eSim 2018
«BUILDING SIMULATION TO SUPPORT BUILDING SUSTAINABILITY»
IBPSA Canada
The Canadian Chapter of the International Building Performance Simulation Association
Le chapitre canadien de International Building Performance Simulation Association

Calibration bottom-up d'un système CVCA complexe à l'aide de données mesurées

Mathilde Valentin[1], Danielle Monfet[1], Stanislaw Kajl[1]

[1] École de Technologie Supérieure, Canada

Résumé :

Les bâtiments commerciaux et institutionnels sont maintenant équipés de Building Automation System (BAS), fournissant de nombreuses données sur l'opération des systèmes. Cela permet de calibrer les modèles énergétiques de bâtiments avec des données plus détaillées que les factures. Cet article décrit la calibration d'un modèle complexe de systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA). Les données enregistrées via le BAS comme la température de soufflage, le débit d'air et les charges de climatisation et de chauffage sont utilisées pour calibrer le modèle. L'approche employée est l'approche ascendante ou « bottom-up » et la qualité de la calibration est validée à l'aide d'indices statistiques et de représentation graphique.

Le bâtiment étudié est un bâtiment universitaire à Montréal. Le logiciel TRNSYS est utilisé puisqu'il permet de bien représenter les systèmes CVCA installés dans le bâtiment. Les charges du bâtiment sont estimées via les données du BAS et imposées en entrée du modèle. Le modèle des systèmes respecte les critères ASHRAE Guideline 14-2002 sur la consommation horaire. Les résultats sur la charge instantanée et la puissance du ventilateur avec le goodness of fit (G) sont supérieurs à 90% et 60% et avec le coefficient de corrélation (R^2) supérieurs à 0.9. Le modèle des systèmes CVCA calibré peut être couplé au modèle du bâtiment pour compléter l'analyser de différents scénarios de contrôle.

Keywords: *Systèmes CVCA, calibration, bâtiment en opération, données enregistrées*

INTRODUCTION

Les bâtiments commerciaux et institutionnels représentent 30% de la consommation totale d'énergie malgré d'importantes améliorations en matière d'efficacité énergétique (IEA, 2015). Puisque la durée de vie des bâtiments commerciaux et institutionnels est d'environ 70 ans (Cloutier et al., 2017), leur utilisation et leur gestion peuvent par conséquent évoluer. Une des solutions pour améliorer la performance énergétique des bâtiments existants est d'optimiser la séquence de contrôle et le contrôle des équipements. Plusieurs stratégies ont été proposées où la complexité du modèle utilisé dépend de l'analyse souhaitée et doit être adaptée aux besoins (Candanedo et al., 2013). Parmi celles-ci, l'utilisation d'un modèle calibré des systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA) du bâtiment, qui représente fidèlement le comportement réel de celui-ci, permet de tester des stratégies de contrôle plus détaillées sans perturber les occupants. La qualité de cette étape, celle de calibration, dépend de la quantité et de la qualité des données d'opération disponibles. Habituellement, les modèles sont calibrés uniquement sur la consommation globale du bâtiment et parfois sur celle des systèmes (Coakley et al., 2014). De plus en plus de bâtiments sont équipés de *Building Automation System* (BAS) qui permettent de récupérer en temps réel des données comme la température, les débits et la vitesse des ventilateurs. Cela permet d'affiner l'analyse au niveau des systèmes. Dans cet article, la calibration d'un modèle complexe de systèmes CVCA est décrite. La qualité de la calibration est évaluée à partir de la consommation, mais également pour les conditions de l'air alimentant les zones. Cela permet de représenter le comportement réel des zones et de pouvoir réaliser des analyses non seulement sur la consommation, mais aussi sur le confort. Le modèle calibré des systèmes sera ensuite couplé au modèle du bâtiment via le le Building Controls Virtual Test Bed, BCVTB (Wetter, 2010).

REVUE DE LITTÉRATURE

Il existe plusieurs stratégies de calibration des modèles et différentes façons de les implanter. Par exemple, Raftery et al. (2011) proposent une méthodologie générale pour une calibration basée sur des mesures À partir d'un modèle de base et des premiers résultats de simulation, ils proposent de mettre en place un processus itératif. Ce processus permet de mettre à jour le modèle en réalisant des mesures supplémentaires jusqu'à ce que les résultats rencontrent les critères d'acceptation. Une fois les critères atteints, le modèle peut être utilisé pour analyser et tester des scénarios de contrôle. Ils précisent que les simplifications et les approximations doivent être évitées. Lorsque le modèle initial n'est pas disponible, ils suggèrent de le créer à partir des informations de conception, des standards et des bonnes pratiques. Cependant, ils ne précisent pas le niveau

ISBN 978-2-921145-88-6

de complexité que le modèle de base doit posséder. Cette méthodologie générale peut être appliquée pour divers cas, mais jusqu'à présent, en matière de calibration, c'est l'approche *top-down* qui est la plus utilisée puisqu'elle nécessite seulement la consommation globale du bâtiment et qu'elle est moins chronophage (Zibin et al., 2013). Pour cette approche, une fois que la consommation globale du bâtiment est calibrée, celle des systèmes est considérée calibrée. Cependant, cela induit souvent des erreurs de compensation (Zibin, 2014). En effet, Sansregret (2017) souligne que changer le débit d'une unité de traitement d'air peut avoir le même impact qu'un changement de coefficient d'infiltration. Conséquemment, des approches dites *bottom-up* ont récemment été proposées, où la calibration débute par les zones puis les systèmes, la centrale thermique et enfin le bâtiment en entier.

Cette approche *bottom-up* a été étudiée par Zibin (2014) qui a calibré successivement les zones, les systèmes, la centrale et le bâtiment. Pour chacune des étapes, les critères de calibration sont analysés. S'ils ne sont pas atteints et que le calage du modèle est suffisant, seules les données d'entrées de l'étape en cours sont modifiées. Sinon la calibration recommence à l'étape des zones. Cette méthode analyse la calibration à chaque étape, mais modifie seulement les données d'entrées sans changer le modèle des composants. Ji et Xu (2015) proposent une approche différente : au lieu de calibrer les zones individuellement, ils calibrent le modèle du bâtiment afin de s'assurer que le comportement thermique est représentatif. Ils calibrent ensuite les équipements non CVCA, puis les systèmes CVCA, la centrale et enfin le bâtiment au complet. Cela permet de calibrer en tenant compte de l'influence des zones les unes sur les autres. Une autre proposition de cette approche est de considérer qu'une fois que les zones sont correctement calibrées, l'unité de traitement d'air est elle-même calibrée (Mihai et Zmeureanu, 2017). Toutes les études sur la calibration s'appuient sur l'utilisation de données mesurées et s'intéressent à la qualité de celles-ci.

