a eu recours à des thermopompes géothermiques combinées à des serpentins électriques de chauffage.

La modélisation des équipements CVCA nécessite de bien comprendre comment on détermine la puissance de l'appareillage en mode de climatisation ou en mode de chauffage. Les données d'entrée de certains logiciels utilisent des valeurs courantes qu'il faut connaître pour être en mesure de valider les résultats obtenus. On présentera quelles sont les conséquences d'utiliser des données inappropriées pour établir la performance d'un système utilisant un réseau de thermopompes géothermiques. Un mauvais choix des données d'entrée peut avoir un impact considérable sur les résultats d'analyse et en fausser totalement les conclusions.

Les calculs des différentes modélisations qui seront présentées ont été effectués à l'aide du logiciel DOE-2.1E.

2. INTRODUCTION

La conception des systèmes architecturaux et des systèmes énergétiques des bâtiments fait appel à une foule de connaissances de nature si diverse qu'il est très difficile d'adopter une méthodologie uniformisée sans devoir l'adapter au contexte particulier de chaque nouveau bâtiment. Par chance, au cours des années et surtout suite à l'avènement de l'ordinateur, une multitude d'outils d'aide à la conception ont été développés pour faciliter la tâche des concepteurs. Il est donc possible de compléter une étude particulière pour chaque bâtiment sans devoir y consacrer un effort extraordinaire.

Malheureusement, on constate que les outils d'analyse énergétique sont encore peu utilisés. Une évaluation d'un représentant technique d'un important fournisseur d'équipements de climatisation mentionnait qu'en dix ans de représentation, sur un nombre de plus de 1 000 projets, il a eu connaissance qu'une analyse énergétique par modélisation complète du bâtiment avait été effectuée sur moins de dix (10) bâtiments. Il mentionne aussi que pour plus 30 % de ces 1 000 bâtiments le calcul des charges de climatisation et de chauffage avait été effectué par analyse sommaire à l'aide de tableaux et formules empiriques. Selon son opinion, le calcul des charges à l'aide des outils informatiques ne se réalise que pour un pourcentage de 40 à 50 % des projets. Les logiciels de calcul des fournisseurs d'équipement ne sont utilisés que pour 35 % des concepts de nouveaux bâtiments.

Dans la province de Québec, il existe plus de 50 firmes importantes de génie conseil qui offrent des services de conception des systèmes énergétiques de bâtiment. On considère comme importante une firme qui compte plus de 40 employés à plein temps. On peut prétendre qu'il y a au total plus de 250 firmes de consultants en mécanique et électricité de bâtiment.

De ce nombre, très peu de firmes utilisent une modélisation complète pour orienter la conception d'un nouveau bâtiment. Pourtant, ce sont ces consultants qui ont le plus d'impact sur le choix de l'appareillage qui aura une incidence majeure sur sa consommation d'énergie. Il est difficile d'évaluer le pourcentage exact des firmes qui utilisent l'analyse énergétique par modélisation. Il est fort probable que cette technique n'est utilisée que pour moins de 10 % des nouveaux bâtiments.

Ce document démontre les avantages incontournables de la modélisation du fonctionnement d'un édifice pour en évaluer sa performance énergétique. Il présente, en première partie, l'analyse d'un petit bâtiment qui a fait l'objet d'une analyse de la consommation énergétique par modélisation de son comportement à l'aide du logiciel DOE-2.1.

On y présente les informations les plus pertinentes d'une première analyse qui a été l'élément déclencheur pour convaincre les responsables de la construction de ce bâtiment qu'il était opportun de concevoir des systèmes architecturaux et des systèmes mécaniques et électriques qui permettraient d'en abaisser la facture énergétique.

On présente ensuite les difficultés rencontrées lors de la modélisation requise dans le cadre du programme d'encouragement pour les bâtiment efficaces (PEBC). On discutera de la méthodologie utilisée pour la modélisation d'équipements particuliers.

