

Outil d'aide à la conception: Automatisation de l'analyse de sensibilité pour EnergyPlus

Mickael Rabouille*^{1,3}, Pascal Perrotin¹, Etienne Wurtz²

¹ LOCIE, Université de Savoie

Polytech Annecy-Chambéry, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-du-Lac,

² CEA INES

50 Avenue du Lac Léman, 73375 Le Bourget-du-Lac,

³ LERMAB, Université de Lorraine

ENSTIB, 27 rue Philippe Seguin, 88051 Epinal,

*mickael.rabouille@gmail.com

RESUME. En énergétique du bâtiment et particulièrement en réhabilitation il peut être nécessaire de calibrer un modèle thermique, de rechercher des solutions et d'évaluer des incertitudes. Ce sont 3 étapes qui entrent dans le domaine des techniques d'analyse de sensibilité. Un des besoins de la simulation thermique dynamique est donc de se servir de ces méthodes spécialisées dans l'étude des modèles. Nous proposons un outil générique destiné à réaliser des analyses de sensibilité sur le logiciel de simulation thermique dynamique EnergyPlus. La démarche sera illustrée par une étude de l'influence d'une surépaisseur d'isolation extérieure sur l'éclairage, le confort et les besoins. Cet outil a déjà été employé dans diverses analyses au sein du laboratoire LOCIE.

MOTS-CLÉS : Analyse de sensibilité, Incertitudes, Interface EnergyPlus.

ABSTRACT. In building physics and particularly refurbishment it can be useful to calibrate a thermal model, to look for solutions and to estimate uncertainties. There are all of three in the field of sensitivity analysis technics. These methods specialized in the models study can be usefully used in thermal simulation. We propose a generic tool to perform sensitivity analysis on the dynamic thermal simulation software EnergyPlus. The approach is illustrated by a study of the influence of an external insulation thickness on the illumination, comfort and needs. This tool has already been used in various analyzes in the LOCIE laboratory.

KEYWORDS : Sensitivity analyses, Uncertainties , EnergyPlus interface.

1. INTRODUCTION

Les simulations thermiques dynamiques sont employées afin d'obtenir de façon déterministe des évaluations précises du fonctionnement des bâtiments. L'objectif est une maîtrise de tous les échanges énergétiques afin de concevoir des bâtiments neufs à haute efficacité et de rechercher des solutions d'amélioration efficaces. Dans ces deux applications, nous souhaitons quantifier et réduire les écarts entre simulation et bâtiment final. Ce besoin de fiabilité est fortement présent en réhabilitation dans laquelle les investissements sont généralement conditionnés par l'économie d'énergie attendue mais où la connaissance des caractéristiques physiques est limitée. L'enjeu est de comprendre le comportement du bâtiment face à la modification de ses caractéristiques, qu'elles soient liées à une variabilité naturelle, à des phénomènes sous-jacents ou à une recherche de solution. Cela demande

donc d'une part de quantifier la variabilité statistique des données d'entrée puis de permettre leurs évaluations dans le modèle énergétique pour enfin en déduire l'impact sur les sorties du modèles.

2. PRESENTATION DE L'OUTIL

De nos jours, cette étude de la variation des paramètres d'entrée est rendu possible par l'augmentation de la puissance de calcul des stations de travail et par la généralisation les outils de simulation dynamique. Ces logiciels de simulation intègrent généralement des options permettant de faire des analyses paramétriques ou peuvent être couplés à de tels outils, comme jEPlus (Zhang 2009). Cependant, il est nécessaire de développer ces logiciels sur deux points. D'une part prendre en compte les lois de distribution et permettre de générer des échantillonnages correct afin d'évaluer les incertitudes et rendre possible l'utilisation des techniques d'analyse de sensibilité. D'autre part extraire les informations géométriques qui sont associées aux sorties afin de favoriser l'analyse multicritère et la création d'indicateurs élaborés. Le modèle peut disposer d'une géométrie complexe avec des dénominations plus ou moins explicites ce qui rend la manipulation des sorties au cas par cas difficile.

