



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/6621>

#### **To cite this version :**

Clara SPITZ, Laurent MORA, Étienne WURTZ, Arnaud JAY - Incertitudes sur la prévision des performances énergétiques d'un logement à très basse consommation - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



# Incertitudes sur la prévision des performances énergétiques d'un logement à très basse consommation.

Clara SPITZ<sup>1&2\*</sup>, Laurent MORA<sup>3</sup>, Étienne WURTZ<sup>2</sup>, Arnaud JAY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LOCIE, UMR CNRS, INES-RDI, Université de Savoie, 73377 Le Bourget du Lac

<sup>2</sup> LEB CEA INES, 50, Av du lac Léman, 73377 Le Bourget du Lac

<sup>3</sup> I2M-TREFLE, UMR CNRS, Université de Bordeaux, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence

\* (auteur correspondant : [clara.spitz@univ-savoie.fr](mailto:clara.spitz@univ-savoie.fr))

**Résumé** - Dans ces travaux afin d'évaluer et de hiérarchiser les incertitudes sur les résultats des simulations en phase de conception, une méthodologie a été mise en place qui consiste en trois étapes : une analyse de sensibilité locale, une analyse d'incertitude et une analyse de sensibilité globale. Cette méthodologie a été appliquée à un bâtiment de la plateforme expérimentale INCAS.

## 1. Introduction

Aujourd'hui l'utilisation de la simulation numérique des bâtiments permet d'obtenir une prédiction de la consommation énergétique. Ces simulations numériques mettent en jeu un grand nombre de paramètres sujets à de nombreuses incertitudes. Ces incertitudes peuvent être dues soit à une mauvaise connaissance du paramètre d'entrée soit à une mauvaise prise en compte du phénomène physique. Or ces incertitudes peuvent jouer un rôle non négligeable sur la prédiction finale et donc sur le processus de décision.

Dans ces travaux, nous avons modélisé une maison à faible consommation d'énergie de la plateforme INCAS située à l'INES au Bourget du Lac et grâce à l'instrumentation mise en place sur le site, une comparaison entre l'expérimentation et la prévision a pu être effectuée. Une méthodologie a été proposée permettant d'identifier les paramètres de conception les plus influents sur la performance énergétique d'un bâtiment et de rendre compte des effets de l'incertitude associée à ces paramètres sur cette même performance. On montrera qu'un jeu réduit de paramètres a une influence prédominante (vis à vis des autres paramètres) et les analyses de sensibilité permettent de les identifier. Une meilleure connaissance des paramètres influents permettra une meilleure prédiction. Une analyse d'incertitude permet de caractériser la réponse d'un modèle dans un intervalle de confiance connaissant à priori l'incertitude des paramètres d'entrées.

## 2. Cadre d'étude

### 2.1. Description du bâtiment

Dans cette étude nous avons considéré le bâtiment expérimental de type « double mur parpaing » situé sur la plateforme INCAS au Bourget du Lac (73) [1], [2]. Ce bâtiment est actuellement en cours d'expérimentation avec plus de 200 capteurs suivant son évolution énergétique au cours du temps.

C'est un bâtiment à très haute efficacité énergétique. Il est caractérisé par une grande surface de vitrage au Sud permettant la pénétration du rayonnement solaire durant la période

hivernale tandis qu'en été des protections solaires (fixes et mobiles) évitent la surchauffe. Les infiltrations d'air et ponts thermiques structurels ont été limités au maximum. Les épaisseurs d'isolant varient de 20 cm pour les parois verticales à 40 cm pour le plancher haut. Une ventilation mécanique double flux permet le renouvellement d'air du bâtiment.

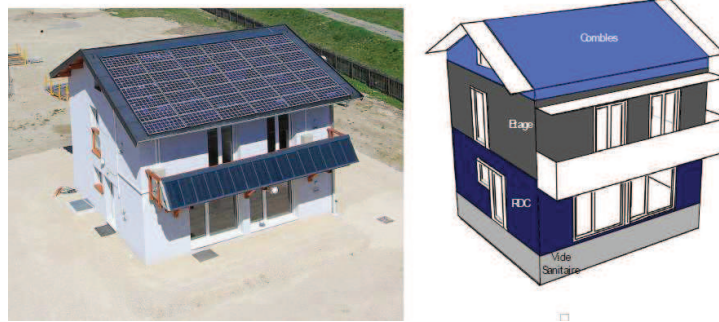


Figure 1 : Maison expérimentale I-DM, photo et modèle numérique

## 2.2. Scénario et résultat de mesure

La période étudiée est le mois de février 2011. Le scénario est présenté sur la figure 2. Durant 9 jours du 5 au 14 février, le débit de ventilation et la consigne de chauffage ont été diminués et les volets fermés toute la journée, c'est une période appelé par la suite hors gel.

