



**HAL**  
open science

## Présentation et Application d'une Technique d'Analyse de Sensibilité en Thermique du Bâtiment

Thierry A. Mara, Harry Boyer, François Garde, Laetitia Adelard

► **To cite this version:**

Thierry A. Mara, Harry Boyer, François Garde, Laetitia Adelard. Présentation et Application d'une Technique d'Analyse de Sensibilité en Thermique du Bâtiment. SFT 2000, May 2000, Lyon, France. pp.1-6. hal-00768183

**HAL Id: hal-00768183**

**<https://hal.science/hal-00768183>**

Submitted on 21 Dec 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Présentation et Application d'une Technique d'Analyse de Sensibilité en Thermique du Bâtiment.

Thierry Alex MARA, Harry BOYER, François GARDE, Laetitia ADELARD

Université de La Réunion, Laboratoire de Génie Industriel, BP 7151, 15 avenue René Cassin, 97 715 Saint-Denis.

**Résumé** - L'analyse de sensibilité est une étape extrêmement importante dans l'élaboration de modèle et l'interprétation des résultats de celui-ci. Nous proposons dans ce papier, une technique faisant appel aux outils du traitement du signal, afin de déterminer les facteurs les plus influents sur la sortie du modèle. Pour illustration, une étude de la sensibilité paramétrique d'un modèle de bâtiment est présentée.

## Nomenclature

<i>Caractéristiques du signal</i>		$C_p$	Chaleur massique
$\Gamma_x(f)$	Densité spectrale de puissance de $x$	$e$	Épaisseur
$a_h$	Coefficient de Fourier à la fréquence $f_h$	$\tau$	Transmittance
$\delta$	Fonction de Dirac	$\alpha_e$	Coefficient d'absorption extérieur
$\sigma_x^2$	Variance de la variable $x$	$H_{rc}$	Coefficient d'échange par rayonnement grande longueur d'onde avec la voûte céleste
<i>Grandeurs thermiques</i>		$H_{ce}$	Coefficient d'échange par convection extérieur
$\lambda$	Conductivité thermique		
$\rho$	Masse volumique		

## 1. Introduction

L'analyse de sensibilité consiste à étudier l'influence des entrées (paramètres et /ou entrées) d'un modèle sur les résultats de simulation. Cette étude est extrêmement importante dans l'élaboration de modèle et s'avère très utile dans le cadre de la validation. Cependant, les applications en simulation thermique du bâtiment sont récentes [1-4]. Les objectifs de l'analyse de sensibilité sont multiples [5] mais dans le cadre de la validation de modèles en thermique du bâtiment, les objectifs sont principalement :

- L'identification des paramètres ou entrées du modèle qu'il est indispensable de mesurer avec la plus grande précision
- La détermination de l'intervalle d'incertitude des résultats de simulation (analyse d'incertitude).

Dans ce papier, nous présentons une méthode basée sur l'analyse de la variance (ANOVA) afin d'estimer l'influence des paramètres sur les résultats de simulation. L'application à un bâtiment réel nous a permis d'une part, de déterminer les paramètres les influents sur la sortie du modèle et d'autre part, d'identifier les faiblesses de ce dernier.

## 2. La technique proposée

### 2.1. Description

L'idée consiste à réaliser un certain nombre de simulations en faisant varier simultanément chaque facteur suivant un *sinus* selon une fréquence qui lui est propre (une fréquence différente pour chaque facteur). Ces informations peuvent se retrouver en calculant la Densité Spectrale de Puissance (DSP) des résultats de simulation (cf. Figure 1). Finalement, les facteurs associés aux fréquences retrouvées en sortie sont considérés comme influents sur la sortie considérée. En outre, il est possible d'évaluer l'influence de chacun d'eux, selon l'*intensité* de la fréquence en sortie. Ce dernier point est très important car cela revient à déterminer un *indice de sensibilité* qui permet de quantifier l'influence de chacun des facteurs et d'identifier ainsi les plus influents (screening).

