

CIFQ2011 / OptimSystTherm01

MODELISATION ET OPTIMISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UN MUR SOLAIRE A PERFORATIONS A L'AIDE D'UN PLAN EXPERIMENTAL

Messaoud **BADACHE**^{a,*}, Stéphane **HALLÉ**^b, Daniel **ROUSSE**^c

^a Etudiant gradué, Ecole de technologie supérieure, Montréal, Canada

^b Professeur, Ecole de technologie supérieure, Montréal, Canada

^c Professeur, Ecole de technologie supérieure, Titulaire de la Chaire Industrielle T3E, Montréal, Canada

RÉSUMÉ

Cet article présente les résultats d'une étude sur la modélisation et l'optimisation des performances thermiques d'un mur solaire à perforations (UTC) à l'aide d'un plan expérimental complet à trois niveaux. Pour ce faire, un prototype d'UTC a été construit. Dans un premier temps, la méthodologie des plans expérimentaux nous a permis de déterminer un modèle analytique qui prédit le rendement de l'UTC. Ce modèle validé par une Anova et une analyse de résidus a été optimisé grâce à une représentation graphique par des courbes de surfaces de réponse. Une combinaison optimale de quatre paramètres a été obtenue, pour un rendement compris entre 70% et 80%.

Mots Clés : Mur solaire à perforation, rendement, plan expérimental, optimisation statistique.

NOMENCLATURE

Symboles :

A_{coll} surface du collecteur, m²

C_p capacité calorifique de l'air, kJ/(kg.°C)

D diamètre des perforations, mm

DDL degré de liberté,-

G_T intensité du rayonnement, W/m²

L longueur du collecteur, m

P espace entre les perforations dans l'absorbeur, mm

T_{coll} température de l'absorbeur, °C

T_{amb} température ambiante, °C

T_{out} température de sortie de l'air, °C

débit massique de l'air par unité de surface, kg/(m².s)

Lettres grecques :

α absorbtivité

ε émissivité

η_{coll} rendement du collecteur

α_{rev} revêtement de l'absorbeur (paramètre qualitatif)

Indices / Exposants :

coll collecteur

abs absorbeur

1. INTRODUCTION

Parmi les techniques les plus répandues pour capter l'énergie solaire, on peut distinguer le système de chauffage solaire de l'air à plaque perforée parfois appelé capteur solaire non vitré «*Unglazed Transpired Collector*» (UTC). Ces capteurs sont généralement constitués d'une plaque perforée de couleur foncée. Les perforations de quelques millimètres de diamètre permettent l'admission de l'air provenant de l'extérieur. L'air est ensuite préchauffé par contact avec la plaque

perforée avant d'être introduit dans le système de ventilation d'un bâtiment.

La recherche sur les UTC, a commencé à la fin des années 80. Ces recherches initiales étaient concentrées sur le développement de la théorie d'échange de chaleur entre l'air et le mur perforé [1]. Par la suite, les efforts de recherche ont principalement été orientés vers le développement de modèles analytiques tels que présentés par [2], et de modèles numériques présentés par [3]. Compte tenu du nombre important de paramètres intervenant dans les systèmes d'UTC

* auteur correspondant

Adresse électronique : messaoud.badache.1@etsmtl.ca

(diamètre et espace des perforations, revêtement de l'absorbeur, rayonnement incident, débit d'air admis, etc.), l'évaluation des performances thermiques de ces derniers à partir des méthodes analytiques et numériques devient une opération très complexe. Cette complexité s'explique par la multiplication du nombre de paramètres influençant les performances thermiques d'un UTC. Cependant, ces paramètres n'ont pas tous le même niveau d'influence sur les performances thermiques. Le développement de solutions approximatives au problème de transfert de chaleur, quoique nécessaire dans certains cas, limite toute analyse exhaustive des réponses. En raison de ces contraintes, nous proposons une méthode puissante et fiable dans la prise de décision, qui s'est acquise une bonne réputation dans le contrôle et la modélisation des systèmes complexe. Le choix de cette méthode est basé sur le fait que son utilisation est assez aisée dans les systèmes possédant de nombreux paramètres de contrôle, comme c'est le cas des UTCs.

2. METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

L'objectif assigné au plan expérimental élaboré dans cette étude est de trouver les performances thermiques optimales d'un UTC en fonctions des paramètres de fonctionnement. Plus précisément, il s'agit de mettre en œuvre un plan d'expérience de type factoriel complet à trois niveaux pour la détermination d'un modèle polynomial d'ordre 2 représentant les performances thermiques de l'UTC et qui met en valeur l'influence des principaux paramètres.

La définition des paramètres de contrôles consiste à déterminer l'ensemble des paramètres influençant les performances thermiques d'un UTC. Une revue bibliographique a permis de faire un inventaire de tous les paramètres expérimentaux susceptibles de modifier les performances d'un collecteur perforé non vitré. En tout, onze paramètres ont été identifiés. Compte tenu du nombre important de paramètres, il est difficilement envisageable de quantifier exhaustivement l'influence de chacun d'eux sur les performances thermiques d'un UTC. Des contraintes matérielles et de temps, nous ont incités à fixer le nombre de paramètres de contrôle à quatre réduisant ainsi l'ordre du problème à étudier [9]. Les quatre paramètres retenus et susceptibles d'influencer de manière prépondérante les performances thermiques de l'UTC sont :

- Le diamètre des perforations (D).
- Le débit massique d'air aspiré (\dot{m}).
- Le rayonnement incident (G_T).
- Le revêtement de l'absorbeur (α_{rev}).

Les trois premiers paramètres (D , \dot{m} , G_T) sont des paramètres quantitatifs alors que (α_{rev}) et un paramètre

qualitatif. Ce paramètre caractérise les « performances » du revêtement face au rayonnement incident et au rayonnement infrarouge émis. Par conséquent, le paramètre α_{rev} ne doit pas être confondu avec l'absorptivité de l'absorbeur.

La stratégie associée à la méthode des plans expérimentaux consiste à choisir les points de mesures aux extrémités du domaine expérimental. Ainsi, le niveau inférieur du facteur est noté par « -1 », le niveau intermédiaire par « 0 » et le niveau élevé par « 1 ». Le domaine de variation de chaque paramètre est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau inférieur et le niveau élevé. Une fois le modèle expérimental déterminé, il sera alors possible de prédire les performances optimales de l'UTC à l'intérieur du domaine déterminé. Les principales étapes qu'ils convient de suivre pour la mise en œuvre de la technique des plans expérimentaux sont représentées schématiquement à la Figure 1[4].

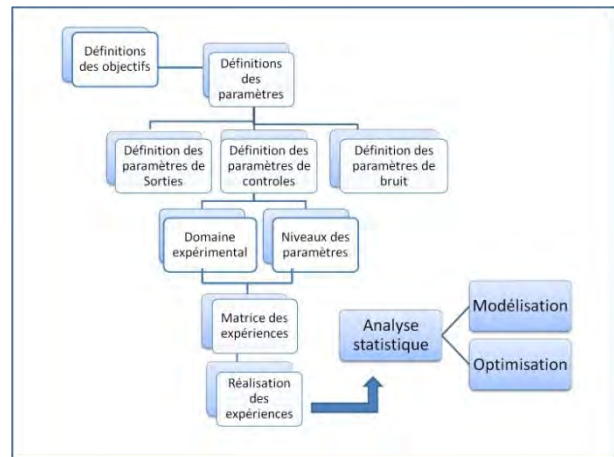


Figure 1 : Méthodologie des plans expérimentaux appliquée à l'UTC

Les paramètres de réponses permettant la prédiction des performances thermiques de l'UTC sont la température de l'air à la sortie du collecteur (T_{out}) et la température de l'absorbeur (T_{abs}). Tel que présenté par Duffie et Beckman [5], ces températures sont liées au rendement de l'UTC défini par la relation suivante.