3. DESCRIPTION DU BÂTIMENT

L'école primaire de Ste-Anne-de-Bellevue est propriété de la commission scolaire Marguerite-Bourgeoys située dans la banlieue ouest de Montréal. L'école comprend deux étages et un gymnase. Le premier étage est occupé par six salles de cours, une salle polyvalente, cuisinette, vestiaires, bureaux administratifs et une maternelle. Le deuxième étage est occupé par six salles de cours, une bibliothèque, une salle informatique de même qu'une salle mécanique et une salle électrique. Le bâtiment couvre une surface totale d'environ 2 900 m² (31 000 pieds carrés). L'implantation au sol est de 1 930 m² (21 000 pieds carrés). Les informations plus détaillées sont les suivantes :

4. DONNÉES GÉNÉRALES

Type de bâtiment : École primaire
Lieu : Ste-Anne-de-Bellevue, Québec

Occupation : 435 personnes ou 1 personne/0,66 m² (72 pi.²)

Horaire des occupants :
Selon l'occupation probable d'un bâtiment scolaire (école primaire)

Conditions ambiantes :
Température (calcul de charge) : 23,9 °C (75^{O} F)
Point de consigne de chauffage : 23,3 °C (74^{O} F)
Point de consigne de la climatisation :24,4 °C (76^{O} F)

Données architecturales :
Superficie totale :
2 908 m² (31 309 pi.²) total qui comprend :
1 930 m² (20 778 pi.²) au rez-de-chaussée
978 m² (10 531 pi.^{2}) pour l'étage

Construction des fenêtres : fenêtres doubles, tintées
valeur U : 3,17 SI (0,56 I-P)
valeur R : 0,31 RSI (1,79 I-P)
coefficient d'ombrage: 0,58
coefficient de gain solaire:0,50
fenestration : 33 %

Construction des murs extérieurs :
Hauteur : plancher à plancher : 3,84 m (12' 6")
Valeur U totale : 0,45 SI (0,08 I-P)
Valeur R totale : 2,2 RSI (12,5 I-P)
Le taux d'infiltration d'air frais a fait l'objet d'une analyse spécifique

Construction du toit :
Valeur U totale : 0,381SI (0,067 I-P)
Valeur R totale : 2,62 RSI (14,9 I-P)

Éclairage :
Type d'éclairage : fluorescent
Charge : 16,14 W/m² (1,5 W/pi.²)

Horaire d'usage de l'éclairage :
Selon l'usage d'un bâtiment scolaire (école primaire)

Équipement électrique :
Type d'équipement : ordinateurs, copieurs, projecteurs

Charge : 5,38 W/m² (0,5 W/pi.²) (classes, bureaux administratifs)
1,62 W/m² (0,15 W/pi.²) (gymnase)
Horaire d'usage de l'équipement :
Selon l'usage d'un bâtiment scolaire (école primaire)

Les systèmes CVCA :
Deux systèmes CVAC différents ont été étudiés. Un système de chauffage en périmètre avec convecteurs à l'eau chaude a été comparé à un système de chauffage par plinthes électriques. Le modèle de base assure une entrée d'air frais de 10 l/s (20 pcm) par personne.

L'horaire d'air frais est le suivant :
Selon l'occupation probable : 8h00 – 18h00 (5 jours par semaine)

Les systèmes de chauffage :
Le système de chauffage comprend une chaudière au gaz naturel. Le modèle de base assure une efficacité de la chaudière de 80 %. Certaines modifications ont été apportées au modèle de base pour évaluer différents taux d'air frais et différents taux d'humidité. Les résultats les plus intéressants ont été obtenus avec la comparaison entre le modèle de base au gaz et un système de chauffage de type électrique. On retrouve aussi des informations sur la différence de coût entre un système de chauffage au gaz utilisant deux chaudières au lieu d'une seule.

5. ANALYSE PRÉLIMINAIRE

La préoccupation des administrateurs d'un parc immobilier lors de la construction d'un nouveau bâtiment sont :

- Bâtiment qui répondra aux besoins des usagers (fonctionnel et esthétique agréable)
- Coût initial qui respecte les budgets (même s'ils sont souvent trop faibles)
- Construction qui respectera les échéanciers
- Composantes qui seront durables et faciles à entretenir
- Coûts énergétiques faibles

Il demeure de la responsabilité du concepteur de faire valoir les avantages d'un concept par rapport à un autre. Pour la province de Québec, la démonstration des différences dans le coût des différentes sources d'énergie permet au concepteur d'amorcer chez les administrateurs une réflexion très captivante.