Les mesures de la maison I-DM pour le mois de février sont présentées sur la figure 3. De nombreux capteurs mesurent la température d'air dans la maison à chaque niveau et on a observé des disparités entre les capteurs. Sur la figure 3, un seul capteur représentatif du niveau est représenté pour éviter de surcharger la figure.

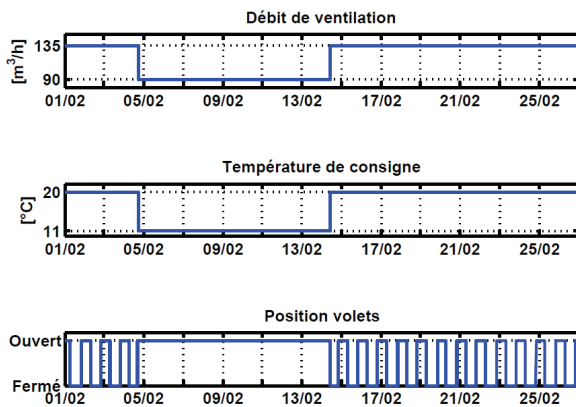


Figure 2 : Scénario du mois de février

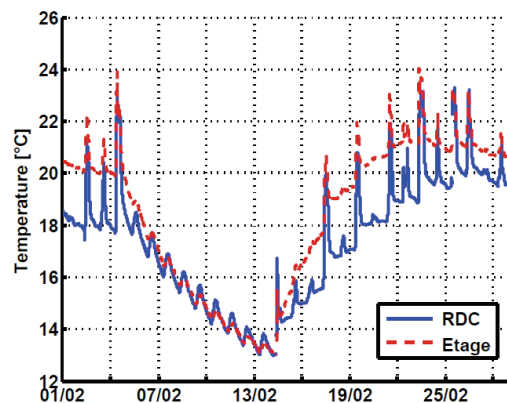


Figure 3 : Température RDC et étage maison I-DM pour le mois de février 2011

## 3. Simulation

### 3.1. Description du modèle thermique du bâtiment et conditions extérieures

Les simulations ont été effectuées avec l'outil EnergyPlus version 6 [3]. C'est un outil de simulation dynamique permettant de prévoir le comportement énergétique de bâtiments. Le modèle retenu est composé de 4 zones : le vide sanitaire, le rez de chaussé, le premier étage et les combles. Le système énergétique de la maison a été modélisé : il est composé d'un échangeur, d'une résistance électrique de 1150W et de 2 ventilateurs : l'un pour l'extraction et

l'autre pour l'insufflation. La répartition des débits injectés entre le RDC et l'étage peut être modulée. Nous avons forcé un transfert d'air entre le RDC et l'étage. Les débits dans la maison doivent être équilibrés, c'est à dire conservation des débits massiques en entrée et en sortie. Il n'y a pas de système de refroidissement. La consigne de chauffage est régulée par la zone du RDC.

Le fichier météo utilisé est un fichier de mesure du site d'INES. Le pas de temps de la simulation est de 1 minute. Le temps d'une simulation pour le mois de février 2011 dure un peu plus d'une minute avec un processeur Intel Core avec une fréquence de 1.73GHz et 3.24Go de RAM. La simulation commence le 28 janvier et se fini le 28 février.

### 3.2. Comparaison mesure/simulation

La période étudiée pour la comparaison s'est limitée du 5 au 25 février 2011 pour ne pas surcharger les figures. Dans la simulation, on obtient une seule température d'air par zone. Pour la mesure pour représenter correctement la température d'air à tout point de chaque niveau et pour tenir compte des différentes incertitudes dues aux capteurs mais aussi aux différences de températures mesurées dans les différentes pièces, on a considéré qu'une plage d'incertitude de +/- 1°C sur le capteur représentatif de chaque niveau représentait correctement la température d'air. Les figures 4 et 5 présentent la comparaison de la température d'air du RDC et de l'étage entre la simulation et la plage d'incertitude de la mesure. La figure 6 présente le résidu des températures d'air du RDC et de l'étage. Le résidu est

$$r(t) = y_{mesure}(t) - y_{simulation}(t) \quad (1)$$

De plus sur la figure 6 du résidu une plage d'incertitude de +/- 1°C a été considérée permettant d'observer la bonne cohérence des résultats de simulation avec la plage d'incertitude de la mesure. La figure 7 présente les conditions météorologiques.

