



ÉLABORATION D'UN ALGORITHME DE GÉNÉRATION DE ZONES THERMIQUES VISANT À FACILITER LA SAISIE DE DONNÉES À L'INTERIEUR D'UN LOGICIEL DE SIMULATION HORAIRE DE BÂTIMENTS

René Bellemare¹, Simon Sansregret²

¹ Hydro-Québec Distribution, Services conseil - Utilisation de l'énergie,
Montréal, Québec, Canada

² Institut de recherche d'Hydro-Québec, Laboratoire des technologies de l'énergie,
Shawinigan, Québec, Canada

RÉSUMÉ

L'article présente un algorithme qui génère automatiquement des zones thermiques afin de faciliter la saisie de données à l'intérieur d'un logiciel de simulation énergétique de bâtiments. Cette fonctionnalité a été introduite dans le progiciel d'évaluation de projet (PEP) d'Hydro-Québec qui permet d'évaluer les économies d'énergie potentielles de projets.

En utilisant des hypothèses d'ingénierie et des règles de l'art en modélisation, l'algorithme génère des zones thermiques à partir des superficies des éléments de l'enveloppe et du type d'activité du bâtiment. Une comparaison entre un découpage thermique exhaustif et un découpage issu de l'algorithme est également présenté avec un écart inférieur à 3 % sur la charge de chauffage et de climatisation.

INTRODUCTION

Dans le cadre de son programme d'appui financier à l'optimisation énergétique des bâtiments, Hydro-Québec a développé un progiciel d'évaluation des projets (PEP) qui permet d'évaluer les économies d'énergie potentielles d'un projet d'efficacité énergétique sur un bâtiment. Ce progiciel utilise le logiciel DOE2.1E comme moteur de simulation. Ce type de logiciel requiert la définition complète des zones thermiques du bâtiment à modéliser. La définition de chacune des zones thermiques du bâtiment est relativement fastidieuse car elle demande un effort de saisie important et une connaissance approfondie de la simulation énergétique des bâtiments.

Afin de favoriser l'implantation du progiciel PEP et par conséquent le déploiement du programme commercial d'Hydro-Québec, un algorithme de génération de zones thermiques a été développé et intégré au PEP. Le but de cet algorithme était de restreindre l'effort de saisie à l'intérieur du progiciel tout en évaluant des économies

d'énergie de façon juste et équitable. Également, l'algorithme devait rendre accessible et facile l'utilisation de l'outil à des consultants non initiés à la simulation énergétique du bâtiment et au découpage de zones thermiques

L'algorithme développé permet de générer les zones thermiques à partir de zones fonctionnelles déterminées par l'utilisateur. Le concept de zone fonctionnelle est à la fois distinct et plus large que celui de zone thermique puisqu'une zone fonctionnelle comprend généralement plus d'une zone thermique.

L'article présente de façon détaillée les règles de génération de zones thermiques qui ont été élaborées à partir d'hypothèses d'ingénierie et de règles de l'art en modélisation. La méthodologie, les limites de l'approche de même qu'une comparaison entre un découpage thermique exhaustif et un découpage issu de l'algorithme sont présentés.

MÉTHODOLOGIE

La simulation énergétique approfondie de bâtiments requiert la description de chacune des zones thermiques comprises dans un immeuble. Une zone thermique est habituellement définie comme un espace desservi par un même système de CVCA et dont les charges de chauffage, les charges de refroidissement et les horaires d'exploitation sont relativement semblables. Le guide de modélisation EE4-PEBC [1] donne une description exhaustive du concept de zonage et de l'importance de ce dernier. Par exemple, un étage comportant des bureaux à aire ouverte sera généralement divisé en cinq zones thermiques, une zone interne et quatre zones en périphérie pour chaque orientation. Les zones thermiques d'un ou de plusieurs étages situées entre deux autres étages peuvent être généralement regroupées si elles sont desservies par le même système et si on retrouve sensiblement le même profil de charges. Toute cette gymnastique de définition de zones thermiques est relativement

fastidieuse mais elle est essentielle à l'obtention de résultats probants.