$$\eta = \frac{T_{out} - T_{amb}}{T_{abs} - T_{amb}} \quad (1)$$

La température ambiante (T_{amb}) où les expériences ont eu lieu est susceptible d'influencer le rendement du collecteur. Cependant, il n'a pas été possible d'effectuer un contrôle précis sur cette température qui varie entre 23 et 25 °C. La Figure 2 présente les différents paramètres identifiés lors de l'application de la méthodologie du plan expérimental sur l'UTC.

Les quatre paramètres retenus pour l'étude étant déterminés, l'étape suivante consiste à fixer pour chaque paramètre un domaine expérimental et un nombre de

niveaux convenable. Les renseignements disponibles dans la littérature ont permis de déterminer la plage typique de variation de ces derniers. En se rapportant aux résultats de [1], le débit d'air d'aspiration, exprimé par unité de surface du collecteur (), a été fixé entre 0,011 kg/(m².s) et 0,04 kg/(m².s).

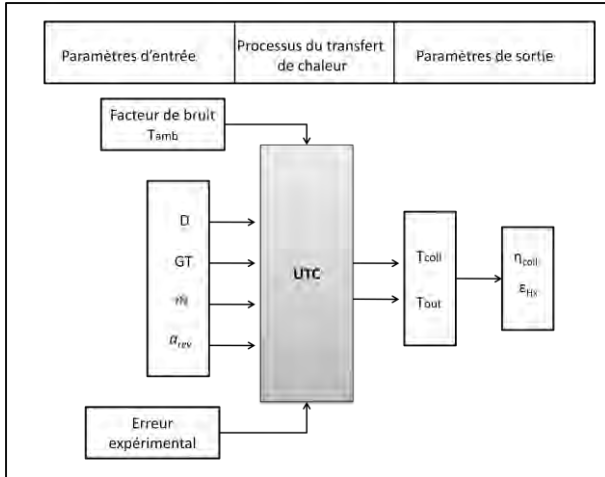


Figure 2: Représentation schématique des paramètres du plan expérimental effectué sur l'UTC

Le rayonnement constitue un autre paramètre important retenu dans cette étude. Son domaine de variation est contraint par l'intensité du système d'éclairage et la nécessité d'avoir un rayonnement uniforme sur le capteur solaire. Plusieurs mesures effectuées avec un pyranomètre (Kipp & Zonen, CMP 11) ont permis de déterminer les distances minimale et maximale admissibles entre les lampes et le capteur. Les valeurs retenues pour l'intensité du rayonnement (G_T) incident sur le capteur sont 348 W/m², 399 W/m² et 605 W/m². Ces valeurs correspondent à des distances lampes-capteur de 140 cm, 120 cm et 100 cm, respectivement. Finalement, le diamètre des perforations (D) a été fixé entre 1,5 mm (niveau inférieur) et 2,4 mm (niveau élevé), le niveau intermédiaire étant fixé à 2 mm. Le *Tableau 1* montre les paramètres retenus ainsi que leurs niveaux.

Tableau 1 : Niveaux des facteurs du plan d'expériences

Niveaux	Paramètres de contrôles			
	Revêtement (α_{rev})	Diamètre D (mm)	Rayonnement G_T (W/m ²)	Débit (kg/m ² .s)
-1 Minimum	Sans revêtement	1,5	348	0,011
0 Intermédiaire	Sélectif	2	399	0,025
1 Maximum	Noir	2,4	605	0,039

3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La méthodologie des plans d'expériences nécessite l'évaluation expérimentale du rendement de l'UTC (appelé fonction de réponse) en fonction des paramètres d'entrée dans tout le domaine expérimental désigné. Le dispositif expérimental utilisé pour la collecte des données est présenté en détails dans [6]. Dans cette référence, la description des éléments qui entre dans la composition du mur solaire perforé est exposée. L'instrumentation utilisée pour la réalisation des expériences, ainsi que l'incertitude expérimentale associée aux mesures y sont également présentés. La Figure 3 montre une photo du capteur perforé et de la source d'irradiation utilisés pour le volet expérimental.

