

Développement d'un modèle de prédiction et d'optimisation de la conception des maisons individuelles vis-à-vis de leur consommation de chauffage au nord du Maroc

Zaid ROMANI^{1,2}, Abdeslam DRAOUI¹, Francis ALLARD²

¹Équipe de recherche des transferts thermiques et énergétique (UAE/E14FST) - Faculté de Sciences et Techniques de Tanger - Université Abdelmalek Essaâdi - Maroc

²LaSIE, FRE CNRS 3474, Pôle Sciences et Technologie, Université de La Rochelle, France.

romani.zaid@gmail.com

Résumé : Vu le nombre important des paramètres à prendre en considération dans la phase de conception des bâtiments à basse consommation énergétique, un choix optimal parmi les nombreuses solutions possibles s'avère être un problème très complexe. L'objectif de ce travail est de proposer un modèle d'estimation de la consommation de chauffage permettant une analyse multi-variable des paramètres de l'enveloppe, dont il est possible de chercher un optimum pour l'aide à la décision dès la phase de conception. Ce modèle est déterminé par des régressions polynomiales via la méthode des plans d'expériences et des simulations dynamiques faites à l'aide du logiciel TRNSYS. Pour la vérification de la fiabilité de ce modèle, plusieurs simulations numériques ont été réalisées. Nous avons choisi comme étude de cas une maison individuelle située à Tanger (climat méditerranéen). Le modèle développé fournit des informations et des recommandations pour la conception des maisons individuelles à basse consommation énergétique pour la zone climatique ciblée.

Mots clés :

Optimisation énergétique, bâtiment basse consommation, besoin de chauffage, plans d'expériences, TRNSYS.

1. Introduction

Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie au Maroc avec une part d'environ 36% de la consommation énergétique globale du pays, dont 29% est réservée au secteur résidentiel et le reste pour celui du tertiaire. Ces valeurs risquent d'augmenter si les nouveaux bâtiments ne sont pas bien conçus vis-à-vis de la demande en énergie. Les études caractéristiques prennent beaucoup de temps vu le nombre important des paramètres à prendre en considération. Cependant, la conception des bâtiments à basse consommation devient difficile à réaliser, et par conséquent un choix optimal parmi les nombreuses solutions possibles s'avère être un problème complexe, nécessitant une évaluation de l'influence de plusieurs paramètres sur les performances énergétiques des bâtiments. Il est à noter qu'un choix rapide des solutions pourrait être effectué à l'aide de techniques d'optimisation comme l'algorithme génétique en minimisant une fonction [1]. Mais cette méthode présente la contrainte de ne pas pouvoir estimer les performances pour tous les niveaux des solutions qui existent dans le domaine de calcul. De plus, elle présente le risque de converger vers un minimum local (faux optimum). A cet effet, nous avons choisi la méthode des plans d'expériences, qui est une méthode structurée et organisée pour déterminer la relation entre les facteurs qui affectent un système ou un processus et sa sortie, permettant d'obtenir le plus d'informations avec le moindre nombre de simulations [2]. À partir d'une série de simulations, il est possible d'établir un modèle polynomial qui décrit le comportement du système étudié. La méthode des plans d'expérience a déjà été utilisée dans le domaine de l'énergie des bâtiments [3-8]. Les différents auteurs ont développé des modèles polynomiaux des besoins de chauffage, de climatisation et du confort thermique en fonction des paramètres clés de l'enveloppe et des systèmes qui influencent les réponses. Ces travaux ont montré l'efficacité de la méthode pour identifier des modèles polynomiaux en limitant le nombre de simulations à effectuer avec une bonne précision par comparaison aux logiciels de simulation dynamique. Mais il manquait certains paramètres comme le coefficient d'absorption du rayonnement solaire des surfaces extérieures des parois, surtout que celui-ci a une influence significative sur le transfert de chaleur à travers l'enveloppe [9], ce qui est d'autant plus vrai au Maroc avec un ensoleillement important. L'objectif de notre travail est de développer un modèle d'estimation des besoins de chauffage qui soit rapide, précis et ergonomique, afin d'aider les architectes et les ingénieurs dans la conception et l'optimisation des bâtiments à basse consommation au Maroc.