L'algorithme proposé permet de générer des zones thermiques en fonction des zones fonctionnelles que l'on retrouve dans le bâtiment. Une zone fonctionnelle est définie comme un espace desservi par un même système de CVCA et dont les charges internes (éclairage, occupation, charge aux prises,...) sont semblables. Cependant, contrairement aux zones thermiques, les charges externes à la zone (gains solaires, infiltration, pertes par conduction,...) peuvent être différentes. Par cette simplification, un immeuble à bureaux de dix étages desservi par un seul système de CVCA peut être défini dans le PEP à l'aide de deux zones fonctionnelles, soit une zone de type « Corridor » et une seconde zone de type « Bureaux ». L'algorithme de découpage générera par la suite plusieurs zones thermiques à partir de la saisie des données architecturales des deux zones fonctionnelles et de paramètres normalisés.

Pour chacune des zones fonctionnelles définies par l'utilisateur, une configuration de systèmes de CVCA y est associée. Les zones thermiques créées à partir de la zone fonctionnelle sont desservies par cette configuration de systèmes de CVCA. Certains types de systèmes (par exemple les types DOE : RHFS, DDS et PVAVS) peuvent desservir plusieurs zones fonctionnelles à la fois. D'autre part, les systèmes de type monozone (par exemple le type DOE : PSZ et SZRH) ne peuvent alimenter qu'une seule zone fonctionnelle et aucun découpage n'est réalisé pour cette zone (l'algorithme n'est pas utilisé).

Il est à noter que les besoins en air neuf de même que les autres charges internes (éclairage, charges aux prises,...) de la zone fonctionnelle sont distribuées aux zones thermiques créées en fonction de leur superficie. Ces charges internes de même que les horaires sont prescrits par le programme. Leur valeur diffère selon le type de zones fonctionnelles présent, tel que présenté au tableau 1 pour certain type de zones fonctionnelles.

Tableau 1 : Paramètres normalisés des charges internes

Type de zones fonctionnelles	Air neuf		Occupation [m ² /occ]	Charge aux prises [W/m ²]	Horaires
	[L/s/m ²]	[L/s]			
Bureaux	--	8,5	20,0	7,5	A
Salles de conférences	--	3,1	2,0	1,0	A
Salles informatiques	0,3	--	--	32,3	A*
Corridors	0,3	--	--	--	A

Le découpage en zone thermique tient compte des éléments suivants comme point de départ :

- 1) Saisie effectuée par l'utilisateur des superficies de toiture, de plancher en contact avec le sol et de chaque orientation de murs extérieurs associées à chacune des zones fonctionnelles
- 2) Paramètres normalisés propres à chaque type de zones fonctionnelles :
 - hauteur des murs extérieurs de la zone, H
 - profondeur normale de la zone périphérique, P_{norm}
 - profondeur maximale de la zone périphérique, P_{max}
 - superficie minimale de zone de niveau 1, A_{min1}
 - superficie minimale de zone de niveau 2, A_{min2}

La profondeur de la zone périphérique est la distance entre le mur extérieur et le centre de la pièce où se concentrent les charges externes (infiltration, perte par conduction, gain solaire). À titre d'exemple, les valeurs des paramètres normalisés sont présentées au tableau 2 pour certains types de zones fonctionnelles d'une institution d'enseignement. Dans le progiciel PEP, on retrouve plus de 100 types de zones fonctionnelles prédéfinis différentes, telles des zones de type bureaux, corridor, gymnase, vestiaires et stationnement intérieur. Pour chacun de ces types de zones, des paramètres normalisés ont été définis.

Le découpage d'une zone fonctionnelle par l'algorithme se fait en deux étapes, tel qu'illustré schématiquement à la figure 1. Un découpage de niveau 1 est effectué afin de scinder les zones fonctionnelles en fonction des différentes orientations de murs extérieurs présents dans une même zone fonctionnelle. Une zone thermique interne peut être créée selon la profondeur maximale de la zone périphérique P_{norm} . De plus, les zones générées peuvent être regroupées en zones NE, SW ou NESW selon la superficie minimale de zone thermique de niveau 1 A_{min1} . Le découpage de niveau 2 permet de morceler chacune des zones créées au niveau 1 en fonction de la superficie de toiture et de plancher en contact avec le sol et de la superficie minimale de zone thermique de niveau 2 A_{min2} . La description plus détaillée de chacun des niveaux de découpage est présentée ci-après.

