

COMPARAISON MESURES – SIMULATIONS ET ANALYSE DE SENSIBILITE

Ana Maria Stefanoiu*^{1,2}, Monika Woloszyn¹, Etienne Wurtz², Arnaud Jay²

¹ LOCIE, Université de Savoie, CNRS UMR 5271

Polytech Annecy-Chambéry - Campus Scientifique - Savoie Technolac
73376 Le Bourget-Du-Lac cedex

² CEA/LITEN-INES, 50 Avenue du Lac Léman, 73375 Le Bourget-du-Lac

*Ana-Maria.Stefanoiu@univ-savoie.fr

La simulation dynamique sert à étudier et à mieux comprendre le fonctionnement et les propriétés du système modélisé, ainsi qu'à prévoir son évolution. Il y a des nombreuses incertitudes qui peuvent influencer la performance énergétique d'un bâtiment. Cet article se focalise sur l'étude paramétrique et sur l'analyse de sensibilité d'une simulation thermique dynamique.

L'étude s'appuie sur la plateforme expérimentale INCAS située à INES au Bourget du Lac qui comporte notamment quatre maisons dont les objectifs principaux sont la validation de simulations énergétiques, la comparaison et l'évaluation des modes constructifs utilisés ou encore les tests de systèmes énergétiques.

D'abord, une comparaison entre les mesures et les simulations est présentée, suivi d'une analyse de sensibilité en utilisant la méthode RBD-FAST. La forte influence du débit d'infiltration, de la ventilation, de la température de consigne et des caractéristiques des vitrages sur les résultats est montrée.

MOTS-CLÉS: simulations du bâtiment, analyse de sensibilité, comparaison mesures-simulations.

The energy performance simulation is used to study and understand the operation and properties of the modeled system, and to predict its evolution. There are many uncertainties that may affect the energy performance of a building. This article focuses on a parametric study and on a global sensitivity analysis.

The study is based on the experimental platform INCAS at INES Bourget du Lac, which includes four houses whose main objectives are the validation of energy simulations, comparison and evaluation of construction methods used, as well as tests on different technical systems.

First, a comparison between measurements and simulations is presented complemented with a sensitivity analysis using the RBD-FAST method. The importance of the infiltration rate, ventilation, set-point temperature and characteristics of glazing is shown.

KEYWORDS : building simulation, sensivity analysis, comparison measurements-simulations.

1. INTRODUCTION

Les simulations thermiques dynamiques des bâtiments (STD) sont de plus en plus utilisées en phase de conception, afin de vérifier l'adéquation du projet par rapport à des critères de performance énergétique. Ces simulations partent du principe que les résultats des outils de simulation représentent correctement les comportements réels. Afin de confirmer ce principe, des études comparatives entre les résultats de mesures et les résultats de simulation sont nécessaires. Par ailleurs, utilisation de la simulation demande la saisie de plusieurs centaines de paramètres concernant le bâtiment et son environnement proche : l'enveloppe, les systèmes énergétiques, les charges internes, le climat extérieur... Or, ces différents paramètres impactent de manière inégale la performance du bâtiment. Il

est donc très important de pouvoir identifier ceux qui ont une forte influence, afin d'augmenter le niveau de fiabilité des simulations. Les analyses de sensibilité permettent de répondre à cet enjeu.

Le présent article s'intéresse à la simulation thermique dynamique d'une maison expérimentale. Après la description de la maison et du modèle STD correspondant, une comparaison entre les mesures et les simulations est présentée. Enfin, les analyses de sensibilité globales sont introduites pour identifier les paramètres les plus influents.

2. MOYENS DE MESURES EXPERIMENTALES

Le cas d'étude est une maison expérimentale non-occupée, avec une structure en béton banché (I-BB), isolée par l'extérieur, avec une composition des parois choisie afin d'optimiser au mieux ses performances énergétiques. Elle est située sur la plateforme expérimentale INCAS sur le site de Technolac au Bourget du Lac, à l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES). C'est une maison à deux niveaux, chauffé par un système à air.

