

## CALIBRATION ASSISTÉE DANS LA MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS

Karine Lavigne<sup>1</sup>, Jocelyn Millette<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Technologies de l'Énergie, Institut de Recherche d'Hydro-Québec  
Shawinigan, Québec, Canada

### RÉSUMÉ

L'article décrit un module de calibration assistée pouvant être greffé au logiciel DOE2.1E afin que la simulation représente adéquatement les profils de consommation et d'appel de puissance électriques facturés mensuellement.

Le module implique deux algorithmes. Un algorithme de pré-calibration valide les paramètres à ajuster en se basant sur les différences de profils simulé et facturé. Cette étape permet de limiter le nombre de paramètres à calibrer. La liste de ces paramètres est ensuite transmise à l'algorithme de calibration. Ce dernier utilise la méthode de Levenberg-Marquardt pour identifier les ajustements de paramètres nécessaires pour minimiser l'écart entre les valeurs facturées et simulées.

L'article présente deux cas où les factures sont produites artificiellement. L'algorithme de calibration employé seul permet un ajustement acceptable de la simulation. De plus, l'ajout de la pré-calibration réduit les calculs d'environ 50% tout en présentant des résultats similaires.

### INTRODUCTION

L'utilisation de logiciel de simulation pour l'énergétique des bâtiments est de plus en plus répandue. L'une des applications de ces logiciels est sans aucun doute la justification et la validation de l'implémentation de mesures d'efficacité énergétiques. Toutefois, la plupart de ces logiciels requiert une multitude de données d'entrée et les risques d'erreurs sont importants. Il est donc essentiel de calibrer adéquatement le modèle afin de représenter correctement le bâtiment simulé.

Comme la méthode décrite par Waltz (1992), la plupart des techniques de calibration nécessitent plusieurs audits sur le terrain. Aussi, la calibration est souvent effectuée pour des bâtiments dont la source de chauffage est un combustible fossile. Ainsi, la consommation de chauffage peut être découplée de la consommation de base et de celle en climatisation

[Yoon et Lee, 1999]. Toutefois, comme le mentionne Roberge et coll.(2001), cela est difficile pour le cas des immeubles québécois dont plusieurs ont une source de chauffage électrique et un seul compteur. Ces techniques nécessitent une bonne connaissance du logiciel de simulation ainsi que de l'énergétique du bâtiment, ce que l'utilisateur n'a peut-être pas toujours.

Carroll et Hitchcock (1993) ont présenté une méthode purement mathématique. L'utilisateur doit fournir une liste de paramètres comportant des incertitudes et l'algorithme mathématique calibre le modèle en ajustant les valeurs de ces paramètres. Selon les auteurs, la méthode présente des niveaux de précision, de robustesse et d'efficacité acceptables. Toutefois, comme le mentionne Sun et Reddy (2006), la méthode décrite par Carrol et Hitchcock n'a pas été mise en œuvre avec des logiciels de simulation complexes tels que DOE-2. Ils présentent quant à eux une méthode de calibration analytique qui fait intervenir 4 processus distincts : une analyse de sensibilité, une analyse d'identification, une optimisation et une analyse d'incertitude [Sun et Reddy, 2006]. Bien qu'elle semble concluante, la méthode requiert un grand nombre de simulations et implique donc un temps de calcul non négligeable. Cela peut représenter un obstacle majeur à sa mise en œuvre au sein d'un logiciel de calcul.

La méthode proposée ici vise une calibration mathématique du modèle mais, également, une réduction maximale du nombre de paramètres impliqués afin de réduire la quantité de simulations à effectuer.

### MÉTHODOLOGIE

Le procédé de calibration est effectué à partir des données de consommation et d'appel de puissance maximal mensuelles et n'est pas conçu pour l'ajustement des profils horaires. Il se compose de deux modules : la pré-calibration et la calibration elle-même.

L'utilisateur doit sélectionner les paramètres de simulation à ajuster (ex. propriétés des fenêtres, débit d'air neuf, infiltration, etc.) L'algorithme de pré-calibration peut ensuite être lancé. À partir des

paramètres sélectionnés par l'utilisateur et en comparant les profils mensuels simulé et mesuré, il identifie les paramètres sensibles et propose un « sous-ensemble » de paramètres pour la calibration. Le module de calibration ajuste ensuite la valeur des paramètres afin de minimiser l'écart avec les données mesurées.

Cette section décrit d'abord l'algorithme de calibration et ensuite celui de la pré-calibration.