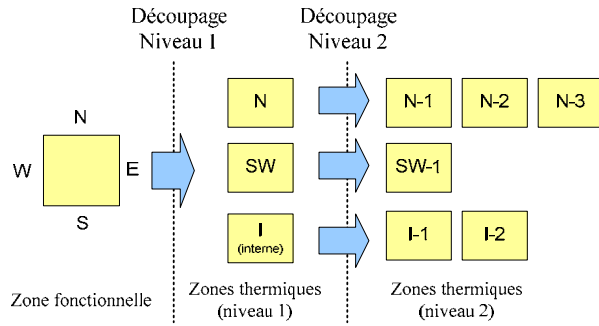


Figure 1 : Principe du découpage

Découpage de niveau 1

Les zones thermiques périphériques sont formées au prorata de la superficie des murs de chacune des orientations. Par exemple, la superficie de la zone thermique Nord A_N est donnée par :

$$A_N = \frac{A \cdot N}{N + E + S + W} \quad (\text{éq. 1})$$

Où A est la superficie de la zone fonctionnelle et N , E , S , W sont respectivement les superficies des murs nord, est, sud et ouest.

Par la suite, pour chaque zone thermique créée, la longueur exposée du mur extérieur L et la profondeur P sont évaluées à l'aide de la hauteur normalisée H des murs extérieurs propre au type de zone fonctionnelle. Pour la zone thermique Nord les équations suivantes sont utilisées :

$$L = N/H \quad (\text{éq. 2})$$

$$P = A_N/L \quad (\text{éq. 3})$$

Si la profondeur P de la zone, calculée avec l'éq. 3, est supérieure à la profondeur maximale P_{max} pour les zones périphérique, l'algorithme réaffecte la superficie de la zone périphérique à l'aide de la profondeur normale de la zone périphérique P_{norm} et génère une zone interne avec l'excédent. La profondeur maximale P_{max} et la profondeur normale P_{norm} sont des valeurs normalisées propres au type de zone fonctionnelle. Pour la zone thermique Nord, on obtient alors :

$$A_N = L \cdot P_{norm} \quad (\text{éq. 4})$$

La balance de la superficie (soustraction de A_N calculée avec éq. 1 et de A_N calculée avec éq. 4) constituera une zone interne.

Il est à noter que si une zone fonctionnelle ne possède aucune superficie de mur extérieur, elle sera considérée comme une seule zone interne.

Découpage de niveau 2

Le découpage de niveau 2 fait intervenir les superficies de toiture et de plancher en contact avec le sol (excluant le plancher du sous-sol). Il permet de morceler davantage les zones de niveau 1 dont la superficie de toit ou de plancher en contact avec le sol est supérieure une superficie minimale de niveau 2 A_{min2} , paramètre normalisé fonction du type de zone fonctionnelle. Également, il scinde les zones où il y a une différence notable entre la superficie de la zone et la superficie de son toit ou du plancher en contact avec le sol. Cette façon de faire évite un découpage excessif des zones si une faible superficie de toit ou de plancher en contact avec le sol est attribuée à la zone.

Pour chacune des zones thermiques obtenues du découpage de niveau 1, on évalue une superficie de toit $TOIT$ en multipliant la superficie de toit de la zone fonctionnelle A_{toit} par le ratio de la superficie de la zone thermique Tot et de la superficie de la zone fonctionnelle A . Par le même raisonnement, on évalue une superficie de plancher en contact avec le sol PL en multipliant la superficie de plancher en contact avec le sol de la zone fonctionnelle $A_{plancher}$ par le même ratio. Les variables suivantes sont ainsi évaluées pour chaque zone thermique du découpage de niveau 1 :

$$TOIT = A_{toit} \cdot (Tot / A) \quad (\text{éq. 5})$$

$$PL = A_{plancher} \cdot (Tot / A) \quad (\text{éq. 6})$$

$$RST_1 = Tot - PL \quad (\text{éq. 7})$$

$$RST_2 = Tot - PL - TOIT \quad (\text{éq. 8})$$

La figure 2 expose les 12 différents cas qui peuvent survenir en fonction de la valeur des variables $TOIT$ et PL . Pour les 12 cas présentés, chaque encadré correspond à une zone thermique. Les cas 0, 1, 3, 5, 7, 11 de la figure 2 indiquent qu'aucun découpage de niveau 2 n'est effectué. Les zones thermiques de niveau 1 sont donc conservées tel quelles pour fin de simulation. Les cas 2, 4, 6, 8, 9, 10 indiquent qu'un découpage de niveau 2 est effectué. Les superficies de la zone et du toit sont inscrites à l'intérieur de l'encadré représentant les zones thermiques créées.