4. ANALYSE DU PLAN EXPERIMENTAL

Dans la présente étude, la fonction de réponse (η_{coll}) est déterminée par un modèle statistique qui prend en considération les effets principaux des paramètres et leurs interactions. Ce modèle quadratique peut être présenté sous la forme générale suivante :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{44} X_4^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{14} X_1 X_4 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{24} X_2 X_4 + \beta_{34} X_3 X_4 + \epsilon_i \quad (2)$$

Dans cette relation, les coefficients du modèle (β_0 , β_i , β_{ij}) sont appelés coefficients de régression. Ces coefficients sont estimés par la technique des moindres carrés [7]. Ils sont au nombre de 15 dont 6 sont des coefficients d'interaction non linéaire. La démarche adoptée pour établir le modèle statistique est la suivante : *i*) vérification de la qualité du modèle, *ii*) ajustement du modèle et *iii*) validation du modèle.

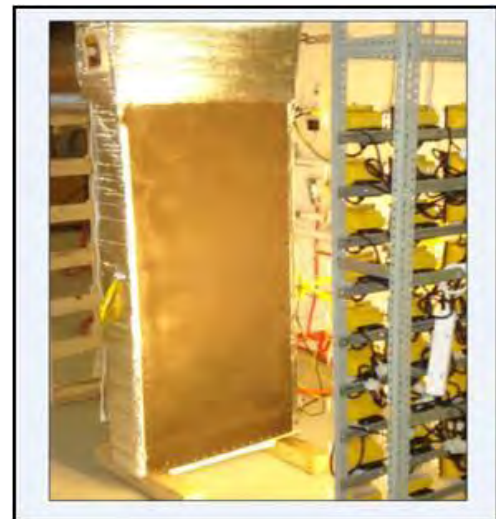


Figure 3: Photo de l'UTC construit

4.1 Vérification de la qualité du modèle

Le test statistique qui permet la vérification de la qualité de la modélisation, est la statistique R-carré ou le

coefficient de détermination. Celui-ci, donne la proportion de la variation totale des données qui est expliquée par le modèle : plus la valeur de R^2 est proche de 1, plus le modèle est fidèle dans sa représentation des données expérimentales. La statistique R^2 du modèle de rendement donne une valeur de 0,9547 cela signifie que 95,47 % de la variabilité des données est expliquée par le modèle obtenu du rendement.

4.2 Ajustement du modèle

Le graphique de Pareto de la Figure 4 montre les paramètres ainsi que leurs interactions en ordre décroissant d'importance.