### 2.2. Résultats escomptés

Considérons un modèle à  $k$  facteurs et une sortie, indépendante du temps,  $Y = F(X_1, X_2, \dots, X_h, \dots, X_k)$  et effectuons des simulations en faisant varier chaque facteur suivant un *sinus* de fréquence différente de telle sorte que :  $X_h = X_{base} \cdot (1 + \Delta_h \cdot \sin(2\pi f_h))$  où  $X_{base}$  est le jeu de facteurs à leur valeur de base et  $\Delta_h > 0$ .

Dans le cas où le modèle n'est pas linéaire mais comporte des interactions d'ordre deux entre les différents facteurs nous obtenons :

$$\Delta Y = \sum_{h=1}^p a_h \cdot \sin(2\pi f_h) + \sum_{h=1}^p \sum_{h'=1}^p a_{hh'} \cdot \sin(2\pi f_h) \cdot \sin(2\pi f_{h'}) \quad (1)$$

où  $p \leq k$  dépend de l'influence de chacun des paramètres et  $\Delta Y = Y_{base} - Y$  avec  $Y_{base}$  résultat obtenu en considérant  $X_{base}$

$Y$  vecteur résultat des différentes simulations.

Le calcul de la DSP de l'équation (1) donne :

$$\Gamma_{\Delta Y}(f) = \sum_{h=1}^p \frac{a_h^2}{2} \delta(f - f_h) + \sum_{h=1}^p \sum_{h'=1}^p \frac{a_{hh'}^2}{2} \left[ \frac{1}{2} \delta(f - (|f_h - f_{h'}|)) + \frac{1}{2} \delta(f - (f_h + f_{h'})) \right] \quad \forall f_h \geq 0, \text{ d'où après intégration}$$

$$\sigma_{\Delta Y}^2 = \sum_{h=1}^p a_h^2 + \sum_{h=1}^p \sum_{h'=1}^p a_{hh'}^2 \quad \text{car } \Gamma_{\Delta Y}(f) \text{ est paire}$$

$$\Leftrightarrow 1 = \sum_{h=1}^p \frac{a_h^2}{\sigma_{\Delta Y}^2} + \sum_{h=1}^p \sum_{h'=1}^p \frac{a_{hh'}^2}{\sigma_{\Delta Y}^2} \quad (2)$$

L'équation (2) traduit la décomposition de la variance des écarts en sortie en fonction des facteurs et de leurs interactions. Ainsi, le rapport  $a_h^2 / \sigma_{\Delta Y}^2$  représente la part de la variance des résultats de simulation expliquée par le facteur  $h$  seul.

## 3. Application en thermique du bâtiment

### 3.1. Analyse des résultats

Nous présentons les résultats obtenus pour l'analyse de sensibilité paramétrique du modèle de la cellule LGI qui se trouve à l'Université de La Réunion (cf. figure 2). Le transfert de chaleur par conduction est représenté par le modèle R2C (analogie thermo-électrique) qui utilise deux nœuds par paroi excepté pour le sol qui possède trois nœuds. Pour ce modèle de bâtiment, à 120 paramètres nous nous sommes intéressés à l'influence sur la température d'air intérieur.

Après avoir effectué 1024 simulations en faisant varier de 10% par rapport à leur valeur de base ( $\Delta_h = 0.1$ ), les paramètres suivant un sinus, nous avons identifié 15 paramètres influents, ceux expliquant plus de 3% de la variance des écarts à un instant donné (voir tableau 1).