En résumé, le découpage d'une zone thermique de niveau 1 est effectué si les conditions suivantes sont respectées :

- Si la superficie de toit $TOIT$ est nulle et que la superficie de plancher en contact avec le sol PL et la différence RST_1 sont plus grandes que la superficie minimale de zone A_{min2} , sinon
- Si la superficie de plancher en contact avec le sol PL est nulle et que la superficie de toit $TOIT$ et la

différence RST_2 est plus grande que la superficie minimale de zone A_{min2} , sinon

- Si la différence de superficie RST_2 est inférieure à zéro et que la superficie de plancher en contact avec le sol PL et la différence RST_1 sont plus grandes que la superficie minimale de zone A_{min2} , sinon
- Si la différence de superficie RST_2 est supérieure à zéro et que la superficie de toit $TOIT$ est supérieure à la superficie minimale de zone A_{min2} ou la superficie de plancher en contact avec le sol PL et la différence RST_2 sont plus grandes que la superficie minimale de zone A_{min2} , sinon
- Les superficies de plancher en contact avec le sol PL et de toit $TOIT$ sont supérieures à la superficie minimale de zone A_{min2}

Zones fonctionnelles avec présence de sous-sol

La présence d'un sous-sol et de murs enfouis dans une zone fonctionnelle est traitée de façon particulière. Avant même d'effectuer le découpage de niveau de niveau 1, l'algorithme génère une zone thermique distincte pour le sous-sol, de superficie égale au plancher du sous-sol et ayant seulement les murs enfouis comme élément d'enveloppe. Aucun autre découpage n'est effectué par la suite pour cette zone thermique. La superficie de plancher restante de la zone fonctionnelle est traitée par la suite en effectuant un découpage de niveau 1 et de niveau 2 en fonction des superficies de murs extérieurs et de toits présents, tel que présenté précédemment.