Nous présentons dans cet article un outil d'analyse générique basé sur le domaine de l'analyse d'incertitude et de l'analyse de sensibilité globale, nous l'avons voulu simple, parallélisable et adaptable au projet le plus automatiquement possible. Une attention particulière a été portée sur l'utilisation de techniques d'analyse de sensibilité robustes qui permettent de réduire le coût de calculs tout en assurant la fiabilité des indicateurs produits.

Le logiciel de simulation EnergyPlus a été choisi pour de nombreuses raisons. C'est un outil complet, gratuit et multiplateforme avec un développement important et une capacité de simulation des systèmes énergétiques développée. Il dispose d'entrées et de sorties au format texte et peut être utilisé en parallèle sans interface graphique. De plus, il a fait l'objet de nombreuses validations et dispose d'un fort soutien de la communauté scientifique.

Pour la partie analyse, le code a été développé sur MatLab pour sa gestion du format matriciel et des séries temporelles. Le langage se veut également accessible et multiplateforme et peut être compilé pour fonctionner de façon autonome. De plus, l'utilisateur de l'outil dispose par l'intermédiaire de Matlab de nombreux outils statistiques grâce à la toolbox statistique (non utilisée) ou bien par les nombreuses routines alimentées par la communauté internationale d'analyse de sensibilité (Joint Research Centre website).

L'analyse de sensibilité sur le bâtiment apporte des informations qui peuvent permettre: la calibration de modèle, un indice de confiance sur les résultats, une recherche de solution de réhabilitation. Pour chaque utilisation, les conditions de l'étude seront certes différentes mais la méthodologie suit la même démarche et se définit en 6 étapes selon (Tian 2013) : Déterminer les variations ; Créer le modèle énergétique ; Simuler ; Collecter les résultats ; Calculer les effets ; Présenter les résultats. La structure du programme est décrite en Figure 1. Les parties suivantes présentent les grandes étapes.

3. ECHANTILLONNAGES ET METHODES IMPLEMENTEES

La génération des variations d'entrées est une étape importante de toute analyse de sensibilité. Les plages de variations ainsi que les lois de distributions (uniforme, normale) vont dépendre de l'objectif

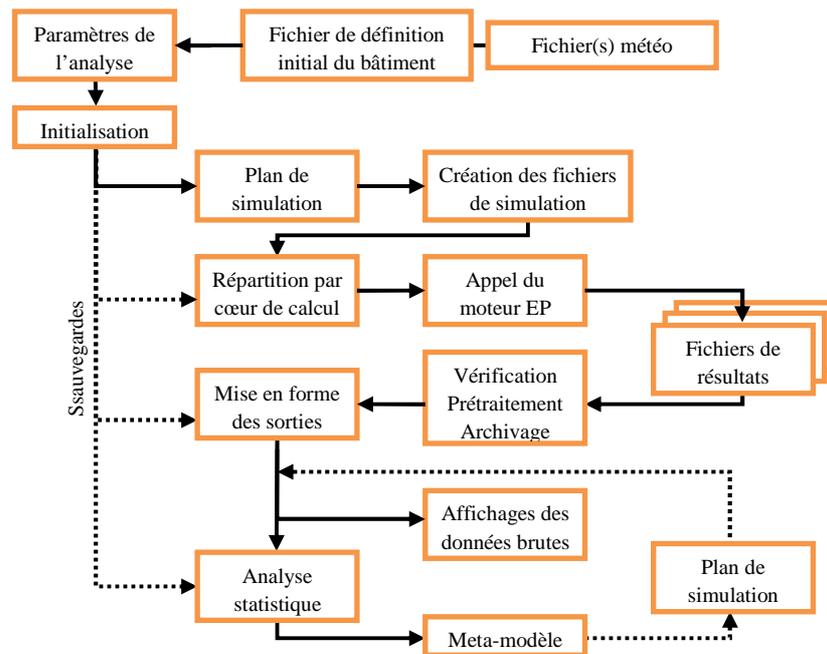


Figure 1 : Architecture de l'outil

de l'étude et de l'interprétation qui en sera faite. Concrètement, deux types de définitions d'entrées sont employées :