2. Méthodologie

Afin de déterminer la relation entre la consommation énergétique annuelle de chauffage d'un bâtiment, qui est supposée une fonction a priori inconnue, et les caractéristiques de l'enveloppe, nous effectuons un développement en série de Taylor pour approximer cette fonction par un polynôme (1) :

$$Q_{ch} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

Avec :

- Q_{ch} : la consommation annuelle de chauffage
- a_0 : la valeur moyenne de la réponse
- a_i : Effet de la variable X_i
- a_{ij} : Effet de l'interaction entre les variables X_i et X_j
- X_i et X_j : Les variables du modèle
- n : le nombre des paramètres étudiés

Les coefficients a_0 , a_i et a_{ij} sont déterminés par la méthode des plans d'expériences. Les paramètres influençant sur la consommation annuelle de chauffage sont définis dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Les paramètres du modèle

Facteur	Définition
U_m	Coefficient de transmission des murs extérieurs
α_m	Coefficient d'absorption du rayonnement des surfaces extérieures des murs extérieurs
U_t	Coefficient de transmission de la toiture
α_t	Coefficient d'absorption du rayonnement de la surface extérieure de la toiture
U_p	Coefficient de transmission du plancher
α_p	Coefficient d'absorption du rayonnement de la surface extérieure du plancher
ψ_{pt}	Coefficient de transmission linéique des ponts thermiques
α_{pt}	Coefficient d'absorption du rayonnement de la surface extérieure des ponts thermiques
U_v	Coefficient de transmission de vitrage
FS_n	Facteur solaire de vitres orientées Nord
FS_s	Facteur solaire de vitres orientées Sud
FS_e	Facteur solaire de vitres orientées Est
FS_o	Facteur solaire de vitres orientées Ouest
U_c	Coefficient de transmission de cadre des fenêtres
α_c	Coefficient d'absorption du rayonnement de la surface extérieure de cadre des fenêtres
q_{inf}	Taux de renouvellement d'air des infiltrations
q_{vent}	Taux de renouvellement d'air de la ventilation
η_{vent}	Rendement de la ventilation mécanique double flux

Le nombre de simulations dynamiques nécessaires pour identifier un modèle dépend du nombre des paramètres et de la fonction polynomiale choisie. Si on considère deux niveaux pour chaque paramètre (les bornes du domaine d'étude), et si nous faisons une étude paramétrique complète pour les 19 paramètres sélectionnés, le nombre de combinaisons possibles est de 262144 (2^{19}). Mais identifier un modèle avec ce nombre de simulations dynamiques est très coûteux en temps. D'où l'importance de la méthode des plans d'expériences pour diminuer le nombre des simulations à effectuer. Nous avons choisi la méthode des plans factoriels fractionnaires et le nombre de simulations se réduit alors à 176 [2].

3. Etude de cas

Les différentes quantités de chaleur influençant sur les besoins de chauffage sont fortement dépendantes des conditions météorologiques. Dans cette étude, nous faisons une application pour le climat de la ville de Tanger située au nord-ouest du Maroc. Le bâtiment sélectionné est une maison individuelle, d'une superficie de 100 m² (figure 2).

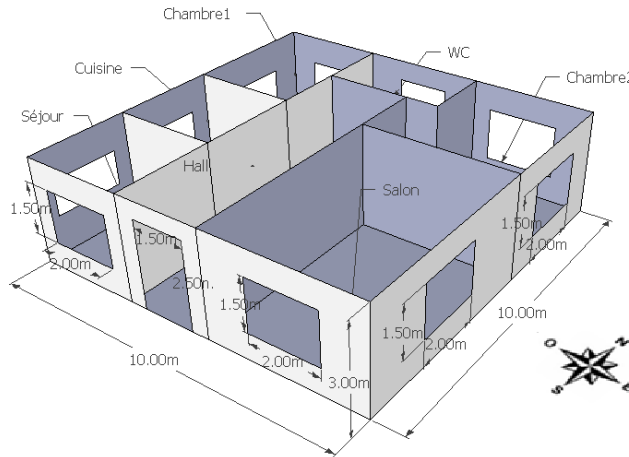


Figure 1 : Vue 3D de la maison étudiée

Le plancher est posé sur un sol dont les caractéristiques thermophysiques sont les suivantes :

