

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Ing.

PAR
Messaoud BADACHE

MODÉLISATION ET OPTIMISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UN
MUR SOLAIRE À PERFORATIONS (UTC)

MONTREAL, LE 26 FÉVRIER 2010

© Messaoud Badache, 2010

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE

M. Stéphane Hallé, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Forgues, président du jury
Département de construction à l'École de technologie supérieure

M. Stanislaw Kajl, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 18 FÉVRIER 2010

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Stéphane Hallé, Professeur au département de génie mécanique de l'École de technologie supérieure, d'avoir dirigé ce travail me faisant ainsi bénéficier de son savoir et de son expérience. Merci pour le soutien, l'attention et le temps que vous m'avez accordé sans compter pour la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres de jury Monsieur Stanislaw Kajl et Monsieur Daniel Forgues, d'avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mes parents pour leur soutien et sacrifice, sans lesquels ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Je remercie aussi ma femme, pour m'avoir soutenue et encouragée durant toutes les périodes difficiles. Je voudrais également remercier mes frères, sœurs et amis : Abdessamie, Ammar, Adoula, Rabah, Abdenour, Lyes, Mourad, Mohamed et Zinou.

En fin un grand bizou à ma fille Malak et Aymen (Atamaa).

MODÉLISATION ET OPTIMISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UN MUR SOLAIRE À PERFORATIONS (UTC)

Messaoud BADACHE

RÉSUMÉ

L'objectif principal de ce mémoire est la modélisation et l'optimisation des performances thermiques d'un mur solaire à perforations (UTC). Vu le nombre de paramètres importants intervenant dans les systèmes d'UTCs, la mise en œuvre d'un plan expérimental complet à trois niveaux est nécessaire. Pour ce faire, un prototype de mur solaire à perforations UTC a été construit au Centre de technologie thermique (CTT) de l'École de technologie supérieure. Des mesures expérimentales de température, rayonnement et vitesse d'écoulement ont été réalisées, selon la stratégie définie par le plan d'expériences.

Dans un premier temps, la méthodologie des plans expérimentaux a permis de déterminer l'influence de quatre paramètres (le revêtement de l'absorbeur, le débit d'air aspiré par le ventilateur, le diamètre des trous et le rayonnement) sur les performances thermiques (rendement et efficacité) de l'UTC. Dans un second temps, un modèle analytique de type polynomial est établi. Ce dernier explique 94,6 % de la variabilité des résultats du rendement. Par la suite, ce modèle est ajusté et validé par une analyse de variance et une analyse des résidus. Finalement, le modèle obtenu est optimisé grâce à une représentation graphique par des courbes de surfaces de réponse. Une combinaison optimale de quatre paramètres est obtenue, pour un rendement compris entre 80% et 90%.

Mots-clés : UTC, rendement, efficacité, plan expérimental, optimisation statistique.

MODÉLISATION ET OPTIMISATION DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UN MUR SOLAIRE À PERFORATIONS (UTC)

Messaoud BADACHE

ABSTRACT

The main objective of this study is to model and optimize the thermal performances of an unglazed transpired solar collector (UTC). Given the important number of parameters intervening in the UTC systems, the implementation of a full experimental design at three levels was necessary. In order to achieve this objective, a UTC prototype has been built in the Centre of thermal technology (CTT) at Ecole de technologies supérieure. Experimental measurements of temperature, radiation and flow rates are achieved, according to the strategy defined by the experimental design.

At first, the experimental design methodology allowed to determine the influence of four parameters (the collector coating, the mass flow of air through the perforations, the holes diameter and the radiation intensity) on thermal performances (efficiency and effectiveness) of the UTCs. In second time, an analytical model of polynomial type is established, which explains 94.6 % of the variability of the output results. Later, this model is adjusted and validated by a variance and a residual analysis. Finally, the model developed is optimized with a graphics representation using curves of response surfaces. An optimum combination of four parameters is obtained, for a collector efficiency included between 80 % and 90 %.

Key words: UTC, efficiency, effectiveness, experimental plan, statistical optimization.