Ainsi, pour le projet d'école de la Commission scolaire Marguerite–Bourgeoys, une modélisation sommaire du bâtiment a fourni une information très crédible sur les différents concepts possibles pour permettre l'usage des différentes sources usuelles d'énergie. Les différentes options qui ont été analysées sont les suivantes (voir aussi Tableau-1) :

- Chauffage au gaz naturel avec radiation en périmètre, apport d'air neuf (10 l/s par personne), humidification à 30 % et efficacité nominale de chaudière de 80 %.

- Chauffage au gaz naturel avec radiation en périmètre, apport d'air neuf (7,5 l/s par personne), humidification à 30 % et efficacité nominale de chaudière de 80 %.

- Chauffage au gaz naturel avec radiation en périmètre, apport d'air neuf (0 l/s par personne), humidification à 30 % et efficacité nominale de chaudière de 80 %.

- Chauffage au gaz naturel avec radiation en périmètre, apport d'air neuf (10 l/s par personne), humidification à 0 % et efficacité nominale de chaudière de 80 %.

- Chauffage à l'électricité avec plinthes en périmètre, apport d'air neuf (10 l/s par personne) et humidification à 30 %.

- Chauffage au gaz naturel avec radiation en périmètre, apport d'air neuf (10 l/s par personne), humidification à 30 % et deux (2) chaudières avec efficacité nominale de 80 %.

Cette étude permet de saisir l'importance d'une analyse du fonctionnement d'un bâtiment par modélisation. Strictement pour le choix de la source énergétique pour le chauffage, tout dépendant de l'option choisie, le coût global résultant de la consommation énergétique peut faire l'objet d'une augmentation de l'ordre de 67 % (voir tableau #1). Le futur propriétaire d'un bâtiment est certainement intéressé à connaître les conséquences des diverses options possibles et bien entendu de les connaître avant la construction. Il est donc nécessaire de faire une modélisation théorique.

Même si le coût initial de construction d'une installation de chauffage à l'électricité est moins élevé, les résultats de cette étude démontrent que le coût énergétique d'une telle option est très dispendieux en comparaison du coût global d'énergie de chacune des différentes options utilisant le chauffage au gaz naturel.

Deux phénomènes sont à l'origine de cette importante différence. D'abord, les caractéristiques du tarif d'Hydro-Québec sont telles qu'un client qui consomme l'électricité pour des fins de chauffage aura à payer une surprime pour l'écart entre la puissance d'été et la puissance d'hiver. Puisqu'une école est normalement fermée pour la période estivale, il en résultera un écart important entre la puissance appelée en hiver et la puissance appelée en été. Les résultats globaux feront en sorte que le coût moyen par kWh sera relativement élevé (voir tableau #2). Une autre caractéristique du tarif d'Hydro-Québec tient compte de l'usage de la puissance raccordée. Le cas d'une école primaire est typique. Il n'y a aura presque pas d'usage de la puissance appelée en dehors des périodes d'occupation, donc le coût moyen par kWh sera plus élevé que pour une option utilisant d'autres sources d'énergie.

Cette simple démonstration illustre l'importance de faire l'analyse du fonctionnement d'un nouveau bâtiment en utilisant les techniques modernes de modélisation. Une telle analyse peut être l'élément initial d'une démarche qui fera en sorte qu'on utilisera le modèle pour non seulement valider le choix de la meilleure source d'énergie mais aussi pour optimiser le choix de l'appareillage électromécanique.

6. CHOIX FINAL DE LA SOURCE ÉNERGÉTIQUE POUR L'ÉCOLE DE SAINTE-ANNE-DE-BELLEVUE

Il est intéressant de mentionner que l'électricité a été retenue comme choix final de la source d'énergie pour le chauffage de l'école. Toutefois, l'option choisie fait appel à une technologie de chauffage qui est beaucoup plus efficace que les différentes options au gaz naturel. Les concepteurs ont opté pour une installation de chauffage de type géothermique. De plus, pour minimiser l'impact du chauffage de l'air de ventilation sur la puissance appelée en hiver, on a prévu l'utilisation d'un récupérateur de la chaleur contenue dans le débit d'air évacué. La chaleur récupérée est utilisée pour le préchauffage de l'air de ventilation.