Les données utilisées pour calibrer le modèle n'ont pas toutes la même qualité. Raftery et al. (2011) ont créé une hiérarchie pour les types de données utilisées : (1) données de mesure enregistrées, (2) mesures à court terme, (3) observations directes, (4) interviews du personnel, (5) documents d'opération, (6) documents de mise en service (7) guide pratiques (8) standards et guides (9) données de conception. Cette hiérarchie permet de sélectionner les données à utiliser pour créer les entrées du modèle. Lorsque le bâtiment étudié est équipé d'un système BAS cela donne accès à un nombre important de données de premier rang. Cependant, comme l'explique Zibin et al. (2011), les données doivent être organisées et traitées en considérant la précision des capteurs pour documenter les différences entre les données mesurées et simulées. Ceci peut se faire en traitant les données d'entrées et en communiquant ensuite avec le logiciel pour envoyer les entrées, récupérer les résultats et les comparer avec les données mesurées. Comme les données mesurées sont conservées, les résultats des simulations (données simulées) peuvent aussi être analysés suivant cette approche.

Les résultats de la calibration sont généralement évalués à l'aide d'indices statistiques tels que le CVRMSE et le NMBE. Les valeurs à atteindre, pour une fréquence horaire, sont de 30% et 10%, respectivement pour le CVRMSE et le NMBE (ASHRAE Guidelines 14-2002). Cependant ces critères ont été développés à l'origine pour évaluer la consommation (Coakley et al., 2014). De plus, ils sont valables uniquement pour des pas de temps horaires ou mensuels. Ces critères ne peuvent donc pas s'appliquer directement pour des résultats de simulation avec un pas de temps plus faibles tel que requis pour le contrôle. Afram et al. (2014) ont identifié quatorze indices, mais sans expliquer lesquels sont les plus adaptés. Mihai et Zmeureanu (2017) proposent, en plus des indices habituels, l'indice t-statistique qui permet de prendre en compte les incertitudes du capteur. Cet indice permet de comparer l'écart entre les données mesurées et simulées avec l'incertitude du capteur. Ils considèrent que si l'écart entre les données mesurées et simulées est plus faible que l'incertitude de mesure alors la calibration est validée. Ils ont également prouvé qu'à ce niveau de détails, suivant les indices choisis, les résultats ne sont pas identiques pour un même système. Chakraborty et al. (2017) ont démontré qu'au niveau de l'analyse des systèmes, les indices couramment utilisés (NMBE et CVRMSE) pouvaient amener à faire de mauvaise interpétation. Il ont donc développé un indice *root mean square error* normalisé (RN_RMSE). D'autres critères pour les débits et températures, tel que le RMSE qui permet d'évaluer l'amplitude de l'erreur, ou le coefficient de corrélation (R^2) et le *goodness of fit* (G) qui sont utilisés pour analyser la correspondance, peuvent être utilisés pour évaluer si le modèle est calibré (Mustafaraj et al., 2008). Il n'y a pas de critères établis pour ces indices; cependant, l'objectif est de minimiser le RMSE et de maximiser le R^2 et le G.

PRÉSENTATION DU BÂTIMENT

Le bâtiment étudié est équipé de nombreux systèmes différents. L'approche de calibration est présentée pour une partie de ces systèmes (Figure 1). L'air neuf est d'abord prétraité par l'UTA 801, unité de traitement d'air (UTA) 100% air neuf équipée d'un récupérateur à cassette et d'un serpentin froid. Cet air est ensuite distribué à une unité de traitement d'air UTA 802, aux ventilo-convecteurs (VC) de type 1 et aux salles mécaniques. Ces dernières servent de boîte de mélange pour les VC de type 2. Dans chacun de ces systèmes, l'air est alors mélangé avec l'air de retour. Les VC de type 2 et l'UTA 802 alimentent alors directement les boîtes de mélange des zones en débit fixe. Ces boîtes ont donc deux entrées : une entrée d'air fixe qui renouvelle l'air de la zone (VC de type 2 ou UTA 802) et une entrée d'air variable.