L'étude se base sur des mesures réalisées du 01/09/2011 au 24/04/2012, pour lesquels différents scénarii ont été spécifiés en faisant varier plusieurs paramètres : le débit de ventilation, le régime du by-pass du récupérateur de chaleur sur le système de ventilation double-flux, la température de consigne, l'ouverture et la fermeture des volets, etc. (Jay, 2012).

Plusieurs dizaines de capteurs sont disposés dans la maison pour mesurer les températures et les vitesses d'air, les températures de surfaces, les températures radiatives et l'humidité. D'autre part deux stations météorologiques sur le site de l'INES permettent de mesurer la température, l'humidité, la pression, le vent (vitesse et direction), la pluviométrie mais également les différents rayonnements (global, infrarouge, diffus et direct).

3. MODELISATION POUR LES SIMULATIONS DYNAMIQUES

Le logiciel EnergyPlus (EnergyPlus 2010) a été retenu pour ce travail. Comme il est impossible de reproduire numériquement à l'identique un bâtiment réel le choix des hypothèses de modélisation a de l'importance. Les principales sont décrites ci-dessous.

Le volume chauffé de la maison a été divisé en deux zones thermiques : RDC et étage.

Concernant la valeur de l'albédo à considérer dans les codes de simulation, le gravier blanc à proximité des maisons est prédominant avec un albédo de 0,4. Cette valeur a été mesurée au cours de l'été 2011.

La maison n'est pas occupée. Les apports internes sont dus aux équipements et aux centrales d'acquisitions. Au rdc il y a un onduleur, une baie informatique, trois transformateurs et deux centrales d'acquisition. A l'étage, il y a deux centrales d'acquisition et deux transformateurs. Nous avons considéré que l'énergie consommée est égale à l'énergie dissipée des appareils ce qui correspond à $2,2\text{W/m}^2$. Le label PassivHaus considère un apport de chaleur interne égal à $2,1\text{W/m}^2$ et la RT2005 $4,5\text{W/m}^2$. Ces ratios comportent une forte incertitude que l'on considérera par la suite.

Le constructeur indique que la puissance de la résistance électrique qui sert de chauffage est de 1200W, ce qui est proche de la valeur mesurée (1190W). Pour la modélisation, on considère la puissance de 1200W avec un rendement égal à 1.

Le rendement du récupérateur de chaleur de la ventilation double-flux donné par le constructeur est égal à 0,90. Cette valeur a été utilisée dans les simulations.

Le débit de ventilation prévu lors de la construction pour la maison I-BB est égal à $135\text{m}^3/\text{h}$. Cette valeur a été confirmée par des mesures effectuées dans une autre maison de la plateforme INCAS à l'aide des débitmètres durant les mois de février et de mars. Ainsi dans le modèle nous avons considéré un débit soufflé au RDC égal à $73\text{m}^3/\text{h}$ et à l'étage de $62\text{m}^3/\text{h}$. Un débit interzones de $15\text{m}^3/\text{h}$ a été considéré entre les deux niveaux allant du RDC vers l'étage.

Un débit d'infiltration constant de $0.05\text{Vol}/\text{h}$ a été inclus dans la simulation. En réalité ce débit dépend des pressions exercées par l'effet du vent sur les surfaces extérieures du bâtiment et du tirage thermique. Ainsi de nombreuses incertitudes subsistent sur la valeur à considérer dans les codes.

4. SIMULATIONS ET ETUDES PARAMETRIQUES

La comparaison préliminaire entre les résultats de la simulation et les mesures expérimentales a montrée des écarts importants. Ainsi, une étude paramétrique a été lancée, en faisant varier : l'albédo, la température de consigne, les apports internes, le débit d'infiltration, le débit de la VMC et finalement le régime du by-pass du récupérateur de la chaleur.

Les résultats ont confirmé que la valeur de 238W représente mieux les apports internes réels que la valeur initialement retenue de 400W . Effectivement, cette valeur correspond à la répartition des gains dus aux équipements entre les zones chauffées et non-chauffées de la maison. L'évolution des températures avec cette nouvelle valeur des apports internes est représentée dans la figure 1 et celle des puissances de chauffage dans la figure 2.