### Calibration

La calibration requiert les énergies et puissances simulées et mesurées ainsi que le groupe de paramètres à ajuster (déterminés par la pré-calibration) avec la plage d'incertitude associée. Le but est de minimiser la somme des carrés des écarts entre les valeurs de sorties (consommations et puissances) mesurées et simulées :

$$S(\bar{x}) = \sum_{j=1}^m [f_j(\bar{x})]^2 \quad (1)$$

Ou encore

$$S(\bar{x}) = \vec{f}^T \vec{f} \quad (2)$$

Notons que

$$f_j(\bar{x}) = y(j, \bar{x}) - y_j \quad (3)$$

Où  $f_j$  est la  $j$ ème des  $m$  sorties et  $\bar{x}$  est un vecteur de dimension  $n$  représentant les différents paramètres de simulation,  $y(j, \bar{x})$  est la valeur de la sortie  $j$  obtenue grâce à une simulation utilisant l'ensemble des paramètres  $\bar{x}$  et  $y_j$  est la valeur mesurée de la sortie  $j$ .

Le but de l'algorithme est de déterminer pour quelles valeurs de paramètres ( $\bar{x}^*$ ) l'écart entre les valeurs simulées et mesurées est nul :  $\vec{f} = \vec{0}$ .

La méthode de Newton-Rhapon est indiquée pour solutionner ce type de système. Des itérations de point fixe s'écrivent sous la forme suivante [Payre, 2004] :

$$\bar{x}^{k+1} = \bar{x}^k - \hat{J}^{-1}(\bar{x}^k) f(\bar{x}^k) \quad (4)$$

Où la matrice  $\hat{J}(\bar{x})$  est le jacobien de  $f(\bar{x})$ . Les itérations sont généralement mises en œuvre sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \hat{J}(\bar{x}^k) \cdot \vec{\delta}^k &= -f(\bar{x}^k) \\ \bar{x}^{k+1} &= \bar{x}^k + \vec{\delta}^k \end{aligned} \quad (5)$$

Donc, en considérant  $m$  sorties ( $m$  consommations et puissances maximales) et  $n$  paramètres:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_j}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_i \\ \vdots \\ \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_j \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

Le système décrit à l'équation (6) est de taille  $m \times n$ . Pour obtenir une forme pouvant être inversée, chaque côté de l'équation est multiplié par  $\hat{J}^T$  :

$$\hat{J}^T \hat{J} \vec{\delta} = -\hat{J}^T \vec{f} \quad (7)$$

Il s'agit ici de la méthode de Gauss-Newton, une méthode avec convergence quadratique. Cela dit elle est peu robuste. Pour la stabiliser, la méthode de Levenberg-Marquardt a été implémentée. La méthode modifie le système de la façon suivante :

$$(\hat{J}^T \hat{J} + \lambda \hat{D}^2) \vec{\delta} = -\hat{J}^T \vec{f} \quad (8)$$

Où  $\hat{D}$  est une matrice diagonale dont les éléments sont positifs. La méthode de Nash (1990) a été adoptée pour la valeur des éléments diagonaux :

$$D_{ii}^2 = (\hat{J}^T \hat{J})_{ii} + \phi \quad \text{avec} \quad \phi = 1 \quad (9)$$

Pour chaque itération, si  $S(\bar{x} + \vec{\delta}) \geq S(\bar{x})$ , le paramètre  $\lambda$  est augmenté par un facteur *inc* et le calcul est relancé avec le même jacobien. Par contre, si  $S(\bar{x} + \vec{\delta}) < S(\bar{x})$ ,  $\lambda$  diminué par un facteur *dec* et  $\bar{x}$  est remplacé par  $(\bar{x} + \vec{\delta})$ . La méthode combine un amortissement additif et multiplicatif. Le premier permet de naviguer de façon défensive dans une région de l'espace vectoriel des paramètres pour lequel le modèle est fortement non linéaire. En outre, ce type d'amortissement améliore le conditionnement relatif à la norme euclidienne pour la matrice  $\hat{J}^T \hat{J}$ . En conséquence, l'amortissement peut stabiliser le processus au travers des régions de l'espace vectoriel des paramètres où le rang du jacobien serait déficient (entraînant la singularité de la matrice  $\hat{J}^T \hat{J}$ ). L'amortissement additif quant à lui peut aider à solutionner des problèmes disproportionnés, car l'ordre de grandeur des paramètres est respecté [Lampton, 1997]. En accord avec Nash (1990), le facteur *inc* est fixé à 10 et le facteur *dec* est fixé à 0.4. Le système est résolu à l'aide de la décomposition de Choleski.