Pour la première, de grandes plages de variation uniformes sont définies. L'objectif est de faire un criblage de l'espace afin de permettre la recherche de solution ou le calcul de l'influence globale des entrées sur les sorties. Généralement, une suite pseudo-aléatoire comme Halton ou LPTau(Sobol) est utilisée pour sa capacité à explorer l'espace de façon multidimensionnelle et uniforme. Les résultats peuvent alors être analysés via les graphiques produits ou permettre la construction d'un méta-modèle. Dans ce dernier point, la technique du chaos polynomial (Polynomial Chaos Expansion) permet de décomposer le comportement du modèle initial dans des bases de polynômes orthogonaux (Blatman and Sudret 2010). Le calcul des indices de sensibilité est automatiquement réalisé et des indicateurs d'erreur permettent de valider ce nouveau modèle. Ce méta-modèle permet, sur son domaine de définition, d'estimer de façon instantanée les réponses. Il peut être employé pour rechercher des voies d'amélioration ou pour réaliser des analyses sur des plages réduites comme décrit ci-dessous.

La seconde définition des entrées correspond à une recherche de précision (analyse d'incertitude), les variations naturelles des entrées sont employées avec les lois de probabilité qui leur correspondent et des méthodes d'échantillonnage aléatoire sont utilisées : MonteCarlo, LHS. L'effet produit par une variable d'entrée sur la sortie est ainsi la combinaison d'une incertitude avec une influence du modèle. Par conséquent, l'étude des indices de sensibilité permet de conclure immédiatement sur l'importance de chaque entrée en prenant en compte qu'une variable sûre mais influente peut produire autant d'incertitude qu'une variable incertaine mais peu influente.

Quel que soit la plage de définition des entrées, la méthode d'échantillonnage doit être compatible avec la technique d'analyse de sensibilité employée. Le programme contient des techniques basées sur le principe RBD (Random Balance Design) qui ont besoin d'un échantillonnage spécifique mais permettent le calcul des principaux indices avec un coût de simulation réduit (Tarantola, Gatelli, and Mara 2006). Les méthodes d'analyse de ce type en place sont : RBD-FAST et Indices de Sobol.

4. DESCRIPTION DU FICHIER ET SIMULATION

Une fois le plan de simulation créé il est nécessaire de réaliser les simulations. Les nombreuses données d'entrée nécessaire sont généralement regroupées en deux fichiers, un fichier météorologique horaire « .epw » et un fichier de définition « .idf » qui comprend les données du bâtiment, les systèmes, les scénarios et les options de simulation. C'est à partir de ces fichiers que différentes variantes de la simulation initiale seront créées.

Pour la définition des données climatiques, le fichier météo peut être unique ou être considéré comme une entrée discrète ou être couplé à un programme externe. L'outil présenté a ainsi pu servir de base au développement d'une méthode de génération sur des données issue de séries temporelles corrélées afin de permettre l'analyse de sensibilité (Goffart 2013).

