

Développement d'une méthode rapide pour la conception des maisons individuelles à basse consommation énergétique au Maroc

Zaid Romani*^{1,2}, Abdeslam Draoui¹, Francis Allard²

¹Equipe de recherche en Transferts Thermiques et Énergétique (UAE/E14FST), Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc.

²Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (UMR CNRS 7356), Université de La Rochelle, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle, France.

*zaid.romani@univ-lr.fr

RESUME. 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. Ces valeurs risquent d'augmenter encore plus si les nouveaux bâtiments ne sont pas bien conçus vis-à-vis de la demande en énergie. L'objectif de la présente étude est de proposer une méthode simple à utiliser pour l'évaluation des besoins de chauffage et de rafraîchissement, permettant une analyse multi-variable des paramètres de l'enveloppe. Cette méthode est basée sur des régressions polynomiales via la méthode des plans d'expériences et des simulations dynamiques. Des modèles polynomiaux sont développés pour le cas d'une maison individuelle située dans les six zones climatiques du Maroc. Ces modèles permettent d'effectuer très rapidement une optimisation opérationnelle de l'enveloppe pour contribuer au développement rapide de bâtiments à basse consommation énergétique.

MOTS-CLÉS : Conception de l'enveloppe, Les plans d'expériences, optimisation énergétique.

ABSTRACT. The building sector is the largest consumer of energy in Morocco with a share of about 36% of the overall energy consumption of the country. These values may increase if the new buildings are not well designed with respect to the energy demand. The aim of this work is to propose a simple method for the evaluation of heating and cooling energy needs through a multi-variable analysis of the envelope parameters. This method is based on polynomial regression models using the design of experiments theory and dynamic simulations of the building behavior. These models are developed here for a single family house located in six Moroccan climate zones. The developed models are used to perform a fast operational optimization of the building envelope to enhance the implementation of low energy building consumption in Morocco.

KEYWORDS : Building envelope, Design of experiments, optimization of energy consumption.

1. INTRODUCTION

Le Maroc a une dépendance énergétique qui a atteint 94 % en 2011, le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie avec une part d'environ 36% de la consommation énergétique globale du pays, dont 29% réservée au secteur résidentiel et le reste pour le tertiaire (ADEREE 2011). Ces valeurs risquent d'augmenter encore plus si les nouveaux bâtiments ne sont pas bien conçus vis-à-vis de la demande en énergie. Des études ont été réalisées pour l'évaluation de l'énergétique du bâtiment au Maroc, (Babbah et al. 2011; Benhamou et Bennouna 2013; Guechchati et al. 2012), mais ces études sont difficiles à exploiter pour conclure sur la thermique du bâtiment au Maroc.

Vu le nombre important des paramètres à prendre en considération, les études caractéristiques prennent beaucoup de temps. 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. A cet effet, nous avons choisi la méthode des plans d'expériences afin de réduire le nombre de simulations et de développer des modèles polynomiaux qui permettent de simplifier les études caractéristiques. Cette méthode a déjà été utilisée pour l'évaluation de la consommation énergétique du bâtiment (Catalina, Iordache, et Caracaleanu 2013; Jaffal, Inard, et Ghiaus 2009; Praznik, Butala, et Zbašnik Senegačnik 2013; Chlela et al. 2009). 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 d'une part, 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 (Doya, Bozonnet, et Allard 2012), ce qui est d'autant plus vrai au Maroc avec un ensoleillement important. D'autre part la recherche d'un compromis entre les besoins de chauffage et de rafraîchissement n'a pas été réalisée.

L'objectif de ce travail est de proposer une méthode simple pour l'évaluation et l'optimisation des besoins de chauffage et de rafraîchissement permettant une analyse multi-variable des paramètres de l'enveloppe des maisons individuelles au Maroc. Cette méthode est basée sur des modèles de régressions polynomiales via la méthode des plans d'expériences et des simulations dynamiques réalisées à l'aide du logiciel TRNSYS 17 (S.A Klein et al 2010). Afin d'évaluer la précision des modèles développés, de nombreuses simulations numériques aléatoires sont à réaliser. A partir de ces modèles, il est alors possible de chercher un optimum des besoins énergétiques à l'aide de la fonction de désirabilité.

