

Etudes de sensibilité avec COMETH

Benjamin Haas^{*1}, Paul Jallet¹, Christophe Gay², Khadija Tijani^{1,3}

¹ Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

84, avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2

² AUSY

10 Rue des Acacias, 92134 Issy-les-Moulineaux

³ G-SCOP

46, avenue Félix Viallet - 38031 Grenoble Cedex 1

*benjamin.haas@cstb.fr

RESUME. La place importante des outils de calcul dans l'évaluation de la performance énergétique d'un bâtiment associé aux exigences toujours plus importantes sur les performances des bâtiments nécessite aujourd'hui de porter un regard critique sur leur fiabilité. Dans le cadre du projet ANR FIABILITE (HABISOL 2010), COMETH, (Cœur de calcul pour la Modélisation Énergétique et le confort Thermique) a été utilisé pour effectuer des études de sensibilité à divers paramètres. Cette démarche vise plusieurs objectifs. Tout d'abord, à valider notre capacité à fournir à la filière bâtiment des outils d'analyse de sensibilité rapide, simple d'utilisation et dont les résultats sont rapidement exploitables. Ensuite, sonder des paramètres jusqu'ici laissés de côté dans les approches thermiques horaires dynamiques dites "simples" (en référence au vocabulaire de la norme ISO 13790).

MOTS-CLEFS. COMETH, étude de sensibilisé, SED

ABSTRACT. Simulation tools are increasingly used for the evaluation of the energy consumption of buildings. As the performance of new buildings is required to be close to those of NZEB, and pressure is put on the renovation sector, the reliability of the tools must be questioned. Supported by the Agence Nationale de la Recherche project FIABILITE, we used COMETH (COre For Modelling Energy Consumption and THERmal Confort) to evaluate the sensitivity to several parameters. We aim at several objectives. First, we wish to validate our capacity to deliver sensitivity tools to the various stakeholders. Such a tool should be easy to use, results must lead to decisions. We also use this opportunity to check the sensitivity to parameters of the so-called simple hourly model (after ISO 13790 vocabulary)

KEYWORDS. COMETH, Energy modeling, sensitivity studies

1 INTRODUCTION

Les outils de calculs énergétiques sont aujourd'hui largement utilisés pour l'aide à la conception et à la rénovation. COMETH (Cœur de calcul pour la Modélisation Énergétique et le confort

Thermique) est un moteur de calcul énergétique (Videau et al., 2013), dynamique au pas de temps horaire, créé par le CSTB. Cette bibliothèque de calcul sert de fondation au code réglementaire dans la RT2012 (CSTB, 2011). Il simule le comportement thermique et énergétique d'un bâtiment et de ses systèmes énergétiques afin de calculer les consommations d'énergie et des indicateurs de confort. Les phénomènes thermiques et aérauliques sont pris en compte de manière couplée. Le modèle thermique est issu de la méthode horaire de la norme ISO 13790 (ISO, 2008b) et le modèle aéraulique est largement inspiré de la norme EN 15242 (ISO, 2008a). De nombreux systèmes CVC, d'éclairage, et d'eau chaude sanitaires avec leurs régulations sont couplés dynamiquement pour valoriser pertes récupérables et gestions intégrées. Ce couplage offre l'avantage de proposer une approche holistique du bâtiment, où la concomitance des phénomènes est largement valorisée, élément indispensable pour évaluer correctement des bâtiments économes en énergie.

Toutefois, l'empilement de modèles unitaires rend difficile d'identifier les paramètres qui influenceront le plus les résultats. Ceci pose de réels problèmes dans l'appropriation de ce type d'outils. Le nombre de modèles unitaires importants a deux effets principaux en termes de compréhension de l'outil : l'augmentation du nombre de paramètres, et la dilution de l'impact de ces paramètres dans les nombreux modèles dans lesquels ils peuvent intervenir, directement ou indirectement (via les pertes par exemple). Le processus de conception n'étant pas associé à un unique calcul, mais à une suite de calculs où le projet est constamment amélioré, il est crucial de comprendre quel paramètre a une chance d'améliorer tel aspect de la performance du bâtiment. Cet effort de pédagogie est indispensable à la valorisation des calculs holistiques dans la filière.