L'analyse des courbes montre bien les différents scenarii : nous avons d'abord une période de chauffage (1-15 janvier), suivi d'une période d'évolution libre (15 janvier – 20 février), pendant laquelle le chauffage et la ventilation ont été coupés, puis d'une deuxième période de chauffage (21 février – 14 mars). Sur la figure 1 on remarque aussi une augmentation forte de l'amplitude journalière de variation de températures à partir de 15 mars, qui correspond à l'ouverture des volets.

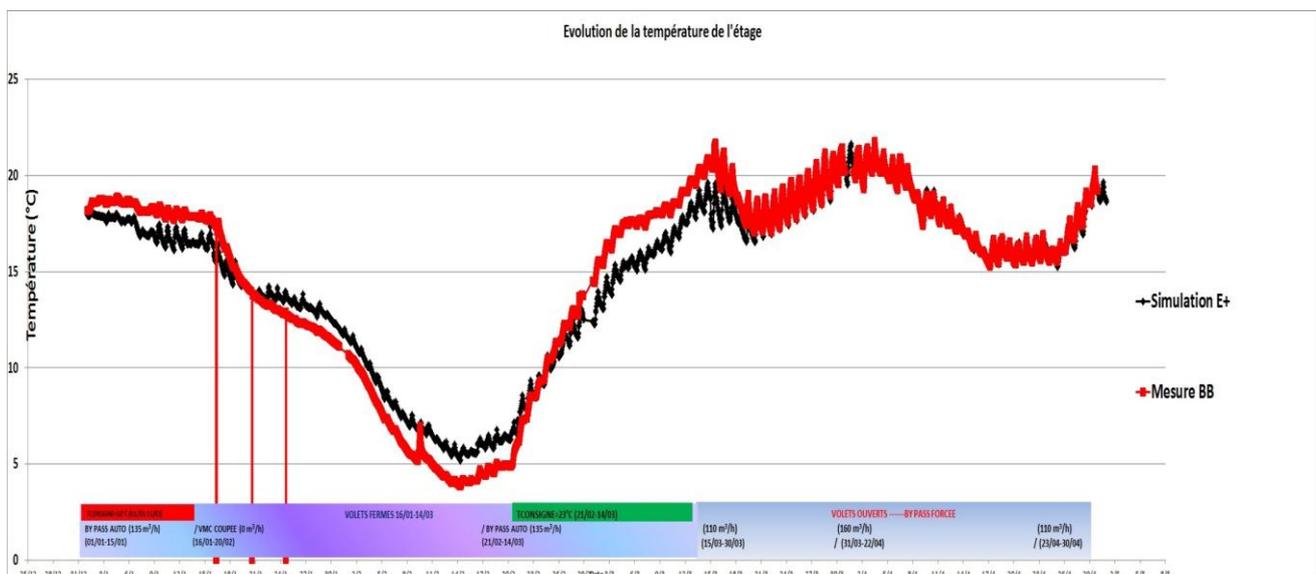


Figure 1 : Coubes de températures simulées en EnergyPlus (noir) et mesurées (rouge).

La comparaison des températures (figure 1) pendant la période de l'évolution libre montre que les températures mesurées baissent plus rapidement que celle prédites par la simulation. Cela suggère que les pertes thermiques réelles de la maison (par exemple les infiltrations) ne correspondent pas aux valeurs estimées. Ceci est confirmé par l'analyse des courbes de puissance (Figure 2), car sur la première semaine de janvier les valeurs de puissance simulées sont bien inférieures aux valeurs mesurées.

Sur dernière partie de la figure 1 (à partir de 20 mars), les courbes de simulations sont beaucoup plus proches des courbes de mesures. Ce cas de figure correspond à l'ouverture des volets. Nous pouvons alors présumer que les apports solaires sur EnergyPlus (avec albédo = 0,4) sont proches de ceux présents dans la réalité.

