

# Analyse de sensibilité et d'incertitude du comportement thermique d'un logement

Clara SPITZ<sup>1&2\*</sup>, Laurent MORA<sup>3</sup>, Arnaud JAY<sup>2</sup>, Etienne WURTZ<sup>1</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** - En phase de conception d'un bâtiment les simulations permettent de prévoir le comportement énergétique d'un bâtiment. La mauvaise connaissance des paramètres d'entrée d'une simulation ne permet pas de donner le résultat sous forme unique. Dans ces travaux, une étude de sensibilité a identifié les 13 paramètres les plus influents pour le besoin de chauffage d'une maison proche du standard passif. Une étude d'incertitude, considérant la plage des paramètres les plus influents, a permis d'obtenir les besoins de chauffage pour une plage de confiance donnée.

## 1. Introduction

La construction de bâtiments à basse consommation s'est multipliée durant ces dernières années. Pour aider à la rationalisation de l'utilisation de l'énergie dans le secteur du bâtiment la simulation thermique dynamique est utilisée. La forte réduction de la consommation des bâtiments de demain réduisant presque d'un facteur 10 la consommation des bâtiments par rapport à la moyenne du parc existant implique de considérer de nouvelles études. On observe de nombreux écarts entre les performances énergétiques prévues par simulation thermique dynamique et les consommations réelles. Ces écarts sont, généralement dus aux erreurs sur les paramètres d'entrées. Les questions qui se posent sont : quels sont les paramètres d'entrées ayant une réelle influence sur la sortie d'un modèle numérique ? Quelle incertitude est engendrée sur le résultat final de la simulation dû à la méconnaissance des paramètres influents ?

L'objectif de cette étude est de proposer une méthodologie 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. Pour effectuer cette étude, nous avons modélisé une maison à faible consommation d'énergie de la plateforme INCAS et mis en place des méthodes d'analyse de sensibilité et d'incertitude.

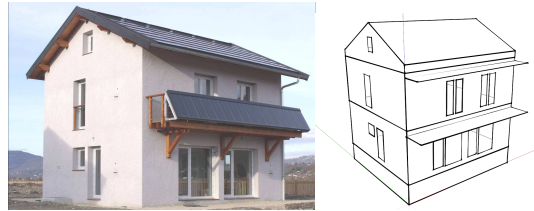
## 2. Cadre d'étude

### 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]. 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 INCAS, photo et modèle numérique*

## **2.2. Description du modèle thermique du bâtiment**

Les simulations ont été effectuées avec l'outil EnergyPlus version 6 [2]. C'est un outil de simulation dynamique permettant de prévoir le comportement énergétique de bâtiments. L'algorithme utilisé pour le calcul des transferts conductifs dans l'enveloppe est celui des fonctions de transfert [3] qui permet d'évaluer les flux intérieur et extérieur en fonction des températures de surface intérieure et extérieure. Le modèle retenu est composé de 4 zones : le vide sanitaire, le rez de chaussé, le premier étage et les combles. Chaque zone est représentée par un nœud. La consigne de chauffage a été fixée à 19°C et aucun système de refroidissement n'a été considéré. Seules les protections solaires fixes au Sud ont été considérées et aucun pont thermique n'a été pris en compte. Les coefficients de convection sont fonction du type de parois (horizontal, vertical, intérieur, extérieur) et constants durant la simulation pour chaque surface.

Le fichier météo utilisé est un fichier horaire de Chambéry représentant une année type. Le pas de temps de la simulation est de 10 minutes. Le temps d'une simulation pour l'année dure un peu plus d'1 minute avec un processeur Intel Core avec une fréquence de 1.73GHz et 3.24Go de RAM.

L'échangeur double flux n'a pas été simulé. Nous avons considéré un débit de renouvellement d'air équivalent du point de vue énergétique à une ventilation double flux d'un rendement de 80% ce qui est équivalent à une réduction du débit. Cette équivalence n'est valable que lorsque les températures extérieures sont inférieures aux températures intérieures.

### 3. Analyse de sensibilité

#### 3.1. 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.

#### 3.2. La méthode utilisée : l'analyse de sensibilité locale

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. Une autre analyse de sensibilité dite globale s'intéresse à l'influence des paramètres sur toute leur plage de variation et permet de connaître les interactions entre les paramètres. Les analyses de sensibilité globale n'ont pas pu être mises en œuvre pour ces travaux en raison du coût de calcul trop élevé du modèle numérique utilisé. Dans ces travaux, l'intérêt s'est porté sur les analyses de sensibilité locales (Saltelli A et al, 2008 [5]) simples à mettre en place et idéales lorsque le nombre de facteurs d'entrée est trop important pour appliquer directement une analyse de sensibilité globale. Le principe est de faire varier individuellement chaque facteur au voisinage de sa valeur nominale. Cette méthode a l'avantage d'éviter les problèmes des effets d'annulation (lorsque les effets de deux facteurs ayant des influences sur la sortie s'annulent entre eux).