ISBN 978-2-921145-88-6

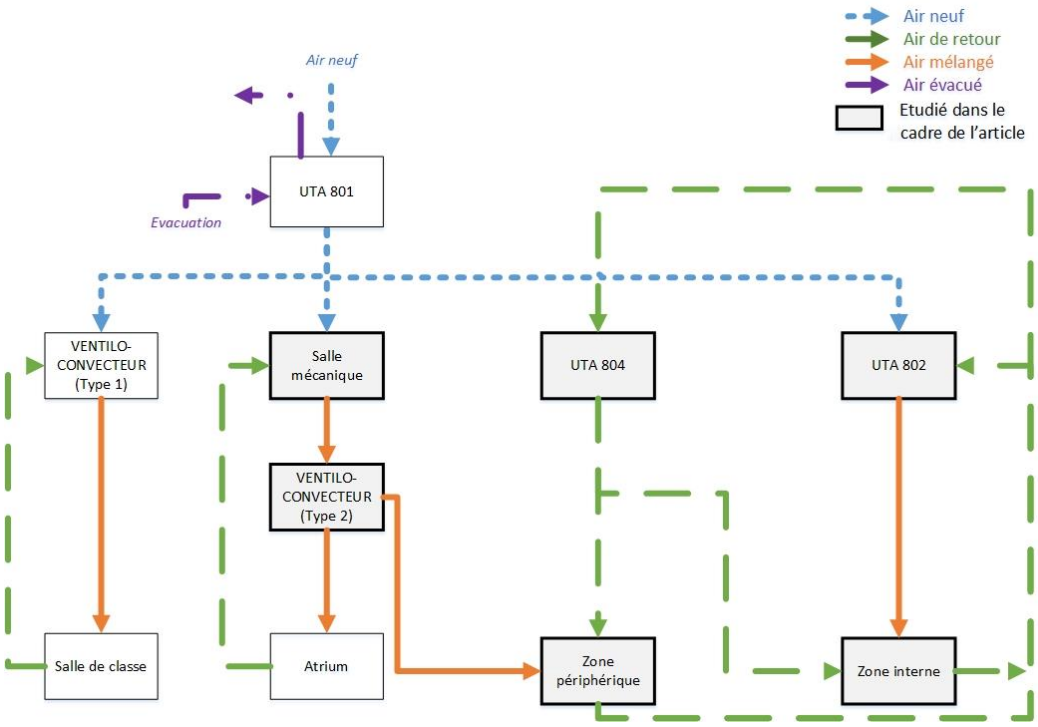

Figure 1 : Schéma de fonctionnement du système aéraulique du bâtiment étudié

Cette dernière est alimentée par l'UTA 804 qui fait seulement de la recirculation d'air pour le refroidissement en alimentant un air à 13°C. L'entrée d'air variable est donc seulement alimentée lorsque la zone a besoin de refroidissement. La priorité est donnée à l'UTA 802 et les VC de type 2. L'UTA 804 vient ensuite combler la charge restante. Les zones périphériques sont équipées de plinthes électriques qui permettent également de combler la charge restante en chauffage. En mode chauffage, la priorité est donnée aux serpentins de chauffage des VC de type 2 et de l'UTA 802. Cet article présente seulement la calibration des systèmes UTA 802, des VC de type 2 et de l'UTA 804.

MODÉLISATION ET CALIBRATION

L'objectif de la calibration est d'avoir un modèle détaillé et calibré des systèmes pour évaluer différents scénarios de contrôle. Une approche, combinant les méthodologies proposées par Zibin (2014) et Raftery et al. (2011) pour créer un modèle de base et ensuite l'affiner grâce aux résultats de calibration est proposée.

Approche

Chaque système est modélisé et calibré de façon indépendante en utilisant les données mesurées et suivant l'approche développée par Raftery et al. (2011). Le modèle de base pour chacun des systèmes est développé en utilisant la documentation de conception et de mise en service. Ce modèle de base est volontairement simplifié pour réduire le nombre d'hypothèses. Le modèle est ensuite complexifié au travers d'itérations qui nécessitent des mesures et hypothèses supplémentaires.

Les modèles sont ensuite jumelés pour représenter le système CVCA existant. Un nouveau processus de calibration où les modèles ou données d'entrées sont mises à jour basées cette fois sur l'approche *bottom-up* (Zinin, 2014) pour compléter cette étape. Cette approche permet dans un premier temps de réduire les temps de simulation, car chaque modèle est plus léger. Un modèle complexe et une période de calibration longue peuvent nécessiter des temps de simulation de plusieurs heures (Monfet et al., 2009). Dans un second temps, elle permet de s'assurer que chaque modèle du système représente le comportement réel de celui-ci.

Les systèmes sont modélisés avec le logiciel TRNSYS (Thermal Energy System Specialists, LLC, 2017) puisqu'il a la particularité d'être modulaire. Il permet de créer facilement des modèles de systèmes CVCA qui ont le même comportement que ceux installés dans le bâtiment. Il est également aisé de modifier ou de créer de nouveaux composants pour s'adapter à chaque bâtiment. De plus, il peut communiquer facilement avec d'autres logiciels.

La période de calibration dépend des données disponibles. Pour ce bâtiment les données sont sur la période estivale de juin 2017 à septembre 2017. Monfet et al. (2009) suggèrent d'utiliser les périodes d'opération de façon indépendante pour limiter les erreurs de compensation. L'évaluation de

ISBN 978-2-921145-88-6

différents scénarios de contrôle des équipements requière un pas de temps faible. Le pas de temps choisi est donc de 5 minutes. Les données mesurées du BAS pour estimer la charge et calibrer les modèles incluent entre autres :

- La température des zones
- La température d'alimentation des systèmes
- La température extérieure
- La concentration en CO2
- L'occupation
- Horaires de fonctionnement et saisons

Cette information est complétée par des mesures à court terme qui permettent de vérifier des points suspects et d'apporter des corrections sur les données qui serviront de référence. Les incertitudes sont également documentées avec les informations des fabricants (Table1). Ces incertitudes sont ensuite prises en considération lors de la comparaison entre les données mesurées et simulées.

Table 1: Données extraites et précisions

Données	Précision
Température de pièce (°C)	± 0.6 °C
Température d'alimentation (°C)	± 0.19 °C
Température moyenne de retour (°C)	± 1.9 °C
Débit des boîtes (L/s)	± 5 %

Données d'entrées et sorties du modèles

Il y a 27 zones alimentées par les systèmes étudiés. Les charges de chaque zone sont estimées à l'aide des données mesurées BAS, tels que les débits et températures des zones et à partir des équations (1), (2) et (3). Ces charges sont utilisées comme données d'entrée du modèle des systèmes. Pour ces zones, le débit de soufflage varie et la portion d'air neuf est fixe, la température d'alimentation est donc calculée selon les équations (3) et (4). Les débits et températures des zones sont validés avant de débuter la calibration. Les données de sortie pour chacun des modèles sont les débits et températures d'alimentation pour chaque zone et les charges au 5 min des serpentins ainsi que la puissance du ventilateur.

$$Q_Z = q_{as} * \rho_{air} * C_{p,air} * (T_A - T_Z) + Q_{plinthes} \quad (1)$$

$$q_{as} = q_{fixe} + q_{variable} \quad (2)$$

$$T_A = \frac{q_{fixe}}{q_{as}} * T_{an} + \frac{q_{variable}}{q_{as}} * T_{UTA804} \quad (3)$$

où Q_Z est la charge de la zone [kW]; q_{as} le débit d'alimentation [m^3/s]; ρ_{air} la densité de l'air [kg/m^3]; $C_{p,air}$ la chaleur spécifique de l'air [kJ/kg.K]; T_A la température d'alimentation [°C]; T_Z la température de la zone [°C]; $Q_{plinthes}$ la puissance des plinthes [kW]; q_{fixe} le débit d'air provenant de l'UTA 802 ou VC de type 2 [m^3/s]; $q_{variable}$ le débit d'air provenant de l'UTA 804 [m^3/s]; T_{an} la température de soufflage de l'UTA 802 ou VC de type 2 [°C]; T_{UTA804} la température de soufflage de l'UTA 804 [°C].