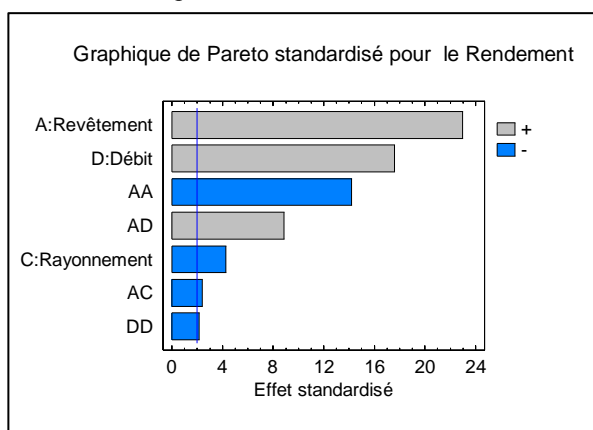


Figure 4: Graphique de Pareto pour les effets significatifs pour le rendement

La longueur de chaque barre est proportionnelle à la valeur de la statistique calculée pour l'effet associé. La ligne verticale est utilisée pour juger les effets statistiquement significatifs. Toutes les barres qui s'étendent au-delà de cette ligne correspondent à des effets statistiquement significatifs au niveau de confiance de 95,0 %. Le signe (+) indique que le paramètre contribue positivement au rendement alors que le signe (-) indique le paramètre contribue négativement. Dans ce cas, 7 effets significatifs sont identifiés. Les paramètres dont l'effet sur le rendement se situe à gauche de la ligne verticale sont statistiquement non significatifs et sont retirés du modèle. Ainsi, le modèle ajusté du rendement de l'UTC est donné par l'équation 3 [6].

$$\eta_{coll} = 66,5 + 24,42\alpha_{rev} - 4,29G_T + 18,37\dot{m} - 25,67\alpha_{rev}^2 - 2,93\alpha_{rev} \times G_T + 11,3\alpha_{rev} \times \dot{m} - 3,92\dot{m}^2 \quad (3)$$

4.3 Validation du modèle

On conclue l'étape de la modélisation par une validation au moyen de tests statistiques tels que les tests des résidus, l'analyse de la variance, ou le test de Student-Fischer [8]. Les résultats de l'Anova effectuée à partir du rendement de l'UTC sont présentés au Tableau 2. Ce tableau présente le pourcentage de variance

expliquée par le modèle mathématique par comparaison avec la variance contenue dans les résultats expérimentaux. La taille de $SS_{traitement}$ et SS_{erreur} indique si la différence observée entre les traitements est réelle ou si elle est due au hasard. La différence due au traitement est dite réelle si elle dépasse l'erreur expérimentale de façon significative. Cependant, il faut noter que la somme liée à l'erreur ($SS_{erreur} = 4298,86$) représente 5,7% de la variabilité totale du rendement de l'UTC ($SS_T = 74208,30$). Ainsi 94,3%, de la variabilité totale est due aux effets occasionnés par les paramètres retenus. Cela signifie que le revêtement, le rayonnement, le débit d'air et les interactions (revêtement-débit) et (revêtement-rayonnement) sont responsables de la variabilité totale de la fonction de réponse η_{coll} dans une proportion de 94,3%.

Tableau 2 : Analyse de la variance pour le rendement

Source	Somme des carrés	DDL	Moyenne quadratique	Rapport F	P-value
A: Revêtement	31010,2	1	31010,2	526,6	0,0000
C: Rayonnement	1079,3	1	1079,3	18,3	0,0001
D: Débit	18240,8	1	18240,8	309,7	0,0000
AA	11865,6	1	11865,6	201,5	0,0000
AC	337,01	1	337,0	5,7	0,0193
AD	4602,0	1	4602,0	78,1	0,0000
DD	276,60	1	276,6	4,7	0,0335
Erreur totale	4298,8	73	58,8		
Total (corr.)	74208,3	80			

Les résidus sont définis comme étant l'écart entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle de régression. Ils ont la particularité de représenter la partie non expliquée par l'équation de régression. Cette analyse consiste à vérifier les trois conditions de bases suivantes : *i*) indépendance des résidus, *ii*) homogénéité des variances et *iii*) normalité des résidus.

Dans cette étape, il s'agit de vérifier que la représentation des résidus ne présente aucune structure particulière pour la vérification de l'indépendance des résidus et l'homogénéité des variances, et quel doit s'apparenter à une droite pour la vérification de la normalité des résidus. Après avoir vérifié les trois conditions de base de l'analyse des résidus avec succès, on peut affirmer que le modèle du rendement est représentatif et que les résultats qui seront obtenus à partir de ce modèle sont valables.