Tableau 1 : *Les paramètres les plus influents et leur fréquence associée*

Epaisseur polyuréthane toit (3705)	Transmittance du vitrage (9035)
$\lambda$ polyuréthane toit (4530)	Absorptivité Est (405)
Epaisseur dalle béton au sol, (4750)	Absorptivité toit (850)
Chaleur massique dalle béton au sol(8555)	Absorptivité Porte (6100)
Masse volumique dalle béton au sol(3255)	$Hrc$ (4305)
Surface de la porte (780)	$Hce$ de la paroi Nord (5950)
Surface du sol (9710)	$Hce$ du toit (2050)
Surface de la vitre (7825)	

Les figures 3 et 4 représentent les spectres de puissance des écarts à différents pas de temps de la simulation. Sur les 120 fréquences utilisées seules une partie se retrouvent en sortie avec une forte amplitude. La figure 5 représente l'évolution des spectres de puissance en fonction du temps. Par conséquent, cette courbe montre l'évolution de l'influence de chaque paramètre. A partir de l'équation (2), nous avons calculé la part de la variance des écarts expliqués par les 12 paramètres les plus importants (cf. figure 6). Ainsi, ces derniers semblent expliquer 70 à 90% de la variance. Les paramètres prépondérants sont les propriétés du vitrage ( $\tau$  et surface) durant la journée ainsi que le coefficient d'échange par rayonnement grande longueur d'onde avec la voûte céleste ( $Hrc$ ).

L'analyse des résultats montre aussi que, concernant les propriétés thermophysiques des matériaux, c'est la résistance thermique ( $e, \lambda$ ) du polyuréthane dans le toit qui influe sur la température d'air intérieur alors que c'est la capacité thermique de la dalle béton au sol ( $e, \rho, Cp$ ) qui semble avoir un impact sur cette sortie. Le fait que la température d'air intérieur soit sensible aux propriétés du vitrage n'est guère étonnant dans la mesure où le bâtiment considéré est bien isolé et que la principale source de chaleur est le rayonnement diffus passant par la vitre. Par contre, la sensibilité vis à vis de  $Hrc$  est liée à la linéarisation des échanges par rayonnement grande longueur d'onde avec le ciel. Cette linéarisation rend le modèle thermique du bâtiment plus sensible à ces échanges.

Les résultats d'une analyse de sensibilité paramétrique dépendent d'une part des modèles utilisés mais aussi des entrées. En effet, la figure 6 montre que l'influence de la transmittance est faible les premiers jours et plus forte du 7<sup>ème</sup> au 10<sup>ème</sup> jour, jours correspondant à un fort rayonnement diffus. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé des données météorologiques issues d'un générateur de climat [6]. De même, nous avons constaté [7] que pour un modèle de transfert de chaleur par conduction autre (3 nœuds par couche) les résultats sont sensiblement différents.

### **3.2. Comparaison avec la DSA et la MCA**

A priori, tous les pics principaux visibles sur les spectres de puissance correspondent à des fréquences affectées à des facteurs ce qui signifie qu'il n'y a pas d'interactions entre les facteurs. Si ce dernier point est vérifié, cela signifie que le coefficient de Fourier à une fréquence donnée (c-a-d pour un paramètre donné) correspond, en valeur absolue, à la

différence entre la sortie de base et celle obtenue pour une simulation où seul le paramètre considéré est modifié de 10% de sa valeur de base.

Ainsi, le calcul d'incertitude peut être obtenue par la méthode dite DSA (Differential sensitivity analysis) qui nécessite autant de simulations que de paramètres [1] considérés au lieu de l'analyse de Monte Carlo (MCA). Autrement dit, si le modèle est linéaire par rapport aux paramètres, l'incertitude obtenue à partir de la méthode MCA est égale à la somme quadratique des écarts obtenus par la DSA et égale la somme de coefficients de Fourier au carré obtenus à partir de notre méthode. Soit,

$$e_T = \sqrt{\sum_{i=1}^N e_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N a_i^2}$$

$e_T$  incertitude obtenue par la MCA.

$e_i$  écart obtenu en prenant le paramètre  $i$  à sa valeur maximale (ici +10%)

$a_i$  le coefficient de Fourier pour le paramètre  $i$  (fréquence  $f_i$ )

$N$  nombre de paramètres considérés.