Création du modèle de base

Chaque système CVCA est modélisé à l'aide des données disponibles (documentation de conception et de mise en service, données mesurées BAS, etc.). Les comparaisons sont effectuées sur plusieurs variables et les charges des serpentins. Puisqu'il n'y a pas d'enregistrement de la consommation pour chaque serpentin, la consommation horaire de ceux-ci est estimée en utilisant l'équation (4) et les températures en amont et en aval des serpentins enregistrées par le BAS.

$$Q_h = \left(\sum_{i=1}^{i=\frac{60}{5}} \frac{q_{as} * \rho_{air} * C_{p,air} * (T_A - T_M)}{12} \right) \quad (4)$$

où Q_h est la consommation horaire [kWh] et T_M la température de mélange [°C]

La charge des serpentins existants étant calculées à partir des données mesurées il est primordiale de prendre en compte l'incertitude lors de la comparaison avec le modèle. La Table 2 présente les incertitudes sur la charge des serpentins de refroidissement des systèmes CVCA. Cette incertitude est plus importante pour les UTA 802 et UTA 804 car la précision de la sonde de température de retour est moindre (Table 1). L'incertitude sur la charge des serpentins est calculée à partir de l'ASHRAE Guideline 2-2010 (2010).

Table 2: Incertitude sur la charge des serpentins froids

Données	Précision (kW)
UTA 802	± 5.43
VC-3-7	± 0.13
VC-3-21	± 0.12
VC-3-22	± 0.14
UTA 804	± 4.12

L'UTA 802 alimente en air fixe les zones internes, deux modèles ont été évalués : (1) le modèle UTA 802A et (2) le modèle UTA 802B. Les deux modèles sont construits à partir des types 752f et 754f pour les serpentins et du type 146 pour le ventilateur. Les types 752f et 754f utilisent la température de consigne comme entrée. Le modèle UTA 802A estime la température de consigne d'alimentation à partir des demandes des boîtes enregistrées à l'aide d'un contrôleur. Les données d'entrées sont les demandes des zones enregistrées et les températures de sortie de l'UTA

ISBN 978-2-921145-88-6

801 et de retour des pièces. Le modèle UTA 802A simule une température d'alimentation plus stable que celle mesurée. Dans la réalité la température d'alimentation oscille fortement. Le modèle UTA 802B utilise comme température de consigne directement la température d'alimentation mesurée, ce qui permet de mieux reproduire les oscillations de la température et de la charge des serpentins (Figure 5). Ces deux modèles sont utilisés lorsque les différents systèmes sont combinés pour évaluer l'impact de la température de sortie de l'UTA 802 sur le modèle de l'UTA 804.

Les VC de type 2, représentés sur le schéma de la Figure 2, alimentent les boîtes de mélange des zones périphériques et sont alimentés en air par les salles mécaniques. Ces salles font le mélange entre l'air neuf et l'air de retour. En analysant la variation de la température d'alimentation d'air des VC en fonction de l'ouverture des valves des serpentins (Figure 3), il est possible de déterminer une relation directe entre le pourcentage d'ouverture et la température d'air d'alimentation. Pour une ouverture de valve comprise entre 0% et 20%, la température d'alimentation ne varie pas. Ceci permet de supposer que le serpentin n'a pas d'influence sur l'air et que la température mesurée peut être définie comme la température d'air à l'entrée du serpentin. Ceci signifie que cette température en entrée des serpentins est relativement constante. Des mesures in situ de température ont permis de confirmer cette hypothèse. Il est possible alors de choisir comme entrée du modèle soit la température d'air d'alimentation désirée ou l'ouverture de valve. Il a été décidé de choisir la température d'alimentation, car des mesures ont montré que l'enregistrement des ouvertures de valves était moins fiable. En effet le BAS enregistre parfois, en été, une ouverture de la valve d'eau chaude alors que la température de soufflage diminue et que les pompes sont à l'arrêt. La température de la salle mécanique constitue l'autre entrée du modèle des VC de type 2.

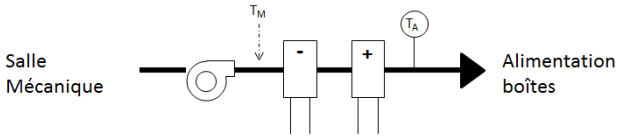

Figure 2 : Schéma de fonctionnement des VC de type 2

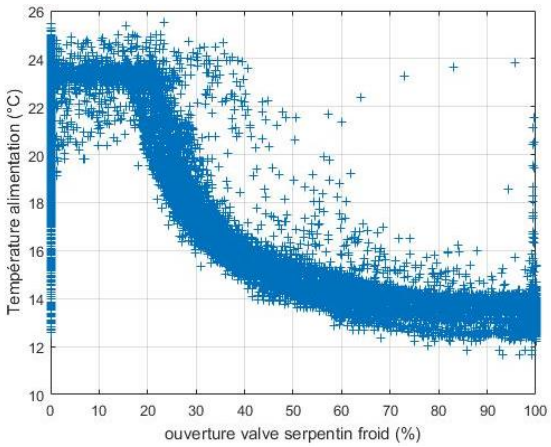

Figure 3 : Exemple d'évolution de la température d'alimentation d'un VC de type 2 en fonction de l'ouverture de la valve du serpentin froid

Les zones sont alimentées en air fixe par l'UTA 802 ou les VC de type 2. L'UTA 804 est à débit variable et permet de compenser la charge de refroidissement restante dans ces zones. Le modèle de l'UTA 804 utilise le type 155, nouveau type de la version 18 de TRNSYS, avec les charges des zones comme données d'entrée. La charge que doit combler l'UTA 804 pour une zone est modélisée suivant l'équation (5).

$$Q_{R,Z} = Q_Z - q_{fixe} * \rho_{air} * C_{p,air} * (T_{an} - T_Z) \quad (5)$$

où $Q_{R,Z}$ est la charge restante de la zone à combler par l'UTA 804 [kW].

Si la demande de refroidissement est nulle ou s'il y a une demande de chauffage, cette charge est nulle. Lors de l'analyse de l'UTA804, il apparaît que le ventilateur fonctionne à vitesse constante, bien que le débit total des boîtes évolue. La sonde de pression qui permet de réguler la vitesse est dans une branche morte qui n'est pas encore en service. La zone concernée représente 30 % de la surface totale desservie par cette unité, soit 800 L/s. Le débit manquant entre la mesure au ventilateur et la somme des boîtes se situe entre 700 et 1000 L/s. Dans le modèle, une zone additionelle, représentant cette zone morte, a donc été ajoutée afin de maintenir le débit au ventilateur à son débit minimum, soit de 43 % du débit total.