Pour déterminer l'indice de sensibilité réduit, nous nous sommes intéressés à la méthode de perturbation. Nous avons considéré un modèle avec  $k$  facteurs d'entrées indépendants  $X_i = 1, \dots, k$ . Pour une valeur de  $X$  donnée, l'indice de sensibilité réduit du  $i^{\text{ème}}$

facteur d'entrée est défini comme : 
$$S_i(t) = X_i \frac{\partial y_k(t)}{\partial X_i} \quad (1)$$

L'approximation numérique est définie comme :

$$S_i(t) = X_i \frac{\Delta y_k(t)}{\Delta X_i} = X_i \frac{[Y(X_1, X_2, \dots, X_i + \Delta_i, \dots, X_k) - Y(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_k)]}{\Delta X_i} \quad (2)$$

Où  $X_i$  représente la valeur nominale du paramètre  $i$  et  $\Delta X_i$  représente la valeur de la perturbation de ce paramètre. L'indice de sensibilité réduit permet d'obtenir un indice homogène à la sortie d'où le facteur  $X_i$ .

#### 3.3. Paramètres étudiés

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.

### 3.4. Résultats

Pour déterminer les indices de sensibilité réduits des 139 paramètres, 140 simulations ont été effectuées. La valeur du delta  $\Delta X_i$  a été considérée comme +1% de la valeur nominale pour l'ensemble des paramètres. En sortie du modèle, nous avons étudié les besoins de chauffage du bâtiment.

Les besoins sont de 16,5 kWh/(m<sup>2</sup>.an) pour la configuration de référence. La figure 2 représente les paramètres les plus influents pour le besoin de chauffage classés par ordre croissant. Seuls les paramètres dont la valeur absolue de leur indice de sensibilité est supérieure à 1 ont été représentés sur la figure 2.

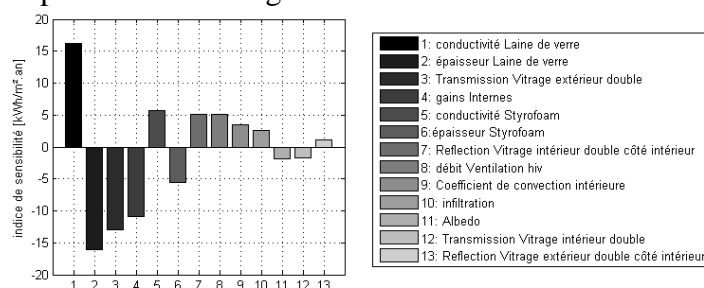


Figure 2. : Valeur des indices de sensibilité pour le besoin de chauffage

Sur 139 paramètres, nous avons dégagé 13 paramètres ayant une réelle influence sur le besoin de chauffage. Quatre paramètres contribuent à l'isolation, quatre paramètres concernent les propriétés des vitrages, deux paramètres sont relatifs au renouvellement d'air de la maison et aux défauts d'étanchéités. Pour observer l'effet de ces paramètres sur le besoin de chauffage une étude d'incertitude a été menée.

### 4. Analyse d'incertitude

Le résultat de l'analyse de sensibilité locale a permis de sélectionner les 13 paramètres les plus influents pour le besoin de chauffage. Une plage d'incertitude a été définie en fonction de chaque paramètre. La valeur du paramètre avec la plage d'incertitude est représentée dans le tableau 1. Pour l'analyse d'incertitude 1000 simulations ont été effectuées. Pour les épaisseurs et les conductivités thermiques, une distribution normale a été choisie car l'incertitude de ce paramètre reflète le manque de connaissance exacte de la valeur mesurée. Pour les autres paramètres un échantillonnage selon Monte Carlo [6] ayant une distribution uniforme dans leur plage d'incertitude a été choisie. On a une méconnaissance sur la valeur exacte de ces paramètres.

	Paramètres	Valeur du paramètre	Distribution	Incertaince
1	Conductivité laine de verre	0.035 W/m.K	normale	+/-10%
2	Epaisseur laine de verre	0.2 m	normale	+/-6%
3	Transmission vitrage extérieur	0.842	uniforme	+/- 8%
4	Gains internes	320W	uniforme	+/- 10%
5	débit de ventilation	27 m <sup>3</sup> /h	uniforme	+/- 10%

6	Réflexion du vitrage intérieur côté intérieur	0.312	uniforme	+/- 10%
7	coefficient de convection intérieure	3.08 W/m.K	uniforme	fonction des corrélations qui existent
8	conductivité Styrofoam	0.029 W/m.K	normale	+/-3
9	Epaisseur Styrofoam	0.2m	normale	+/-3
10	Infiltration	0.042V/h	uniforme	+/- 20%
11	Albedo	0.3	uniforme	+/-10%
12	Transmission du vitrage intérieur	0.588	uniforme	+/- 8%
13	Réflexion du vitrage extérieur côté intérieur	0.076	uniforme	+/- 10%

Tableau 1 : Valeur de l'incertitude des paramètres

La moyenne du besoin de chauffage pour les 1000 simulations en considérant l'incertitude des 13 paramètres définis dans le tableau 1 est de 16,67 kWh/m<sup>2</sup>.an et son incertitude est de +/- 2.75 kWh/m<sup>2</sup>.an. L'incertitude comprend 95% des résultats, dans un intervalle de deux fois l'écart type. La figure 3 représente la distribution du besoin de chauffage pour les 1000 simulations. La réponse du modèle a une distribution gaussienne.