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1	PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF	3
1.1	Contexte	3
1.1.1	Raisons environnementales.....	3
1.1.2	Raisons économiques.....	5
1.1.3	Solution	5
1.1.4	Bénéfices des systèmes de chauffage solaire de l'air (UTCs).....	6
1.2	Problématique	6
1.3	Objectifs	8
1.4	Paramètres importants et performances thermiques des UTC	8
CHAPITRE 2	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	13
2.1	Introduction.....	13
2.2	La théorie du transfert de chaleur	14
2.3	L'efficacité des capteurs perforés	18
2.4	Les outils d'analyse des systèmes de chauffage solaire de l'air	21
CHAPITRE 3	CONVERSION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE DANS LE BÂTIMENT ..	24
3.1	Introduction.....	24
3.2	Le système UTC de chauffage solaire de l'air.....	25
3.3	Description des systèmes de chauffage solaire de l'air	26
3.4	Contrôle des capteurs perforés.....	27
3.5	Classement des systèmes d'UTCs	29
3.5.1	Systèmes d'UTCs de bâtiment commercial et résidentiel	29
3.5.2	Systèmes d'UTCs des bâtiments industriels	30
3.5.3	Systèmes d'UTCs pour procédés industriels	31
3.6	Revêtement de l'absorbeur	31
3.6.1	Revêtement non sélectif.....	32
3.6.2	Revêtement sélectif.....	33
CHAPITRE 4	MÉTHODOLOGIE DES PLANS EXPÉRIMENTAUX.....	35
4.1	Principe	36
4.2	Objectif	37
4.3	Définition des paramètres	37
4.3.1	Paramètres de contrôle.....	37
4.3.2	Paramètres bruits.....	39
4.3.3	Paramètres de réponses	39
4.4	Domaine expérimental	40

4.4.1	Contraintes expérimentales	40
4.4.2	Contraintes d'appareillage	41
4.4.3	Renseignements bibliographiques	41
4.5	Construction du plan d'expériences.....	41
CHAPITRE 5 DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF		
	EXPÉRIMENTAL	43
5.1	Dispositif expérimental	43
5.2	Instrumentation	46
5.3	Mesure de l'irradiation.....	47
5.4	Mesure du débit.....	48
5.5	Mesure de la température.....	49
5.6	Systèmes d'acquisition de données.....	50
5.7	Mesure de l'émissivité.	50
5.8	Déroulement des expériences	51
CHAPITRE 6 MODÉLISATION ET OPTIMISATION DU RENDEMENT ET DE		
	L'EFFICACITÉ DE L'UTC	53
6.1	Modélisation	54
6.1.1	Hypothèses.....	55
6.1.2	Ajustement du modèle du rendement	59
6.2	Validation du modèle.....	61
6.2.1	L'analyse de variance	61
6.2.2	Analyse des résidus.....	64
6.2.3	Discussion des résultats et analyse des effets	67
6.2.4	Effets principaux et d'interactions	68
6.3	Optimisation du rendement de l'UTC.....	72
CONCLUSION		78
RECOMMANDATIONS		81
ANNEXE I RESULTATS DU PLAN EXPÉRIMENTAL		83
ANNEXE II MATRICE DES EXPÉRIENCES		85
ANNEXE III MATRICE INTRODUITE DANS LE LOGICIEL STATGRAPHICS.....		86
ANNEXE IV DIFFÉRENTES INSTALLATIONS DES UTCs		88
ANNEXE V INCERTITUDE DES THERMOCOUPLES.....		89
ANNEXE VI CARACTÉRISTIQUES DE LA PENTURE THERMALOX 250		90
ANNEXE VII GRAPHIQUES DE SURFACES DE RÉPONSE.....		91

BIBLIOGRAPHIE	94
---------------------	----

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 3.1	Surfaces sélectives pour la conversion photo thermique à basse et à moyenne température.....	34
Tableau 4.1	Niveaux des facteurs du plan d'expériences	42
Tableau 5.1	Résultats de mesure de l'émissivité des plaques	51
Tableau 6.1	Coefficients de régression pour	57
Tableau 6.2	Paramètres inclus et exclus du modèle.....	60
Tableau 6.3	Analyse de la variance pour le rendement du modèle non ajusté	62
Tableau 6.4	Analyse de la variance pour le rendement du modèle ajusté	62
Tableau 6.5	Effets estimés du rendement	64
Tableau 6.6	Analyse de la variance pour Rendement -Somme des carrés de type III	68
Tableau 6.7	Niveaux optimums des paramètres	73