Le type 155 est paramétré avec un fichier de performance pour le ventilateur où le PLR (Part Load Ratio) est interpolé en fonction du FR (Fan Ratio). Des mesures de puissance in situ ont permis d'établir la relation entre ces deux paramètres et de produire un fichier de performance représentant le comportement réel de ce ventilateur (Équation (6)).

$$PLR = a + b * FR + c * FR^2 + d * FR^3 \quad (6)$$

Cette courbe est comparée avec celle de la loi des ventilateurs (Figure 4). Dans les conditions actuelles, le

ISBN 978-2-921145-88-6

ventilateur fonctionne seulement pour un FR compris entre 40% et 50%. Par conséquent le modèle pour les autres plages ne peut être vérifié. Le modèle possède la même allure que la loi du ventilateur, mais le PLR est légèrement plus faible. Les données d'entrées du modèle de l'UTA 804 sont les charges des zones et la température de soufflage de l'UTA 802 et des VC de type 2.

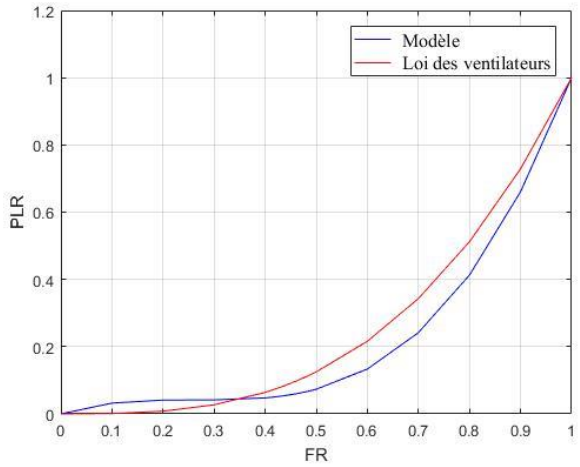

Figure 4 : PLR du ventilateur à débit variable en fonction du FR pour UTA 804

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de calibration pour chacun des systèmes indépendamment et de l'ensemble des systèmes sont présentés dans les sections suivantes. Lorsque les systèmes sont combinés, les données d'entrées sont les charges des zones et les conditions de soufflage de l'UTA801. Les sorties du modèle combiné sont les températures et débits d'air d'alimentation au niveau des zones ainsi que les charges et consommation de chacun des systèmes.

UTA 802

L'UTA 802 a été modélisée de deux façons différentes et la température d'alimentation ainsi que la charge de refroidissement ont été utilisées pour vérifier la calibration (Table 3 à Table 5). La prédiction de la température d'alimentation est légèrement meilleure pour le modèle UTA 802B (Table 3). Pour la consommation horaire, calculée à partir de l'équation (4), les deux modèles donnent des résultats similaires pour le NMBE (Table 4). Le CVRMSE, qui permet de mieux évaluer si le modèle est en mesure d'estimer ces variations, est plus élevé pour le modèle UTA 802A tout en satisfaisant les valeurs recommandées par ASHRAE (2002). En analysant les résultats sur la charge des serpentins aux 5 minutes, les variations sont très différentes (Figure 5). Les critères sur le CVRMSE et le NMBE ne sont plus applicables puisque le pas de temps d'analyse est inférieur à une heure. En revanche si la valeur de G et R^2 sont prises en considération (Table 5), celles-ci sont de 52% et 0.880 pour le modèle UTA 802A versus 90% et 0.996 pour le modèle UTA 802B. De même, le RMSE est plus faible pour le modèle UTA 802B, mais toutefois inférieur à l'incertitude de la charge de référence pour les deux cas. Les résultats au niveau de la température concordent avec les résultats sur la charge. Les indices sont calculés sur la période où le système est en fonctionnement. Le RMSE est supérieur à l'incertitude pour l'UTA 802A est inférieur pour l'UTA 802B (Table 1). L'analyse sur la période globale augmente la valeur de cet indice pour les deux cas, le RMSE du modèle UTA802B devient alors supérieur à l'incertitude. Il est donc possible de définir l'incertitude comme critère de rejet, après analyse des données. En revanche sur la charge, les deux modèles possèdent un RMSE inférieur à l'incertitude. Ce critère n'est donc pas suffisant., le G et la visualisation permettent de valider si le modèle suit les oscillations de la charge et de la température. Il apparaît également que le R^2 est moins sensible à la quantité de données que le RMSE. Les résultats des trois indices ainsi que la visualisation coïncident et permettent d'évaluer la calibration sur la charge du serpentin. Puisque les deux modèles permettent l'évaluation de scénarios de contrôle différents, la performance des deux est considérée lors de la calibration du système globale.

Table 3: Températures d'alimentation mesurées et simulées UTA 802, 4/06 au 30/09 2017

Indices	**Modèles**	
	UTA 802A	**UTA 802B**
RMSE [°C]	1.36	0.02
R^2	0.720	1.00
G [%]	30.56	99.1

Table 4: Consommations horaires mesurées et simulées du serpentin froid UTA 802, 4/06 au 30/09 2017

Indices	**Modèles**	
	UTA 802A	**UTA 802B**
NMBE [%]	-6.87	4.23
CVRMSE [%]	16.11	6.70

ISBN 978-2-921145-88-6

Table 5: Charges mesurées et simulées du serpentin froid UTA 802, 4/06 au 30/09 2017

Indices	Modèles	
	UTA 802A	**UTA 802B**
RMSE [kW]	3.26	0.67
R^2	0.884	0.996
G [%]	52.32	90.21

VC DE TYPE 2

Les résultats de calibration pour les trois VC de type 2 sont présentés aux Table 6 et Table 7. Les indices au niveau de la consommation horaire permettent de rencontrer les critères ASHRAE (2002). Les indices sur la température d'alimentation (Table 6) montrent que le modèle représente bien la réalité. En revanche les indices sont un peu plus faibles sur la charge du serpentin (Table 7).