Pour illustration, nous avons effectué une simulation en faisant varier de 10% la valeur du coefficient de la transmittance du vitrage ( $\tau$ ). Ensuite, nous avons calculé le carré de l'écart entre la température obtenue avec les valeurs de base des paramètres et celle obtenue après variation de ce paramètre :  $(\Delta T)^2 = (T_{\text{base}} - T_{\tau \text{ mod.}})^2$ . La figure 7 montre l'égalité entre les coefficients de la DSP de la fréquence 9035 ( $\tau$ ) et le carré de l'écart obtenu.

De même, nous avons calculé la variance des écarts obtenus par la méthode de Monte-Carlo pour un nombre de tirs de 200. Tous les paramètres ayant été affectés d'une distribution gaussienne entre  $\pm 10\%$  de leur valeur de base. La figure 8 montre l'égalité entre l'incertitude obtenue en sommant les coefficients de la DSP et celle obtenue à partir de la MCA.

**Conclusion** – Nous avons présenté une technique d'analyse de sensibilité. L'application sur un modèle de bâtiment existant nous a permis d'identifier les paramètres les plus influents. La cohérence des résultats obtenus ainsi que la comparaison avec d'autres techniques nous confortent dans son utilisation. Dans le cadre de la validation de modèle de bâtiment, cette étude est très importante car elle permet, entre autres, de mieux concevoir l'expérimentation. Il est à noter que cette approche peut s'étendre aux entrées du modèle (données météorologiques).

## Références

- [1] K. Lomas, H. Eppel, *Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs*, Energy and Buildings Vol. 19, 1992, pp. 21-44.
- [2] J.M. Fürbringer, *Sensibilité de modèles et de mesures aéraulique du bâtiment à l'aide de plan d'expériences*, Ph. D thesis, N° 1217, EPFL, 1015 Lausanne, Switzerland, 1994.
- [3] N. Rahni, N. Ramdani, Y. Candau, G. Guyon, *Regression analysis and dynamic buildings energy models*. SAMO'98 proc. Venice Ca'Dolfino April 19 – 22, 1998, pp. 227 229.
- [4] P. Aude, C. Beghein, P. Depecker, C. Inard, *Perturbation of the Input Data of Models Used for the Prediction of Turbulent Air Flow in an Enclosure*, Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, Vol. 34, Issue 2 1998, pp. 139-164.
- [5] J.P.C. Kleijnen, *Sensitivity analysis and related analysis: a review of some statistical techniques*, Journal Statistical and Computation Simulation, Vol. 57, 1996, pp 111-142.

- [6] L Adelaar, *A detailed weather data generator for building simulations*, Energy and Buildings , Vol 31 Iss 1, 2000, pp 75-88. à paraître.
- [7] T. A. Mara, H. Boyer, F. Garde, *Parametric sensitivity analysis of a thermal test cell model using spectral analysis*, soumis à Journal of Solar Energy Engineering Déc 1999.