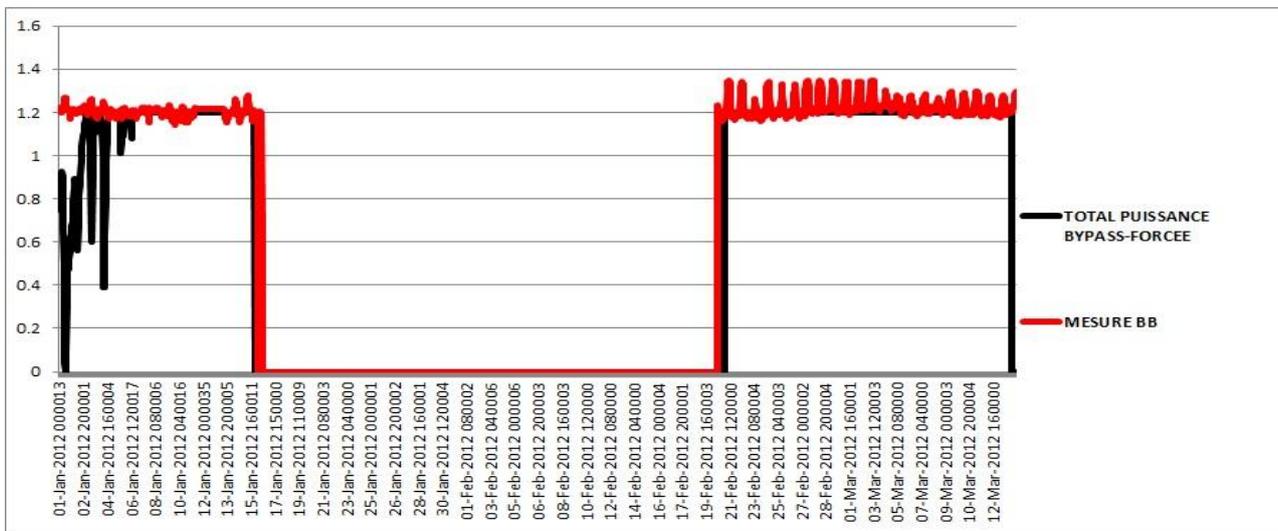


Figure 2 : Coubes de puissances simulées en EnergyPlus (noir) et mesurées (rouge).

Il est intéressant de noter que cette analyse a permis non seulement de valider le modèle et de calibrer certains de ses paramètres (tels que les apports internes), mais également de 'calibrer' le protocole expérimental. En effet, le fonctionnement réel du by-pass s'est avéré non-conforme aux scénarii prévus. Pendant la période du 1^{er} au 15 janvier, le récupérateur de chaleur n'était pas en service (ce qui correspond au 'by-pass forcée'), ce qui explique les écarts entre les mesures et les simulations initialement importants constatés sur cette période. Par ailleurs, les débits de VMC réels se sont avérés bien moins importants que ceux prévus dans la phase du projet. Des mesures complémentaires ont été effectuées, et ont montré que le débit en fonctionnement normal était de 110 m³/h (au lieu de 135 m³/h prévu).

Une autre conclusion importante est que les débits d'air (VMC et infiltration) ainsi que les apports internes (centrales d'acquisition) semblent avoir beaucoup d'impact sur les résultats. Ceci a motivé le recours aux méthodes d'une analyse de sensibilités présentées dans la suite.

5. ANALYSE DE SENSIBILITE

5.1. DESCRIPTION DE LA METHODE

L'objectif final des méthodes d'analyse de sensibilité est de mieux comprendre la modélisation et réduire les erreurs sur les sorties du modèle, afin que celui-ci respecte le comportement réel du bâtiment.

Pour pouvoir utiliser l'analyse de sensibilité on peut mettre le modèle étudié sous la forme $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x)$, où y est la sortie du modèle et $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ est l'ensemble des paramètres considérés du modèle.

Pour étudier la contribution des paramètres d'entrée d'un modèle à la variation de ses sorties, il faut déterminer les paramètres qui ont une forte influence sur cette sortie du modèle, et/ou une grande variabilité.

Dans notre étude la méthode d'analyse de sensibilité RBD-FAST, proposé par (Rabouille et al. 2013), basé sur (Tarantola et al. 2006) a été utilisé. L'implémentation pratique a été faite à l'aide de programmes développés dans l'environnement Matlab, qui lancent automatiquement les nombreuses simulations EnergyPlus nécessaires aux analyses de sensibilité et traitent ensuite les résultats. C'est une approche non-intrusive, utilisée dans la thèse de Clara Spitz (Spitz 2013).