C'est l'objet du présent article qui s'attache, dans le cadre de COMETH, à étudier la question d'outils d'analyses de sensibilité. Ce n'est pas tant des résultats universels que nous souhaitons présenter dans ce travail que des méthodologies à adapter à chacun pour permettre d'évaluer la sensibilité des résultats de calcul aux valeurs des paramètres pour des cas précis de conception/rénovation, et permettre ainsi d'identifier des voies d'amélioration du projet les plus pertinentes.

Dans le cadre du projet ANR Fiabilité, nous avons travaillé sur un couplage entre COMETH et des outils d'étude de sensibilité standard. Nous présentons ici la méthode employée, sa validation par confrontation avec des résultats obtenus sur d'autres projets, ainsi que des résultats de sensibilité sur des paramètres souvent peu étudiés. Nous présentons Figure 1 la structure de la chaîne de calcul.

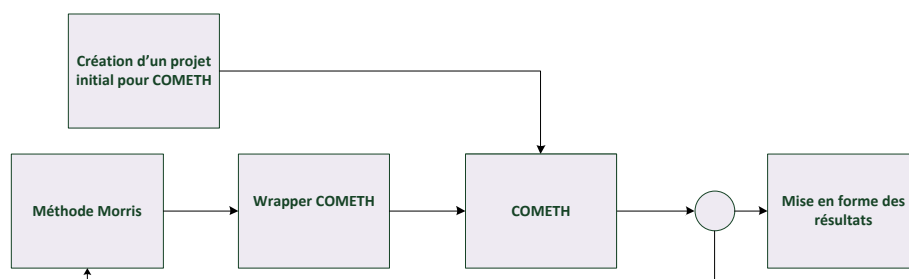


FIGURE 1. structure de la chaîne logicielle utilisée pour l'étude sensibilité sous COMETH

Dans une première partie, nous rappelons le principe de la méthode de Morris, et nous présentons la manière dont nous l'avons implémentée. Par la suite, nous présentons le couplage avec COMETH et la présentation des résultats. Ensuite, nous présentons, basés sur deux variantes d'un même cas, des études de sensibilités à quelques paramètres.

2 IMPLÉMENTATION DE LA MÉTHODE DE MORRIS

2.1 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

La méthode de Morris (Morris, 1991; Saltelli et al., 2000) permet de faire une analyse de sensibilité globale de la sortie d'une fonction $F : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$ à ses N paramètres. Le principe de la méthode est d'échantillonner à l'intérieur d'une plage de valeurs les N paramètres et d'itérer sur ces valeurs de manière à ce qu'un seul paramètre voit sa valeur changée (processus OAT, « One At a Time »). A chaque itération, $F(\vec{x})$ est calculée, et est comparée à sa valeur obtenue à l'itération précédente. Une collection d'effets élémentaires $d_i(\vec{x})$ est ainsi créée :

$$d_i(\vec{x}) = F(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta_i, \dots, x_N) - F(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N) . \quad (1)$$

L'analyse statistique de cette collection permet d'extraire deux paramètres. Le premier, μ_i , permet d'analyser la sensibilité globale de la sortie à une variation du paramètre x_i . Il est basé sur la moyenne des $d_i(\vec{x})$ que nous avons choisi de normaliser comme suit :

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{\vec{x}} \frac{d_i(\vec{x})}{\Delta_i} \times \frac{\bar{x}_i}{F(\vec{x})} , \quad (2)$$

où \bar{x}_i est la valeur centrale de \vec{x} . Cet indicateur est normalisé de telle manière qu'il soit adimensionné. La valeur de μ_i représente le rapport algébrique d'un écart sur la sortie par rapport à l'écart sur le paramètre d'entrée qui en est la cause. A titre d'exemple $\mu_i = 0.1$ signifie qu'une variation de 10% de x_i entraîne une variation de l'ordre de grandeur de 1% sur la sortie. En ordre de grandeur uniquement : en effet, cet indicateur ne fournit qu'une indication de la sensibilité globale sur l'intervalle considéré. Un autre indicateur permet de mesurer la dispersion de la sensibilité, c'est-à-dire le risque que l'impact soit plus ou moins important que la valeur μ_i sur l'intervalle considéré. Il s'agit de l'indicateur basé sur l'écart type des $d_i(\vec{x})$:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{\vec{x}} \left(\frac{d_i(\vec{x})}{\Delta_i} \times \frac{\bar{x}_i}{F(\vec{x})} - \mu_i \right)^2} . \quad (3)$$