5 ANALYSE DES RESULTATS

Le graphique des effets principaux présenté à la Figure 5 représente les valeurs estimées du rendement de l'UTC en fonction de chaque paramètre expérimental. Le paramètre considéré est délimité par

les niveaux inférieur (-1) et supérieur (1), alors que tous les autres paramètres sont fixés à leur niveau central désigné par la valeur (0). D'une part, l'examen de cette figure indique que le rendement (η_{coll}) de l'UTC diminue, lorsque le rayonnement augmente. Ceci s'explique par le fait que les déperditions thermiques de l'UTC augmentent lorsqu'on augmente le rayonnement. En effet, la température du capteur étant plus élevée, les pertes thermiques par convection et par rayonnement vers l'environnement extérieur augmentent. Ce résultat est en accord avec celui rapporté par [2]. D'autre part, ce graphique nous indique deux autres effets, plus importants que l'intensité du rayonnement. Ces effets sont le revêtement de l'absorbeur et le débit d'air aspiré. On remarque que ces paramètres suivent une évolution non monotone. L'interprétation de cette tendance s'explique par la présence des termes β et γ dans le modèle de régression (3). En effet pour un rayonnement et revêtement de l'absorbeur fixés à leur niveau central (0), l'évolution du rendement en fonction du débit d'aspiration est donnée par l'expression (4). Cette parabole présente un maximum se situant en dehors du domaine de variation du débit d'aspiration, au point où $\dot{m} = 2,34$ kg/m²/s.

$$\eta_{coll}(\dot{m}) = 66,50 + 18,37\dot{m} - 3,92\dot{m}^2 \quad (4)$$

La relation 4 explique ce qui se passe dans le domaine de variation du débit d'air (entre -1 et 1), c'est-à-dire entre 0,011 kg/m²/s et 0,04 kg/m²/s. Cependant, en dehors de cet intervalle, la relation n'est plus valable puisqu'en réalité le rendement devrait tendre vers une constante lorsque le débit tend vers l'infini.

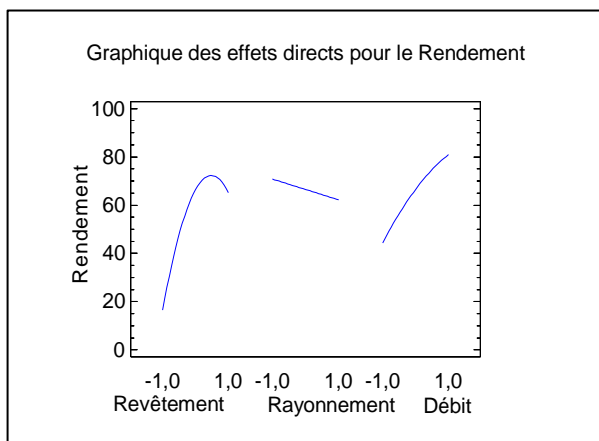


Figure 5: Effets principaux pour le rendement

La présence d'un maximum dans le graphique de la Figure 5, s'explique par le terme γ qui signifie que le rendement est fortement dépendant de la nature du revêtement de l'absorbeur.

Contrairement à ce qui était attendu, les meilleurs rendements sont obtenus pour un niveau de revêtement égal à 0,73. Les caractéristiques optiques (α, ϵ) de cet absorbeur sont plus proches de celles de l'absorbeur à revêtement noir que celles de l'absorbeur à revêtement sélectif. Une telle tendance s'explique par le fait que les caractéristiques de l'absorbeur à revêtement sélectif sont destinées aux capteurs exposés au rayonnement solaire dont le spectre d'émission se compare à celui d'un corps noir à 5800 K. Dans notre cas, l'utilisation de lampes halogènes génère un spectre d'émission qui s'apparente à celui d'un corps noir à 3500 K. Par conséquent, cela nous permet d'exclure l'utilisation de l'absorbeur à revêtement sélectif et de fixer le niveau du revêtement de l'absorbeur à 1 pour l'optimisation du rendement de l'UTC.