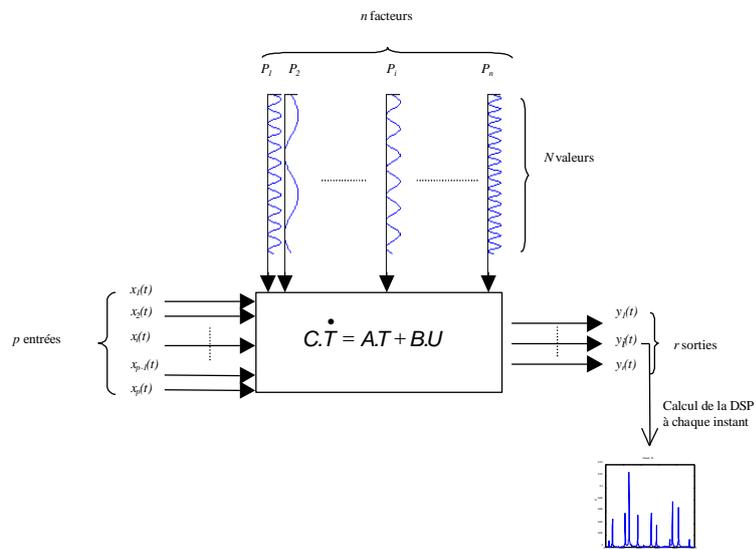


Figure 1 : Description de la méthode utilisée pour l'analyse de sensibilité

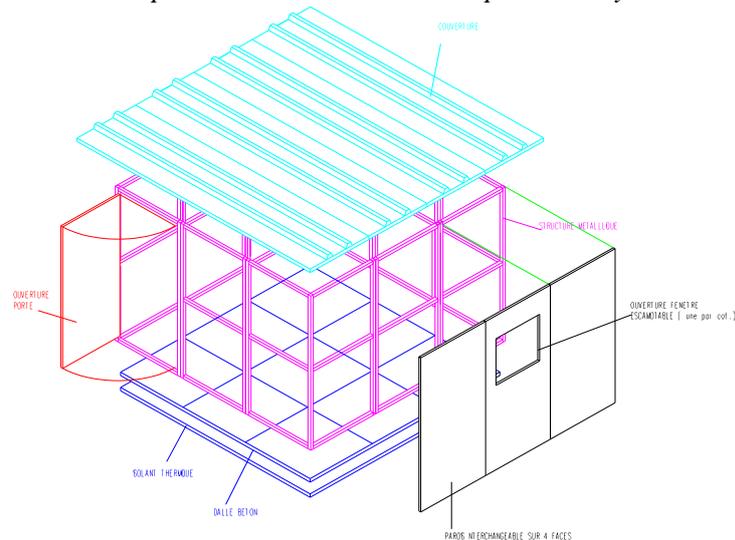


Figure 2 : Cellule expérimentale LGI

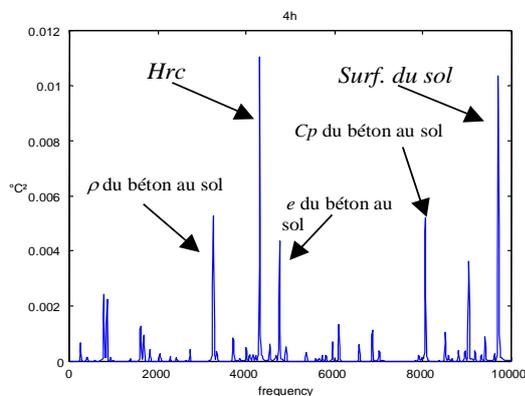


Figure 3 : DSP des écarts obtenus sur la température d'air intérieur à 4h du matin.

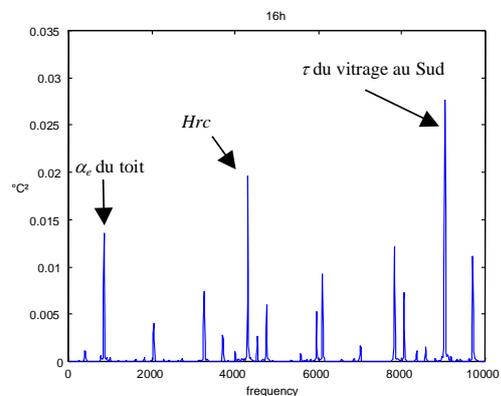


Figure 4 : DSP des écarts obtenus sur la température d'air intérieur à 16h.