Cet indicateur reflète les linéarités de F . En effet, si F est linéaire par rapport x_i , σ_i sera nul. Les non-linéarités et interactions entre paramètres, qui peuvent s'avérer extrêmement complexes dans COMETH étant donné la valorisation de la concomitance des phénomènes, sont ainsi explicitées et viennent compléter l'indicateur global μ_i .

Le tirage des \vec{x} doit respecter la contrainte de variation OAT. Notre implémentation utilise une tirage aléatoire pour décider de la variable à faire évoluer. Cette approche par Monte-Carlo permet de minimiser les temps de calcul.

Le principal avantage de la méthode est sa simplicité de mise en œuvre et de compréhension. Pour chaque paramètre d'intérêt, deux indicateurs viennent le caractériser. Il est éventuellement possible de combiner ces deux indicateurs pour en créer de plus simples, au regard des besoins d'un utilisateur final de type bureau d'étude. En pratique, la question est souvent axée sur le fait d'avoir une liste de paramètres les plus influents plutôt que de caractériser leur influence, ou de les classer de manière précise les uns par rapports aux autres. Ce dernier point est, en tout état de cause, risqué à mettre en œuvre avec une telle méthode de sensibilité globale.

2.2 IMPLÉMENTATION

La méthode de Morris est facile à implémenter. Ceci est un des avantages de la méthode, ce qui a nous conduit à développer un code en Python plutôt de chercher à en réutiliser un existant. Le travail en Python, initialement guidé par une volonté de couplage OpenTurns (EDF, 2014). L'absence de la méthode Morris dans ce package nous a donc poussé à la développer, en valorisant certains points clefs.

Tout d'abord, COMETH est développé en .Net. Doté d'une API afin d'en assurer le pilotage, nous avons exploité le package *Python For .Net* (Lloyd, 2014) qui permet de représenter les objets .Net en objets Python et assurer un accès totalement transparent. Le développement d'un code dédié a ainsi permis de simplifier une partie plus complexe que l'écriture du code de la méthode de Morris en elle-même : le wrapper de COMETH. Le wrapper permet de ramener la fonction COMETH à une fonction $F : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$ avec N une valeur raisonnable, et une sortie adaptée à problème précis (consommation totale, consommation de chauffage, ...).

La méthode de Morris elle-même a été optimisée pour tirer partie des architecture parallèles des machines du bureau actuelles.

3 CAS D'ÉTUDE

3.1 PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE

Nous avons profité de cette architecture logicielle pour mener des études de sensibilité sur une maison individuelle. Avec une consommation de chauffage en énergie primaire de 36 kWh/m² par an, cette maison est chauffée à l'effet Joule. Sa SHON est de 102.9 m², ses murs extérieurs ont un coefficient de transmission thermique 0,173 W/m²K et sa toiture terrasse de 0,124 W/m²K. Son taux de vitrage est de 20%, les baies donnant sur l'est et sur l'ouest, dotées de volets. La perméabilité est de $Q_{4\text{Pa,surf}} = 0,2 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ mesuré à 4 Pa (ramené à la surface déperditive). Son inertie quotidienne est dans la classe « moyenne ».

Nous allons étudier deux variantes de cette maison. Une première est équipée d'un système simple-flux d'un débit de 210 m³/h et entrées d'air. L'autre est une double-flux équilibrée d'un débit de 210 m³/h.

Nous présentons maintenant la listes des paramètres sur lesquels nous avons décidé de réaliser l'étude de sensibilité.