La prédiction de la température d'air du RDC est en grande partie comprise dans la bande d'incertitude de la mesure. Pour la température d'air de l'étage, les résultats de simulation sont rarement compris dans la plage d'incertitude de la mesure. Sur les résidus, on observe des pics de température en cours de journée.

Les écarts entre les mesures et la simulation sont importants, mais il est impossible de connaître à ce stade les paramètres influençant le plus les sorties du modèle pour améliorer le modèle numérique. Des incertitudes de mesures ont été prises en compte mais aucune incertitude n'a été considérée dans les résultats de simulation. De nombreuses interrogations subsistent : les incertitudes de la simulation recourent-elles les incertitudes de mesures ? Quels sont les paramètres ayant le plus d'influence sur les résultats de simulation ? Quels sont les paramètres ayant peu voir pas d'influence sur les résultats de simulation ? Comment améliorer les résultats de la prévision ? C'est à toutes ces questions que l'on va tenter de répondre maintenant.

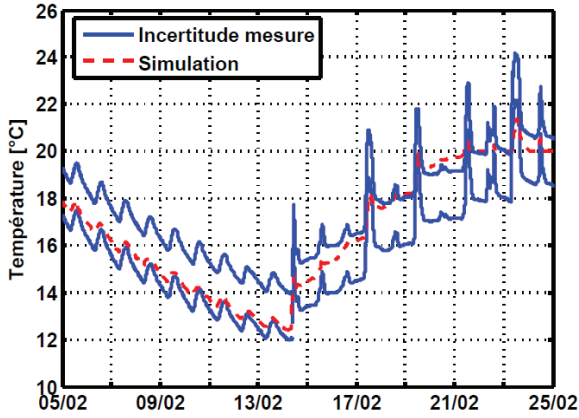


Figure 4 : comparaison mesure/simulation température d'air du RDC

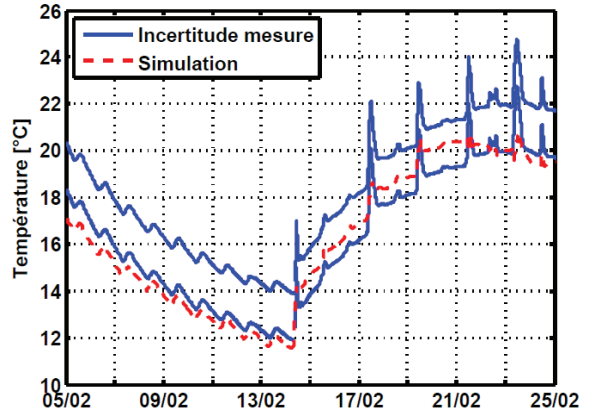


Figure 5 : comparaison mesure/simulation température d'air de l'étage

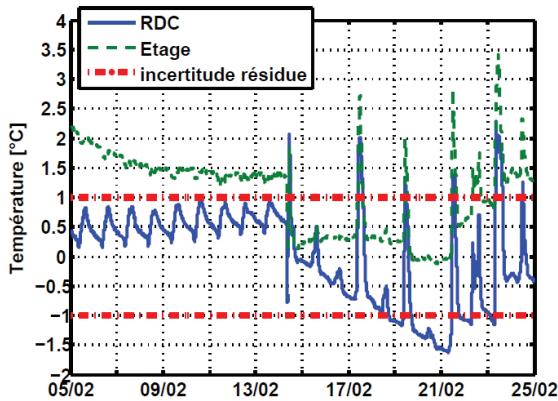


Figure 6 : Résidu pour les températures d'air RDC et étage

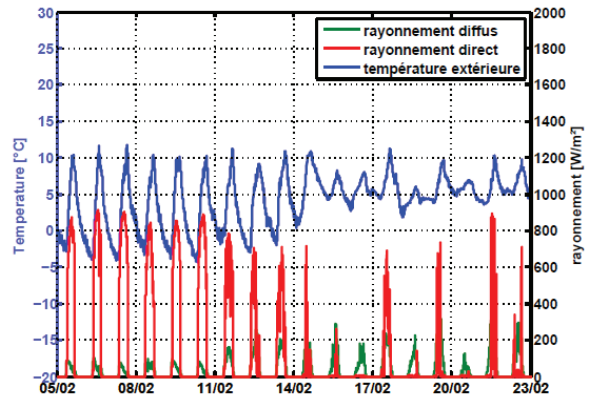


Figure 7 : Conditions météorologiques

## 4. Analyse de sensibilité

### 4.1. Définition des analyses de sensibilité

Les analyses de sensibilité sont des méthodes permettant d'observer la contribution des paramètres d'entrées d'un modèle à la variation des sorties du modèle. Ce sont des méthodes très importantes dans des travaux d'élaboration de modèle (numérique ou non), dans l'interprétation de leurs résultats et dans le cadre de la validation du modèle. L'analyse de sensibilité est une discipline à part entière de la statistique.