Pour les autres données une variante du fichier idf initial est créée pour chaque simulation. Il est donc nécessaire de connaître préalablement la place des valeurs des paramètres d'entrée dans le fichier initial de simulation afin de définir les modifications à apporter. L'identification des paramètres se fait via la balise de commentaires « ! » du fichier. Cette méthode permet de garder une compatibilité avec les outils classiques (EP-Launch, EP-Editor, DesignBuilder,...). La méthode est d'ajouter juste avant l'objet que l'on souhaite modifier, une ligne de commentaire via « !\$\$ » puis le nom de la variable et enfin sa localisation dans les lignes suivantes.

```
!$$ epIsolant 3
Material,
  isolation murs,      !- Name
  Rough,              !- Roughness
  0.2000000,          !- Thickness {m}
  0.0350000,          !- Conductivity {W/m-K}
  12.0000000,         !- Density {kg/m3}
  840.0000000;        !- Specific Heat {J/kg-K}
```

Dans l'exemple ci-dessus l'épaisseur d'isolant, présente à la troisième ligne, sera remplacée dans toutes les simulations pas la valeur définie pour « epIsolant ». Ce type de remplacement est valable pour des données numérique ou texte, ce qui peut permettre d'inclure différents choix de modèle (exemple : calcul des coefficients convectifs). La localisation peut également cibler plusieurs lignes pour une même variable en écrivant le numéro de ligne à la manière de MatLab [1:2:10] ou {1,[5,7]}. Il est aussi possible de réaliser des opérations simples lors du remplacement en ajoutant un opérateur (+, -, *, /). L'exemple suivant permet de moduler la taille du masque solaire dû au débord de toiture en fonction de l'épaisseur d'isolant. La valeur de la variable « epIsolant » définie pour cette simulation sera soustraite aux composantes Y des deux premiers vecteurs. Ceci permet d'évaluer les multiples impacts que peuvent avoir la modification de certaines variables.

```
!$$ epIsolant -[6,9]
Shading:Zone:Detailed,
  debord_toiture,      !- Name
  face_sud,            !- Base Surface Name
  ,                    !- Transmittance Schedule Name
  autocalculate,      !- Number of Vertices
  5,                   !- Vertex 1 X-coordinate {m}
  -.4,                !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
  2.5,                !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
  0,                  !- Vertex 2 X-coordinate {m}
  -.4,                !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
  ...
```

5. TRAITEMENT DES RESULTATS

Les simulations donnent accès à une quantité importante d'informations sur les échanges du bâtiment, des systèmes et de l'environnement. Il n'est donc pas évident de manipuler toutes ces

variables d'une part face à la quantité importante de données et particulièrement quand les surfaces n'ont pas des noms explicites. La collecte des résultats se fait donc en trois étapes : Prétraitement, Extraction et Formatage. Elle permet de produire automatiquement des résultats en fonction des zones, des orientations, des périodes, L'utilisateur peut exploiter ses informations afin d'observer différents aspects de la simulation et aller au-delà de la simple étude de la consommation annuelle.

Le prétraitement permet d'extraire les données temporelles et géométriques qui sont communes à toutes les simulations. On suppose pour cela que l'étude est réalisée sur une (des) période(s) constante(s) et le bâtiment conserve sa composition afin que les mêmes sorties soient présentes dans tous les fichiers de résultats. Ce prétraitement fournit des identifiants à toutes les zones et les surfaces, informe de leurs propriétés et les rassemble par groupe (zones, orientations, parois vitré/opaque, conditions limites, ...). On obtient le squelette du bâtiment ce qui permet d'identifier les résultats et de localiser leurs origines dans la géométrie quel que soit le modèle.

Les données extraites proviennent des fichiers de sorties « .csv » mis en forme par EnergyPlus. Les données correspondent aux sorties qui ont été demandées lors de la simulation et sont généralement nommées « KeyValue: Type (Frequence) » tel que : Frequence est l'intervalle d'affichage de chaque valeur, allant du pas de temps à l'année ; Type correspond à la variable demandée et son unité ; Enfin KeyValue correspond à l'élément auquel s'applique le Type, la valeur * affiche tous les éléments.