Le calcul du jacobien demeure l'opération la plus complexe et la plus coûteuse. En effet, les fonctions  $f_j(\bar{x})$  ne sont pas connues. En conséquence, le calcul

des dérivées nécessite des simulations supplémentaires. Une analyse factorielle appliquée à plusieurs modèles de bâtiments a démontré que les interactions entre les différents paramètres de simulation n'avaient pas une influence significative sur les résultats de la simulation. En outre, une variation indépendante de chacun des paramètres a permis de déterminer que les  $y(j, \bar{x})$  pouvaient être corrélés aux valeurs de paramètres par un modèle quadratique. Ainsi, la  $j$ ème sortie est représentée par :

$$y(j, \bar{x}) = (A_1 x_1^2 + B_1 x_1 + C_1) + \dots + (A_i x_i^2 + B_i x_i + C_i) + \dots + (A_n x_n^2 + B_n x_n + C_n) \quad (10)$$

Donc,

$$f_j(\bar{x}) = y_j + (A_1 x_1^2 + B_1 x_1 + C_1) + \dots + (A_i x_i^2 + B_i x_i + C_i) + \dots + (A_n x_n^2 + B_n x_n + C_n) \quad (11)$$

La détermination des coefficients  $A$ ,  $B$  et  $C$  nécessite trois équations. Ainsi, pour chacun des paramètres, pour chacune des sorties, au moins deux simulations supplémentaires sont nécessaires en faisant varier le paramètre concerné. La variation des paramètres est déterminée d'après la plage d'incertitude fournie par l'utilisateur. Les fonctions polynomiales ainsi que leurs dérivées de premier et second ordres sont calculées à l'aide des polynômes de Lagrange. Pour un paramètre  $x_i$ , pour une sortie  $j$ , avec trois points  $[(x_i, y_j)^1, (x_i, y_j)^2, (x_i, y_j)^3]$ , il est possible de définir le polynôme de degré deux suivant :

$$P_2(x_i) = \sum_{k=1}^3 y_j^k L_{n,k}(x_i) \quad (12)$$

Où  $L_{2,k}(x_i) = \frac{\prod_{l=1,3,l \neq k} (x_i - x_i^l)}{\prod_{l=1,3,l \neq k} (x_i^k - x_i^l)}$

Toutefois, pour chacun des paramètres, l'algorithme de calibration utilise cinq points et non trois. En effet, la plage d'incertitude fournit une limite haute (LH) et une limite basse (LB) pour chaque paramètre. La valeur du paramètre dans la simulation initiale est notée (VA). Deux autres valeurs sont utilisées :  $\frac{1}{2}[(LH)+(VA)]$  et  $\frac{1}{2}[(LB)+(VA)]$ . La simulation (VA) est commune à tous les paramètres. Toutefois, il faut effectuer quatre simulations supplémentaires pour chacun des paramètres afin d'obtenir les points nécessaires. Les consommations et les puissances maximales électriques mensuelles sont extraites pour les quatre simulations. Une analyse de sensibilité est effectuée à partir de ces données. La sensibilité d'une sortie  $j$  (une consommation ou une puissance) vis-à-vis un paramètre  $i$  est donnée par :

$$SC(y_j(\bar{x}))_i = \frac{\Delta y_j(\bar{x})}{y_j(\bar{x})} \frac{x_i}{\Delta x_i} \quad (12)$$

Si la sensibilité maximale associée à un paramètre est inférieure à un certain seuil pour l'ensemble des  $m$  sorties, il est écarté afin d'assurer la stabilité de la routine de calcul. Pour les autres paramètres, quatre fonctions quadratiques sont alors calculées à partir de cinq points :

- Courbe 1 : (LH), (VA), (LB)
- Courbe 2 :  $\frac{1}{2}[(LH)+(VA)]$ , (VA),  $\frac{1}{2}[(LB)+(VA)]$
- Courbe 3 : (LH),  $\frac{1}{2}[(LH)+(VA)]$ , (VA)
- Courbe 4 : (LB),  $\frac{1}{2}[(LB)+(VA)]$ , (VA)

Les fonctions ainsi que les dérivées premières et secondes sont évaluées au point  $(\bar{x}_0)$  (ensemble initial des paramètres de simulation).

En conséquence, la valeur de  $\bar{f}$  pour l'ensemble initial des paramètres  $(\bar{x}_0)$  est connue. Toutefois, si on cherche à évaluer la fonction à un point  $(\bar{x})$ , il est possible d'écrire une série d'expansion de Taylor pour la fonction  $f_j(\bar{x})$  autour d'un point  $\bar{x}_0$  :

$$f_j(\bar{x}) = f_j(\bar{x}_0) + \Delta \bar{x}^T \frac{\partial f_j(\bar{x}_0)}{\partial \bar{x}} + \frac{1}{2} \Delta \bar{x}^T \hat{H} \Delta \bar{x} + O(\|\Delta \bar{x}\|^3) \quad (13)$$