Il existe différentes méthodes d'analyse de sensibilité. T.A. Mara (2008) [4] et A. Saltelli (2008) [5] en dressent un large aperçu. Dans ces travaux, on utilisera trois méthodes : l'analyse de sensibilité locale, l'analyse d'incertitude et l'analyse de sensibilité globale.

### 4.2. L'analyse de sensibilité locale et paramètres étudiés

L'analyse de sensibilité locale permet avec un grand jeu de paramètres et un faible nombre de simulations d'obtenir une information qualitative sur les paramètres influençant le plus la sortie du modèle. Le principe est de faire varier individuellement chaque facteur au voisinage de sa valeur nominale afin de déterminer un indice de sensibilité réduit  $S_i(t)$  de la sortie du modèle  $y$  vis à vis du  $i^{\text{ème}}$  paramètre  $X_i$  défini par :

$$S_i(t) = X_i \frac{\partial y_k(t)}{\partial X_i} \quad (1)$$

139 paramètres ont été considérés dans l'analyse de sensibilité. Ces paramètres représentent les propriétés physiques des matériaux opaques (conductivité thermique, épaisseur, chaleur spécifique, masse volumique, émissivité...), des matériaux translucides (propriétés physiques des volets, des vitrages), les débits de ventilation, les gains internes, l'infiltration, les coefficients d'échange convectifs.

### 4.3. Résultats

Les indices de sensibilité réduits des 139 paramètres vis à vis de la température d'air au RDC et à l'étage ont été calculés par différence finie. La figure 8 présente les paramètres les plus influents pour la température d'air du RDC classés par ordre croissant. Seuls les paramètres les plus influents ont été représentés sur la figure 8. Les résultats de l'étage ne sont pas représentés mais les paramètres influents sont identiques entre les niveaux. Sur 139 paramètres, nous avons dégagé moins de 20 paramètres ayant une réelle influence sur la température d'air de l'étage.

