

DÉVELOPPEMENT ET UTILISATION DE MODÈLES DE SIMULATION POUR L'AUDIT ET LA RÉNOVATION DE BÂTIMENTS CONDITIONNÉS

Stéphane BERTAGNOLIO ^{a,*}, Jean LEBRUN ^a, Philippe ANDRE ^b

^a Laboratoire de Thermodynamique, Université de Liège, Liège, Belgique

^b Département des Sciences et de Gestion de l'Environnement, Université de Liège, Arlon, Belgique

RÉSUMÉ

Une suite d'outils de simulation de bâtiment et de système de climatisation destinés à assister l'audit et la rénovation des bâtiments commerciaux est actuellement en développement. Les outils en question sont développés de façon à limiter le nombre de paramètres demandés à l'utilisateur et à garder une transparence totale pour ce dernier. Dans un premier temps, le développement des modèles et leur implémentation dans un solveur d'équations sont discutés. L'identification des paramètres des modèles développés est ensuite discutée et illustrée par un exemple d'application.

Mots Clés : audit, calibration, modèle, bâtiment, système de climatisation

1. INTRODUCTION

Les enjeux environnementaux et l'augmentation récente du coût de l'énergie ont ouvert la porte à la mise en œuvre de techniques innovantes permettant de réduire la consommation d'énergie. En Europe, les bâtiments résidentiels et non-résidentiels représentent environ 40% de la consommation d'énergie. Le secteur tertiaire représente une part importante de cette consommation et l'amélioration des performances énergétiques de ces bâtiments est un défi majeur du 21^{ème} siècle. Dans ce but, en décembre 2002, la Commission Européenne a approuvé la directive EPBD (« Energy Performance of Buildings Directive ») visant à améliorer les performances énergétiques des bâtiments.

L'article 9 de la directive concerne l'inspection et l'audit des systèmes de climatisation. Lors d'une démarche d'audit, quatre niveaux sont généralement distingués:

1. Le « benchmarking » permet de comparer les performances réelles du bâtiment à des performances de « référence ». Cette référence provient généralement de données statistiques ou de valeurs par

défaut mais peut aussi être établie grâce à une simulation du bâtiment couplé à un système de référence.

2. L'inspection (ou « walk-through audit ») consiste en une première inspection et évaluation de la situation. Cette première analyse permet d'identifier les principaux postes de consommation et les options de rénovation envisageables. A ce niveau, l'outil de simulation calibré est très utile et permet d'évaluer les performances actuelles du bâtiment et de son système.
3. L'audit détaillé consiste en une comparaison la plus objective possible des options de rénovations envisagées. Une fois de plus, l'outil de simulation peut se révéler d'une grande aide.
4. La dernière phase de l'audit consiste en une évaluation technique et économique poussée de l'option de rénovation choisie.

Les outils de simulation actuels permettent de réaliser des simulations détaillées et complètes de la plupart des systèmes de production de chaleur et de froid. Ces modèles sont couramment utilisés pour aider

au dimensionnement de nouvelles installations. Dans le cadre d'un audit et de la rénovation d'un bâtiment existant, l'utilisateur ne dispose que d'informations limitées concernant le bâtiment et son système (données techniques partielles et relevés de consommations globaux). De ce fait, l'utilisation de modèles très détaillés est rendue impossible. De plus, beaucoup de ces modèles fonctionnent comme des « boîtes noires » et n'offrent aucune transparence à l'utilisateur.

Une suite d'outils de simulation de bâtiment et de systèmes est actuellement en développement pour assister l'audit et la rénovation des bâtiments climatisés. Ces modèles sont construits de façon à limiter au maximum le nombre de paramètres demandés à l'utilisateur et à garder une transparence totale pour ce dernier. Les paramètres demandés doivent également être aisément identifiables pour rendre l'utilisation du modèle aussi simple que possible.