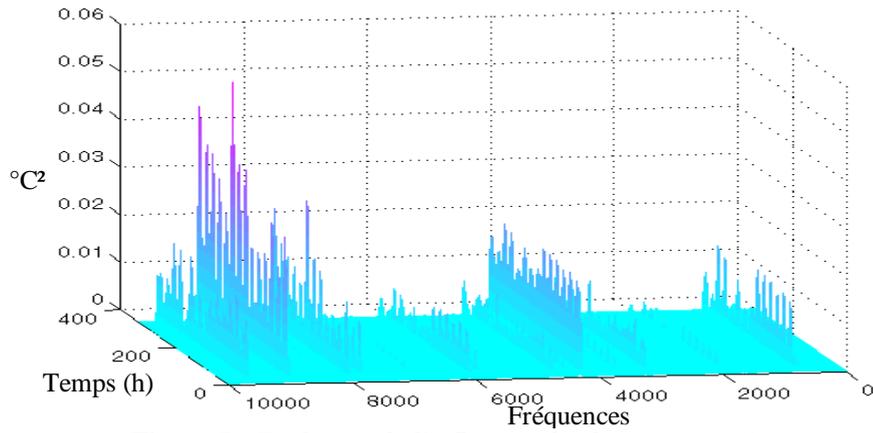


Figure 5 : Evolution de l'influence de chaque paramètre

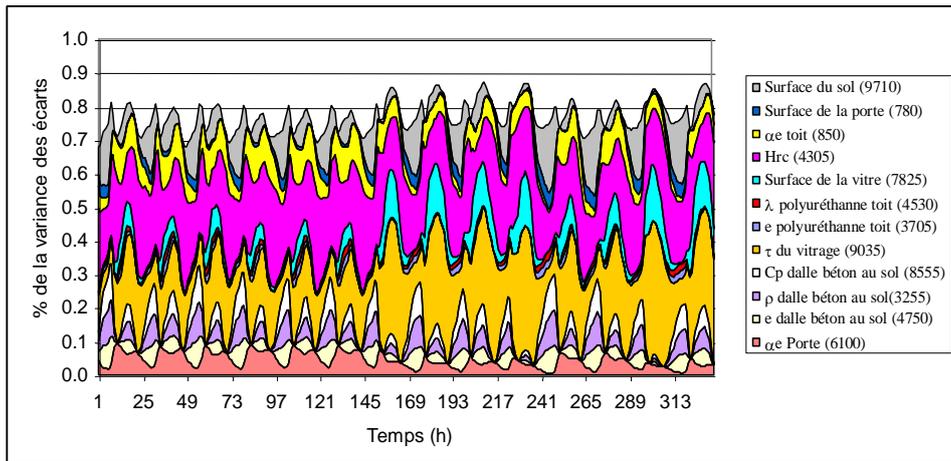


Figure 6 : Evaluation de l'influence des 12 paramètres les plus influents

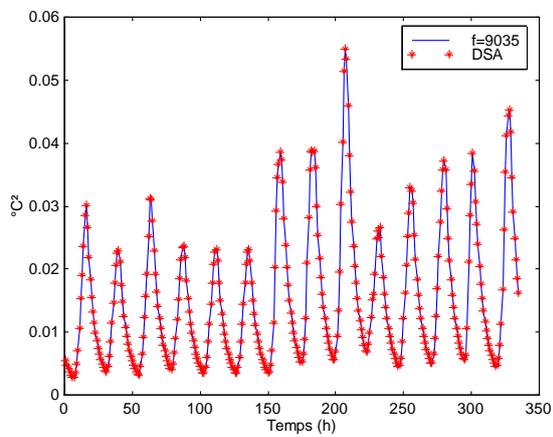


Figure 7 : Comparaison entre DSA et la méthode proposée pour le paramètre  $\tau$

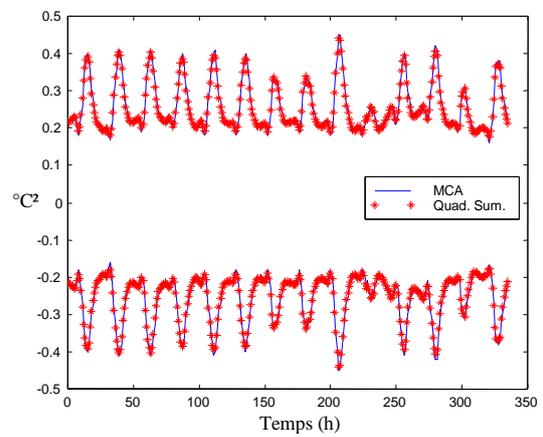


Figure 8 : Comparaison entre l'incertitude obtenue avec la MCA et la méthode proposée