2. DESCRIPTION DU CAS D'ETUDE

Le bâtiment sélectionné est une maison individuelle, d'une superficie de 144 m² et de 3m de hauteur (Figure 1). Il est constitué de 7 pièces. Le pourcentage de la surface des baies vitrées par rapport à la surface brute de la façade est de 25%.

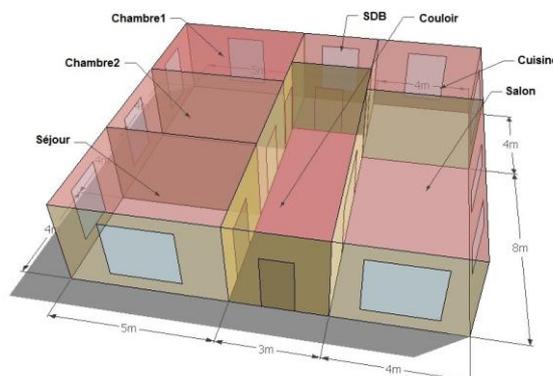
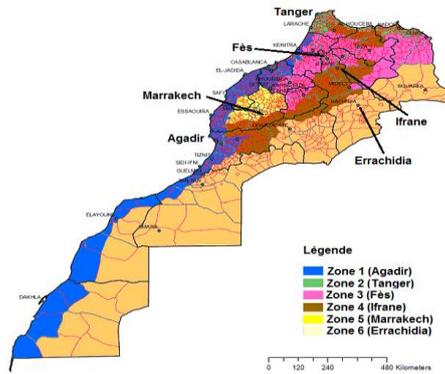


Figure 1. Vue 3D de la maison étudiée

Le territoire Marocain a été subdivisé en six zones climatiques (Figure 2.a) (Direction de la météorologie nationale 2011). La température minimale atteinte est de -5,75°C à Ifrane et la température maximale atteinte est de 43,28°C à Marrakech. La figure 2.b donne les degrés jours de

chauffage et de rafraîchissement pour ces six zones climatiques. Les températures de consignes données par la réglementation thermique du bâtiment au Maroc sont 20 et 26 respectivement pour le chauffage et le rafraîchissement.



2.a) Zonage climatique du Maroc

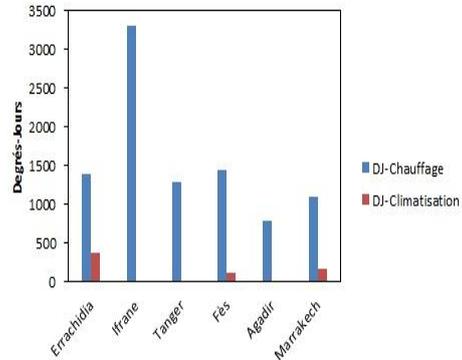


Figure 2.b) Degrés jours de chauffage et de rafraîchissement des zones climatiques marocaines

3. METHODOLOGIE

3.1. LES PARAMETRES ETUDIES

Tout d’abord, on définit les paramètres les plus importants à inclure dans cette étude. Concernant le flux thermique par conduction, les coefficients de transmission des murs extérieurs U_m ($W/m^2.K$), du plancher U_p ($W/m^2.K$), de la toiture U_t ($W/m^2.K$) et du coefficient de transmission linéaire des ponts thermiques ψ_{pt} ($W/m.K$) sont sélectionnés en tant que paramètres de conception. Pour les vitrages, nous ne pouvons pas assurer une évolution continue de leurs caractéristiques, vu les différents types (Simple vitrage, double vitrage, vitrage à faible émissivité...). A cet effet, nous sélectionnons 5 types de vitrage qui sont les plus utilisés dans le marché de la construction du bâtiment (voir tableau 1).