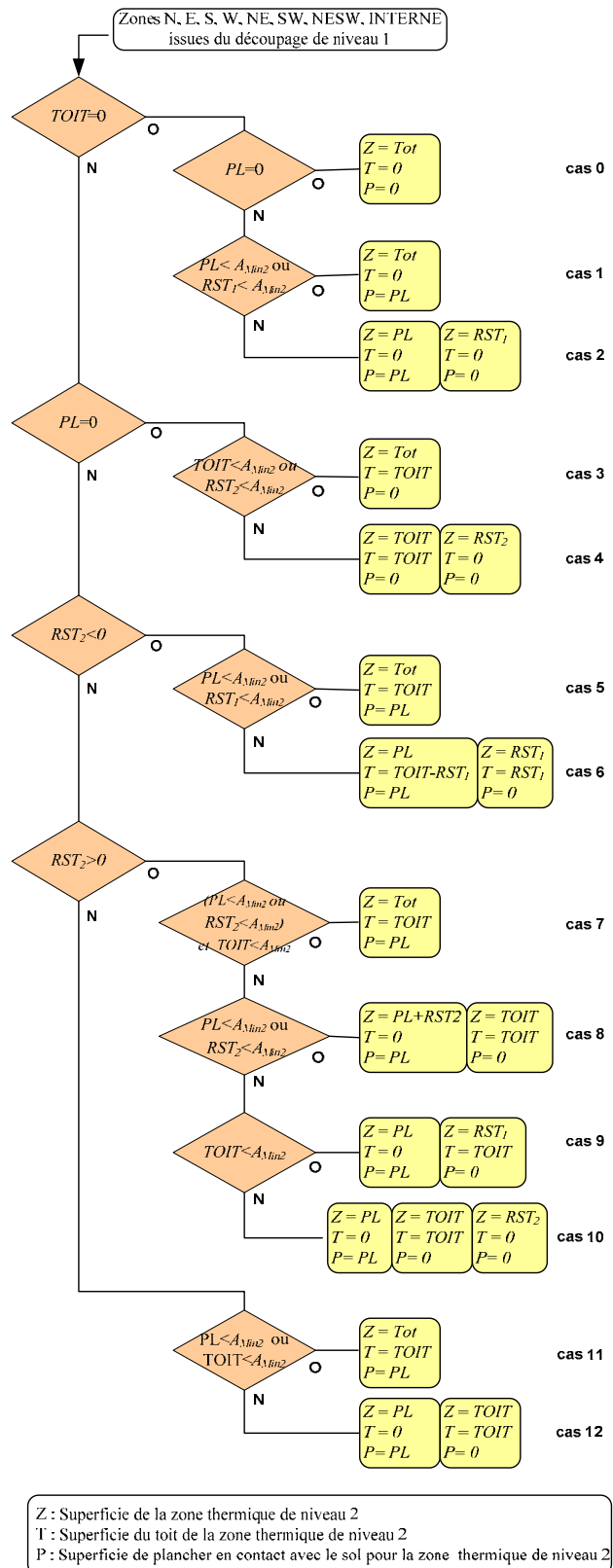


Figure 2 : Découpage de niveau 2

VALIDATION

L'algorithme de génération de zones thermiques a été validé en comparant les résultats de modèles utilisant l'algorithme avec les résultats provenant d'un découpage exhaustif de zones thermiques réalisé selon les règles de l'art. La suite de cette section présente un des cas analysés.

Description du bâtiment

Le bâtiment étudié est une école primaire situé à Montréal. Cette école est fermée deux mois par année pendant la période estivale (juillet-août). L'édifice comporte un sous-sol et trois étages (rez-de-chaussée inclus) pour une superficie brute d'environ 5 925 m². On retrouve au sous-sol une cafétéria, une cuisine, des vestiaires (casiers), des corridors et une salle électrique/mécanique. Un gymnase et une bibliothèque sont situés au rez-de-chaussée. Les étages supérieurs sont composés essentiellement de bureaux, de corridors et de classes. Également, on retrouve une seconde salle électrique/mécanique au 3^e étage. Dépendamment de l'orientation, le taux de fenestration varie entre 15 % et 29 % de la superficie brute des murs extérieurs. Les résistances thermiques de la toiture, des murs et des fenêtres sont respectivement de 3.45 m²°C/W, 3.03 m²°C/W et 0.41 m²°C/W. L'ensemble des zones thermiques du bâtiment sont desservies par des pompes à chaleur décentralisées reliées à une boucle d'eau mitigée. Une chaudière électrique et une tour d'eau sont reliées à la boucle d'eau afin respectivement d'y injecter ou d'y retirer de l'énergie thermique. Les pompes à chaleur permettent de maintenir le point consigne à 22 °C en mode chauffage et 24 °C en mode climatisation. L'apport en air neuf du bâtiment est assuré à l'aide d'un système centralisé (100 % air neuf) munis d'un récupérateur de chaleur dont l'efficacité annuelle est de 70 %. L'air neuf du système centralisé est distribué indirectement aux thermopompes via les corridors du bâtiment.

Modélisation

Afin de valider l'algorithme de génération de zones thermiques, deux modèles de simulation du bâtiment ont été élaborés. Le premier modèle nommé « Étalon » a été élaboré directement sous le format DOE-2.1E. Un découpage exhaustif du bâtiment a permis d'identifier 30 zones thermiques (25 zones externes et 5 zones internes) se distinguant par leur activité et leur position géographique dans le bâtiment. Le deuxième modèle nommé *Alg-PEP* a été élaboré dans le PEP. L'analyse des plans du bâtiment a permis d'identifier 9 types de zones fonctionnelles, soit la bibliothèque, les bureaux, la cafétéria, les classes, les corridors, la cuisine, les salles électrique/mécanique et finalement les vestiaires. Ces 9 zones fonctionnelles ont été introduites dans le progiciel PEP qui utilise l'algorithme de génération des

zones thermiques décrit précédemment. Le tableau 2 présente la liste des paramètres normalisés utilisés par le PEP dans l'algorithme, et ce, pour chaque zone fonctionnelle.

Tableau 2 : Paramètres normalisés

Activité	Hauteur des murs extérieurs, H [m]	Profondeur normale, P_{norm} [m]	Profondeur maximale, P_{max} [m]	Superficie minimale de niveau 1, A_{min1} [m ²]	Superficie minimale de niveau 2, A_{min2} [m ²]
Bibliothèque	3.05	4.57	6.10	304.88	∞
Bureaux	3.05	3.05	4.57	76.22	76.22
Cafétéria	3.05	4.57	9.15	304.88	∞
Classes	3.05	7.62	9.15	304.88	304.88
Corridors	3.05	∞	∞	∞	304.88
Cuisine	3.05	∞	∞	∞	∞
Salle élec./méc.	3.05	∞	∞	∞	∞
Gymnase	6.10	∞	∞	∞	∞
Vestiaires	3.05	∞	∞	∞	∞

L'algorithme a généré 20 zones thermiques, dont 15 zones externes et 5 zones internes. Le tableau 3 présente le résultat du découpage thermique du modèle *Étalon* et du modèle *Alg-PEP*.