Le graphique des effets d'interactions revêtement-débit de la Figure 6, montre que le changement du niveau du revêtement de l'absorbeur de son niveau bas (-1) à son niveau moyen (0) pour un débit d'air maintenu à son niveau élevé (1), augmente le rendement de 18% à 90%, soit une augmentation de 72%. Toutefois, une augmentation de seulement 27% est observée avec le niveau bas (-1) du débit d'air. L'influence du débit d'aspiration sur le rendement de l'UTC est fortement amplifiée lorsqu'on remplace l'absorbeur sans revêtement (-1) par un absorbeur avec revêtement sélectif (0) ou noir (1). Ceci est conforme aux observations expérimentales et confirme l'importance de l'utilisation des collecteurs perforés ayant un absorbeur avec revêtement sélectif ou noir. Dans une telle situation, une interaction existe entre ces paramètres puisque l'effet du débit dépend du revêtement. Cette interaction correspond au terme β dans le modèle du rendement obtenu. Toujours sur la Figure 6, on remarque qu'il n'y a pas d'interaction significative entre le revêtement et le débit d'air pour les niveaux moyen et élevé du revêtement de l'absorbeur.

5.1 Optimisation du rendement

L'examen du graphique surface de réponse du rendement de l'UTC de la Figure 7 indique la hauteur de la surface de réponse. Cette hauteur représente la valeur prévue du rendement de l'UTC en fonction du revêtement de l'absorbeur et du débit d'air. Les autres paramètres étant fixés à leurs valeurs moyennes respectives. Un tel graphique indique que de nombreuses solutions sont disponibles, chacune ayant sa propre variabilité. Le choix entre ces solutions ne peut être fait qu'en fonction des spécifications des quatre paramètres du modèle. Un choix judicieux serait de sélectionner le revêtement noir pour l'absorbeur et un débit d'air élevé pour limiter la hausse de température. Une fois le niveau du revêtement et du diamètre fixés, la représentation graphique du rendement de l'UTC par des contours de surface de réponse, nous semble plus

convivial. La Figure 8, représente les contours de surface de réponse. Cette figure nous indique un intervalle du débit d'air compris entre les niveaux «0,25 et 0,75» et un rendement compris entre 70% et 80% pour un absorbeur dont le niveau du revêtement et du diamètre est égal à «1» et «0», respectivement. Cette figure nous permet de déceler, non seulement un point de fonctionnement optimal pour le rendement de l'UTC, mais elle permet également de détecter tout un intervalle du débit d'air pour lequel le rendement est compris entre 70% et 80%.