Les résultats sont donnés sous la forme des indices de sensibilité, qui quantifient l'impact du paramètre x_i sur la sortie y . Les valeurs sont toujours comprises entre 0 et 1. En ce qui concerne l'interprétation des résultats, plus l'indice de sensibilité est proche de 1, plus l'influence du paramètre x_i sur la sortie y est forte.

5.2. CHOIX DES PARAMETRES

Les travaux de Spitz et al. (2013) ont permis d'écarter certains paramètres du modèle, très peu influant sur le résultat. Ainsi, dans notre travail, 36 paramètres, regroupés en 5 familles, ont été retenus :

- les paramètres relatifs aux débits d'air : les débits de ventilation air neuf (les cas de by-pass forcée, et de by-pass auto), le débit d'infiltration réel,
- les paramètres relatifs au système de chauffage : la température de consigne ;
- les paramètres relatifs à l'isolation du bâtiment : les épaisseurs et les conductivités thermiques des isolants ;
- les paramètres relatifs à l'inertie du bâtiment : les caractéristiques physiques de la chape du RdC et de la dalle du plancher intermédiaire ;
- les paramètres relatifs aux apports solaires : le coefficient de transmission, le facteur solaire.

Les valeurs et les plages d'incertitude se trouvent dans les tableaux 1 et 2. Les sorties ont été la température de l'air et la puissance de chauffage (rdc et étage) de la maison étudiée. Une période de plus de 7 mois, entre le 09 septembre et le 24 avril a été étudiée, pendant laquelle plusieurs scenarii d'utilisation, présentés dans le tableau 3 ont eu lieu.

Famille de paramètres	Paramètres	Valeur nominale	Variation
relative aux débits d'air	débit de VMC	Cf. tableau 2	10%
	débit d'infiltration réel	0.05 (vol/h)	50%
relative au système de chauffage	température de consigne	20, 24, 26.75 (°C)	10%
relative à l'isolation du bâtiment	épaisseur du polystyrène extrudé	0.2 (m)	3%
	conductivité du polystyrène extrudé	0.029 (W/mK)	5%
relative à l'inertie du bâtiment	épaisseur de la chape	0.08 (m)	5%
	conductivité de la chape	1.75 (W/mK)	5%
	épaisseur du plancher intermédiaire	0.16 (m)	10%
	conductivité du plancher intermédiaire	2.5 (W/mK)	5%
relative aux apports solaires	Coefficient U	Valeurs entre 1.28 et 1.39 (W/m ² K)	5%
	Facteur solaire	Valeurs entre 0.21 et 0.47	5%

Tableau 1 : Valeurs des paramètres et des incertitudes associés, utilisés pour l'analyse de sensibilité.

Régime de ventilation	by-pass forcé (phases 1, 2,3) (m ³ /h)	by-pass auto (phase 4 et 7) et by-pass forcé (phases 5 et 8) (m ³ /h)	by-pass forcé (phase 9) (m ³ /h)
Rdc	40.5	49.5	72
Etage	49.5	60.5	88
Total	90	110	160

Tableau 2 : Valeurs du débit de ventilation mécaniques, utilisé pour l'analyse de sensibilité.

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6	Phase 7	Phase 8	Phase 9
Période	1/9-3/10	4/10-21/11	22/11-24/11	25/11-20/12	21/12-15/1	16/1-20/2	21/2-14/3	15/3-30/3	31/3-22/4
Volets	Fermés	Ouverts	Fermés	Fermés	Fermés	Fermés	Fermés	Ouverts	Ouverts
Régime VMC	By-pass forcé	By-pass forcé	By-pass forcé	By-pass auto	By-pass forcé	VMC coupée	By-pass auto	By-pass forcé	By-pass forcé
Débit VMC (m³/h)	90	90	90	110	110	0	110	110	160
Chauffage	26.75° C	Evolution libre	Evolution libre	24°C	20°C	Evolution libre	24°C	Evolution libre	Evolution libre