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Changement de la température de la terre 1860-1999.....3
Figure 1.2	Pourcentage de consommation d'énergie et des émissions des GES au Canada des secteurs résidentiel, commercial et institutionnel (RCI) en 2005.4
Figure 1.3	Bilan thermique sur l'UTC.....10
Figure 2.1	Capteur solaire perforé utilisé par Kutscher.....16
Figure 2.2	Modèle de bilan énergétique proposée par Summers et coll.....17
Figure 2.3	Configuration du modèle proposé par Van Decker.....19
Figure 2.4	Configuration du modèle Leon et Kumar.21
Figure 2.5	Comparaison des économies d'énergie annuelles calculées par22
Figure 2.6	Réseau de conduites fictives développées par Dymond et Kutscher.23
Figure 3.1	Plaque noire perforée de Matrix Energy.26
Figure 3.2	Représentation schématique d'un système de chauffage solaire de l'air.27
Figure 3.3	Système de contrôle de la température.....28
Figure 3.4	Chauffage solaire de l'air, pour bâtiment commercial et résidentiel.29
Figure 3.5	Projet CSA sur un bâtiment industriel.....30
Figure 3.6	Station d'épuration des eaux usées: Alberta Cold Lake.....31
Figure 3.7	L'émissivité en fonction de la longueur d'onde d'une surface sélective d'un capteur plan.33
Figure 5.1	Coupe longitudinale de l'UTC construit au CTT.....43
Figure 5.2	Photo de l'UTC construit au CTT.46
Figure 5.3	Positionnement des thermocouples dans l'UTC.49
Figure 5.4	Vue de face des thermocouples dans l'UTC.50

Figure 5.5	Ordre et nombre de changement des niveaux des paramètres.	52
Figure 6.1	Graphique de Pareto pour tous les effets.....	58
Figure 6.2	Graphique de normalité pour le rendement.....	59
Figure 6.3	Graphique de Pareto pour les effets significatifs.	60
Figure 6.4	Graphique des résidus en fonction du numéro de l'essai.	65
Figure 6.5	Les résidus en fonction valeur prévue.....	66
Figure 6.6	Graphique probabilité – Normale.....	66
Figure 6.7	Valeurs observées Vs valeurs prévues du rendement.	67
Figure 6.8	Graphique des effets principaux pour le rendement.....	69
Figure 6.9	Effet d'interaction revêtement-débit.	71
Figure 6.10	Effet d'interaction revêtement – rayonnement.....	71
Figure 6.11	Effet d'interaction revêtement – diamètre.....	72
Figure 6.12	Graphique surface de réponse.	75
Figure 6.13	Contours surface de réponse revêtement-débit.	75
Figure 6.14	Contours surface de réponse revêtement-rayonnement.	76
Figure 6.15	Contours de surface de réponse débit-rayonnement.	77

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A_{coll}	Air du capteur (m^2).
C_p	Capacité calorifique de l'air (kJ/kg.K).
D	Diamètre de trous (mm).
DDI	degré de liberté d'un paramètre.
$F_{\text{col.sky}}$	Facteur de forme entre le capteur et le ciel.
$F_{\text{col.gnd}}$	Facteur de forme entre le capteur et le sol.
G_T	Intensité du rayonnement (W/m^2).
L	Longueur du capteur (m).
$\dot{m}$	Débit massique de l'air (kg/s.m^2).
N	nombre total des expériences.
P	Espace entre les perforations dans l'absorbeur (m).
Q	Débit volumique de l'air (m^3/s).
Q_u	la chaleur utile (W).
T_{abs}	Température de l'absorbeur ($^{\circ}\text{C}$).
T_{amb}	Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$).
T_{coll}	Température du capteur ($^{\circ}\text{C}$).
T_{out}	Température de sortie de l'air ($^{\circ}\text{C}$).
T_{sky}	Température du ciel ($^{\circ}\text{C}$).
T_{gnd}	Température du sol ($^{\circ}\text{C}$).
T_{01}	Température d'entrée de l'air dans les trous ($^{\circ}\text{C}$).
T_{02}	Température de sortie de l'air des trous ($^{\circ}\text{C}$).
U	Coefficient de transfert de chaleur global ($\text{W/m}^2.\text{K}$).
V_s	Vitesse de section (m/s).
V_{wind}	vitesse du vent (m/s).
X_i	Le niveau de l'i-ème facteur dans la i-ème observation.
Y	La réponse obtenue à partir de la i-ème combinaisons de facteurs.
$\hat{Y}$	La réponse obtenue à partir du modèle.