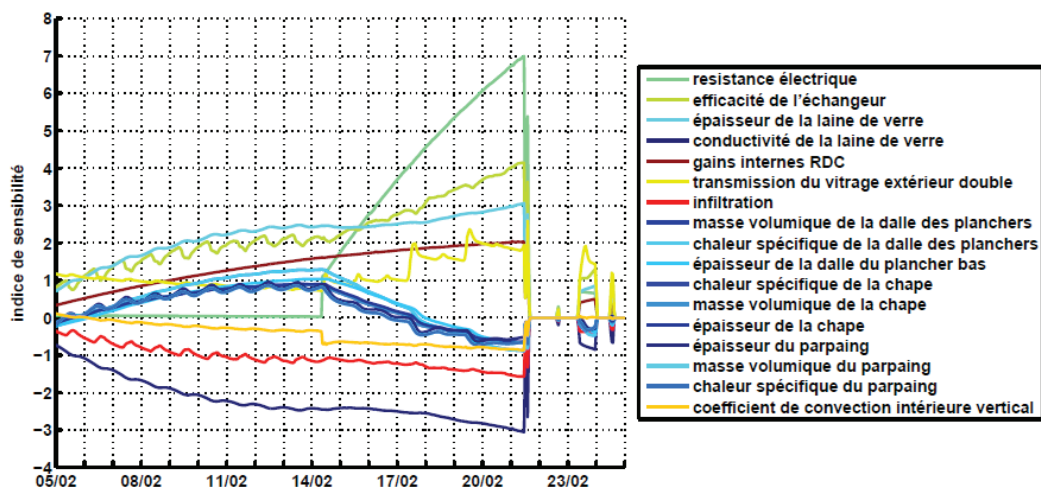


Figure 8 : Valeur des indices de sensibilité pour la température d'air du RDC

Les indices de sensibilité de la résistance électrique et la transmission du vitrage extérieur double augmentent à partir du 14 février, jour où la température de consigne est augmentée et les volets sont ouverts durant la journée. Pour l'indice de sensibilité de la transmission du vitrage extérieur double, l'augmentation de sa valeur dépend du rayonnement solaire. S'il y a du rayonnement solaire comme pour le 17 et 19 février l'indice de sensibilité augmente durant la journée.

La conductivité et l'épaisseur de la laine de verre sont des paramètres influents. La valeur de leur indice de sensibilité augmente continuellement jusqu'au 21 février. Les gains internes sont un paramètre influent comme le débit d'infiltration. Pour observer l'effet de ces paramètres sur la température d'air du RDC et l'étage, une étude d'incertitude a été menée.

## 5. Analyse d'incertitude

Une comparaison entre la simulation et la mesure tout en tenant compte des différentes incertitudes a pu être effectuée. A l'aide de l'analyse de sensibilité locale sur les résultats de la température d'air du RDC, 10 paramètres considérés comme influents ont été sélectionnés.



Les paramètres sont : la puissance de la résistance électrique, l'efficacité de l'échangeur, l'épaisseur de la laine de verre, la conductivité de la laine de verre, les gains internes du RDC, la transmission du vitrage extérieur, le débit d'infiltration, l'épaisseur de la dalle, l'épaisseur du parpaing, le coefficient de convection intérieure verticale.

La masse volumique et la chaleur spécifique de la dalle des planchers n'ont pas été considérées tout comme les paramètres relatifs à l'inertie de la chape. Le fait de ne pas considérer certains paramètres permet de réduire le nombre de paramètres et aussi d'éviter les corrélations entre les paramètres.

Le tableau 1 représente les valeurs des 10 paramètres considérés dans l'analyse d'incertitude et les plages de variation des paramètres. 2000 simulations ont été effectuées.

	Paramètres	Valeur du paramètre	Distribution	Incertitude
1	Résistance électrique	1150W	uniforme	+/-5%
2	efficacité échangeur	0.9	uniforme	+/-10%
3	épaisseur laine de verre	0.2m	uniforme	+/-10%
4	conductivité laine de verre	0.035W/(m.K)	uniforme	+/-5%
5	gains internes RDC	180W	uniforme	+/- 10%
6	transmission vitrage extérieur	0.842	uniforme	+/-5%
7	débit d'infiltration	0.115V/h	uniforme	+/-10%
8	épaisseur de la dalle	0.16m	normale	+/-10%
9	épaisseur du parpaing	0.15m	normale	+/-10%
10	Infiltration	3.08W/(m².K)	uniforme	+/-10%

Tableau 1 : Valeur de l'incertitude des paramètres

Les figures 9 et 10 représentent les résultats de l'analyse d'incertitude pour la température d'air du RDC et de l'étage pour 2000 simulations du 5 au 24 février 2011. Sur la même figure est représentée la plage d'incertitude de la mesure de la température d'air du RDC et de l'étage. En tenant compte des plages d'incertitude de la mesure et de la simulation, pour le cas de la température d'air du RDC, il y a constamment recouvrement entre les résultats de mesure et de simulation. Pour le cas de l'étage, avant le 14 février il n'y a aucun recouvrement entre la modélisation et l'expérimentation et après le 14 février la plage d'incertitude de la simulation est en partie comprise dans la plage d'incertitude de la mesure. Le modèle numérique représente donc correctement le RDC de la maison I-DM en considérant les incertitudes mais ce n'est pas le cas pour l'étage.