Dans un premier temps, le développement des modèles (bâtiment, unités terminales, centrale de traitement d'air, systèmes de production de chaleur et de froid...) et leur implémentation dans un solveur d'équations sont discutés. L'identification des paramètres des modèles développés est ensuite discutée et illustrée par un exemple d'application.

Les outils de simulation présentés sont développés dans le cadre du projet « HARMONAC » (programme européen de recherche sur l'audit énergétique des bâtiments conditionnés).

2. AUDIT ET OUTILS DE SIMULATION

La méthodologie d'audit présentée ici repose sur l'utilisation de deux logiciels de simulation basés sur une série de modèles simplifiés de bâtiment et de composants de système de climatisation.

2.1 Performances de référence

Le premier outil, nommé « Benchmark », est utilisé pour calculer les performances « théoriques » (ou de référence) du bâtiment étudié. Le bâtiment en question est supposé être équipé d'un système de climatisation « standard » permettant le contrôle de la qualité, de la température et de l'humidité de l'air intérieur. Le bâtiment est représenté comme une zone unique, décrite par un nombre très limité de paramètres. Cet outil de simulation permet à l'auditeur de réaliser une première évaluation des performances du bâtiment et de son système et une première interprétation de ses consommations d'énergie.

Le système « standard » envisagé inclut une centrale de traitement d'air CAV double flux pulsant le débit d'air hygiénique (défini sur base de la norme européenne prEN 13779) et permettant le contrôle de l'humidité intérieure. La température intérieure est contrôlée grâce aux ventilo-convecteurs 4-tubes

installés dans la zone. La production d'eau glacée est assurée par une groupe frigorifique à condenseur à air, tandis qu'une chaudière au gaz naturel assure la production d'eau chaude. Les performances nominales de tous ces composants sont estimées sur base de valeurs par défaut ou de normes européennes (prEN 13779 et 13053). Les profils d'occupation et d'utilisation du bâtiment utilisés sont des profils typiques choisis en fonction de l'utilisation du bâtiment.

2.2 Audit et calibration

Le second outil utilisé, appelé « SIMAUDIT », aide l'auditeur durant les phases d'inspection et d'audit détaillé. Cette fois, l'outil de simulation offre une option « multi-zone » à l'utilisateur et de 1 à 5 zones peuvent être considérées. Chaque zone créée peut être couplée à un système de climatisation réaliste, représentant le système actuel. L'objectif de ce second outil est de réaliser une étude plus détaillée des performances du bâtiment et d'identifier les principaux postes de consommation.

Dans le cadre d'un projet initié par l'ASHRAE, Reddy [1] a identifié 4 types de méthodes de calibration : la calibration manuelle itérative, la calibration manuelle basée sur comparaison graphique des résultats, la calibration basée sur des méthodes analytiques ou de mesures spécifiques et la calibration basée sur des méthodes mathématiques. Les trois premières catégories regroupent les méthodes pouvant être qualifiées d'heuristiques et principalement basées sur les connaissances de l'utilisateur. Dans le cadre du projet en question, une méthodologie de calibration combinant l'utilisation de méthodes heuristiques et de méthodes mathématiques avancées, a été développée. Au final, il apparaît que la méthodologie en question, implémentée grâce au logiciel DOE-2, est difficilement transposable à d'autres outils de simulation et peut se révéler trop complexe ou non transparente pour l'utilisateur.

Pour conserver le caractère simplifié des modèles développés, il a été décidé d'établir une méthodologie de calibration uniquement basée sur l'analyse approfondie des données disponibles. Cette méthode est similaire à celle proposée par Yoon et al. [2]. Les règles de bonnes pratiques développées ici sont directement applicables aux outils de simulation développés et sont totalement intégrées à la procédure d'audit décrite ci-dessus.

2.3 Analyse et évaluation des options de rénovation

Après calibration, l'outil de simulation peut être utilisé en vue d'identifier les principaux consommateurs d'énergie (éclairage, équipements électriques, ventilateurs, pompes...) et de quantifier leur contribution à la consommation d'énergie globale.