Vitrage	U-value ($W/m^2.K$)	Facteur solaire
Simple vitrage (V1)	5.74	0.87
Double vitrage (V2)	2.95	0.777
Triple vitrage (V3)	2	0.7
Double vitrage + 1 couches faible émissivité (V4)	1.76	0.597
Double vitrage avec de l’argon + 1 couches faible émissivité (V5)	1.43	0.596

Tableau 1 : Caractéristiques des vitrages utilisés.

L’orientation est prise en considération seulement par l’effet du facteur d’ombrage (FO) sur les fenêtres pour les quatre orientations à savoir Nord, Sud, Est, et Ouest. Ce facteur est activé dans la période entre le 15 Septembre et le 15 mai, et il varie de 0 à 1. La valeur 0 indique qu’il n’y a pas de protection solaire et la valeur 1 indique que les fenêtres sont totalement protégées du rayonnement solaire. Le facteur solaire corrigé par le facteur d’ombrage s’écrit comme suit :

$$FS_c = FO \times FS \tag{1}$$

Pour prendre en considération les infiltrations d’air et la ventilation mécanique simple flux, le taux de renouvellement d’air (ACH) est sélectionné en tant que paramètre de conception. Les aspects

géométriques ne sont pas étudiés, ils sont considérés comme des données. Le tableau 2 présente les 11 paramètres sélectionnés et leurs intervalles de variation :

Définition	Symbole	Niveau bas	Niveau haut	Unité
Coefficient de transmission des murs extérieurs	U_m	0,2	1	$W/m^2.K$
Coefficient d'absorption du rayonnement des surfaces extérieures des murs extérieurs	α_m	0,2	0,8	---
Coefficient de transmission de la toiture	U_t	0,2	1	$W/m^2.K$
Coefficient d'absorption du rayonnement de la surface extérieure de la toiture	α_t	0,2	0,8	---
Coefficient de transmission du plancher	U_p	0.59	2.32	$W/m^2.K$
Coefficient de transmission linéique des ponts thermiques	ψ_{pt}	0.01	1	$W/m.K$
Taux de renouvellement d'air	ACH	0	2	vol/h
Facteur d'ombrage sur les fenêtres orientées Sud	FO_s	0	1	---
Facteur d'ombrage sur les fenêtres orientées Est	FO_e	0	1	---
Facteur d'ombrage sur les fenêtres orientées Ouest	FO_o	0	1	---
Vitrage	V	V1, V2, V3, V4, V5		---

Tableau 2 : Les paramètres sélectionnés et leurs intervalles de variation.

3.2. LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCE

Si nous faisons une étude paramétrique complète pour les 11 paramètres sélectionnés, le nombre de combinaisons possibles est de 531684 ($3^{10} \times 5$), ce serait énorme en terme de temps de calcul. A cet effet, nous avons choisi la méthode des plans d'expériences. Elle permet d'obtenir le maximum d'information sur les réponses avec un faible nombre de simulations à partir desquelles il est possible d'établir un modèle polynomial décrivant le comportement du système étudié (Goupy 2013). Afin de choisir le type de polynôme à utiliser, nous vérifions d'abord la linéarité des paramètres en fonction de la réponse (besoins de chauffage et de rafraîchissement). Nous avons constaté une variation quadratique de certains paramètres. Par exemple, pour le cas de la zone climatique de Tanger (zone 2), la variation du coefficient de transmission des murs et de la toiture en fonction des besoins de rafraîchissement est non linéaire à cause de l'effet de l'inertie thermique (Figure 3).