Table 6: Températures d'alimentation mesurées et simulées VC, 4/06 au 30/09 2017

Indices	Modèles		
	VC-3-7	**VC-3-21**	**VC-3-22**
RMSE [°C]	0.67	0.43	0.29
R^2	0.99	0.995	0.996
G [%]	85.46	90.12	91.33

Table 7: Charges mesurées et simulées des serpentins froids des VC, 4/06 au 30/09 2017

Indices	Modèles		
	VC-3-7	**VC-3-21**	**VC-3-22**
RMSE [kW]	0.50	0.52	0.64
R^2	0.944	0.975	0.948
G [%]	65.62	76.68	68.12

UTA 804

Le modèle de l'UTA 804 a d'abord été calibré au niveau des zones soit sur le débit et la température d'alimentation pour chacune des zones. Une fois que le débit et la température au niveau des zones sont acceptables, le modèle est calibré sur la consommation et la puissance du ventilateur et du serpentin froid. Les résultats présentés sont obtenus après 4 itérations pour la calibration des zones. Une fois les débits calibrés, l'UTA 804 ne nécessite pas de calibration supplémentaire. Il y a 27 boîtes desservies par l'unité : 15% de ces boîtes ne sont pas ouvertes pendant la période de calibration; par conséquent, il n'est pas possible d'utiliser les indices car les valeurs de référence sont nulles. Seule la visualisation permet de valider le modèle pour ces zones. Pour les autres boîtes, 86% de celles-ci ont un G supérieur à 75% pour le débit et la température. Les boîtes qui ont un G inférieur à 40 % sont des boîtes qui sont ouvertes une ou deux fois sur la période. L'utilisation du R^2 comme critère de calibration n'est pas suffisante car l'indice ne varie qu'entre 0.76 et 1. À titre d'exemple, lorsque le G varie de 20%, le R^2 ne varie que de 0.02. Quant au RMSE, pour l'utiliser, il est important de le rapporter au débit maximal de la boîte. Par exemple, pour une boîte le RMSE de 19 L/s (pour un G de 82 %) représente en fait seulement 6 % du débit total. La visualisation vient ainsi compléter le processus de validation de la calibration. Elle permet également de vérifier si le modèle est en mesure de suivre les oscillations du système. En effet, les boîtes peuvent avoir des critères de calibration qui sont acceptables même si le débit oscille autour de la valeur mesurée (Figure 6).

Les résultats sur la puissance du ventilateur et la charge du serpentin ainsi que la consommation horaire sont répertoriés dans les Table 8 et Table 9 ainsi que présentés sur la Figure 7. Les résultats sur la charge du serpentin coïncident et montrent une bonne calibration. La puissance mesurée oscille plus que celle simulée. Cela est dû à la vitesse minimale modélisée de 43 %. Dans la réalité cette vitesse varie. Le RMSE est cependant faible puisque les oscillations sont faibles, ce qui permet de valider le modèle malgré un G plus faible. Les critères de l'ASHRAE (2002) sont satisfaits pour les deux composants. Le CVRMSE et le NMBE ne pouraient pas être utilisés comme indices pour calibrer sur les débits car ils sont sensibles à la moyenne des données et que les valeurs de débits peuvent être nulles. Cela a pour conséquence d'abaisser la moyenne et donc d'augmenter les indices.

Table 8: Puissances mesurées et simulées UTA 804, 4/06 au 30/09 2017

Indices	Modèles	
	Ventilateur	**Serpentin froid**
RMSE [kW]	0.14	0.71
R2	0.927	0.996
G [%]	62.31	90.45

Table 9: Consommations horaires mesurées et simulées UTA 804, 4/06 au 30/09 2017

Indices	Modèles	
	Ventilateur	**Serpentin froid**
NMBE [%]	2.29	-1.21
CVRMSE [%]	14.10	4.55

ISBN 978-2-921145-88-6

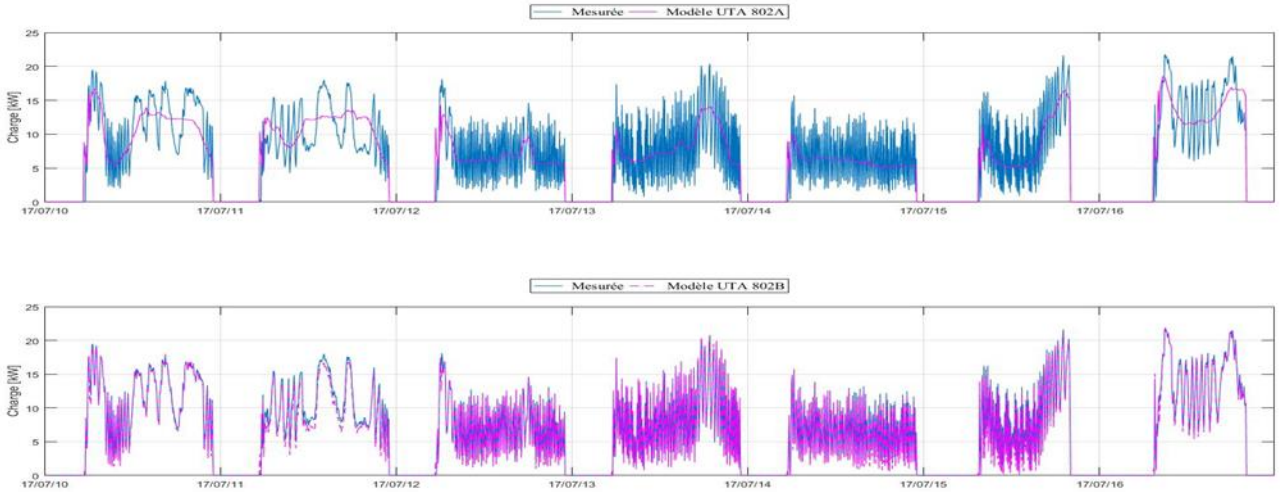

Figure 5 : Variation de la charge du serpentin froid pour le modèle (a) UTA 802A et (b) UTA 802B, 10-17/07/2017