Tableau 2 : Caractéristiques thermophysiques du sol

λ (W/m.°C)	ρ (Kg/m ³)	C_p (KJ/Kg.°C)
1,5	1600	1,83

Chaque paramètre sélectionné varie entre un niveau bas et un niveau haut (tableau 3). Les valeurs minimales sont choisies en respectant les exigences des éléments du projet de la réglementation thermique des bâtiments au Maroc pour les coefficients de transmission des parois et du facteur solaire [10]. Pour le calcul du débit d'infiltration et le calcul des ponts thermiques, et vu l'inexistence des normes locales, nous avons utilisé la réglementation thermique française 2012 [11].

Tableau 3 : Les valeurs minimales et maximales de chaque paramètre

Facteur	Niveau bas	Niveau haut	Unité
U_m	0,2	0,8	W/m ² °C
α_m	0,2	0,8	---
U_t	0,2	0,8	W/m ² °C
α_t	0,2	0,8	---
U_p	0,5	2,5	W/m ² °C
α_p	0,2	0,8	---
Ψ_{pt}	0,01	1,8	W/m ² °C
α_{pt}	0,2	0,8	---
U_v	2,3	5,7	W/m ² °C
FS_n	0,3	0,7	---
FS_s	0,3	0,7	---
FS_e	0,3	0,7	---
FS_o	0,3	0,7	---
U_c	2,3	5,7	W/m ² °C
α_c	0,2	0,8	---
q_{inf}	0,2	0,8	v/h
q_{vent}	0,5	1,1	v/h
η_{vent}	0,5	0,9	---

4. Résultats et discussion

Pour l'identification des coefficients du modèle, nous avons réalisé des simulations à l'aide du logiciel TRNSYS [12]. Le polynôme d'estimation de la consommation de chauffage est donné par :

$$\begin{aligned}
 Q_{ch} = & 58,90 + 7,458 U_m - 1,86 \alpha_m + 6,94 U_t - 3,57 \alpha_t - 0,7 U_p - 0,24 \alpha_p + 5,72 \Psi_{pt} - 0,88 \alpha_{pt} \\
 & + 27,97 U_v - 3,24 FS_s - 2,39 FS_o - 0,93 FS_n - 2,31 FS_e + 0,19 U_c - 0,837 \alpha_c + 7,857 q_{inf} + \\
 & 2,47 q_{vent} - 4,24 \eta_{vent} + 171 \text{ interaction entre les variables}
 \end{aligned} \quad (2)$$

Après l'identification des coefficients du modèle simplifié, il est nécessaire de vérifier sa précision. Ceci est réalisé en le comparant aux résultats de 250 simulations dynamiques de combinaisons aléatoires pour les niveaux des paramètres étudiés. La figure 4 montre les résultats obtenus.