3 MODÉLISATION

Autant pour le calcul des performances de référence que pour la calibration et la simulation d'un système existant, les outils de simulation doivent prendre en compte les principaux facteurs d'influence de façon réaliste :

- Le comportement thermique (statique et dynamique) du bâtiment ;
- Les charges d'occupation (occupants, éclairage, équipements divers) et climatiques (gains solaires, température et humidité) ;
- Le confort des occupants (température, qualité d'air et humidité) et la régulation du système de climatisation ;
- Le système de climatisation dans son ensemble (distribution et production de chaleur et de froid).

En plus de ces différents facteurs, l'outil de simulation destiné à l'audit de bâtiments tertiaire se doit de rester simple et utilisable, malgré la faible quantité de données disponibles. Il est également nécessaire que les outils concernés soient transparents pour l'utilisateur et offrent un degré de précision suffisant.

Les deux outils décrits précédemment sont construits sur des bases similaires : un modèle dynamique simplifié de bâtiment interagissant en temps réel avec un modèle complet de système de climatisation (unités terminales, centrale de traitement d'air, réseaux de distribution et systèmes de production).

3.1 Modèle de bâtiment

Un modèle simplifié basé sur un réseau R-C du 3^{ème} ordre est utilisé. L'identification des paramètres est basée sur la méthode des admittances, déjà utilisée par Laret [3] et améliorée par Masy [4].

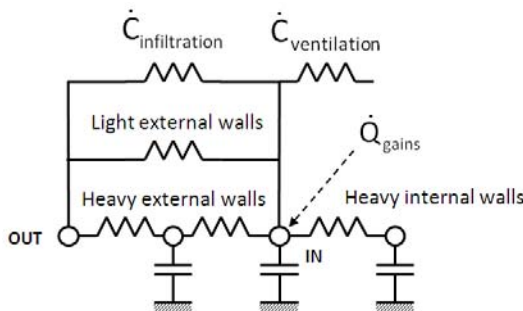


Figure 1 : Modèle de bâtiment - Réseau R-C équivalent

Le modèle en question a été validé expérimentalement, analytiquement et par comparaison avec d'autres logiciels de simulation [5] et s'est montré d'une précision suffisante quant au calcul des conditions intérieures et des charges de chauffage et de rafraîchissement.

3.2 Modélisation du système de climatisation

Des modèles stationnaires d'équipements sont utilisés pour représenter le comportement des différents composants des systèmes secondaire et primaire.

Le système secondaire envisagé ici comprend une centrale de traitement d'air complète (CTA) et différents types d'unités terminales (UT) de chauffage et/ou de rafraîchissement. La CTA considérée inclut :

- Un système de récupération air-air ;
- Un économiseur ;
- Un système d'humidification (adiabatique ou vapeur) ;
- Une batterie de rafraîchissement ou déshumidification ;
- Une batterie de post-chauffe ;
- Des ventilateurs de pulsion et d'extraction ;
- Des filtres.

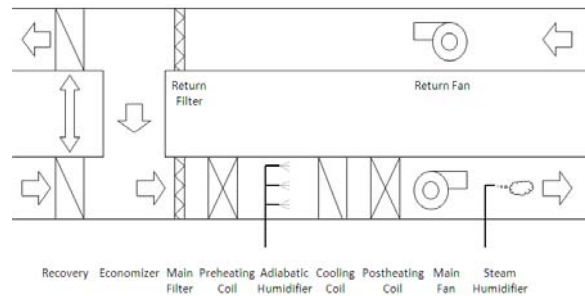


Figure 2: Composants de CAT présents dans le modèle

Les UTs disponibles sont les radiateurs, les ventilo-convecteurs, les unités à induction et les systèmes de chauffage / rafraîchissement radiants. Tous ces composants ne peuvent évidemment pas être sélectionnés en même temps par l'utilisateur. Les modèles utilisés pour simuler le comportement de ces différents composants sont similaires à ceux présentés par André et al. [6].