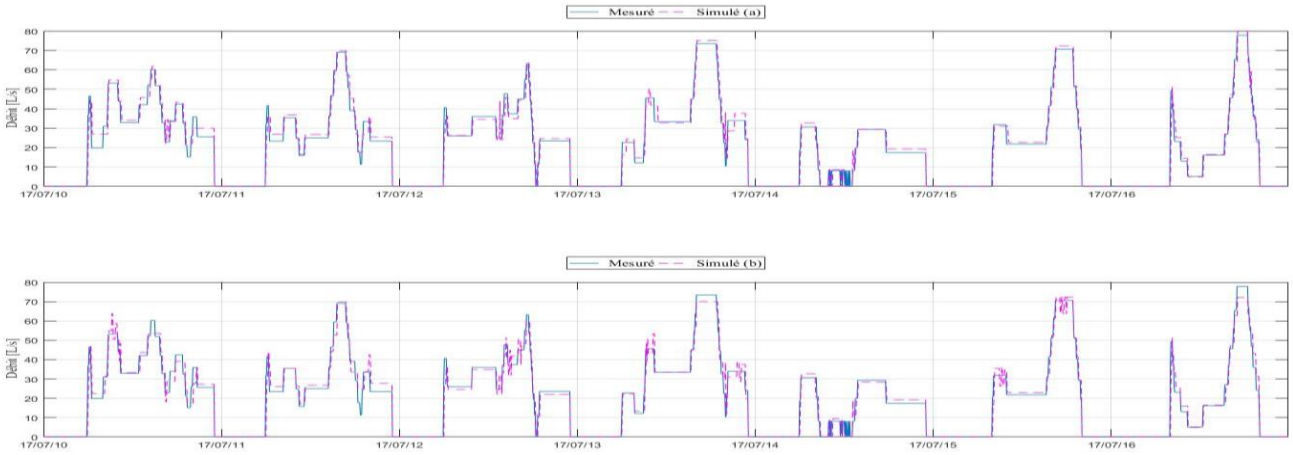

Figure 6 : Variation du débit d'air d'une boîte pour (a) modèle initial et (b) modèle modifié UTA 804, 10-17/07/2017

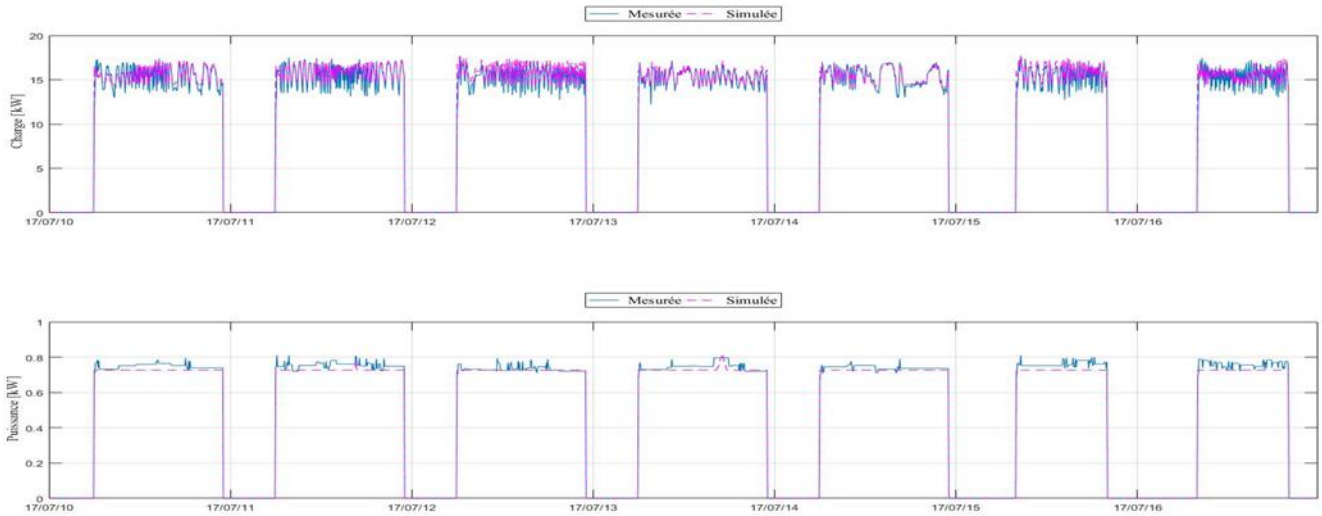

Figure 7 : Variation de la charge du serpentin froid (a) et de la puissance du ventilateur (b) UTA 804, 10-17/07/2017

ISBN 978-2-921145-88-6

Ensemble des systèmes

Une fois chaque système calibré, ils sont combinés et connectés entre eux dans TRNSYS. La température de l'air en sortie de l'UTA 802 et des VC devient la température d'entrée pour le calcul de charge restante selon l'équation (5). L'impact de l'intégration de tous les systèmes influence seulement les résultats de l'UTA 804 et des pièces. Le modèle de l'UTA 802A est utilisé dans le modèle global A tandis que le modèle UTA 802B est utilisé dans le modèle global B. Au niveau de la température des zones, il n'y a pas de changement, car le modèle oblige le débit à s'adapter pour maintenir les conditions d'alimentation. Les boîtes alimentées par les VC et l'UTA 804 ont de bons résultats : 90% des boîtes ont un G supérieur à 75% et un RMSE inférieur à 10 L/s. Ceci est dû au fait que la calibration sur la température d'alimentation des VC de type 2 était bonne (Table 6). En revanche, pour les boîtes alimentées par l'UTA 802 et l'UTA 804, les résultats sont plus faibles. Le modèle UTA 802B permet d'avoir 52 % des boîtes qui ont un G supérieur à 75% tandis que le modèle UTA 802A ne permet d'en avoir que 6%. De même, le RMSE sur le débit des boîtes est en général plus faible avec le modèle UTA 802B. Les résultats sur les composants de l'UTA 804 sont répertoriés dans les Table 10 et Table 11.

Au niveau du ventilateur, les différences entre le modèle A et le modèle B sont faibles car il y a un débit de fuite important qui oblige le ventilateur à se maintenir à une vitesse constante peu importe le débit au niveau des boîtes. Les indices du modèle B sont légèrement meilleurs que le modèle A sur la charge du serpentin. Ceci s'explique par une meilleure simulation de la température de soufflage du modèle de l'UTA 802B, ce qui permet un calcul de charge restante plus proche des valeurs réelles. Cependant, les résultats obtenus démontrent que les deux modèles d'UTA802 (A & B) seraient acceptables sur les résultats de l'UTA 804. La calibration initiale de l'UTA 802 confirme que le modèle B est plus représentatif du comportement réel puisque les oscillations de la charge et de la température d'alimentation sont mieux simulées (Figure 5). Pour les deux modèles globaux A et B, les critères d'ASHRAE (2002) sont rencontrés (Table 11). De plus, les résultats de la Table 11 montrent que le modèle A est meilleur que le modèle B alors qu'en réalité avec les autres indices c'est le modèle B qui est plus proches des valeurs mesurées. L'analyse au niveau des zones permet de supporter la décision de choisir le modèle B puisque les valeurs modélisées de débit sont plus proches de celles mesurées. Par conséquent, la calibration sur les conditions de soufflages des zones permet de mieux représenter le comportement réel de celles-ci.