Il est nécessaire d'identifier ces données et de les stocker dans un format facilement manipulable. Le système d'extraction utilise pour cela différents opérateurs génériques issues du prétraitement qui prendront lors de l'extraction le nom (%ZONE%, %ZONECONF%, %SURFACE%, %WINDOW%, ...) ou l'identifiant (%ZONEID%, %SURFID%) de tous les éléments qu'ils désignent. L'utilisation de ces identifiants permet une sélection et un traitement fiable et automatique des données. L'utilisateur définit uniquement les noms des variables EP et les noms des variables locales de la façon suivante :

```

'Environment:Site Outdoor Air Drybulb Temperature [C](Daily)',
'donnees.unique.T_ext';
'%ZONE%:Zone Operative Temperature [C](Hourly)',
'donnees.zone.T_op(:,%ZONEID%)';
'%ZONECONF%:Zone Thermal Comfort Fanger Model PMV [(Hourly)',
'donnees.zone.PMV(:,%ZONEID%)';
'%WINDOW%:Surface Window Heat Loss Energy [J](Daily)',
'donnees.surface.E_win_loss(:,%SURFID%)';
'%SURFACE%:Surface Inside Face Convection Heat Gain Energy [J](Hourly)',
'donnees.surface.E_conv(:,%SURFID%)';

```

Après extraction les fichiers de sorties EnergyPlus peuvent être supprimés. Cela représente une très forte réduction de la masse de donnée (4% de la taille initiale) et permet une lecture rapide par la suite.

L'analyse des résultats se fait généralement sur un nombre limité de valeurs scalaires. Les données extraites sont donc traitées une dernière fois pour l'analyse. Un certain nombre d'indicateurs de base sont définis mais le format des variables permet une mise en forme facile afin de construire ses propres variables d'évaluation. Sachant que les données sont déjà formatées, le temps de traitement est faible et permet de produire différentes études. Exemple : changer la période d'étude des sorties ou réaliser des études par orientation. Cela a permis lors d'un travail de Master de réaliser une analyse de l'influence des variables au cours du temps afin de permettre la calibration d'un modèle (voir l'article déposé par Ana Maria Stafanoiu).

La partie suivante présente des résultats sur l'éclairage, le confort et les besoins. L'éclairage est défini comme l'éclairage moyen sur les heures d'ensoleillement et sur l'ensemble de la surface à une hauteur de 70 cm (Figure 2). Le confort utilise la théorie du confort adaptatif pour fournir des

[°C.jours] d'inconfort au-delà de la classe II (écart de 3°C sur la température optimale soit 80% des occupants satisfait)(EN 15251 2007). Les besoins représentent l'énergie fournie par un système idéal en kWh/m². Sont également présents les transferts (conductifs et radiatifs) des vitrages vers la zone en kWh/m² de vitrage. Les résultats seront analysés sur les mois de janvier et de juillet.

6. DETAILS DU LOCAL ETUDIE

Pour des raisons de simplicité le local présenté en Figure 2 est de type «boite» d'une surface de 5x2,5 m² et d'une hauteur sous plafond de 2,5 m. La structure est constituée de 20 cm de béton lourd avec une isolation extérieure. Il dispose d'une fenêtre orientée sud de 2x1,2 m² avec un débord de mur distant de 10 cm et d'épaisseur égale à l'épaisseur d'isolant. Nous avons également placé une casquette solaire à 30 cm au-dessus de la fenêtre qui dépasse la surface extérieure du mur de 40 cm. Les parois verticales disposent en plus d'un revêtement intérieur composé d'une lame d'air et d'une plaque de plâtre. Nous supposons enfin que le local est soumis au climat de Lyon. Toutes les autres variables sont laissées par défaut. Un jeu réduit de variables d'entrées sont prises en compte les plages de variations et les lois d'incertitudes associées sont définies dans le Tableau 1.