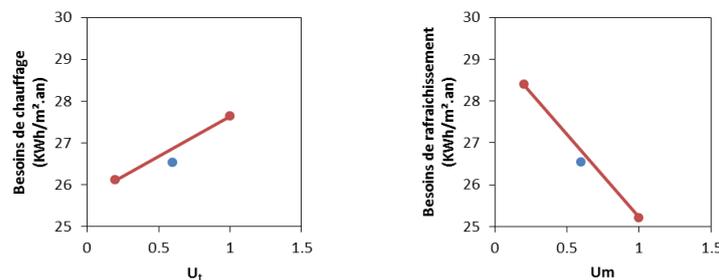


Figure 3. Etude de linéarité des coefficients de transmission des murs et de la toiture en fonction des besoins de rafraîchissement pour le cas de la ville de Tanger (zone 2)

Ainsi, nous choisissons un modèle polynomial de deuxième degré qui s'écrit comme suit :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \times x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 \quad (2)$$

Avec :

Y est la réponse estimée (besoins de chauffage ou de rafraîchissement) par le modèle,

x_i et x_j sont les paramètres d'entrée définis précédemment,

a_0, a_i, a_{ij} et a_{ii} sont les coefficients du modèle déterminés par les régressions polynomiales,

n est le nombre des paramètres étudiés.

3.3. LA REGRESSION POLYNOMIALE

Pour appliquer les plans d'expériences, un système d'équations doit être résolu. A cet effet l'équation (2) doit être écrite en notation matricielle comme suit :

$$[Y] = [X][A] \quad (3)$$

Avec :

$[Y]$ est le vecteur des réponses calculées par les simulations numériques,

$[A]$ est le vecteur des coefficients calculés par la méthode des moindres carrés comme suit :

$$[A] = \left([X]^t [X] \right)^{-1} [X]^t [Y] \quad (4)$$

Où $[X]$ est la matrice de calcul, elle est choisie en fonction du nombre de paramètres à inclure dans le modèle. Pour obtenir une meilleure précision, nous choisissons le plan D-optimal. Ce dernier permet de fournir plus de précision concernant l'estimation des coefficients du modèle polynomial (Goupy 2013). Ceci est équivalent à maximiser le déterminant de la matrice $[X]^t [X]$, où $[X]^t$ est la matrice transposée de la matrice $[X]$.

3.4. CALCUL DE L'OPTIMUM

Pour trouver la valeur optimale des besoins de chauffage et de rafraîchissement ainsi que le compromis entre les deux, nous utilisons la fonction dite de désirabilité. Cette fonction a été développée par (R. Derringer et R. Suich 1980). Dans un premier temps il faut spécifier un niveau de satisfaction pour chaque variable, en affectant aux valeurs prévues un résultat compris entre 0 (indésirable) et 1 (très désirable). La désirabilité individuelle des valeurs prévues pour chacune des variables dépendantes est ensuite synthétisée en calculant leur moyenne géométrique. L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilité individuelles est donnée par :

$$d_i^{\min} = \begin{cases} 0 & \text{Si } Y_i > Y_{i,\max} \\ \left(\frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_{i,\min} - Y_{i,\max}} \right)^{r_i} & \text{Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \\ 1 & \text{Si } Y_i < Y_{i,\min} \end{cases} \quad (5)$$

Où :

$Y_{i,\max}$ est la valeur au-dessus de laquelle la réponse Y_i ne convient pas ($d_i = 0$) ;

$Y_{i,\min}$ est la valeur cible en dessous de laquelle la réponse Y_i est très satisfaisante ($d_i = 1$) ;

r_i est le facteur modifiant l'importance d'une augmentation de la réponse Y_i pour la désirabilité individuelle considérée. Cela correspond à la pondération du facteur dépendant de l'utilisateur en fonction du degré de désirabilité que l'on voudrait avoir pour une réponse donnée entre $Y_{i,\min}$ et $Y_{i,\max}$.

Ensuite, l'ensemble des désirabilités individuelles est rassemblé en une seule désirabilité globale qui est leur moyenne géométrique.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Après avoir construit le plan d'expérience, le nombre de simulation à réaliser est de 110 pour chacune des six zones climatiques du Maroc.