Tout d'abord nous avons effectué une analyse de sensibilité sur des paramètres qui représentaient autant le bâti, les systèmes que les hypothèses du modèle thermique.

Nous nous intéressons à la ventilation. Plusieurs paramètres pilotent l'aéraulique du bâtiment. La perméabilité dont le comportement est représenté par une collection de composants caractérisés par la loi débit/pression suivante :

$$q(\Delta P) = \text{sgn}(\Delta P)C\Delta P^{0.5}, \quad (4)$$

ΔP étant la différence de pression hydrostatique entre l'intérieur et l'extérieur du composant, corrigée d'une composante dynamique due à la vitesse du vent. C est le module de ce composant, directement lié à l'indicateur de perméabilité $Q_{4\text{Pa,surf}}$. Ces éléments sont disposés de manière équitable au vent et sous le vent, ces deux aspects étant représentés par des coefficients de pression différents C_p . L'altitude des composants est également importante. Nous faisons l'hypothèse, conformément à la RT2012, que nous disposons deux éléments sous le vent, à deux altitudes différentes, et deux au vent. Notre étude de sensibilité porte donc sur le paramètre C , sur un paramètre pilotant globalement l'altitude des entrées d'air z , et sur un paramètre contrôlant globalement les coefficients de pression C_p . Nous interrogeons également le débit d'air imposé, que ce soit en double-flux ou en simple-flux.

Nous nous intéressons également aux paramètres de l'inertie dans COMETH. Celle-ci est caractérisée par une surface d'échange équivalente Am et une capacité thermique quotidienne Cm .

Nous explorons ensuite des paramètres figés dans la réglementation thermique, libres dans COMETH. Il s'agit des coefficients d'échanges radiatifs intérieurs h_{ri} et convectifs intérieurs h_{ci} . Conventionnellement fixés respectivement à 5,5 W/m²K et 2.5W/m²K. Également, h_e le coefficient d'échange extérieur global et h_{re} le coefficient d'échange extérieur radiatif.

Symboles utilisés dans les graphiques	Description de la variable
Qv_dep_occ	Débit d'air extrait dans le cas d'une simple-flux. Débit extrait et soufflé dans le cas d'une double-flux (car équilibrée)
Am	Surface d'échange équivalente utilisée dans le modèle thermique
Cm	Capacité thermique quotidienne
Permea_module	Module C des lois de débit d'air utilisée pour la modélisation de la perméabilité
Permea_z	Hauteur des modules d'entrée d'air utilisés pour représenter la perméabilité
Permea_Cp	Coefficient de pression dynamique due au vent sur les modules d'entrée d'air utilisés pour représenter la perméabilité
Pem_conv	Ratio définissant la part d'énergie émise de manière convective et radiative par les émetteurs
Hci	Coefficient d'échange radiatif intérieur
Hri	Coefficient d'échange convectif intérieur
He	Coefficient d'échange extérieur global
Hre	Coefficient d'échange radiatif extérieur

TABLE 1: Liste des variables étudiées, nommées tel qu'elles apparaissent dans les différents graphiques.

Enfin, nous examinons l'impact de la définition de la température de sonde, c'est à dire la grandeur physique sur laquelle est appliquée la température de consigne dans le modèle. Dans la réglementation, cette température de sonde T_{sd} est définie par

$$T_{sd} = P_{sd}T_{air} + (1 - P_{sd})T_{rm} , \quad (5)$$

T_{air} étant la température de l'air et T_{rm} la température radiante moyenne, et nous explorons la sensibilité à P_{sd} .

La notation utilisée pour tous ces paramètres dans les divers graphes qui sont présentés par la suite est disponible dans la Tableau 1.

3.2 ANALYSE EN MODE CALCUL DES BESOINS DE CHAUFFAGE

Nous menons une première analyse dans le cadre du calcul des besoins de chauffage du bâtiment. Les systèmes sont conventionnels et la ventilation une double-flux équilibrée avec un échangeur d'une efficacité de 0.5.