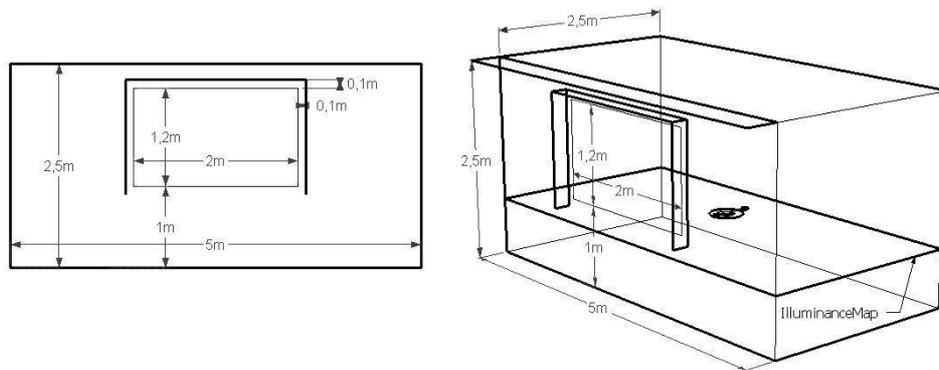


Figure 2 : Géométrie du local (face sud et vue 3/4)

	Isolants [m]	Infiltrations [vol./h]	Consigne haute [°C]	Consigne basse [°C]	Vitrage (sans traitement)
Val. limite	0.001 à 0.3	0.06 à 2	25 à 35	18 à 21	[4]
Incertitudes	Gauss. ±10%	Gauss. ±15%	Uniforme ±5%	Uniforme ±5%	[4/16/4] [4/16/4/16/4]

Tableau 1 : Variables de la simulation

- Incertitude Gaussienne : 95% de confiance soit 1,96 σ -

7. RESULTATS

Dans cet exemple nous illustrons l'effet de modifications fortes des entrées pour la réhabilitation. Les résultats permettent de construire un méta modèle qui sera alors utilisé pour réaliser une analyse plus fine de l'influence des variables d'entrée en fonction de leurs incertitudes.

L'analyse des sorties brutes permet de mettre en avant quelques effets couplés, par exemple la Figure 4 représente l'énergie transmise par les vitrages en fonction de l'éclairage moyen. On remarque d'une façon générale que le nombre de vitre réduit la transmission du rayonnement. Le paramètre prépondérant du vitrage en hiver est la conductivité de celui-ci, l'augmentation du nombre de vitrage produit cependant une diminution d'éclairage significative. On remarque malgré tout que

seul le triple vitrage permet de valoriser les apports solaires par un bilan énergétique au niveau de la surface pouvant être positif. En été la technologie du vitrage ne produit pas de modification majeure sur les transferts si ce n'est la diminution de l'éclairement décrite précédemment. Une analyse des autres courbes présentes en Figure 3 montre que l'épaisseur d'isolant a des influences variables suivant les saisons, en hiver il permettra d'isoler le logement mais en été il sert de pare-soleil. On remarque également qu'il est responsable via la taille du débord de toiture des dispersions qui sont présentes sur la Figure 4.

Nous allons maintenant présenter des résultats d'analyse d'incertitude sur un état initial dégradé et un état final réhabilité. Pour un souci de clarté et dans le but d'être concis, nous ne présenterons pas de résultat d'analyse de sensibilité. Cependant l'analyse de sensibilité permet d'identifier la part de responsabilité de chaque entrée sur les dispersions présentes en sorties et permet donc également de