$$\Delta \bar{x} = \bar{x} - \bar{x}_0$$

Où  $O(\|\Delta \bar{x}\|^3)$  représente l'erreur liée à la troncature des termes d'ordre supérieur et  $\hat{H}$  est la matrice hessienne :

$$\hat{H}_j(\bar{x}_0) = \frac{\partial^2 f_j(\bar{x}_0)}{\partial \bar{x}^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f_j(\bar{x}_0)}{\partial x_1^2} & \dots & \frac{\partial^2 f_j(\bar{x}_0)}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f_j(\bar{x}_0)}{\partial x_n \partial x_1} & \dots & \frac{\partial^2 f_j(\bar{x}_0)}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Étant donné que l'analyse factorielle a démontré l'absence d'interaction entre les paramètres, les dérivées croisées sont considérées négligeables et, donc, l'équation (14) peut être réécrite sous la forme :

$$f_j(\bar{x}) = f_j(\bar{x}_0) + \Delta \bar{x}^T \frac{\partial f_j(\bar{x}_0)}{\partial \bar{x}} + \frac{1}{2} \Delta \bar{x}^T \frac{\partial^2 f_j(\bar{x}_0)}{\partial \bar{x}^2} \Delta \bar{x} + O(\|\Delta \bar{x}\|^3) \quad (15)$$

D'après l'équation (3), l'équation (15) devient:

$$f_j(\bar{x}) = f_j(\bar{x}_0) + \Delta\bar{x}^T \frac{\partial(y(j, \bar{x}_0) - y_j)}{\partial\bar{x}} + \frac{1}{2} \Delta\bar{x}^T \frac{\partial^2(y(j, \bar{x}_0) - y_j)}{\partial\bar{x}^2} \Delta\bar{x} + O(|\Delta\bar{x}|^3)$$

Étant donné que  $y_j$  ne varie pas avec la valeur des paramètres :

$$f_j(\bar{x}) \cong f_j(\bar{x}_0) + \Delta\bar{x}^T \frac{\partial y(j, \bar{x}_0)}{\partial\bar{x}} + \frac{1}{2} \Delta\bar{x}^T \frac{\partial^2 y(j, \bar{x}_0)}{\partial\bar{x}^2} \Delta\bar{x} \quad (16)$$

L'équation (16) est donc utilisée pour estimer  $\bar{f}$  dans l'équation (8). Quand au jacobien :

$$\frac{\partial f_j(\bar{x})}{\partial x_i} \cong \frac{\partial y(j, \bar{x}_0)}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 y(j, \bar{x}_0)}{\partial x_i^2} x_i \quad (17)$$

Les approximations effectuées aux équations (16) et (17) permettent d'alléger le calcul du jacobien et, donc, d'accélérer le calcul.

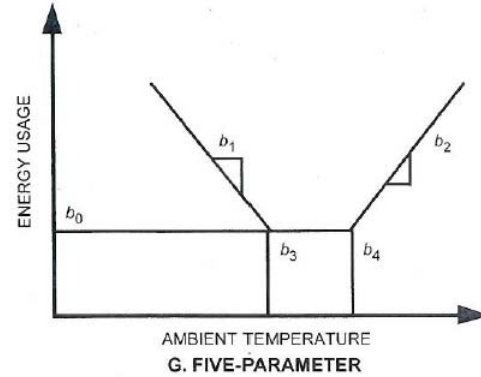
La routine de calcul est lancée trois fois. D'abord en utilisant les dérivées de la courbe 1, puis celles de la courbe 2 et, finalement, celles des courbes 3 et 4 combinées. Dans le dernier cas, au cours du processus itératif, lorsque la valeur d'un paramètre est inférieur à (VA), les dérivées de la courbe 4 sont utilisées. Par contre, si la valeur dépasse (VA), les dérivées de la courbe 3 sont utilisées.

Pour chacun des trois calculs, la somme des carrés des erreurs,  $S(\bar{x})$ , est gardée en mémoire et le calcul présentant la  $S(\bar{x})$  la moins élevée est sélectionné. Les valeurs des paramètres ajustés sont retournées à l'utilisateur.

### Pré-calibration

La routine de pré-calibration permet de valider le choix de l'utilisateur en ce qui concerne les paramètres de simulation à ajuster. La routine permet généralement de limiter le nombre de paramètres et, donc, de réduire le nombre de simulations nécessaires pour l'analyse de sensibilité et le calcul des fonctions (voir description de la calibration) diminuant ainsi de façon appréciable le temps de calcul.