Les résultats de cette étude sont présentés Figure 2. Une première remarque et l'aspect totalement négligeable des écarts types comparés au sensibilités globales. Le modèle est donc globalement assez linéaire dans les paramètres étudiés. En calcul de besoin, ceci s'explique facilement. Le modèle thermique est linéaire, les seules causes de non-linéarité venant de l'algorithme calculant les périodes de chauffe et les périodes de relance, ainsi que des lois non linéaire en la différence de pression du modèle de perméabilité (le coefficient de pression intervient dans la définition de la différence de pression). Une deuxième remarque est l'importance écrasante du débit d'air. C'est de loin le paramètre le plus important, quasiment 10 fois plus important que tous les autres. Les paramètres conventionnels du modèle thermique, ainsi que les inerties et les caractéristiques des perméabilités sont assez peu critiques. La faible sensibilité de l'inertie est assez attendue, elle impacte plus sur le confort thermique que la consommation annuelle d'un bâtiment.

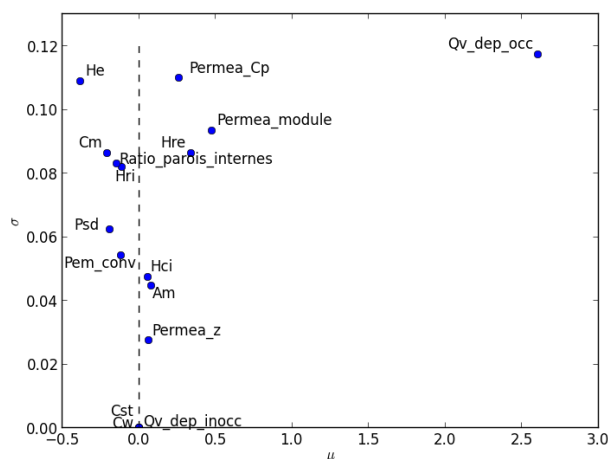


FIGURE 2. Résultat de l'analyse de sensibilité pour notre cas de maison individuelle sur les paramètres mentionnés section 3.2. La représentation montre l'indice de sensibilité global μ en abscisse et l'écart type σ en ordonnée.

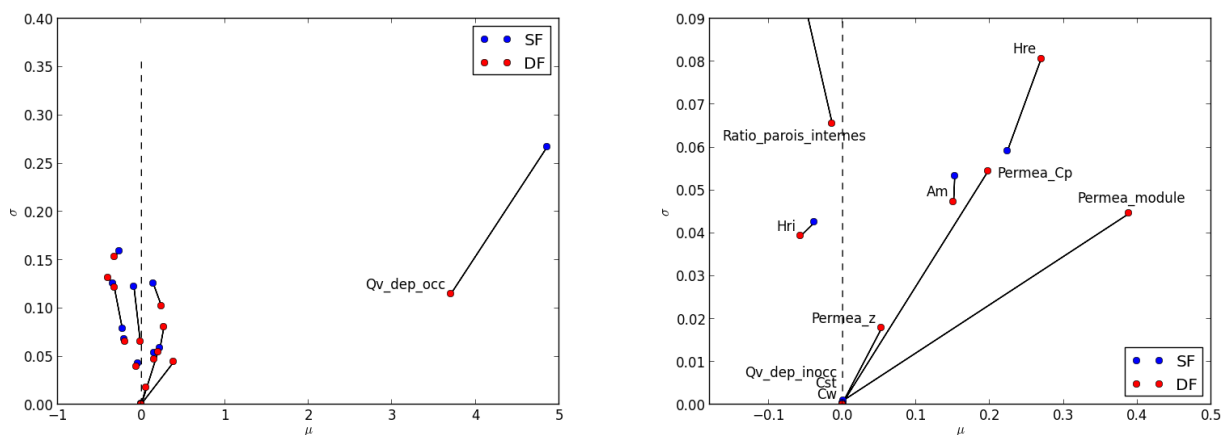


FIGURE 3. Comparaison des sensibilités aux paramètres entre une solution simple-flux notée SF en bleu, et double-flux notée DF en rouge. Le premier graphe donne une vision globale des résultats. Le deuxième (droite) est un zoom sur la partie centrale du graphe

Lé régulation du débit d'air apparaît donc comme cruciale. À noter que le débit d'air intervient dans le calcul via un couplage débit/température. La température du flux a donc un impact également important. Cependant, nous ne pouvons tester la sensibilité à la température soufflée dans COMETH, celle-ci étant calculée par le modèle d'échangeur.