4.1. EVALUATION DES MODELES POLYNOMIAUX

Après l'identification des coefficients des modèles polynomiaux, il est nécessaire d'évaluer leur précision. Cette évaluation est réalisée en les comparant aux résultats de 100 simulations dynamiques supplémentaires réalisées avec des combinaisons aléatoires des valeurs des différents paramètres définies dans leur domaine de variation. Nous donnons l'exemple de cette comparaison pour l'estimation des besoins de chauffage (Figure 4.a) et de rafraîchissement (Figure 4.b) pour le cas de la ville de Tanger.

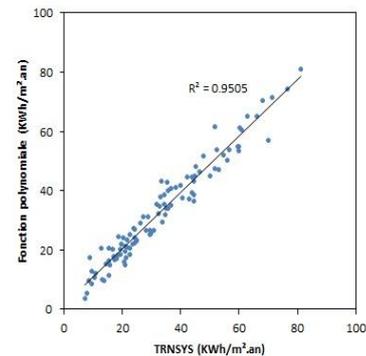
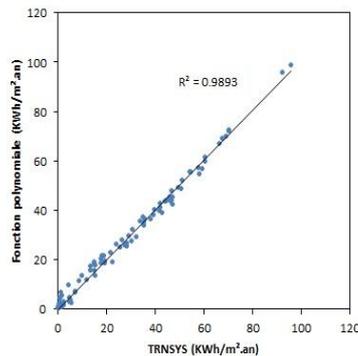


Figure 4.a : Besoins annuels de chauffage calculés avec TRNSYS et la fonction polynomiale. Figure 4.b : Besoins annuels de rafraîchissement calculés avec TRNSYS et la fonction polynomiale.

Les résultats montrent qu'une corrélation acceptable a été constatée entre le modèle polynomial et les simulations numériques. Le tableau 3 donne le coefficient de détermination (R^2) entre les régressions polynomiales et les simulations numériques pour les six zones climatiques du Maroc. Nous constatons que les estimations des besoins de chauffage sont plus précises que celles des besoins de rafraîchissement. Ceci est imputable essentiellement à l'effet de l'inertie thermique en été qui influe sur la précision de l'évaluation des transferts à travers l'enveloppe. Nous remarquons aussi que les erreurs moyennes sont situées entre 1.36 et 3.7 (KWh/m².an), ce qui reste raisonnable pour l'estimation des besoins énergétiques.

	Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia
R^2 (besoins de chauffage)	0.9682	0.9893	0.992	0.9991	0.989	0.9918
R^2 (besoins de rafraîchissement)	0.9579	0.9505	0.9544	0.9192	0.9659	0.9751
Erreur moyenne - modèle chauffage (KWh/m ² .an)	1.36	2.02	2.36	1.99	1.87	2.26
Erreur moyenne - modèle rafraîchissement (KWh/m ² .an)	3.7	3.05	2.48	1.73	2.56	2.5

Tableau 3 : Evaluation de la précision des modèles polynomiaux comparés aux simulations numériques.

4.2. L'OPTIMISATION DES BESOINS ENERGETIQUES

La fonction de désirabilité permet de calculer la valeur minimale à obtenir pour les besoins de chauffage et de rafraîchissement, ensuite une désirabilité globale a été calculée afin de chercher un compromis entre ces besoins (Optimum). Nous donnons l'exemple pour le cas de la ville de Tanger.

Nous comparons un bâtiment dont la conception est mal faite (BR) et un bâtiment dont les paramètres sont fixés au niveau de l'optimum (BBC), le tableau 4 donne leurs caractéristiques. Un taux de renouvellement d'air minimal de 0.3 (1/h) a été fixé.