7. DESCRIPTION GÉNÉRALE DES SYSTÈMES ÉLECTROMÉCANIQUES DE L'ÉCOLE

L'école est munie de différents systèmes CVAC qui combinent la géothermie avec un système de thermopompes et un système conventionnel d'apport d'air frais avec récupérateur d'énergie (roue thermique). Dans le but de limiter les coûts d'immobilisation, la sélection des thermopompes a été effectuée en considérant qu'une partie de la charge de chauffage serait assurée par des serpentins de chauffage de type électrique.

8. SYSTÈME D'AIR FRAIS

Pendant les heures d'occupation, le système fourni un débit constant d'air frais de 2 618 l/s (7 670 cfm). Un récupérateur de chaleur (roue thermique) et un serpentin électrique (85 kW) assurent le chauffage de l'air frais à 18,3º C (65º F). La roue thermique récupère la chaleur avec une efficacité moyenne de 60 %. L'air frais est distribué dans l'entreplafond par l'intermédiaire d'une gaine d'alimentation qui apporte la quantité d'air neuf requis à chaque thermopompe.

9. BOUCLE D'EAU SOUTERRAINE ET BOUCLE DU RÉSEAU DES THERMOPOMPES

Le système géothermique fournit de la chaleur à l'édifice à partir d'une boucle ouverte qui puise l'eau souterraine, alimente un échangeur de chaleur et réinjecte l'eau dans le sol. À l'intérieur du bâtiment, une boucle fermée circule un mélange eau/glycol (5 % poids). Cette seconde boucle est utilisée comme circuit d'échange pour les thermopompes.

Le système de géothermie à boucle ouverte puise l'eau à l'aide d'une pompe submersible dans un puits souterrain. Pour des considérations économiques et en raison de la taille réduite du système, il a été décidé d'utiliser un débit fixe de 6,3 l/s (100 gpm). Suite à une étude de caractérisation de la disponibilité en eau souterraine, le débit de conception peut être maintenu et la température de l'eau souterraine demeure constante à 7,2 °C (45 °F). L'eau ainsi puisée transmet sa chaleur à la boucle interne par l'intermédiaire d'un échangeur de type à plaques. La température de la boucle interne peut être réchauffée par la boucle externe pour atteindre une température maximale de conception de 6,1°C (43 °F). La température du retour d'eau à l'échangeur de chaleur a été fixée à 0 °C (32 °F) pour retirer le maximum de chaleur de la boucle souterraine tout en évitant le danger de gel de l'échangeur. La température de l'eau de retour au sol devrait être de l'ordre de 1,0 °C (33,8 °F).

La boucle interne est utilisée comme source de chaleur pour l'ensemble des thermopompes. Les thermopompes reçoivent une solution d'eau avec un léger additif de glycol à une température de 6,1 °C (43 °F). Lors d'un fonctionnement en plein régime de chauffage, chaque thermopompe peut rejeter l'eau du circuit primaire à une température de 0 °C (32 °F).

Pour les conditions d'été, le bâtiment a été conçu avec refroidissement partiel des locaux. Les locaux de la bibliothèque, la classe d'informatique et les locaux administratifs sont climatisés. Le concept de base ne prévoit pas que les thermopompes des autres locaux puissent fonctionner en mode climatisation.

En été, la boucle interne du réseau des thermopompes rejette sa chaleur dans la boucle géothermique en utilisant l'échangeur de chaleur. Le système fonctionne alors en mode inversé. La chaleur est d'abord retirée des locaux pour être ensuite rejetée dans la boucle interne. Chaque thermopompe (en mode climatisation) sera alors alimentée par la solution de la boucle interne à une température de 8,3 °C (47 °F). Le rejet de chaleur rehaussera la

température de la solution eau/glycol jusqu'à un maximum de 14,4 °C (58 °F). La boucle interne sera alors refroidie par la boucle externe par l'intermédiaire de l'échangeur de chaleur. L'eau souterraine sera alimentée à une température de 7,2 °C (45 °F) pour être réchauffée à une température de 13,3 °C (56 °F).