Les composants du système primaire de production de chaleur et de froid sont modélisés au moyen de régressions directement identifiées sur base de données constructeurs ou générées grâce à des modèles de référence calibrés.

3.3 Contrôle

Généralement, le bâtiment et son système sont modélisés de manière séparée et sont invoqués de façon séquentielle. Le modèle développé ici est similaire à d'autres outils de simulation modulaires et fait interagir tous les composants de façon simultanée. Cette approche permet d'appréhender de façon plus réaliste les interactions entre le système et le bâtiment (effets d'un sous/sur-dimensionnement, etc).

Dans ce but, des lois de contrôle proportionnel sont utilisées. Elles permettent d'atteindre un compromis

entre précision et robustesse tout en conservant la simplicité du modèle.

3.4 Zones

L'outil de simulation présenté peut simuler de 1 à 5 zones. Les quatre premières zones peuvent être des zones internes ou externes. La cinquième zone intervient uniquement dans le cas d'une configuration « zone centrale – zone périphérique ».

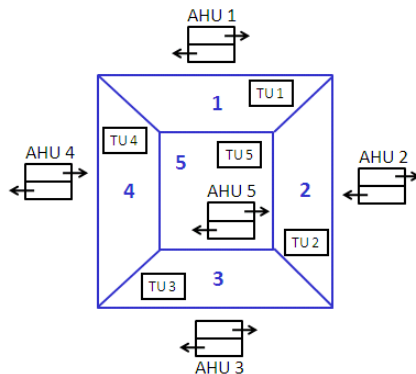


Figure 3: Zonage - Configuration « zone centrale - zone périphérique »

Chaque zone est supposée être équipée d'un système de climatisation/ventilation indépendant et peut être caractérisée par des profils d'occupation et d'utilisation qui lui sont propres. A l'heure actuelle, le transfert de masse entre zones n'est pas pris en compte.

3.5 Entrées, sorties et paramètres

Les principaux résultats (sorties) fournis par le logiciel sont :

- Les conditions intérieures : température, humidité, contamination CO₂, indices de confort ;
- Les profils horaires de demande de puissance électrique, de chaleur et de froid et les consommations intégrées d'énergie ;
- Les consommations spécifiques des composants du système.

Les entrées principales à fournir au modèle sont :

- Les données climatiques ;
- Les taux et horaires d'occupation du bâtiment et de fonctionnement des équipements ;
- Les consignes de température et humidité.

Les paramètres nécessaires sont principalement :

- Les dimensions et caractéristiques constructives du bâtiment ;
- Les caractéristiques principales des composants du système de climatisation (type, performances nominales et données de dimensionnement)

Le développement et l'implémentation de ces modèles dans un solveur d'équation [7] ont été discutés en détails dans un précédent article [8].

4 DESCRIPTION DU BÂTIMENT

Le bâtiment étudié a été bâti fin des années 60 à Bruxelles. Il abrite environ 26700 m² de bureaux et de salles de réunion climatisés répartis sur 8 étages et un rez-de-chaussée. Le bâtiment comprend 3 blocs et a une forme en H, orientée Nord-Sud. Les cinq niveaux souterrains sont dédiés aux parkings et zones techniques.

Les façades du rez-de-chaussée sont constituées de simples vitrages. L'enveloppe des 8 étages est faite d'environ 1000 modules de double-vitrage équipés de protections solaires extérieures orientables.

Le système de climatisation comprend 1000 unités terminales à induction installées dans les bureaux. Les centrales de traitement d'air pulsent au total environ 290000 m³/h, dont 66% d'air frais, 75 heures par semaine. L'air vicié est extrait et utilisé pour la ventilation des parkings souterrains. La production de chaleur est assurée par 4 chaudières au mazout (puissance totale : 4 MWth). La production d'eau glacée est assurée par 4 groupes frigorifiques eau-eau (puissance totale : 2.1 MWth) couplés à autant de tours de refroidissement.