	U_m (W/m ² .K)	α_m -----	U_t (W/m ² .K)	α_t -----	U_p (W/m ² .K)	Ψ_{pt} (W/m.K)	ACH (1/h)	FO _s -----	FO _e -----	FO _o -----	V -----
BR	1	0.5	1	0.5	2.32	1	2	0	0	0	V1
BBC	1	0.2	0.82	0.2	2.32	0.6	0.3	1	1	1	V4

Tableau 4 : La valeur des paramètres pour le bâtiment de référence et le bâtiment BBC

Les Figures 5 et 6 montrent la différence entre la température intérieure et la température de consigne de chauffage et de rafraîchissement pour ces deux bâtiments.

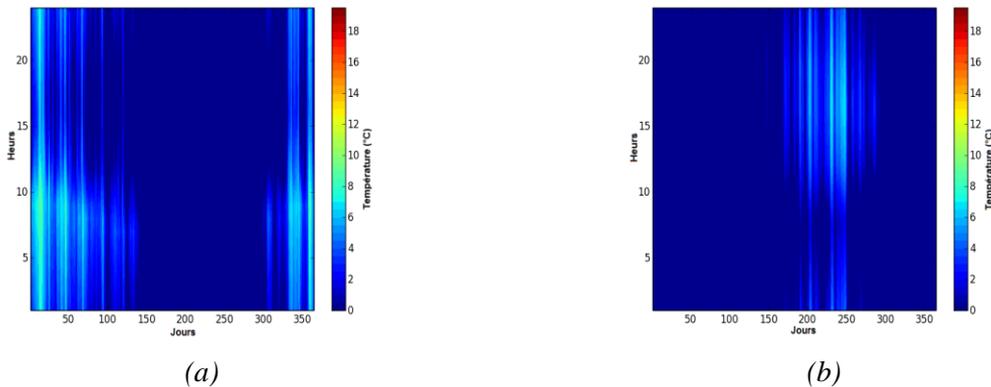


Figure 5. La différence entre la température intérieure du bâtiment de référence (BR) et la température de consigne de a) Chauffage b) Rafraîchissement.

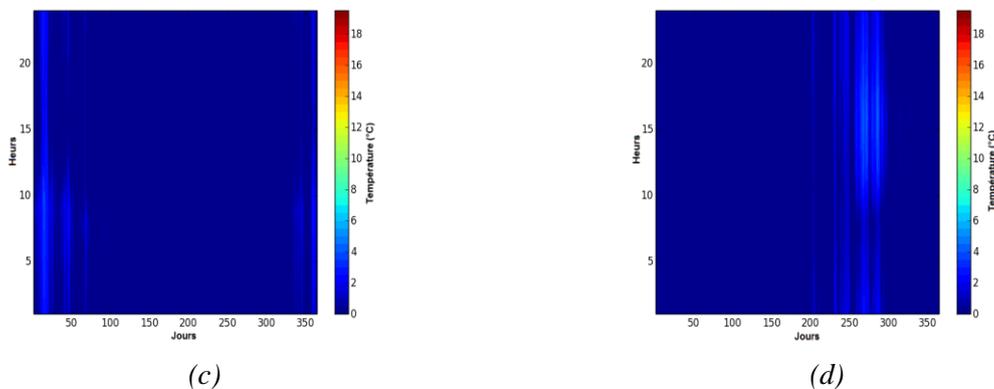


Figure 6. La différence entre la température intérieure du bâtiment BBC et la température de consigne de a) Chauffage b) Rafraîchissement.

Nous remarquons que la différence entre la température intérieure et la température de consigne de chauffage diminue d'une manière remarquable (Figure 5.a et 6.a). Ceci est traduit par une réduction des besoins de chauffage de l'ordre de 82.48 kWh/m².an (92.5%). En outre, la différence entre la température intérieure et la température de consigne de rafraîchissement a diminué dans la période entre le 15 mars et le 15 septembre grâce aux protections solaires des vitrages. Par contre entre le 15 septembre et le 15 octobre une légère augmentation est observée. Celle-ci est due principalement au non présence de protections solaires. Globalement les besoins de rafraîchissement ont été réduits de l'ordre de 27,83 kWh / m².an (73,43%).