10. RÉSEAU DES THERMOPOMPES

L'école est chauffée et refroidie partiellement avec un système de thermopompes sur une boucle fermée. Il y a un total de vingt (20) thermopompes de différentes capacités distribuées à travers l'édifice pour fournir le chauffage pour chaque zone. Le chauffage des pièces est d'abord fourni par chaque thermopompe. Lorsque la demande de chauffage dépasse la capacité de la thermopompe, un serpentin de réchauffage permet d'assurer un chauffage d'appoint pour maintenir le local à son point de consigne 22,2°C (72 °F). Chaque thermopompe a fait l'objet d'une sélection pour fournir 70 % de la puissance de chauffage calculée pour chaque zone. Un serpentin électrique permet de combler la balance du 30 % pour éviter tout abaissement de température durant les périodes de froid intense.

11. SYSTÈME DE CONTRÔLE CENTRALISÉ

Tout l'appareillage CVCA sera contrôlé par un système centralisé de régulation et de gestion de l'énergie. Le système permettra l'arrêt des composantes CVCA en dehors des périodes d'occupation. Différentes stratégies de gestion efficace de l'énergie pourront être implantées de façon à optimiser les performances des systèmes du bâtiment et en diminuer les besoins énergétiques.

12. SYSTÈME D'ÉCLAIRAGE

Les systèmes d'éclairage utilisent les appareils à rendement élevé qui sont actuellement disponible sur le marché. La majorité de l'éclairage est assuré par des appareils de type fluorescent avec tube de type T-8 et ballast électronique. Un système de contrôle permet une gestion efficace de l'éclairage pour éviter toute sur-utilisation en période non-occupée.

13. MODÉLISATION DU SYSTÈME PROPOSÉ

Le logiciel EE4 1.30 n'offre pas la possibilité de reproduire fidèlement le concept et les modes de fonctionnement qui ont été privilégiés pour ce bâtiment. Pour permettre de bien représenter le fonctionnement des systèmes CVCA, il a été nécessaire de modifier la modélisation du bâtiment proposé en utilisant le fichier d'entrée DOE-2.1E (généré par EE4).

Dans un premier temps, on a modélisé le bâtiment en utilisant le logiciel EE4, ensuite une nouvelle simulation a été effectuée en utilisant le logiciel DOE-2.1E et le fichier météorologique Montreal.bin (format CWEC – le même fichier que celui utilisé par EE4).

14. EFFET COMBINÉ DE L'ÉNERGIE REQUISE PAR LES THERMOPOMPES ET L'ÉNERGIE REQUISE POUR LES SERPENTINS ÉLECTRIQUES

Tel que mentionné précédemment, on a effectué la sélection des thermopompes pour assumer 70 % de la charge de chauffage de pointe. La balance du 30 % de chauffage de pointe doit être assurée par des serpentins électriques installés sur la conduite d'air à la sortie de chaque thermopompe.

Étant donné que ces serpentins sont inactifs pendant la majorité de l'année, il serait très pénalisant de modifier le COP de chauffage des thermopompes pour inclure l'alimentation énergétique des serpentins et ainsi diminuer la performance énergétique des thermopompes sur une base annuelle.

Il est évident qu'on doit tenir compte de l'alimentation électrique des serpentins par l'addition de leur puissance respective à l'alimentation électrique des thermopompes. Toutefois, cette addition ne doit être considérée que pour la courte période de froid intense (environ 200 heures par année dans la région de Montréal).

Une simple correction du COP en divisant la puissance de chauffage combinée du serpentin et de la thermopompe par le total combiné de leur alimentation électrique respective serait très pénalisante dans la simulation EE4. On a donc opté pour une méthode alternative plus représentative du fonctionnement simultané de ces deux appareils de chauffage.

Il a été possible de corriger le besoin énergétique de base de l'ensemble tout en modifiant le facteur de correction de l'énergie d'alimentation des appareils combiné en fonction d'une charge partielle de chauffage. Il s'agit du facteur EIR et de la courbe applicable aux thermopompes HEAT-EIR-FPLR.