3.3 ANALYSE EN MODE DE CALCUL CONSOMMATION

Dans ce mode, nous calculons les consommations de chauffage du bâtiment. Le système de chauffage étant presque le même dans les deux cas (un effet Joule), notre intérêt est de comparer les deux solutions techniques en ventilation mécanique : une simple-flux et une double-flux équilibrée. Dans un premier temps, nous laissons l'efficacité de l'échangeur à 0.5, avant d'étudier ensuite son impact dans la section suivante.

Nous représentons Figure 3 les résultats en différentes vues. Le premier graphe permet essentiellement de mettre en valeur l'impact des débits de ventilation mécanique. Comme nous le savions déjà, le débit est particulièrement critique, étant à l'origine de pertes thermiques impor-

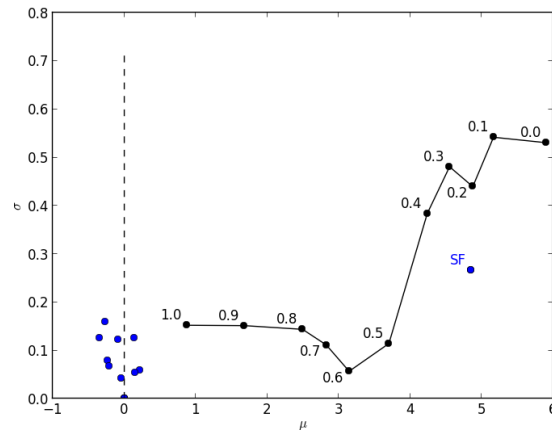


FIGURE 4. En noir, évolution de la sensibilité de la consommation de chauffage à la valeur du débit d'air d'une double-flux équilibrée pour différentes valeurs de l'efficacité de l'échangeur. Dans le cas d'absence d'échangeur, nous nous rapprochons de la configuration d'une simple-flux.

tantes. En simple-flux, ce débit est particulièrement plus sensible qu'en double-flux. Ceci est dû à la présence d'un échangeur qui permet de limiter les pertes énergétiques (d'un facteur 2 en première approximation).

Sur le deuxième graphe de la Figure 3 on présente un agrandissement de la partie centrale. Il est intéressant de constater que des paramètres particulièrement peu sensibles en simple-flux, le deviennent en double-flux. Il s'agit de tous les paramètres liés à la perméabilité. Les paramètres liés à la perméabilité sont donc insensibles en simple-flux. Ceci est tout à fait attendu étant donné que dans ce cas, c'est la pression intérieure du bâtiment qui s'ajuste pour que les débits entrant par la perméabilité (et les entrées d'air) soient égaux au débit de la simple-flux. Nous attirons l'attention sur le fait que le système d'extraction est supposé correctement dimensionné : le débit cible est toujours atteint.

En conclusion de ce cas d'étude, nous esquissons des bonnes pratiques sur l'utilisation des outils d'analyse de sensibilité. Nous étudions différentes solutions techniques, et constatons que la sensibilité aux paramètres est très différente. La maîtrise d'œuvre peut alors confronter ces indicateurs avec la maîtrise d'un chantier. Garantir une perméabilité est particulièrement difficile, probablement plus que garantir un débit de ventilation. Dans une optique de garantie de performance, ceci va argumenter en faveur d'un choix plutôt qu'un autre.