L'algorithme compare d'abord les données de consommation électrique du modèle simulé avec celles obtenues grâce aux relevés de facturation. Pour chacun des ensembles de données, les consommations mensuelles sont corrélées avec les températures moyennes mensuelles. La routine de calcul assume un modèle à cinq variables tel que présenté à la figure ci-dessous :



**Figure 1-Modèle de consommation énergétique à 5 variables [ASHRAE Fundamental, 2001]**

Les cinq variables sont les pentes en chauffage ( $b_1$ ) et en climatisation ( $b_2$ ), les températures d'équilibre en chauffage ( $b_3$ ) et en climatisation ( $b_4$ ) et la puissance de base ( $b_0$ ). L'énergie consommée ( $E$ ) est donc donnée par la fonction suivante :

$$E = b_0 + b_1(b_3 - T)^+ + b_2(b_4 - T)^+ \quad (18)$$

Où  $T$  est la température extérieure moyenne. L'exposant « + » signifie que le terme n'est considéré que si le contenu de la parenthèse est positif.

Ces variables sont déterminées grâce à une fonction d'optimisation basée sur la méthode de Levenberg-Marquardt similaire à la méthode décrite pour la routine de calibration (équations 1 à 9). Le jacobien de  $E$  (voir l'équation 18) est calculé en fonction des différentes données de consommation disponibles. Par exemple, la dérivée de la  $j$ ème consommation par rapport à la pente en chauffage est donnée par :

$$\frac{\partial E_j}{\partial b_1} = (b_3 - T_j)^+$$

On voit donc que si  $T_j > b_3$ , la dérivée sera nulle. Étant donné que les dérivées de  $E$  varient en fonction des températures d'équilibre ( $b_3$  et  $b_4$ ) qui sont elles-mêmes à déterminer, le jacobien devra être recalculé à chaque itération jusqu'à convergence.

À chacune des cinq variables ( $b_0, b_1, b_2, b_3$  et  $b_4$ ) sont associés des paramètres de simulation DOE2.1E. Par exemple, la puissance de base ( $b_0$ ) est principalement affectée par les gains internes, la quantité d'air neuf ainsi que le débit d'air total. L'algorithme de pré-calibration compare les valeurs des variables pour le cas mesuré et le cas simulé. Ainsi, si une différence entre les variables est observée, un sous-groupe de paramètres est immédiatement identifié comme susceptible d'être calibré.

Ensuite, parmi les sous-groupes de paramètres ainsi ciblés, seuls ceux ayant le plus d'impact sur les valeurs de sortie (énergies et puissances mensuelles) sont retenus.

L'impact d'un paramètre dépend de son influence sur les valeurs de sortie. Pour les paramètres d'enveloppe, par exemple, l'influence est déterminée en calculant leur contribution à la pointe de chauffage et de climatisation. Une étude de sensibilité à plus grande échelle effectuée préalablement a déterminé certains seuils à partir desquels les paramètres deviennent influents. En effet, des simulations DOE2.1E ont été réalisées avec un groupe de bâtiments ayant des caractéristiques d'enveloppe, des sources d'énergie et des systèmes de CVCA différents. Différents paramètres ont été variés afin de déterminer l'impact de cette variation sur les valeurs mensuelles de consommation et d'appel de puissance maximal. Par exemple, la sensibilité de la consommation électrique du mois de janvier ( $SC(E_{janvier})_{RSI}$ ) par rapport à la résistance des murs ( $RSI$ ) a été déterminée de la façon suivante :

$$SC(E_{janvier})_{RSI} = \frac{\Delta E_{janvier}}{E_{janvier}} \frac{RSI}{\Delta RSI} \quad (19)$$

Où  $\Delta E_{janvier}$  et  $\Delta RSI$  représentent respectivement la variation enregistrée pour l'énergie du mois de janvier et la variation induite à la valeur d'isolation.

Pour les charges électriques, l'influence est estimée par rapport à la consommation électrique totale. Finalement, en ce qui concerne les systèmes, l'impact des paramètres de simulation dépend du type de système rencontré. Par exemple, dans le logiciel de simulation, certains types de systèmes CVCA ne sont pas affectés par une variation de la température maximale d'alimentation. Il est donc inutile de considérer ce paramètre pour les simulations faisant intervenir des systèmes.

Si un paramètre a été présélectionné grâce aux différences entre les modèles à cinq variables et qu'il

est jugé ayant un impact important sur les valeurs de sortie de la simulation, il sera transmis à la calibration.

## SIMULATION

Afin de valider l'algorithme décrit à la section précédente, les données mesurées ont été créées synthétiquement en induisant volontairement des variations dans les valeurs de certains paramètres d'entrée. Deux bâtiments avec des configurations différentes ont été testés.