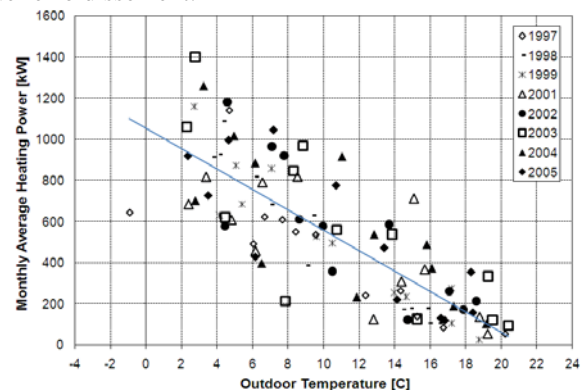


Figure 4: Signature thermique du bâtiment

L'analyse de la signature thermique du bâtiment (relevés mensuels de consommation de mazout exprimés en fonction de la température moyenne extérieur) a permis d'établir que la consommation de mazout était directement expliquée par les déperditions et la ventilation mais également largement influencée par les variations du taux d'occupation et des charges internes [9]. Bien que caractérisée par un coefficient de détermination ($R^2=66\%$) relativement faible, la pente de cette signature thermique (50 kW/K) a une valeur proche du coefficient de transfert global du bâtiment (incluant la ventilation), s'élevant à 52 kW/K. La consommation électrique est quant à elle relativement constante au cours de l'année (environ 520 MWh/mois) et il est impossible d'en déduire la consommation des machines frigorifiques. Suite aux observations faites sur site, il semblerait qu'une part importante de cette consommation est due à l'éclairage et aux équipements de bureautique.

5 UTILISATION DE LA SIMULATION

Les résultats fournis par les logiciels développés seront comparés à des relevés de consommation moyennés sur plusieurs années pour les raisons décrites ci-dessous :

- L'occupation très variable et l'utilisation hétérogène du système de climatisation causent une dispersion importante des consommations (Figure 4) et rendent la calibration du modèle sur une année choisie très difficile et arbitraire ;
- Certaines incertitudes dans les relevés de consommation de mazout empêchent l'exploitation telle quelle de ces données.

L'utilisation de données moyennées sur 35 ans devrait permettre de lisser le profil de consommation et d'effacer les effets de l'utilisation variable du bâtiment de son système. De plus, cette méthode de calibration devrait tendre à diminuer l'erreur due à l'utilisation de données climatiques typiques (« Typical Mean Year ») et non réelles. En effet, dans le cas présent, les données météorologiques réelles complètes ne sont pas disponibles.

5.1 « Benchmarking »

Pour calculer les consommations de références, le débit de ventilation est fixé à un débit hygiénique moyen de 45 m³/h/occupant. La centrale de traitement d'air assure également le contrôle de l'humidité intérieure et est équipée d'un récupérateur air-air. Des valeurs moyennes provenant des normes prEN sont utilisées pour la plupart des paramètres du modèle (éclairage, équipements électriques, performances des composants du système de climatisation...).

Comme le montre le Tableau 1, les consommations d'électricité et de mazout sont largement sous-estimées par le logiciel de simulation. Cette observation suggère l'existence d'un potentiel de réduction de consommation important.

Tableau 1: Consommations annuelles mesurées et calculées (« benchmarking ») de mazout et d'électricité

[MWh]	Mazout	Electricité
« Benchmarking »	1346	3232
Mesures	4625	6187
Différence [%]	71	48

5.2 Calibration du modèle

Dans un premier temps, pour simplifier le travail de calibration du modèle, le logiciel est utilisé dans sa version mono-zone et le bâtiment est étudié de façon globale.

Comme déjà mentionné, le processus de calibration utilisé ici est heuristique et basé sur l'utilisation de règles de bonne pratique. Pour estimer la qualité de la calibration réalisée, les résultats du modèle sont comparés aux relevés de consommations en termes

d'erreur moyenne (« Mean Bias Error » ou « MBE ») et de coefficient de variation de la racine de l'erreur quadratique moyenne (« Root Mean Squared Error » ou « RMSE »).