Tableau 3 : Découpage thermique

Activité	<i>Étalon</i>		<i>Alg-PEP</i>	
	Externe	Interne	Externe	Interne
Bibliothèque	1	-	1	-
Bureaux	3	-	2	-
Cafétéria	-	1	-	1
Classes	15	-	8	-
Corridors	3	1	2	1
Cuisine	-	1	-	1
Salle élec./méc.	1	1	1	1
Gymnase	2	-	1	-
Vestiaires	-	1	-	1
Total	25	5	15	5

On remarque une différence notable entre le nombre de zones externes associées à l'activité « Classes » pour le modèle *Étalon* (15) comparativement au modèle *Alg-PEP* (8). Cette différence est expliquée par un raffinement important des zones thermiques issues du modèle *Étalon*. Lors de la génération des zones thermiques du modèle *Étalon*, les locaux délimités par deux murs extérieurs d'orientation géographique différente ont été considérés comme des zones thermiques distinctes (voir figure 3). L'algorithme *Alg-PEP* ne tient pas compte de la dynamique de ces zones dont les gains externes diffèrent des autres locaux munis d'une seule exposition externe (voir figure 4).

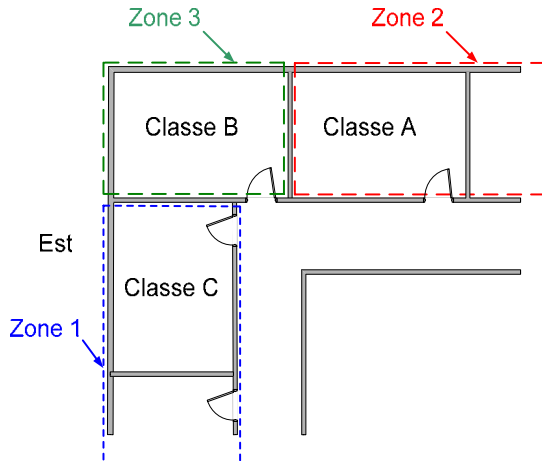


Figure 3 : Découpage avec le modèle *Étalon*

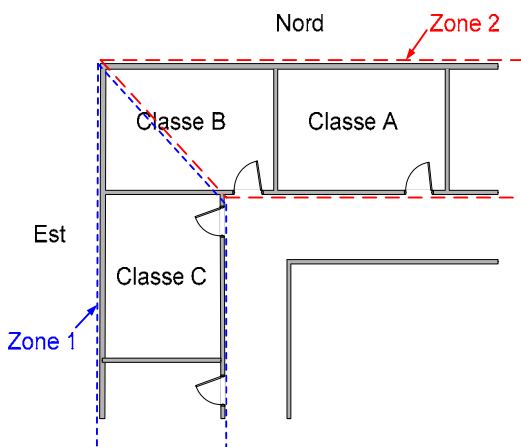


Figure 4 : Découpage avec le modèle *Alg-PEP*

Résultats

Les résultats de la simulation démontrent que l'écart entre la consommation annuelle des deux simulations est seulement de 0.58 %. Lorsqu'on examine la répartition de la consommation d'énergie par usage, on constate que 3 postes de consommation ont été touchés, soit les pompes (-2.56 %), la climatisation (-4.89 %) et le chauffage (0.24 %). Le tableau 4 présente la répartition de la consommation par poste et l'écart entre les deux modèles.

Tableau 4 : Répartition de la consommation d'énergie

Poste de consommation	Étalon [kWh]	Alg-PEP [kWh]	Écart [%]
Éclairage	145 429	145 429	0.00
Charges aux prises	42 628	42 628	0.00
Chauffage	241 890	242 476	0.24
Climatisation	66 780	63 515	-4.89
Pompes et divers	28 412	27 686	-2.56
Ventilation	34 898	34 898	0.00
ECS	28 486	28 486	0.00
Total	588 523	585 118	-0.58

Étant donné que le choix du type de système CVCA peut avoir un impact sur l'évaluation de la performance de l'algorithme, les résultats découlant du module « Load » de DOE-2.1E ont également été analysés. Pour fin de comparaison, les besoins en chauffage et en climatisation de chaque zone thermique ayant la même activité ont été regroupés.