### **Description du bâtiment test #1:**

#### *Général :*

- Complexe sportif situé à Montréal
- Eau chaude sanitaire avec chauffe-eau au gaz naturel
- Éclairage extérieur de 5.7 kW avec halogénure métallique
- Éclairage intérieur : 8.07-23.14 W/m<sup>2</sup> (selon les zones)
- Charges aux prises : 0.97-10 W/m<sup>2</sup> (selon les zones)
- Superficie totale : 2613 m<sup>2</sup>
- Surfaces murs ext. : 2184 m<sup>2</sup> (11% de fenestration)
- Consommation annuelle spécifique : 85 kWh/m<sup>2</sup>
- Consommation mensuelle moyenne : 18563 kWh
- Puissance appelée maximale : 431 kW

#### *CVCA centraux :*

- 2 systèmes à volume d'air variable avec refroidissement, chauffage électrique et ventilateur de retour se partagent presque toutes les zones.
- Une unité de toit sans refroidissement, avec serpentins électrique

#### *Occupation de l'espace :*

- Terrain de soccer, vestiaires, cuisine et salles de réunion.
- Plinthes électriques et terminaux-serpentins électriques
- Point de consigne en chauffage : 22°C, point de consigne en chauffage : 24°C
- Abaissement des consignes de températures en période d'inoccupation

### **Description du bâtiment test #2:**

#### *Général :*

- Immeuble à bureaux situé à Montréal
- Eau chaude sanitaire avec chauffe-eau électrique
- Éclairage extérieur de 5.6 kW (sodium haute pression)
- Éclairage intérieur : 9.90-26 W/m<sup>2</sup> (selon les zones)

- Charges aux prises : 2.48-10W/m<sup>2</sup>(selon les zones)
- Superficie totale : 5263 m<sup>2</sup>
- Surfaces murs ext. : 2870 m<sup>2</sup> (11% de fenestration)
- Consommation annuelle spécifique : 75 kWh/m<sup>2</sup>
- Consommation mensuelle moyenne : 32860 kWh
- Puissance appelée maximale : 481 kW

#### CVCA centraux :

- Un système à double conduit à volume d'air variable avec chauffage à l'eau chaude, climatisation et ventilateur de retour
- Un système à volume d'air variable avec chauffage à l'eau chaude, refroidissement et ventilateur de retour

#### Occupation de l'espace :

- Bureaux, salles de conférences, corridors et salle informatique
- Plinthes électriques et terminaux-serpentins à l'eau chaude.
- Abaissement des consignes de températures en période d'inoccupation

#### Centrale thermique

- Chaudière électrique
- Refroidisseur à compresseur rotatif

#### Paramètres de simulation

La liste des paramètres ajustables a été élaborée d'après une analyse de sensibilité effectuée sur une dizaine de bâtiments simulés.

Les paramètres à ajuster sont les suivants :

- Isolation des murs et des toits
- Isolation de la dalle/ sous-sol
- Infiltration
- Superficie des fenêtres
- Gains internes
- Quantité d'air neuf
- Débit total des systèmes CVCA
- Température d'alimentation en chauffage
- Température d'alimentation en climatisation
- Rendement des refroidisseurs
- Densité d'éclairage extérieur

L'incertitude de chacun des paramètres est fixée à  $\pm 20\%$ .

Pour le bâtiment #1, les valeurs mesurées synthétiques sont obtenues en induisant les variations suivantes :

- La résistance des murs est diminuée de 20%
- Les gains internes (éclairage et équipement) sont augmentés de 18%

Pour le bâtiment #2, les variations induites sont les suivantes :

- L'air neuf est augmenté de 12%
- L'efficacité des refroidisseurs est diminuée de 19%

Pour chacun des bâtiments, la calibration est lancée avec et sans routine de pré-calibration.

## RÉSULTATS

Cette section présente les résultats obtenus pour les deux bâtiments présentés à la section précédente.

Pour le bâtiment #1, la variation induite des paramètres entraîne un écart maximal de 7.9 % sur la consommation mensuelle et de 5.0 % sur l'appel de puissance maximal mensuel. Si la pré-calibration est omise, les ajustements suivants sont obtenus pour les paramètres :

**Tableau 1-Ajustement des paramètres pour le bâtiment #1 sans pré-calibration**

Paramètre	Variation (%)	
	Calibrée	Induite
Isolation des murs et des toits	-17.4	-20.0
Isolation de la dalle/ sous-sol	-1.0	0.0
Infiltration	0.4	0.0
Superficie des fenêtres	∅	0.0
Gains internes	17.8	18.0
Quantité d'air neuf	1.2	0.0
Débit total des systèmes CVCA	0.8	0.0
Température d'alimentation en chauffage	∅	0.0
Température d'alimentation en climatisation	1.6	0.0
Rendement des refroidisseurs	2.0	0.0
Densité d'éclairage extérieur	∅	0.0

(Les paramètres portant la mention ∅ ont été retirés avant la calibration, car l'analyse de sensibilité a révélé qu'ils n'avaient pas un impact significatif sur les énergies et les puissances maximales mensuelles.)