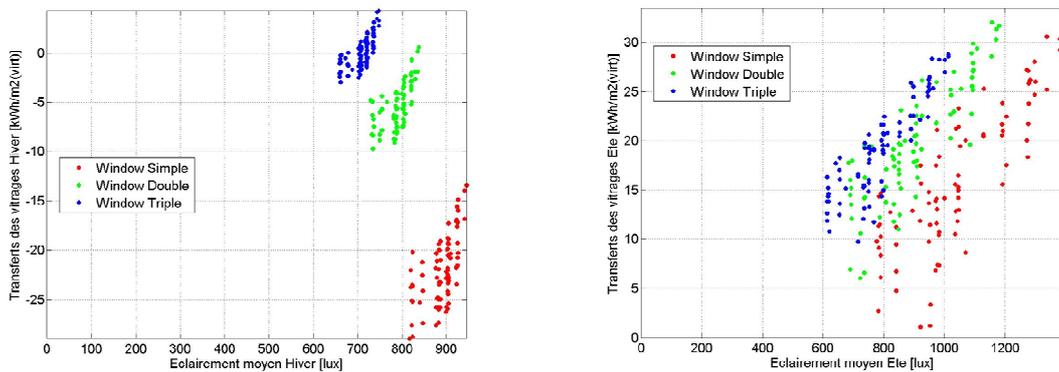


Figure 4 : Eclairage moyen de la zone en fonction des apports des surfaces vitrées dans la zone - pour les mois de janvier et de juillet -

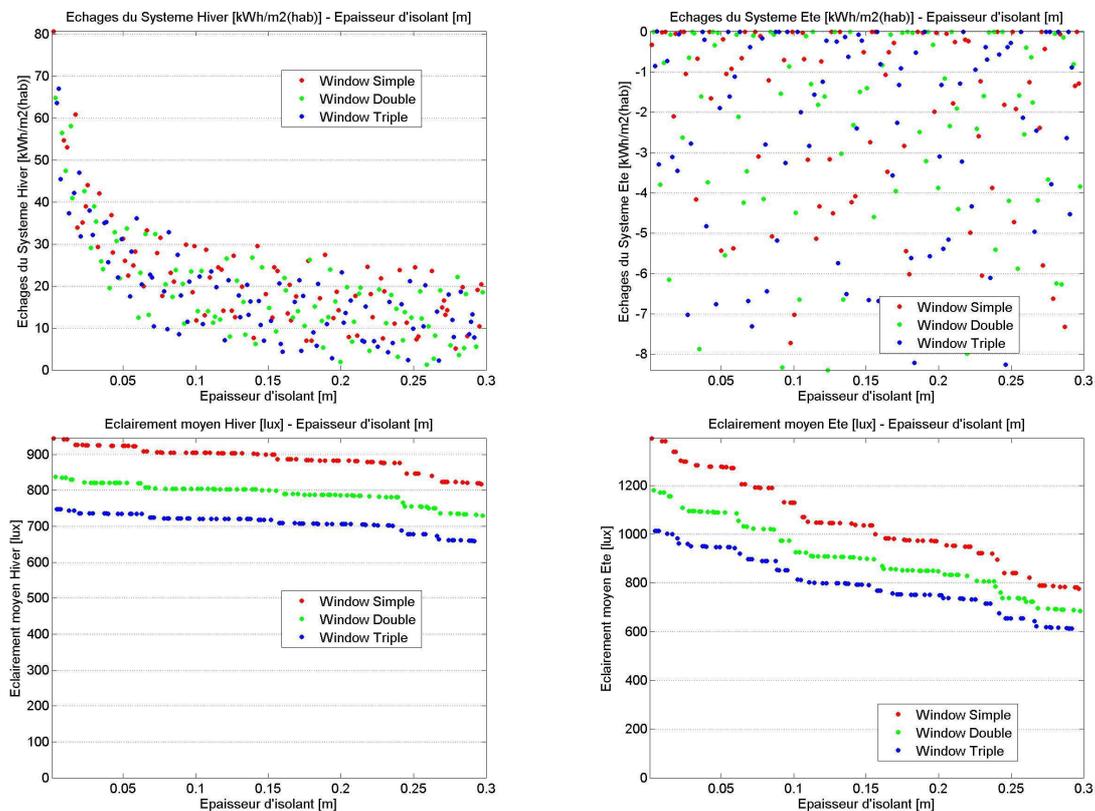


Figure 3 : Effets de l'épaisseur d'isolant

- en haut les besoins, en bas l'éclairement et à gauche en janvier, à droite en juillet -