Y_{ij}	La i-ème observation du j-ème traitement.
$Y_i.$	La somme des observations du traitement i.
$\bar{Y}_i.$	La moyenne de la somme des observations du traitement i.
$Y_{.j}$	La somme des observations du traitement j.
$Y_{..}$	La somme de toutes les observations.
$\bar{Y}_{..}$	La moyenne de la somme de toutes les observations.

Lettres grecs

ϵ_{HX}	L'efficacité de l'UTC.
η_{coll}	Rendement de l'UTC.
ϵ_{coll}	Émissivité du capteur.
ϵ_{abs}	Coefficient de régression polynomiale du revêtement de l'absorbeur.
ϵ_i	La composante de l'erreur aléatoire, associée à la i-ème observation.
$\epsilon(\lambda, T)$	Coefficient d'émissivité monochromatique spectrale.
α	Coefficient d'absorption.
ρ	Masse volumique de l'air (kg/m^3).
σ	Porosité de l'absorbeur.
γ	La viscosité cinématique de l'air (m^2/s).
β_0	Constante.
β_i	L'i-ème coefficient de régression linéaire.
β_{ii}	L'i-ème coefficient de régression quadratique.
β_{ij}	Le (i,j)-ème coefficient d'interaction.

Nombres adimensionnels

Re_D	Nombre de Reynolds basé sur le diamètre des perforations.
Nu_P	Nombre de Nusselt basé sur l'espace entre les perforations.
Nu_D	Nombre de Nusselt basé sur le diamètre des perforations.
Pr	Nombre de Prandtl.

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CNEES	Le Centre national d'essais d'équipements solaires
STRL	Le laboratoire de recherche solaire thermique
NREL	Le laboratoire national d'énergies renouvelables
GES	Gaz à effet de serre
RNCan	Ressource naturelle Canada
CVCA	Chauffage, Ventilation et Climatisation
RCI	Secteur résidentiel, commercial et institutionnel
Shc	Le programme du chauffage solaire et de refroidissement
UTC	Capteur solaire à perforations non vitré « <i>Unglazed transpired collector</i> »
CFD	Dynamique des fluides numériques
TRNSYS	Simulateur de performance transitoire de systèmes d'énergie thermique
DTLM	La différence de température logarithmique moyenne
PV	Photovoltaïque
CTT	Centre de technologies thermiques de l'école de technologie supérieure
IEA	Agence de l'énergie internationale

INTRODUCTION

Depuis le début des années 1990, Ressources Naturel Canada (RNCa) a développé des programmes pour l'efficacité énergétique et des énergies de remplacement en partenariat ou avec la collaboration de plusieurs organismes dans les secteurs privés et gouvernementaux. RNCa a insisté sur la promotion de l'efficacité énergétique et l'utilisation des énergies de remplacement comme moyens de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) (St-Joseph, 2006).

Ces initiatives invitent la population canadienne et tous les grands secteurs de l'économie à adopter de nouvelles approches évoluées relativement à la consommation et l'utilisation d'énergie que ce soit dans le secteur résidentiel, commercial et industriel. Des actions ont été mises au point pour accroître l'efficacité énergétique et diminuer le coût associé à la consommation de l'énergie, sans pour autant réduire la qualité des services ou le degré de confort, le tout en utilisant des énergies propres qui ont un avenir prometteur en raison des avantages environnementaux qu'elles offrent et, aussi, en raison des progrès technologiques qui les rendent de moins en moins onéreuses à utiliser.