Table 10: Puissances mesurées et simulées UTA 804 (ensemble des systèmes), 4/06 au 30/09 2017

Indices	Modèles			
	Modèle A		Modèle B	
	Ventilateur	Serpentin froid	Ventilateur	Serpentin froid
RMSE [kW]	0.14	1.23	0.14	0.71
R^2	0.929	0.98	0.927	0.996
G [%]	62.74	83.43	62.3	90.45

Table 11: Consommations horaires mesurées et simulées UTA 804 (ensemble des systèmes), 4/06 au 30/09 2017

Indices	Modèles			
	Modèle A		Modèle B	
	Ventilateur	Serpentin froid	Ventilateur	Serpentin froid
NMBE [%]	2.75	0.66	2.29	3.43
CVRMSE [%]	13.15	5.66	14.11	5.87

CONCLUSION

L'objectif de cette étude est de proposer une approche de calibration pour un ensemble de systèmes ayant de fortes interactions entre eux. Afin de limiter les temps de simulation, chacun des systèmes est calibré de façon indépendante puis l'ensemble des systèmes est ensuite calibré. Si les systèmes sont calibrés correctement individuellement, il y n'a pas de modifications à compléter pour l'ensemble des systèmes. La méthode de Raftery et al. (2011) permet d'identifier les particularités d'opération des systèmes existants. Ainsi le modèle représente plus fidèlement le comportement des systèmes CVCA existants. De plus, l'approche itérative permet de conserver un modèle simplifié mais précis. L'approche *bottom-up* ainsi que la calibration indépendante des systèmes permettent de mieux répliquer les conditions réelles d'utilisation et limite les erreurs de compensation sur la modélisation des systèmes, tout en réduisant les temps de simulation lors de la phase de calibration. Cependant, il nécessite une quantité importante de données mesurées. Les indices couramment utilisés pour valider la calibration, tels que le CVRMSE et le NMBE, ne sont pas adaptés pour analyser les variations de charges ou de température. Les indices comme le RMSE, le R^2 et le G permettent de valider le processus de

ISBN 978-2-921145-88-6

calibration sur la charge et la température. La visualisation est un outil également indispensable qui permet de repérer rapidement les écarts importants.

Pour compléter l'étude, le modèle de système CVCA est connecté au modèle du bâtiment via le BCBTV. Différentes stratégies de contrôles sont alors testées. Les analyses pourront alors être effectuées sur la consommation, mais également sur le confort thermique.

RÉFÉRENCES

Afram, A., & Janabi-Sharifi, F. (2015). Gray-box modeling and validation of residential HVAC system for control system design. *Applied Energy, 137*, 134-150.

Agency, I. E. (2015). Energy Efficiency Market Report. Repéré à https://www.gita.org.in/Attachments/Reports/MediumTermEnergyefficiencyMarketReport2015.pdf (Consulté le 20 janvier 2018)

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

ASHRAE Guideline 2-2010 (2010). Engineering Analysis of Expérimental Data. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., Atlanta

Candanedo, J. A., Dehkordi, V. R., & Lopez, P. (2013). A control-oriented simplified building modelling strategy. Dans 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association, BS 2013, August 26, 2013 - August 28, 2013 (pp. 3682-3689). International Building Performance Simulation Association.

Chakraborty, D., & Elzarka, H. (2017). Performance testing of energy models: are we using the right statistical metrics? Journal of Building Performance Simulation, 1-16.:

Cloutier, E., Mamfredis, V., Pronovost, F., Porcher, G., & Roy, M. (2017). Les bâtiments municipaux. Repéré à http://www.mamunicipaliteefficace.ca/37-efficacite-energetique-ges-les-batiments-municipaux.html#texte5Consulté le 20 janvier 2018)

Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37, 123-141.

Ji, Y., & Xu, P. (2015). A bottom-up and procedural calibration method for building energy simulation models based on hourly electricity submetering data. Energy, 93, 2337-2350.

Liu, S., & Henze, G. P. (2005). Calibration of building models for supervisory control of commercial buildings. Dans Building Simulation 2005 - 9th International IBPSA Conference, BS 2005, August 15, 2005 - August 18, 2005 (pp. 641-648). International Building Performance Simulation Association.

Mihai, A., & Zmeureanu, R. (2017). Bottom-up evidence-based calibration of the HVAC air-side loop of a building energy model. Journal of Building Performance Simulation, 10(1), 105-123.

Monfet, D., Charneux, R., Zmeureanu, R., & Lemire, N. (2009). Calibration of a building energy model using measured data. Dans 2009 ASHRAE Winter Conference, January 25, 2009 - January 28, 2009 (Vol. 115 PART 1, pp. 348-359). Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditoning Eng. Inc.

Mustafaraj, G., Chen, J., & Lowry, G. (2010). Thermal behaviour prediction utilizing artificial neural networks for an open office. Applied Mathematical Modelling, 34(11), 3216-3230.

Raftery, P., Keane, M., & O'Donnell, J. (2011). Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. Energy and Buildings, 43(9), 2356-2364.

Sansregret, S. (2017). Calibration de modèles Modélisation énergétique des bâtiments. Polytechnique Montréal.

Thermal Energy System Specialists, LLC (2017). TRNSYS (Version 18) [Logiciel]. Madison USA.

Wetter, M. (2011). Co-simulation of building energy and control systems with the building controls virtual test bed. Journal of Building Performance Simulation, 4(3), 185-203.

Zibin, N. (2014). A Bottom-up Method to Calibrate Building Energy Models Using Building Automation System (BAS) Trend Data. (Thèse, Concordia University, Montréal).

Zibin, N., Zmeureanu, R., & Love, J. A. (2013). Use of Building Automation System Trend Data for Inputs Generation in Bottom-Up Simulation Calibration. Energy Systems Laboratory. Texas A&M University

ISBN 978-2-921145-88-6