justifier l'évolution entre l'état initial et l'état final. Le Tableau 2 montre les caractéristiques pour ces deux états, les consignes ont été fixées à 20°C en hiver et 26°C en été. Toutes les variables disposent des incertitudes du Tableau 1 sauf le vitrage qui a été choisi double. On remarque que la réhabilitation produit une forte modification du comportement. Les besoins de chauffage passent de 53.2 à 4.24 kWh/m².mois avec une amélioration du confort et malheureusement une légère augmentation des besoins de climatisation de 5.95 à 8.26 kWh/m².mois. Une seconde conséquence est la forte réduction de la dispersion des résultats.

Etat	Isolants [m]	Infiltrations [vol./h]	Besoin [kWh/m ² .mois]		Eclairage [lux]		Inconfort [°C.jours/mois] Hiver
			Hiver	Eté	Hiver	Ete	
Initial	0.01	1	53.19 (2.83)	-5.95 (1.65)	835 (~0)	1171 (0.038)	113 (15.14)
Final	0.2	0.15	4.24 (0.52)	-8.26 (0.69)	786 (0.61)	834 (7.32)	40 (15.51)

Tableau 2 : Valeurs d'entrée et de sortie pour l'état initial et final pris en compte
- chaque sortie est représentée avec la moyenne et l'écart type des résultats -

8. CONCLUSION

La thermique du bâtiment a besoin d'outils d'évaluation des incertitudes, de recherche de solution et d'analyse multicritères. L'outil présenté dans cet article a pour objectif de pouvoir répondre à ces questions avec des méthodes issues de l'analyse de sensibilité. Dans une approche d'étude et d'optimisation globale du bâtiment nous pensons qu'il est préférable d'optimiser l'exploration de l'espace des réponses plutôt que d'optimiser une solution unique. Les simulations sont utilisées de façon différente et il est possible d'inclure des indicateurs économiques et environnementaux afin de pouvoir par la suite définir une solution. Le choix de la solution est le résultat d'un compromis fait au cas par cas qui peut alors être maîtrisé et prendre en compte les incertitudes.

9. BIBLIOGRAPHIE

- Blatman, Géraud, and Bruno Sudret. 2010. "An Adaptive Algorithm to Build up Sparse Polynomial Chaos Expansions for Stochastic Finite Element Analysis." *Probabilistic Engineering Mechanics* 25 (2) (April): 183–197. doi:10.1016/j.probenmech.2009.10.003. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266892009000666>.
- EN 15251. 2007. *EN 15251: Critères D'ambiance Intérieure Pour La Conception et Évaluation de La Performance Énergétique Des Bâtiments Couvrant La Qualité de L'air Intérieur, La Thermique, L'éclairage et L'acoustique*.
- Goffart, Jeanne. 2013. "Impact de La Variabilité Des Données Météo Sur Une Maison Basse Consommation. Application Des Analyses de Sensibilité Pour Des Entrées Temporelles Corrélées." Université de Savoie. <http://www.theses.fr/s94858>.
- Joint Research Centre website. "Sensitivity Analysis Routines." <http://ipsc.jrc.ec.europa.eu/?id=756>.
- Tarantola, S., D. Gatelli, and Thierry Alex Mara. 2006. "Random Balance Designs for the Estimation of First Order Global Sensitivity Indices." *Reliability Engineering & System Safety* 91 (6) (June): 717–727. doi:10.1016/j.res.2005.06.003. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832005001444>.
- Tian, Wei. 2013. "A Review of Sensitivity Analysis Methods in Building Energy Analysis." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (April): 411–419. doi:10.1016/j.rser.2012.12.014. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112007101>.
- Zhang, Y. 2009. "Parallel EnergyPlus and the Development of a Parametric Analysis Tool." In *IBPSA Conference*. http://ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1382_1388.pdf.