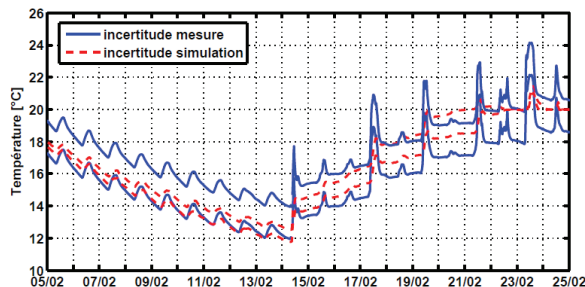


Figure 9 : Comparaison entre mesure et simulation pour la température du RDC en tenant compte des incertitudes

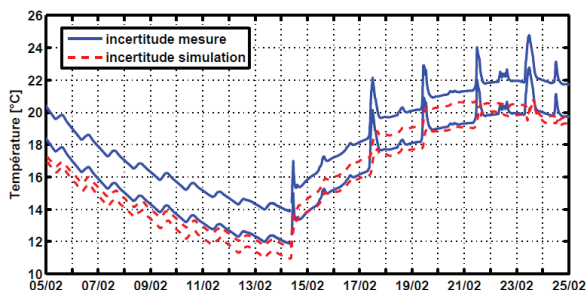


Figure 10 : Comparaison entre mesure et simulation pour la température de l'étage en tenant compte des incertitudes

L'analyse d'incertitude a permis de définir une plage d'incertitude pour les résultats de modélisation de la température d'air du RDC et de l'étage du 5 au 25 février 2011 en

considérant les 10 paramètres les plus influents sur cette période mais cette étude ne permet pas de connaître l'effet de l'incertitude des paramètres sur la température d'air de la maison I-DM c'est pourquoi l'analyse de sensibilité globale est utilisée.

## 6. Analyse de sensibilité globale

Les analyses de sensibilité globale consistent à quantifier l'influence des paramètres sur toute leur plage de variation et permettent de connaître l'effet d'un paramètre sur la sortie du modèle en fonction de son incertitude. Elles prennent en compte la distribution associée aux paramètres et permettent la variation de tous les paramètres à la fois. On a calculé l'indice de sensibilité du premier ordre  $S_i$  qui renseigne sur l'influence du paramètre sur la sortie du modèle sur sa plage d'incertitude. Plus l'indice de sensibilité est élevé plus son influence est importante. Cette méthode est coûteuse en temps de calcul, plus il y a de paramètres plus le nombre de simulations doit être élevé pour obtenir un résultat fiable. Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode de Sobol [5] avec un nombre de simulation égale à 6669.

Comme pour l'analyse d'incertitude, les résultats de l'analyse de sensibilité locale permettent de sélectionner les paramètres les plus influents pour les sorties du modèle numérique. La plage d'incertitude des paramètres définie dans la partie 5 est utilisée.

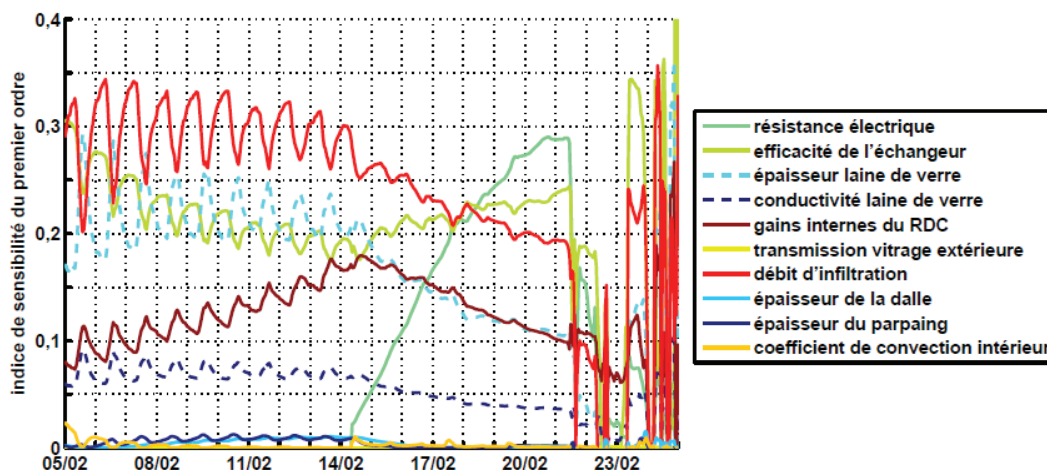


Figure 11 : indices de sensibilité du premier ordre pour la température d'air du RDC