Le tableau 5 présente l'écart des besoins calculés par DOE-2.1E en chauffage et en climatisation entre le modèle *Étalon* et le modèle *Alg-PEP* pour chaque catégorie de zone fonctionnelle. On remarque que l'écart global est de 1.84 % sur les besoins en chauffage et de 2.66 % pour les besoins en climatisation et que les plus grands écarts observés touchent les zones de type bureaux, classes et gymnase.

Dans cet exemple, les gains au niveau de l'effort de saisie sont appréciables. Seulement 9 zones fonctionnelles ont été définies avec l'approche proposées comparativement à la définition de 30 zones thermiques avec l'approche conventionnelle.

Tableau 5 : Écart sur les charges de chauffage et de climatisation

Activité	Différence	
	Chauffage	Climatisation
Bibliothèque	0.00 %	0.00 %
Bureaux	-3.21 %	-2.66 %
Cafétéria	0.00 %	0.00 %
Classes	-2.66 %	-3.89 %
Corridors	-0.42 %	-0.48 %
Cuisine	0.00 %	0.00 %
Salle élec./méc.	0.00 %	0.00 %
Gymnase	-1.80 %	-3.84 %
Vestiaires	0.00 %	0.00 %
Total	-1.84%	-2.66 %

Analyse

La comparaison de quelques bâtiments simulés en utilisant la même démarche que le cas présenté a permis de mesurer la précision et le bénéfice de l'algorithme. En général, une réduction substantielle du nombre de zones à saisir a été constatée et les

différences des résultats obtenus sont peu significatives. Également, il faut considérer que l'objectif premier du progiciel est d'évaluer les économies d'énergie d'un bâtiment en calculant la différence de consommation entre deux simulations. Ainsi, comme les déviations sont obtenues à la fois pour le bâtiment de référence et le bâtiment proposé, il en résulte des écarts négligeables sur les économies calculées.

Limitations

L'utilisation de cet algorithme nécessite toutefois certaines précautions. Il est évident que pour obtenir des résultats de simulation avec une certaine précision, il faut s'assurer que les paramètres normalisés utilisés dans le PEP (profondeur de zone, superficie minimale) conviennent avec la dynamique du bâtiment simulé et s'appliquent convenablement avec le zonage thermique réel.

Également, certaines configurations d'espace peuvent être mal considérées par l'algorithme en raison d'une variation importante de la charge externe à l'intérieur de la zone fonctionnelle. Par exemple, si dans une même zone fonctionnelle (i.e un espace ayant le même type activité et qui est alimenté par un même système) on retrouve un pourcentage différent de fenestration sur diverses sections de mur ayant une même orientation, l'algorithme générera une seule zone thermique périphérique suivant cette orientation. Un découpage plus exhaustif aurait possiblement établi plusieurs zones thermiques périphériques suivant cette même orientation en raison de la diversité des gains solaires.

Il faut être conscient que l'algorithme présenté simplifie le traitement de découpage en zone thermique, au détriment d'une diminution potentielle de la précision dans certaines situations. Cependant, tel qu'expliqué auparavant, les différences de résultats dans les cas analysés ont été jugées faibles, d'autant plus que le progiciel traite les résultats sous forme comparatif (différence entre le bâtiment proposé et le bâtiment de référence, soumis tous les deux au même découpage)

CONCLUSIONS

Cet article a présenté un algorithme qui génère des zones thermiques à partir d'un concept plus large, soit des zones fonctionnelles. Cet algorithme a été implanté dans le progiciel PEP, outil utilisé par le programme d'appui financier d'Hydro-Québec où plus de 400 projets issus de simulations ont été soumis jusqu'à présent.

Il a été démontré que l'algorithme implanté dans le progiciel PEP permet de restreindre la quantité d'information saisie dans le progiciel PEP tout en évaluant les économies d'énergie proposées de façon juste et équitable. Également, il uniformise le traitement du zonage thermique qui requiert une connaissance plus approfondie de la mécanique du bâtiment et de la simulation détaillée. En facilitant la saisie dans le progiciel, la fonctionnalité contribue à l'essor du programme et par le fait même, favorise l'utilisation de la modélisation et de la simulation énergétique des bâtiments.

RÉFÉRENCES

- [1] **Ressources naturelles du Canada**, Guide de modélisation EE4-PEBC version 1.6, avril 2006, Ottawa, 246 p.