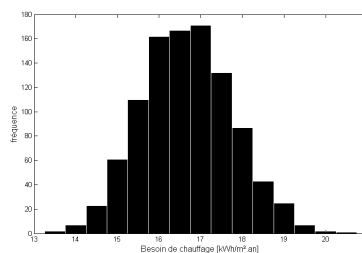


Figure 3. : Histogramme des besoins de chauffage pour les 1000 simulations.

L'incertitude sur le besoin de chauffage est de 13%. Cette valeur a été calculée en considérant l'incertitude des 13 paramètres les plus influents. La question qui se pose est quelle est l'incertitude sur le résultat final d'un paramètre tel la conductivité du Styrofoam ayant une incertitude définie très faible de +/-3% tandis que la conductivité de la laine de verre et le débit de ventilation ont une incertitude de +/- 10%. Pour répondre à cette question 3 analyses d'incertitude ont été effectuées en ne considérant qu'un paramètre à la fois et en effectuant 400 simulations. Les résultats sont dans le tableau 2.

Paramètre considéré	Besoin de chauffage RDC	Incetitude valeur absolu	Incetitude valeur relative
les 14 paramètres	16.67 kWh/m <sup>2</sup> .an	2.75 kWh/m <sup>2</sup> .an	13 %
conductivité laine de verre	16.56 kWh/m <sup>2</sup> .an	1.57 kWh/m <sup>2</sup> .an	9.5 %
conductivité du Styrofoam	16.58 kWh/m <sup>2</sup> .an	0.08 kWh/m <sup>2</sup> .an	0.5 %
le débit de ventilation	16.58 kWh/m <sup>2</sup> .an	0.64 kWh/m <sup>2</sup> .an	3.9 %

Tableau 2 : résultat des analyses d'incertitude

Les résultats représentés dans le tableau 2, permettent de mettre en avant l'incertitude d'un paramètre à la fois. Les paramètres possèdent des incertitudes plus ou moins élevés. Le Styrofoam est une marque déposée de polystyrène extrudé. L'incertitude engendrée par ce

paramètre sur le résultat du besoin de chauffage du RDC est inférieure à 1 %, tandis que l'incertitude du besoin de chauffage du RDC du paramètre de la laine de verre est de 9.5%. La composition du Styrofoam est peu influente sur les incertitudes comparée à celle d'un matériau comme la laine de verre. Le Styrofoam est un paramètre très influent pour les besoins de chauffage mais la connaissance précise de ses caractéristiques physiques permet de ne pas le considérer comme un paramètre important au regard des incertitudes.

## 5. Conclusion

Nous avons montré que l'analyse de la sensibilité des prévisions du comportement thermique d'un logement individuel vis-à-vis de l'ensemble des paramètres de conception de la maison permet de repérer les paramètres les plus influents sur la performance. Les principaux paramètres sont ceux liés à l'isolation thermique du bâtiment. L'étude d'incertitude a ensuite permis de caractériser l'incertitude associée au besoin de chauffage. Le besoin de chauffage du rez de chaussé de la maison INCAS DM doit se situer entre 13.9 et 19.4 kWh/m<sup>2</sup>.an dans notre cas présent.

La combinaison de l'analyse de sensibilité avec une étude d'incertitude permet d'identifier les paramètres influents sur les sorties d'un modèle numérique ainsi que la plage d'incertitude contenant le résultat. La suite de ce travail consistera à effectuer une analyse de sensibilité globale qui permettra de décomposer la variance associée au besoin en chauffage, c'est-à-dire d'exprimer la contribution relative de chacun des paramètres à l'incertitude sur le besoin en chauffage et de connaître les effets entre les paramètres. Dans le cadre de l'expérimentation de la maison INCAS, plusieurs capteurs permettent de suivre les évolutions de température et de consommation. Des travaux consisteront à effectuer une comparaison entre les résultats de simulation et d'expérimentation tout en considérant les différentes incertitudes afin de réaliser un diagnostic énergétique fiable. Le développement d'un modèle réduit avec comme paramètres d'entrées les résultats de l'analyse de sensibilité permettrait de réduire le temps de calcul pour les études d'incertitudes.

## Références

- [1] Brun A., Spitz C., Wurtz E., 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] 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
- [3] D. G. Stephenson, G. P. Mitalas «Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layer slabs », (1971) National Research Council of Canada in Ottawa
- [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.
- [6] Macdonald I, Strachan P. (2001) « Practical application of uncertainty analysis » *Energy and Building*, vol. 33, p. 219-227

## Remerciements

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