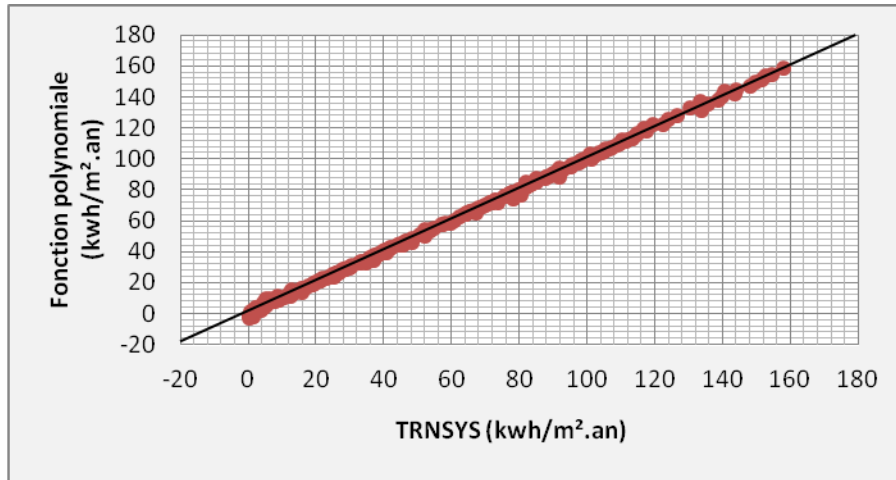


Figure 2 : Besoins annuels de chauffage calculés avec TRNSYS et le modèle polynomial.

Pour évaluer la fiabilité du modèle nous calculons la valeur de l'écart moyen et de l'écart maximal entre le modèle simplifié et les simulations dynamiques qui sont données par :

$$E_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{250} |Q_{ch,TRNSYS} - Q_{ch,mod\ \acute{e}le}|}{250} \quad (3)$$

$$E_{max} = \max |Q_{ch,TRNSYS} - Q_{ch,mod\ \acute{e}le}| \quad (4)$$

Ces valeurs valent respectivement 0,2 kWh/(m².an) et 4 kWh/(m².an). Les résultats de cet exemple sont encourageants, et ils montrent la capacité de la méthode des plans d'expériences à déterminer, à l'aide d'un nombre limité de simulations, un modèle polynomial avec une précision appréciable. Ce modèle polynomial peut servir à effectuer des études de sensibilité et d'optimisation. Il peut servir éventuellement à définir des abaques de sélection des solutions comme le montre la Figure 3.

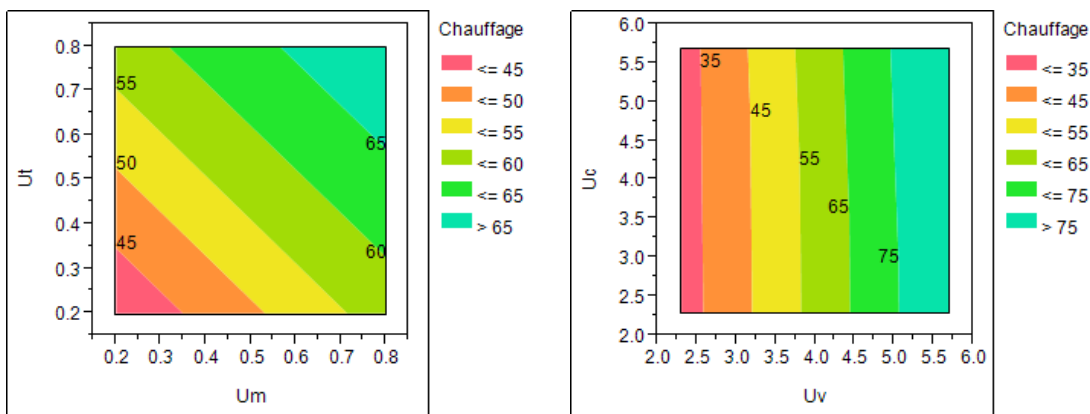


Figure 3 : Courbes d'iso-réponse pour les besoins de chauffage

Chaque abaque représente des courbes d'iso-réponse en fonction de deux variables, les autres paramètres étant au centre de domaine d'étude. Ce type d'abaque peut être utilisé comme une méthode graphique rapide de sélection des solutions optimales en termes de performance énergétique. Par exemple, en fixant la valeur du coefficient de transmission de la toiture U_i à 0,4 W/m²°C, et en décidant que la valeur de la consommation ne doit pas dépasser pas 50 KWh/m².an, nous pourrions alors déterminer la valeur du coefficient de transmission des murs U_m , qui est égale pour ce cas à 0,32 W/m²°C sachant que les autres facteurs sont au niveau moyen.