La première étape (ou itération) consiste à ajuster les paramètres du modèle sur base des données techniques collectées au cours des visites réalisées et des résultats de l'analyse des relevés de consommation. Les profils d'occupation, consignes et débits de ventilation nominaux sont fixés, tandis que des valeurs par défaut sont utilisées pour les paramètres qui n'ont pu être déterminés (performances des pompes et ventilateurs, puissance de l'éclairage et des équipements de bureau...). A la fin de cette première étape, il semble que la consommation électrique soit largement sous-estimée et doive être corrigée. Même si la consommation de mazout de chauffage est relativement bien estimée, la calibration de l'ensemble des paramètres doit être poursuivie. En effet, les consommations d'électricité et de mazout sont intrinsèquement liées et ne peuvent être traitées séparément.

La deuxième étape concerne l'ajustement des gains internes (éclairage et équipements de bureau). Sur base des observations faites durant les visites du bâtiment, les puissances électriques d'éclairage et d'équipement sont ré-évaluées à la hausse. Comme attendu, cet ajustement a pour effet d'augmenter la consommation électrique globale et de diminuer la consommation de mazout de chauffage. On remarque également que les formes des profils de consommation électrique et de mazout sont en accord avec les relevés de consommation.

Tableau 2: Calibration - erreurs

Itération	Erreur	Mazout	Electricité
0	MBE	-70.9 %	-47.8 %
(« benchmark »)	CV(RMSE)	22.2 %	13.8 %
1	MBE	-4.4 %	-25.6 %
(« basecase »)	CV(RMSE)	4.2 %	7.4 %
2	MBE	-11.9 %	-9.4 %
	CV(RMSE)	4.5 %	2.8 %
3	MBE	-6.6 %	-3.2 %
(« baseline »)	CV(RMSE)	3.4 %	1.6 %

La troisième étape du processus de calibration consiste en l'ajustement des performances des équipements de production et distribution de chaleur et de froid. A la fin de cette troisième et dernière étape, les résultats sont satisfaisants et les erreurs résiduelles acceptables (« MBE » et « CV(RMSE) » inférieures à +/- 10 %). Cette conclusion est valable autant pour la consommation électrique que la consommation de mazout de chauffage.

Outre les indices d'erreur « MBE » et « CV(RMSE) », d'autres moyens de vérification de la calibration existent. La Figure 5 permet de comparer les signatures thermiques basées sur les relevés de

consommation et sur les résultats de calcul. Comme attendu, les résultats sont satisfaisants et la pente de la signature « calculée » (55 kW/K) est proche de la pente de la signature basée sur les relevés de consommation.

On peut également noter que le coefficient de détermination (R^2) est meilleur et atteint 98%. Ceci prouve une fois de plus que la consommation de mazout est directement corrélable à la température extérieure lorsque l'utilisation du bâtiment et de son système est idéalisée et simplifiée. Comme supposé, la dispersion observée sur les relevés est principalement due à l'utilisation et à l'occupation variables du bâtiment.

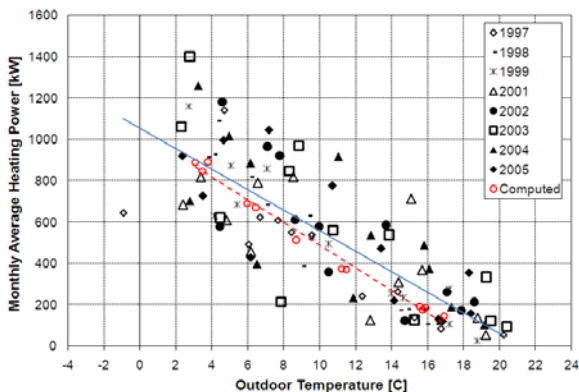


Figure 5: Signatures thermiques mesurée (ligne pleine) et calculée (point tillé)