Cependant, certaines de ces énergies de remplacements peuvent ne pas être utilisées à grande échelle, car elles ne sont tout simplement pas disponibles en quantités suffisantes pour être économiquement viables. Par contre, l'énergie solaire est abondante et largement disponible sur la surface de la planète. De plus, elle est inépuisable, gratuite et non polluante. Par conséquent, l'énergie solaire présente un grand potentiel comme une source d'énergie de remplacement propre.

Les murs sont les éléments principaux d'un bâtiment en termes d'échange de chaleur avec l'environnement extérieur. Au cours des dernières années, un nouveau type de mur, appelé, mur solaire à perforations «*Unglazed transpired collector*» (UTC) a reçu beaucoup d'attention. Cet intérêt vient du fait que l'UTC s'est révélé d'être un moyen efficace et fiable de réduction des charges de chauffage, ventilation et climatisation (CVCA) et les émissions

de gaz à effet de serre. En préchauffant l'air de ventilation, on réduit les coûts d'exploitation des bâtiments, tout en leur permettant d'avoir une meilleure qualité d'air intérieur. L'UTC a été développé au début des années 1990 par Conserval Engineering Inc. Plus de 1000 systèmes ont maintenant été installés dans 25 pays différents (RETScreen, 2009).

Dans le cadre de ce mémoire nous nous sommes intéressés à évaluer les performances thermique d'un prototype de mur solaire à perforations construit à cet effet. Et pour répondre à cet objectif la méthodologie des plans expérimentaux a été privilégiée.

Ce mémoire est structuré comme suit : le chapitre 1 présente la mise en valeur et les bénéfices des capteurs solaires à perforations ainsi que le contexte, la problématique, et l'objectif de l'étude. Le chapitre 2, présente un survol de la bibliographie et des travaux jugés pertinents pour notre étude seront suivis par chapitre 3, où on présente dans un premier temps les différentes technologies de conversion de l'énergie solaire dans le bâtiment. Ensuite, ce chapitre présente une description du mode de fonctionnement et de contrôle des capteurs solaires à perforations. Le chapitre 4 est consacré à la mise en œuvre de la méthodologie des plans expérimentaux, dont le but est d'identifier l'ensemble des facteurs et leurs domaines expérimentaux qui influencent les performances de l'UTC. La description et le montage du dispositif expérimental de l'UTC sont présentés dans le chapitre 5. Ce chapitre décrit également la méthode expérimentale utilisée pour mesurer les paramètres clés de l'UTC. Le chapitre 6 présente dans un premier temps le modèle obtenu du rendement grâce à l'analyse statistique des résultats du plan d'expérience. Dans un deuxième temps, une optimisation de ce dernier par représentation graphique en utilisant les surfaces de réponses et les contours de surface de réponse.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF

1.1 Contexte

1.1.1 Raisons environnementales

L'effet de serre est un phénomène naturel causé par une couche de gaz atmosphérique qui entoure la terre. Ces gaz, tels que le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4), retiennent la chaleur dans l'atmosphère maintenant ainsi la température de la terre au niveau requis pour soutenir la vie.

Depuis près d'un siècle, l'utilisation accrue des combustibles fossiles et le déboisement ont eu comme conséquence d'augmenter considérablement la quantité de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. On s'attend à ce que la hausse envisagée des émissions de GES entraîne une augmentation significative des températures à la surface de la terre comme le montre la figure 1.1, ce qui ne sera pas sans entraîner d'énormes répercussions négatives sur les populations de la planète.