Lorsque la pré-calibration est appliquée pour ce cas, elle suggère uniquement l'ajustement des paramètres listés dans le tableau 2.

Le tableau 3 présente la déviation quadratique moyenne (RMSD) mensuelle pour chacun des cas avec :

$$RMSD = \sqrt{\sum_{mois=1}^{12} \left[ \frac{(y_{mois}(\bar{x}) - (y_{mois})_{mesuré})^2}{12} \right]} \quad (20)$$

La consommation moyenne mensuelle et la puissance maximale sont données dans la description générale de chacun des bâtiments.

**Tableau 2-Ajustement des paramètres pour le bâtiment #1 avec pré-calibration**

Paramètre	Variation (%)	
	Calibrée	Induite
Isolation des murs et des toits	-17.5	-20.0
Isolation de la dalle/ sous-sol	-1.2	0.0
Infiltration	0.8	0.0
Gains internes	18.3	18.0
Quantité d'air neuf	1.0	0.0
Débit total des systèmes CVCA	-0.3	0.0

**Tableau 3-Évaluation de la déviation quadratique moyenne (RMSD) pour les énergies et les puissances mensuelles du bâtiment #1**

Simulation	Déviation quadratique moyenne	
	Énergies (kWh)	Puissances (kW)
	Sans calibration	3282.62
Calibration seule	30.14	1.33
Calibration avec pré-calibration	95.96	0.84

Pour le bâtiment #2, la variation induite des paramètres entraîne un écart maximal de 3.7% sur la consommation mensuelle et de 4.4% sur l'appel de puissance maximal mensuel. Si la pré-calibration est omise, les ajustements suivants sont obtenus pour les paramètres :

**Tableau 4-Ajustement des paramètres pour le bâtiment #2 sans pré-calibration**

Paramètre	Variation (%)	
	Calibrée	Induite
Isolation des murs et des toits	-1.5	0.0
Isolation de la dalle/ sous-sol	∅	0.0
Infiltration	∅	0.0
Superficie des fenêtres	-0.2	0.0
Gains internes	0.9	0.0
Quantité d'air neuf	14.1	12.0
Débit total des systèmes CVCA	0.1	0.0
Température d'alimentation en chauffage	∅	0.0
Température d'alimentation en climatisation	0.0	0.0
Rendement des refroidisseurs	-21.1	-19.0
Densité d'éclairage extérieur	∅	0.0

(Les paramètres portant la mention ∅ ont été retirés avant la calibration, car l'analyse de sensibilité a révélé qu'ils n'avaient pas un impact significatif sur les énergies et les puissances maximales mensuelles.)

Lorsque la pré-calibration est appliquée pour ce cas, elle suggère uniquement l'ajustement des paramètres listés dans le tableau 5.

**Tableau 5-Ajustement des paramètres pour le bâtiment #2 avec pré-calibration**

Paramètre	Variation (%)	
	Calibrée	Induite
Gains internes	-1.24	0.0
Quantité d'air neuf	12.0	12.0
Débit total des systèmes CVCA	1.2	0.0
Température d'alimentation en climatisation	0.0	0.0
Efficacité des refroidisseurs	-17.3	-19.0

Le tableau 6 présente la déviation quadratique moyenne (RMSD) mensuelle pour chacun des cas.

**Tableau 6-Évaluation de la déviation quadratique moyenne (RMSD) pour les énergies et les puissances mensuelles du bâtiment #2**

Simulation	Déviation quadratique moyenne	
	Énergies (kWh)	Puissances (kW)
	Sans calibration	2006.27
Calibration seule	445.60	2.23
Calibration avec pré-calibration	352.59	1.20

## ANALYSE

Il est possible de constater aux tableaux 1 et 4 que les résultats de l'ajustement sans pré-calibration s'approchent de la variation réelle induite aux paramètres. On remarque toutefois que l'algorithme varie légèrement certains paramètres qui n'ont, en fait, subi aucune modification. Étant donné que la calibration est lancée avec 11 paramètres d'entrée à ajuster, 44 simulations doivent être lancées afin de calculer les dérivées nécessaires à l'algorithme de calibration.

Toutefois, en faisant appel à la pré-calibration, il est possible de réduire considérablement le nombre de paramètres clef. Par exemple, dans le cas du bâtiment #2, il a été possible de réduire de 55% le nombre de simulations requises pour calibrer le modèle. Il s'agit d'une économie en temps de calcul intéressante étant donné que la durée de calcul varie entre 9s-15.5s par paramètre.