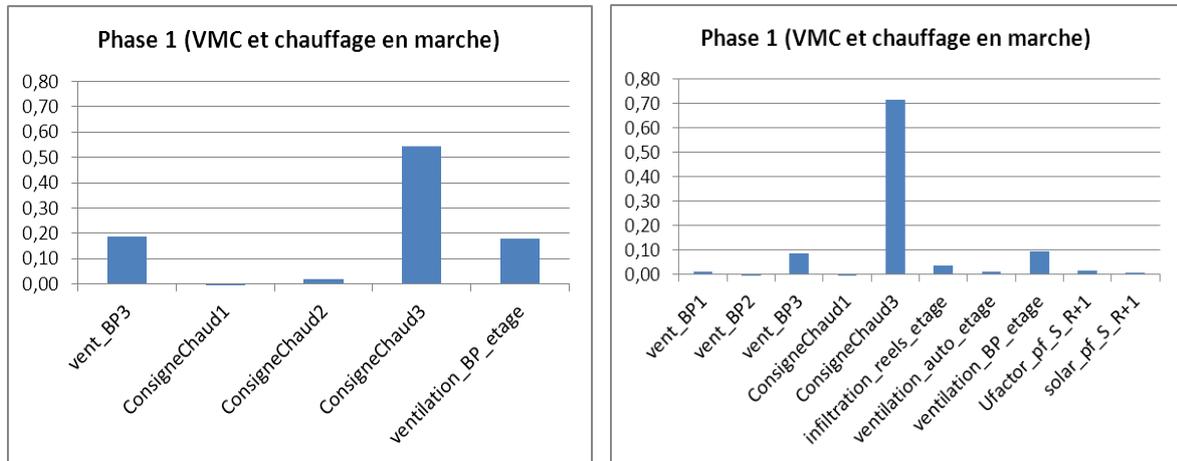
Tableau 3 : Scénarii de la maison

5.3. PRESENTATION ET ANALYSE DE RESULTATS

Dans notre cas, pour les 36 paramètres de la maison I-BB, 300 simulations ont été lancés en choisissant de manière aléatoire les valeurs des paramètres dans les intervalles d'incertitude. La période simulée, du 1/9 au 22/4, couvre différentes phases de fonctionnement de la maison expérimentale. Le temps de calcul était d'environ 2 minutes par simulation.

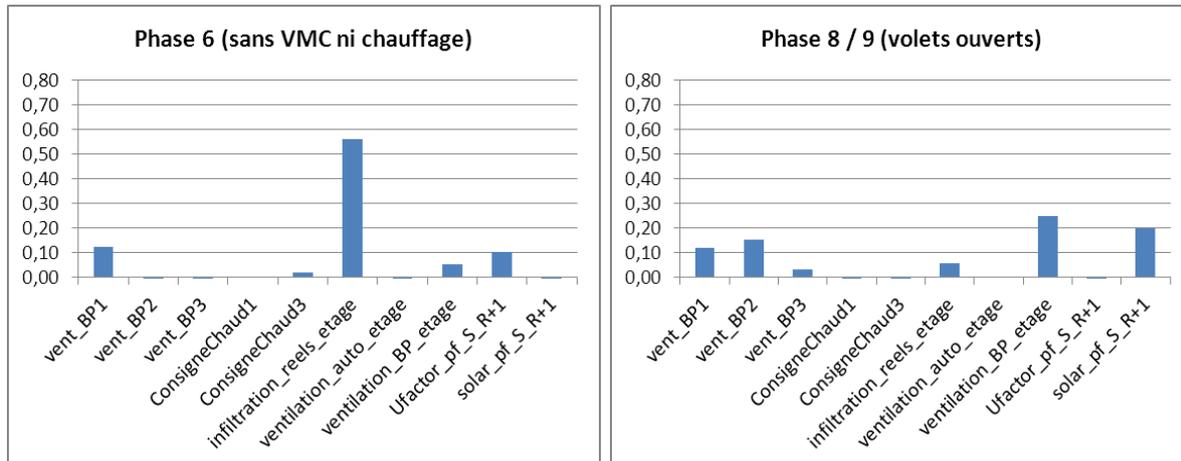
L'ensemble des résultats montre que les paramètres les plus influents changent en fonction de la période ('phase' de scenario donnée dans le tableau 3) et en fonction de la sortie étudiée (température à l'étage ou au rdc, puissance à l'étage ou au rdc). Les résultats les plus significatifs sont présentés dans la figure 4. Au lieu de 36 paramètres, 10 sont présentés pour la sortie 'température' et 5 pour la sortie 'puissance' – cela correspond aux paramètres dont l'indice de sensibilité atteint des valeurs supérieurs à 0.1 sur la période étudiée.