15. MODIFICATION DU COP DES THERMOPOMPES

Le logiciel DOE-2.1 requiert de déterminer la valeur d'un facteur qui représente l'alimentation en énergie d'un appareil mécanique au moment où il fonctionne à pleine charge (Energy Input Ratio, EIR). Ce facteur est une fraction qui est obtenue par la division de l'énergie fournie à l'appareil par la valeur de la puissance à pleine charge. Il s'agit en fait de la valeur inverse du COP. Ce facteur est relativement simple à calculer. Dans le cas de l'usage combiné d'une thermopompe et d'un serpentin électrique, on doit établir le besoin total d'énergie des deux appareils lorsque la demande de chauffage atteint la puissance combinée des deux appareils. Le EIR est un facteur obtenu par la division de l'alimentation combiné des deux appareils par leur puissance combinée de chauffage à pleine charge. On doit mentionner que la puissance combinée de la thermopompe et du serpentin doit être donnée pour une température de la boucle interne de 21,1 °C (70 °F). Il y a une erreur dans le manuel guide du logiciel EE4 à ce sujet. On ne doit pas fournir la puissance de la thermopompe à 0 °C (32 °F) mais bien à 21,1°C (70 °F).

Dans le cas de la modélisation de ce projet, il apparaissait plus approprié de modifier la courbe de correction de puissance (HEAT-CAP-FT) en fonction de la température de la boucle interne plutôt que de donner une puissance initiale peu représentative de la puissance combinée de la thermopompe et du serpentin électrique. Puisque la température de pièce ne change pas beaucoup et que la température de la boucle interne doit être maintenue à 6.1 °C (43 °F), l'équation de correction de la puissance nominale a été modifiée pour établir une valeur constante au facteur de correction (HEAT-CAP-FT). Dans ce cas, il suffit d'utiliser le facteur (1) dans cette équation de correction.

16. MODIFICATION DU FACTEUR DE CORRECTION DE L'ÉNERGIE FOURNIE À L'APPAREIL EN FONCTION DE LA CHARGE DE CHAUFFAGE

Tel que mentionné précédemment, nous avons modifié le EIR des thermopompes pour tenir compte du fonctionnement des serpentins électriques d'appoint lors des périodes de froid intense. Il importe de préciser que le fonctionnement des serpentins n'est requis que pour de très brèves périodes. Étant donné que le système central d'air neuf alimente l'air à une température de 18,3 °C (65 °F), ce mode de fonctionnement crée une charge de chauffage pour les thermopompes. Toutefois, l'apport d'air frais n'est requis qu'en période de jour au moment où la température extérieure s'élève en raison de l'apport de l'énergie solaire.

Il en résulte que l'occurrence d'une charge de chauffage maximale qui requiert le fonctionnement combiné de la thermopompe en mode chauffage à pleine puissance et le fonctionnement du serpentin de chauffage à pleine puissance est très faible. On réalise que le fonctionnement simultané du serpentin de chauffage et de la thermopompe sera possible que pour de très courte période occupée alors que la température extérieure s'approche du minimum annuel.

Il est donc absolument essentiel de modifier la valeur de l'énergie alimentée à l'appareil en fonction de la puissance de chauffage réellement fournie. En bref, on doit obtenir une représentation la plus exacte possible du fonctionnement à charge partielle. DOE-2.1 offre la possibilité de modifier le facteur d'alimentation en énergie en fonction de la charge. Il s'agit d'une équation linéaire ou quadratique qui réajuste l'énergie fournie à l'appareil (EIR) en fonction du facteur de charge. Ce facteur de charge est en fait le rapport de la charge de chauffage qui doit être fourni par l'appareil par rapport à la puissance maximale de chauffage. Il s'agit donc de la courbe de correction de l'énergie d'alimentation en fonction du rapport de charge de l'appareil. Le logiciel DOE-2.1 assigne un code de commande qui appelle la courbe de correction de l'énergie alimentée à charge partielle. Cette courbe est appelée par le terme HEAT-EIR-FPLR.

Dans le cas d'un fonctionnement combiné d'une thermopompe avec un serpentin électrique il s'agit d'abord d'établir une courbe de l'énergie totale requise à l'ensemble au moment où il fonctionne à charge partielle. Le chiffrier Excel permet de trouver facilement les différents points représentatifs de cette courbe et d'y obtenir les paramètres de l'équation quadratique. Le tableau #3 donne un exemple de la méthodologie suivie pour obtenir la courbe désirée. Le tableau #4 et la figure #1 donnent une comparaison des valeurs calculées par rapport à la courbe par défaut utilisée normalement par DOE-2.1.