En outre, tel que montré aux tableaux 3 et 5, la calibration avec ou sans pré-calibration arrive à réduire la déviation quadratique moyenne à la fois pour les énergies et les puissances (plus de 80% de réduction). Néanmoins, dans le cas du bâtiment #1, on remarque que la RMSD pour l'énergie consommée est plus importante pour la simulation avec pré-calibration que celle avec la calibration effectuée seule. Ceci peut peut-

être s'expliquer par le fait que, pour le bâtiment #1, la calibration n'a pas réussi à ajuster de façon exacte la valeur d'isolation des murs et des toits. En conséquence, lorsque la calibration est employée seule, les différentes petites variations des autres paramètres atténuent probablement l'erreur causée par la différence entre l'isolation de la simulation représentant les mesures et la valeur d'isolation obtenue par calibration. Par contre, lorsque la pré-calibration est employée, le nombre de paramètres à ajuster diminue et ainsi, l'écart entre les valeurs d'isolation entraîne une variation plus importante pour la consommation électrique.

L'incertitude associée à la valeur des différents paramètres dépend en partie des seuils de tolérance pour l'analyse de sensibilité ainsi que des plages de variation des paramètres. Jusqu'ici les variations des paramètres ont été limitées à  $\pm 20\%$  et seulement quelques bâtiments ont été soumis à la calibration. En conséquence, les variations de consommation et de puissance maximale mensuelles sont relativement faibles ( $\leq 8\%$ ). Des simulations supplémentaires devront être effectuées afin de fixer des plages limites pour les paramètres.

En addition, étant donné que le but de la calibration assistée est d'arriver à reproduire les consommations et les puissances maximales facturées, il sera impératif d'appliquer la même procédure à des bâtiments pour lesquels des données de facturation sont disponibles. Il sera alors possible de valider la robustesse des routines de pré-calibration et de calibration.

En outre, pour l'utilisation de données de facturation réelles, il sera important que les données météorologiques utilisées pour la simulation soit celles de la station météo la plus près du site et qu'elles couvrent la même période que la facturation.

## CONCLUSIONS

Cet article a démontré qu'un algorithme de calibration simple faisant intervenir une routine d'optimisation utilisant la méthode de Levenberg-Marquardt peut calibrer un modèle de bâtiment afin que les profils de consommation et d'appel de puissance maximal électriques mensuels rejoignent ceux d'une facture produite artificiellement.

Des résultats très similaires peuvent être obtenus en effectuant d'abord une pré-calibration. Cet algorithme permet d'assister l'utilisateur dans la sélection des paramètres à calibrer. En analysant les résultats de simulation et les données de facturation, il propose un sous-ensemble de paramètres à ajuster. La pré-

calibration permet ainsi de réduire, parfois jusqu'à la moitié, le nombre de paramètres et, donc, de diminuer considérablement le temps de calcul de l'algorithme de calibration.

Le module de pré-calibration a été adapté pour fonctionner avec DOE2.1E. Il devrait donc être révisé si on souhaite l'appliquer à un autre logiciel de modélisation énergétique.

## RÉFÉRENCES

Ashrae Handbook (2001), *Fundamentals*, IP Edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Carroll, W.L., Hitchcock, R.J. (1993), 'Tuning simulated building description to match actual utility data: methods and implementation', *ASHRAE Transactions: Symposia*, DE-93-14-2

Lampton, M. (1997), 'Damping-undamping strategies for the Levenberg-Marquardt nonlinear least-squares method', *Computers in Physics*, vol. 11, no.1 JAN/FEB 1997

Nash, J.C. (1990), *Compact Numerical Methods for Computers- linear algebra and function minimisation*, 2<sup>nd</sup> edition, Adam Hilger, New York.

Payre, G. (2004), *Note du cours GMC-710 Méthodes numériques de calcul en génie*, Université de Sherbrooke, Faculté de Génie, Département de génie mécanique, Hiver 2004.

Roberge, M.-A., Kaji, S., Bellemare, R. (2001), 'Validation dynamique des modèles de simulation des bâtiments existants', *Conférence canadienne sur la simulation énergétique dans les bâtiments (eSIM)*, 13-14 juin.

Sun, J., Reddy, T. A. (2006), 'Calibrating of Building Simulation Programs Using the analytic Optimization Approach', *HVAC&R Research*, vol. 12

Waltz, J.P. (1992), 'Practical experience in achieving high levels of accuracy in energy simulations of existing buildings', *ASHRAE Transactions*, Symposium AM-92-1-2, 606-617.

Yoon, J.-H., Lee, E.-J. (1999), 'Calibration procedure of energy performance simulation model for a commercial building', *Proceedings of Building simulation 1999*, International Building Performance Simulation Association (IBPSA), septembre 13-15, Kyoto.