Conclusion

L'objectif principal de ce travail était le développement d'une méthodologie pour optimiser la conception de bâtiments à basse consommation d'énergie dans le nord du Maroc. Le principe a été de développer un modèle polynomial pour l'évaluation des besoins de chauffage à l'aide de simulations dynamiques en se basant sur la méthode des plans d'expériences. Le choix de cette démarche a été motivé par sa facilité de mise en œuvre et son efficacité pour simplifier les études paramétriques, tout en gardant une précision satisfaisante sur les résultats. Le modèle développé peut être appliqué pour n'importe quelle maison individuelle, située dans la région climatique de Tanger (Nord du Maroc). Il peut être aussi un outil d'assistance pour aider les architectes et les ingénieurs à appliquer la future réglementation thermique du bâtiment au Maroc. Pour la suite de cette étude, nous comptons appliquer cette démarche à d'autres typologies, que ce soit pour le secteur résidentiel ou tertiaire, et cela pour toutes zones climatiques au Maroc. Nous comptons aussi développer des modèles pour l'estimation des besoins de climatisation, d'éclairage et le besoin d'eau chaude sanitaire tout en évaluant l'impact économique et environnemental.

Nomenclature

Symbole	Nom, unité	Exposants, Indices	
C	Capacité thermique massique, $J/kg \cdot ^\circ C$	c	cadre
E	Ecart	ch	Chauffage
FS	Facteur solaire	inf	Infiltration
h	Coefficient d'échange superficiel, $W/m^2 \cdot ^\circ C$	m	Murs
Q	Quantité de chaleur, $kWh/m^2 \cdot an$	p	Plancher
q	Taux de renouvellement d'air, vol/h	pt	Pont thermique
T	température, $^\circ C$	t	Toiture
U	Coefficient de transmission, $W/m^2 \cdot ^\circ C$	vent	Ventilation
Symboles grecs		n	Nord
α	Coefficient d'absorption du rayonnement	e	Est
λ	Conductivité thermique, $W/m \cdot ^\circ C$	o	Ouest
ρ	Masse volumique d'un matériau, kg/m^3	s	Sud
Ψ	Coefficient de transmission linéique, $W/m \cdot ^\circ C$		
η	Rendement		

Références

- [1] E. Znouda, N. Ghrab-Morcos, A. Hadj-Alouane, Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms, *Energy and Buildings*, Volume 39, Pages 148-153, 2007.
- [2] J. Goupy, L. Creighton, Introduction aux plans d'expériences, Dunod, Paris, 2009.
- [3] A. Tsanas, A. Xifara, Accurate quantitative estimation of energy performance of residential buildings using statistical machine learning tools, *Energy and Buildings*, Volume 49, Pages 560-567, 2012.
- [4] F. Chlela, A. Husaunndee, C. Inard et P. Riederer, Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings, *Energy and Buildings*, Volume 41, Pages 982-990, 2009.
- [5] R. Freire, G. Oliveira, N. Mendes, Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings, *Energy and Buildings*, Volume 40, Pages 810-820, 2008.
- [6] T. Catalina, J. Virgone et E. Blanco, Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings, *Energy and Buildings*, Volume 40, Pages 1825-1832, 2008.
- [7] E. Gratia et A. De Herdé, A simple design tool for the thermal study of an office building, *Energy and Buildings*, Volume 34, Pages 279-289, 2002.
- [8] I. Jaffal, C. Inard, E. Bozonnet, Toward integrated building design: A parametric method for evaluating heating demand, *Applied Thermal Engineering*, Volume 40, Pages 267-274, 2012.
- [9] M. Doya, E. Bozonnet, F. Allard, Experimental measurement of cool facades performance in a dense urban environment, *Energy and Buildings*, Volume 55, Pages 42-50, 2012.
- [10] *Les éléments techniques du projet de la réglementation thermique du bâtiment au Maroc*, ADEREE, Maroc, 2011.
- [11] *Réglementation Thermique 2012*, CSTB, France, 2012.
- [12] TRNSYS 17, *A Transient System Simulation Program*, User Manual, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin Madison, 2010.