17. CONCLUSION

La modélisation du fonctionnement simultané d'une thermopompe et d'un serpentin électrique demande une attention particulière. Les résultat de cette étude démontre q'une économie de 3 000 $/année est réalisable par une modélisation plus précise des équipements de CVCA.

EIR combiné (par défaut): 44 943 $ par année
EIR combiné corrigé : 41 899 $ par année

Tableau #1 : Comparaison du coût d'énergie des différentes options de chauffage

Gaz naturel avec 10 l/s-pers. (30 % HR)	47 645 $/année
Gaz naturel avec 7.5 l/s-pers. (30 % HR)	44 354 $/année
Gaz naturel avec 0 l/s- pers. (30 % HR)	36 919 $/année
Gaz naturel avec 10 l/s-pers. (sans humidité)	47 227 $/année
Électricité avec 10 l/s-pers. (30 % HR)	79 849 $/année
Gaz naturel avec 2 chaudières 7.5 l/s-pers et 30% HR	44 846 $/année

Tableau #2 Détail du calcul de l'option (tout électrique)

École Ste-Anne-de -Bellevue

Coût de la consommation ***Tarif M***

Tarif M Hydro-Quebec (à compter du 1er mai 1998) (Même tarif au 1er mai 2002)

Calcul du coût Coût moy. 12.38115 c/kWh

	Mois	Demande kW	Consom. kWh	Demande $	Puiss. S. $	Surprime $	Cons.#1 $	Cons.#2 $	Crédit alim. $	Redev. $	Avant Taxes	Taxes $	Total $
31	Jan	395.5	94785	4892	0	1402	0	3526	0	0	9820	1528	11348
28	Fév	410.1	82505	4582	0	1441	0	3069	0	0	9091	1415	10506
31	Mars	385.4	79532	4767	0	1269	0	2959	0	0	8994	1400	10394
30	Avril	227.2	49885	2720	0		0	1856	0	0	4575	712	5287
31	Mai	217.3	35726	2688	0		0	1329	0	0	4017	625	4642
30	Juin	117.2	29264	1403	1195		0	1089	0	0	3686	574	4260
31	Juil	77.9	19999	964	1721		0	744	0	0	3428	533	3961
31	Aout	85	21439	1051	1633		0	798	0	0	3482	542	4023
30	Sept	171.3	32326	2050	547		0	1203	0	0	3800	591	4391
31	Oct	202.9	48397	2510	174		0	1800	0	0	4484	698	5182
30	Nov	250.4	61180	2997	0		0	2276	0	0	5273	821	6094
31	Déc	348.9	89885	4316	0	787	0	3344	0	0	8446	1314	9760
	année		644923	34939	5269	4898	0	23991	0	0	69097	10752	79849

Demande : Coût de l'appel maximale de puissance pour le mois (Coût = kW x 11,97 $ x nombre de jours / 30)

Surprime : Coût pour la surprime en raison d'une puissance (hiver) qui excède 133 % de la puissance souscrite (Coût = kW (excédent) x 12,78 $)

Puiss. S : Coût additionnel résultant d'une puissance souscrite plus élevée que la puissance réelle appelée

Cons.-1 : Coût pour la 2e tranche de consommation (excédent de 210 000 kWh x nombre de jour /30)

Cons.-2 : Coût pour la 1ère tranche de consommation (inférieure à 210 000 kWh x nombre de jour /30)

Crédit alim. : Applicable seulement pour alimentation en haute tension ou mesurage en amont de la transformation par le distributeur

Redev. : Coût pour alimentation électrique par compteur (s'applique seulement pour certains tarifs)

Paramètres du tarif M : Général

						borne inf kWh	borne sup kWh	Cout c/kWh
tarif M	Coût de demande	11.97 $/kW	taxes	15.56 %		0	210000	3.720
	Redevance abon.	0 $/mois	Crédit alim.	0 $/kW		210000	10000000	2.420
	Puissance sousc.	217 kW	Coût de la surprime	12.78 $/kW				

Équations utilisées par DOE-2.1 pour le calcul de l'énergie requise à la thermopompe

Energy = Cap x EIR (Design) x EIR(FPLR)