La température de consigne apparaît comme un paramètre très influant pendant la phase 1, quand le chauffage fonctionne. Elle influence alors fortement la température d'air et la consommation de chauffage.



(a) Sortie : puissance à l'étage

(b) Sortie : température d'air à l'étage



(c) Sortie : température d'air à l'étage

(d) Sortie : température d'air à l'étage

Figure 4 : Les indices de sensibilité de principaux paramètres influençant la puissance et la température d'air à l'étage (valeur moyenne sur la période concernée).

Les débits d'air neuf de la ventilation mécaniques sont très influant quand la VMC fonctionne (figures 4a et 4b). Quand celle-ci est arrêté, l'impact du débit d'infiltration devient très important (figure 4c).

Les paramètres relatifs aux apports solaires deviennent importants seulement lors des phases 8 et 9 quand les volets sont ouverts.

Sur l'ensemble de la période étudiée, on peut noter que les paramètres relatifs aux débits d'air et au système de chauffage (le débit de ventilation air neuf pour le by-pass forcée, le débit de ventilation air neuf pour le by-pass auto, le débit d'infiltration réel, la température de consigne) et, dans une moindre mesure, les paramètres relatifs aux apports solaires (la transmission thermique et le facteur solaire) sont les paramètres les plus influents.

D'un point de vue général, on remarque que le choix du scénario d'utilisation est très important pour l'analyse de sensibilité. Par exemple lors des phases 1 et 6 il y a clairement un paramètre qui domine (valeur de la température de consigne pour la phase 1 et le débit d'infiltration pour la phase 6). En revanche, lors des phases 8 et 9 plusieurs paramètres montrent une importance similaire. Ceci indique un comportement plus complexe, où plusieurs phénomènes physiques jouent des rôles équivalents.

6. CONCLUSIONS

Les simulations thermiques dynamiques ont été utilisées dans la présente étude pour mieux analyser le comportement d'une maison expérimentale à très basse consommation d'énergie. Premièrement, la comparaison entre les mesures expérimentales et les simulations numériques a permis non seulement de valider le modèle, mais également de vérifier et de calibrer la pertinence des données expérimentales.

Ensuite, une analyse de sensibilité globale sur 36 paramètres du modèle a été lancée pendant différentes phases d'utilisation de la maison. L'analyse générale des résultats obtenus montre que les paramètres les plus influant dépendent fortement de la phase expérimentale : fonctionnement ou non du chauffage, de la ventilation, l'ouverture ou la fermeture des volets. Plus spécifiquement le comportement de cette maison, très bien isolée, se trouve essentiellement impacté par les paramètres relatifs aux systèmes énergétiques (température de consigne, débit d'air neuf), mais aussi par les infiltrations et les paramètres relatifs aux apports solaires.

7. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du programme Habitat intelligent et solaire photovoltaïque (projet FIABILITE n° ANR-10-HABISOL-004).

8. BIBLIOGRAPHIE

- Jay, Arnaud, 2012. « Description détaillée des dispositifs expérimentaux et de leur instrumentation (T0+12) ». ANR Fiabilité. Le Bourget du Lac, 2012, rapport technique, CEA
- EnergyPlus Engineering Reference, 2010, The Reference to EnergyPlus Calculations,
- Spitz, Clara. 2013. « Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments ». Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- Rabouille, Mickael, Wurtz, Etienne, Perrotin, Pascal. 2013. « Analysis of dynamic thermal simulation for refurbishment », In : Proc. of International IBPSA conference BS2013, Chambéry, France
- Tarantola, Stefano, Gatelli, Debora, Mara, Thierry. 2006. « Random balance designs for the estimation of the first order global sensitivity indices ». Reliability Engineering and System Safety 91 717-727,
- Spitz, Clara, Laurent Mora, Etienne Wurtz, et Arnaud Jay. 2012. « Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house ».