5. CONCLUSION

L'objectif principal de la présente étude était de proposer une méthode simple pour l'évaluation et l'optimisation des besoins de chauffage et de rafraîchissement à partir d'une analyse multi-variable des paramètres de l'enveloppe des maisons individuelles au Maroc. Cette méthode est basée sur des modèles de régression polynomiale via la méthode des plans d'expériences et des simulations dynamiques. Pour la vérification de la précision des modèles, de nombreuses simulations numériques ont été réalisées. Une corrélation acceptable a été constatée entre les modèles et les simulations aléatoires et ceci pour les six zones climatiques étudiées. Ensuite, la recherche d'un compromis entre les besoins de chauffage et de rafraîchissement a été réalisée à l'aide de la fonction de désirabilité. Nous avons montré que ce modèle peut être utilisé très facilement pour optimiser les besoins énergétiques de chauffage et de rafraîchissement. Cette méthode peut ainsi être un outil d'assistance pour l'aide à la décision dès la phase de conception des bâtiments au Maroc.

6. BIBLIOGRAPHIE

- ADEREE. 2011. « Les éléments techniques du projet de la réglementation thermique du bâtiment au Maroc ». Maroc.
- Babbah, S, I. R Maestre, Abdeslam Draoui, P Cubillas, et F. J. G Gallero. 2011. « Effect Analysis of Constructive Quality and Orientation on the Energy Consumption of the Buildings in the North of Morocco ». *IJEEE* 20 (1): 31- 38.
- Benhamou, Brahim, et Amin Bennouna. 2013. « Energy Performances of a Passive Building in Marrakech: Parametric Study ». *Energy Procedia* 42: 624- 632. doi:10.1016/j.egypro.2013.11.064.
- Catalina, Tiberiu, Vlad Iordache, et Bogdan Caracaleanu. 2013. « Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand ». *Energy and Buildings* 57 (février): 302- 312. doi:10.1016/j.enbuild.2012.11.010.
- Chlela, Fadi, Ahmad Husaundee, Christian Inard, et Peter Riederer. 2009. « A new methodology for the design of low energy buildings ». *Energy and Buildings* 41 (9): 982- 990. doi:10.1016/j.enbuild.2009.05.001.
- Direction de la météorologie nationale. 2011. « Zonage climatique du Maroc destiné à la réglementation de thermique du bâtiment ».
- Doya, Maxime, Emmanuel Bozonnet, et Francis Allard. 2012. « Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment ». *Energy and Buildings* 55 (décembre): 42- 50. doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.001.
- Goupy, Jacques. 2013. *Introduction aux plans d'expériences: avec applications*. Paris: "l'Usine nouvelle : Dunod.
- Guechhati, R, M. A Moussaoui, Ahm Mezrhab, et Abd Mezrhab. 2012. « Reducing Energy Consumption of Habitat Located in Eastern Region of Morocco ». *Applied Solar Energy* 48 (1): 33- 37.
- Jaffal, Issa, Christian Inard, et Christian Ghiaus. 2009. « Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments ». *Energy and Buildings* 41 (6): 669- 677. doi:10.1016/j.enbuild.2009.01.006.
- Praznik, Miha, Vincenc Butala, et Martina Zbašnik Senegačnik. 2013. « Simplified evaluation method for energy efficiency in single-family houses using key quality parameters ». *Energy and Buildings* 67 (décembre): 489- 499. doi:10.1016/j.enbuild.2013.08.045.
- R. Derringer, et R. Suich. 1980. « Simultaneous optimization of several response variables ». *Journal of Quality Technology* 12 (4): 214- 219.
- S.A Klein, et al. 2010. « TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program ». In Madison, USA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.