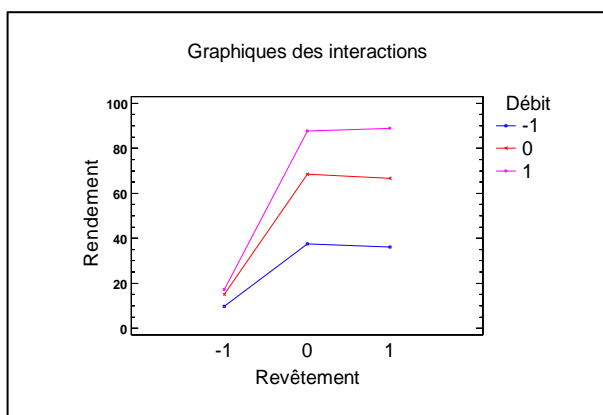


Figure 6: Effets d'interaction revêtement-débit pour le rendement

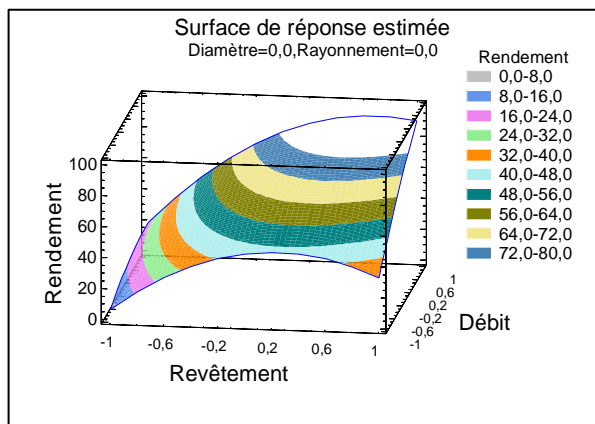


Figure 7 : Surfaces de réponse pour le rendement

6. CONCLUSION

L'utilisation de la méthode des plans expérimentaux a démontré sa fiabilité sur les systèmes possédant de nombreux paramètres de contrôle, comme c'est le cas des collecteurs solaires perforés. Cette méthode a permis entre autres de répondre à un certain nombre de questions, tel que la quantification des paramètres les plus sensibles du modèle et leurs interactions, ce qui est difficile à obtenir en adoptant une méthode expérimentale classique. Trois paramètres principaux

influencent le rendement de l'UTC, soit le revêtement de l'absorbeur, le débit d'air aspiré par le ventilateur et l'intensité du rayonnement. Le diamètre des perforations est le paramètre le moins influent. Rappelons que le revêtement de l'absorbeur et le débit d'air sont les paramètres les plus influents du modèle. Finalement, la méthode des surfaces de réponse nous a permis d'identifier le réglage optimum des quatre paramètres pour lequel le rendement de l'UTC est compris entre 70% et 80%.

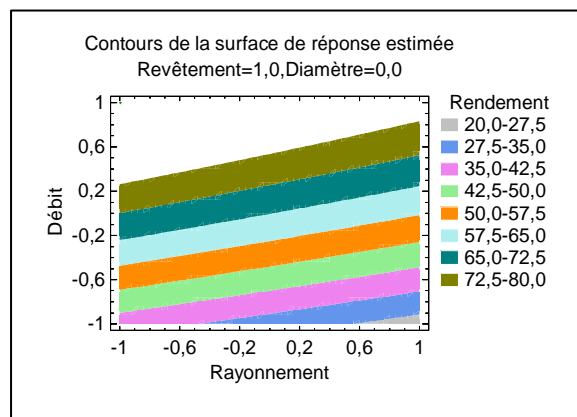


Figure 8 : Contours de surface de réponse pour le rendement

RÉFÉRENCES

- [1] KUTSCHER, C.F.C., et B.BARKER., Unglazed transpired solar collectors: heat loss theory. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, **115**(3), p. 182-188, (1993).
- [2] LEON, M.A. et S. KUMAR, Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors. Solar Energy, **81**(1), p. 62-75, (2007).
- [3] ARULANANDAM, S.J., K.G.T. HOLLANDS, et E. BRUNDRETT, A CFD heat transfer analysis of the transpired solar collector under no-wind conditions, Solar Energy, **67**(1-3), p. 93-100, (1999).
- [4] GOUPY, J., Introduction aux plans d'expériences, 2e éd. Technique et ingénierie, Série Matériaux, Paris, Dunod, 293 pages, (2001).
- [5] DUFFIE, J.A.B., et WILLIAM A., Solar engineering of thermal processes. 3^{ed}, Hoboken, N.J. Wiley, 908 pages, 2006.
- [6] BADACHE, M., Modélisation et optimisation des performances thermiques d'un mur solaire à perforations (UTC), Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure: Canada. 113 pages, (2010).
- [7] JAYARAMAN, K., Manuel de statistique pour la recherche forestière, D.d. forêts, Éditeur, FO: GCP/RAS, (1999).
- [8] VIGIER, M., Pratique des plans d'expériences : méthodologie Taguchi et compléments: Paris . Éditions d'Organisation, 189 pages, (1988).
- [9] BADACHE, M., ROUSSE, D.R., HALLE, S., Experimental characterization of an unglazed transpired solar collector, Proc. Eurosun , (2010).