Energy = Énergie qui doit être fournie à l'unité pour l'heure considérée
Cap = Puissance nominale de chauffage de l'unité (heat output)
EIR (Design) = Fraction de la puissance nominale qui doit être fournie à l'unité à pleine charge (energy input)
EIR(FPLR) = Fraction de l'énergie nominale de pleine charge qui doit être fournie à charge partielle

$EIR(FPLR) = A + (B \times PLR) + (C \times PLR^2)$

A, B, et C = Coefficients de calcul de la fraction de l'énergie nominale selon la charge
PLR = Fraction de la charge pour l'heure considérée par rapport à la pleine charge

Tableau #3 – Évaluation de la courbe (HEAT-EIR-FPLR ou EIR(FPLR))

Charge de chauffage	Facteur de charge	Énergie alimentée thermopompe BTU/hre	Énergie alimentée serpentin BTU/hre	Total de l'énergie à l'ensemble BTU/hre	EIR(FPLR)
5 315	.1	2 501	0	2 501	0.107
10 630	.2	3 888	0	3 888	0.167
15 975	.3	5 250	0	5 250	0.225
21 260	.4	6 610	0	6 610	0.284
26 575	.5	7 993	0	7 993	0.343
31 889	.6	9 721	0	9 721	0.405
37 204	.7	10 919	0	10 919	0.469
42 300	.8	12 441	0	12 441	0.534
47 834	.9	12 441	5 534	17 975	0.772
53 149	1.0	12 441	10 849	23 290	1.00
Puissance de la thermopompe : 42 300 BTU/hre Puissance du serpentin électrique : 10 849 BTU/hre Rapport nominal d'énergie alimentée (EIR) : 0.438					

Tableau #4 – Comparaison pour le HEAT – EIR – FPLR ou EIR(FPLR)
(valeur calculée vs valeur par défaut)

Facteur de charge	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0
Courbe HEAT-EIR-FPLR (valeur par défaut DOE-2.1)	.178	.267	.355	.442	.529	.617	.708	.797	.898	1.0
Courbe HEAT-EIR-FPLR (valeur calculée)	.107	.167	.225	.284	.343	.405	.469	.534	.772	1.0
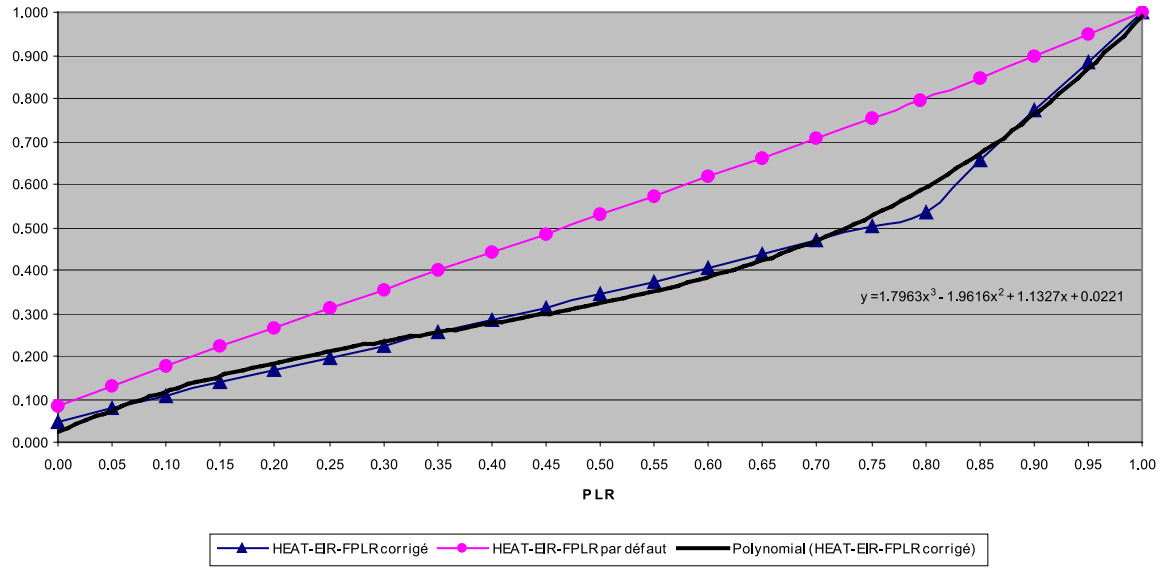
Figure #1