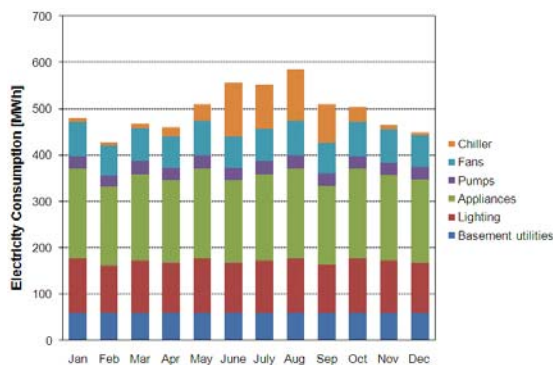


Figure 6: Consommations mensuelles calculées d'électricité

5.3 Analyse

La Figure 6 présente une analyse détaillée de la consommation électrique du bâtiment. Les principaux postes de consommation y sont présentés. On constate que les équipements de bureautique (« appliances »), l'éclairage et les ventilateurs sont responsables chaque mois d'une part importante de la consommation. Les machines frigorifiques ne sont responsables que de 10% de la consommation électrique annuelle.

6 CONCLUSION

Deux outils de simulation simplifiés ont été présentés et utilisés dans le cadre de l'audit d'un bâtiment de bureaux existant. Les deux logiciels

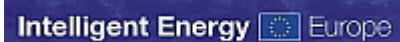
permettent de réaliser une analyse complète et rapide du comportement du bâtiment et de son système de climatisation. Cette analyse détaillée est rendue possible par l'application d'une méthodologie de calibration totalement intégrée à la procédure d'audit en cours et basée sur les observations faites sur le bâtiment et sur les relevés de consommation.

L'utilisation de données moyennées pour la calibration a permis de conduire à une représentation du comportement « moyen » du bâtiment, évitant ainsi les influences parasites de l'occupation et de l'utilisation variables du bâtiment.

L'outil de simulation calibré est ensuite utilisable pour identifier les principaux consommateurs d'énergie dans le bâtiment et évaluer les options de rénovation envisagées.

REMERCIEMENTS

Ce travail est supporté par le Ministère de la Région Wallone de Belgique et le programme « Intelligent Energy Europe ».



RÉFÉRENCES

- [1] REDDY, T.A., et MAOR, I., Procedures for reconciling computer-calculated results with measured energy data, *ASHRAE Research project RP-1051 (ASHRAE)*, Atlanta, USA, (2006).
- [2] YOON, J., LEE, E.J., et CLARIDGE, D.E., Calibration procedure for energy performance simulation of a commercial building, *Journal of Solar Energy Engineering (ASME)*, Vol. 125 pp. 251-257, (1999).
- [3] LARET, L., Contribution au développement de modèles mathématiques du comportement transitoire de structures d'habitation, *Thèse de doctorat (Université de Liège)*, Liège, Belgique, (1981).
- [4] MASY, G., Definition and validation of a simplified multizone dynamic building model connected to heating system and HVAC unit. *Thèse de doctorat (Université de Liège)*, Liège, Belgique, (2008).
- [5] BERTAGNOLIO, S., MASY, G., LEBRUN, J., et ANDRE, P., Building and HVAC system simulation with the help of an engineering equation solver, *Simbuild 2008*, Berkeley, USA, (2008).
- [6] ANDRE, P., LEBRUN, J., LEMORT, V., et MASY, G., Développement de modèles pour la simulation des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air, *Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes*, Montréal, Canada, (2007).
- [7] KLEIN, S.A., EES: Engineering Equation Solver – User Manual, (*F-Chart Software*), Madison, USA, (2008).
- [8] BERTAGNOLIO, S., et LEBRUN, J., Simulation of a building and its HVAC system with an equation solver. Application to benchmarking, *Building Simulation: An International Journal (Springer)*, Tsinghua, China, Vol. 1, pp. 234-250, (2008).
- [9] BERTAGNOLIO, S., LEBRUN, J., HANNAY, J., et APARECIDA SILVA, C., Simulation-assisted audit of an air conditioned building, *ICEBO Conference*, Berlin, Germany, (2008).