La figure 11 présente les résultats des indices de sensibilité du premier ordre pour la température d'air du RDC. On observe que six paramètres sont influents dans leurs plages d'incertitudes qui sont le débit d'infiltration, l'épaisseur de la laine de verre, l'efficacité de l'échangeur, les gains internes du RDC, la conductivité de la laine de verre et la résistance électrique. A partir du 21 février les indices de sensibilité sont biaisés car la température respecte la consigne de chauffage. Deux scénarios distincts caractérisaient cette période : le scénario hors gel et le scénario dit normal. Durant ces deux scénarios, six paramètres sont influents mais en fonction du scénario les indices de sensibilité du premier ordre n'ont pas les mêmes tendances. Les incertitudes de ces six paramètres sont responsables de la majeure partie des incertitudes sur la température d'air pour le cas de la maison I-DM et selon le scénario du mois de février.

## 7. Conclusion

L'analyse de sensibilité locale a permis d'identifier un nombre restreint de paramètres (environ 10) sur la totalité des paramètres utilisés dans la simulation (environ 140



paramètres). Cette analyse utilise la méthode de perturbation d'un paramètre à la fois. Un indice de sensibilité réduit est obtenu et permet de classer les paramètres par ordre d'influence. L'analyse de sensibilité globale permet d'identifier les effets des paramètres sur les sorties du modèle numérique en tenant compte des incertitudes des paramètres. C'est la méthode de Sobol qui a été utilisée. Ces analyses demandent un grand nombre de simulation avec un nombre restreint de paramètres. L'analyse d'incertitude permet d'identifier une plage d'incertitude.

Pour la température d'air sur la maison I-DM, une comparaison entre les résultats de simulation et d'expérimentation a pu être effectuée tout en tenant compte des différentes incertitudes. Le modèle numérique représentait correctement l'expérimentation dans le cas de la température d'air du RDC mais dans le cas de la température d'air de l'étage les bandes d'incertitudes ne se recoupaient pas entre la mesure et la simulation pour la période précédant le 14 février 2011. Pour que les plages d'incertitudes se recoupent, il y a la possibilité d'agrandir les plages d'incertitudes des paramètres car la définition de certaines plages d'incertitude de paramètres a pu être trop optimiste. Une seconde possibilité plus pertinente consiste à avoir une meilleure connaissance des paramètres influents déterminés à l'aide des analyses de sensibilité globale. Dans le cas de la maison I-DM, si l'incertitude de la mesure est améliorée sur certains paramètres comme l'efficacité de l'échangeur ou le débit d'infiltration il y aurait la possibilité d'expliquer l'écart entre mesure et simulation. Soit cet écart provient du modèle numérique, soit d'un dysfonctionnement dans la maison qui pourrait être identifié.

Cette méthodologie peut être utilisée dans tout le processus de conception d'un bâtiment des premières esquisses à l'exploitation du bâtiment. En phase de conception cette méthodologie permet d'orienter des choix architecturaux en évitant des options dont les résultats sont noyés dans l'incertitude de simulation et par conséquent peu fiables. En phase d'exploitation, l'analyse de sensibilité locale permettra d'identifier les points de mesure les plus pertinents afin de réduire l'incertitude des paramètres les plus influents et un diagnostic énergétique plus fiable du bâtiment pourra être effectué.

## Références

- [1] Brun A., Spitz C., Wurtz É., Mora L. «Behavioural comparison of some predictive tools used in a low energy building », *Eleventh International IBPSA Conference* (Glasgow, Scotland July 27-30, 2009)
- [2] Spitz C., Mora L., Jay A., Wurtz É. «Analyse de sensibilité et d'incertitude du comportement thermique d'un logement », *Congrès SFT* (Perpignan, 24-27 mai 2011)
- [3] Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O., Strand R.K., Liesen R.J., Fisher D.E., Witte M.J., Glazer J. (2001) « EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program » *Energy and Building*, vol. 33, p. 319-331
- [4] Mara T.A., Tarantola S. (2008) « Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations » *Build Simul*, 1:290-302
- [5] Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Saiana M., Tarantola S. (2008) « Global Sensitivity Analysis. The Primer » John Wiley&Sons, Ltd.

## Remerciements

Le principal auteur remercie l'ADEME et l'assemblée des pays de Savoie pour le financement de ces travaux.