3.4 ANALYSE DE L'IMPACT DE L'EFFICACITÉ DE L'ÉCHANGEUR

Dans cette démarche d'étude de la sensibilité en fonction des solutions techniques, nous avons également procédé à une étude de la sensibilité aux débits de ventilation d'une double-flux en fonction de l'efficacité de l'échangeur. Nous avons effectué dix études de sensibilité, pour chacune une efficacité de l'échangeur variant de 0 et 1 par intervalle de 0.1. Nous présentons les résultats Figure 4. Nous constatons que, *sous l'hypothèse d'un débit parfaitement équilibré*, la sensibilité au débit de ventilation se rapproche des valeurs des autres paramètres étudiés en présence d'un échangeur idéalisé et non physique, où toute la chaleur est récupérée. Ceci est expliqué par l'annulation des pertes thermiques dues à la ventilation. En première approximation, les effets de soufflage et d'extraction s'annulent. Toutefois, dans le cas d'étude choisi, les deux conduites de ventilations ont des caractéristiques différentes en termes de pertes thermique et de perméabilité, ce qui conduit à une sensibilité non nulle. A l'autre bout de l'étude, une absence d'échangeur conduit à un comportement similaire à celui obtenu avec une simple-flux. Et effectivement, ce comportement est finalement presque identique à une simple-flux, le rôle des entrées d'air étant joué par le soufflage.

4 CONCLUSION

Nous avons montré nos capacités à coupler un outil d'étude de sensibilité avec un outil énergétique relativement léger et complet, et à produire des résultats exploitables, dans des temps raisonnables (2 min par étude de sensibilité sur 4 cœurs, de nouvelles voies d'optimisations ayant d'ores et déjà été identifiées). Ces résultats doivent s'inscrire dans une réflexion plus poussée sur une présentation simple des résultats pour permettre aux bureaux d'étude de s'approprier ce type de technologies.

Dans l'analyse des données de ce type d'analyse de sensibilité, il est crucial que l'interprétation des résultats soit correctement guidée. Certains paramètres peuvent apparaître comme sensibles, alors que leur mise en œuvre va s'avérer extrêmement complexe et être entachée d'incertitudes. A contrario, l'importante sensibilité à certains paramètres, comme le débit en simple-flux est probablement à confronter avec la facilité de piloter le débit. L'étude de sensibilité n'est donc qu'une étape, et chaque indicateur doit ensuite être pondéré par l'incertitude potentielle associée à chaque paramètre. Nous avons fait le choix de ne pas normaliser l'indicateur de sensibilité par une « incertitude type ». Ce choix est typiquement ce qui peut être interrogé dans la présentation des résultats.

Plusieurs perspectives de travaux se dessinent. Tout d'abord, tous les travaux présentés supposent que les paramètres sont indépendants les uns des autres. Ceci est bien souvent faux, et pose donc des problèmes d'interprétation des résultats. Ceci devient d'autant plus important que nous nous éloignons de l'analyse du poste chauffage seul comme fait ici. La consommation des ventilateurs est un composant importante de la consommation énergétique totale (presque la moitié dans le cas étudié en double-flux), or cette consommation est liée au débit. Effectuer une analyse de sensibilité sur la consommation totale du bâtiment nécessite donc une méthode précise de prise en compte des corrélations. Enfin, réaliser le même type d'étude sur des systèmes de chauffage et de refroidissement complexes serait intéressant, dans la mesure où ils sont susceptibles de générer des non-linéarités.

Ce travail a été financé dans le cadre du projet ANR FIABILITE sur l'appel HABISOL 2010 (ANR-10-HABI-0004).

RÉFÉRENCES

CSTB (2011). Méthode Th-BCE.

EDF (2014). <http://www.openturns.org/>.

ISO (2008a). EN NF 15242 : Ventilation for buildings - Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration.

ISO (2008b). ISO 13790 :2008 : Energy performance of building - Calculation of energy use for space heating and cooling.

Lloyd, B. (2014). <http://pythonnet.sourceforge.net>.

Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2) :161–174.

Saltelli, A., Chan, K., et Scott, E.-M. (2000). *Sensitivity analysis*.

Videau, J.-b., Alessandrini, J.-m., Haas, B., Pelé, C., Millet, J.-r., Jallet, P., Reynier, L., et Fleury, E. (2013). An introduction to the development of the French Energy Regulation indicators and their calculation methods. In *CLIMA 2013*.