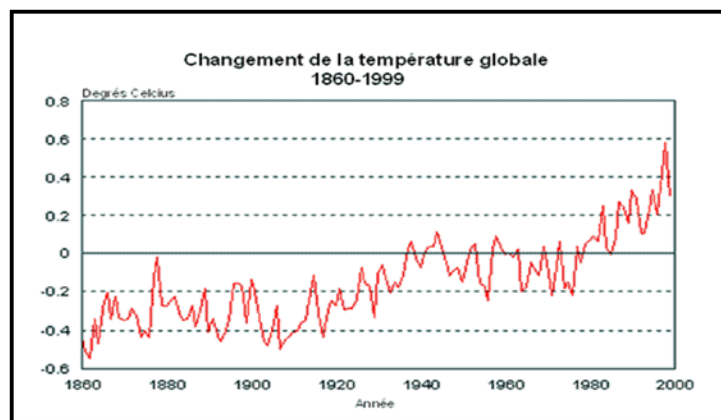


Figure 1.1 Changement de la température de la terre 1860-1999.
Tirée de (Environnement Canada, 2009)

Entre 1990 et 2005, les émissions totales de gaz à effet de serre au Canada ont augmenté de 25 % pour passer à 747 millions de tonnes, dépassant ainsi de 33 % l'objectif du Canada dans le cadre du Protocole de Kyoto. Une bonne partie de cette augmentation des émissions (environ 11 %) est attribuable au secteur résidentiel, commercial et institutionnel (RCI) (Statistique Canada, 2008).

Cette augmentation des émissions de GES est entraînée par une hausse de la consommation d'énergie secondaire, c'est-à-dire l'énergie que l'on consomme pour chauffer et climatiser les habitations et les lieux de travail ainsi que pour faire fonctionner les appareils ménagers. Comme la montre la figure 1.2, une augmentation de consommation d'énergie secondaire entraînera une augmentation des émissions des gaz à effet de serre. Il faut noter aussi qu'environ 60,08 % de la consommation d'énergie dans les secteurs résidentiel, commercial et institutionnel est attribuable au chauffage des locaux.

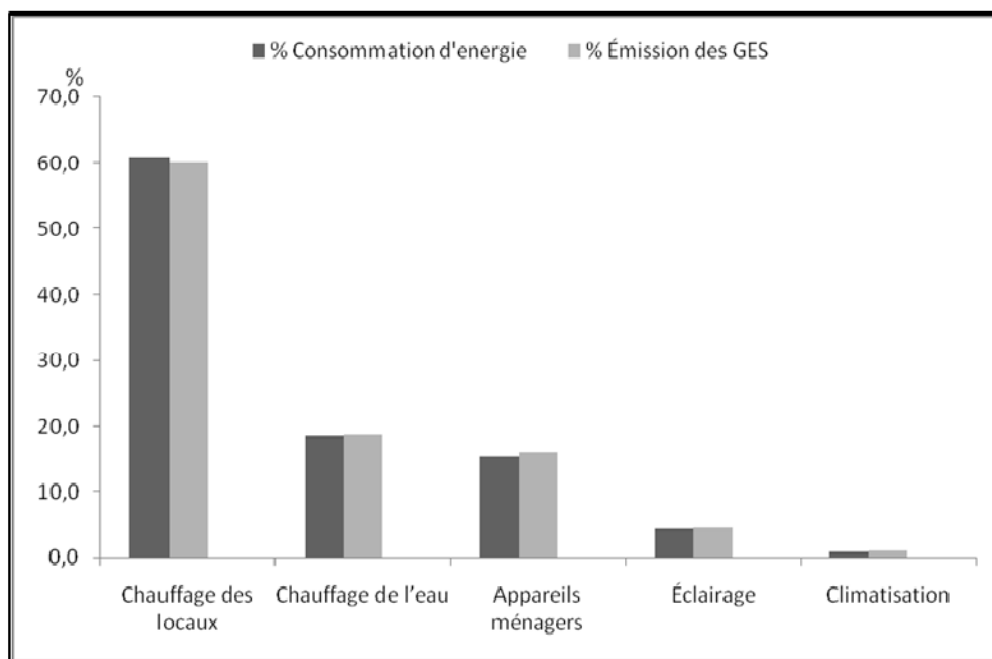


Figure 1.2 Pourcentage de consommation d'énergie et des émissions des GES au Canada des secteurs résidentiel, commercial et institutionnel (RCI) en 2005.

Tirée de (Office de l'efficacité énergétique, 2008)

1.1.2 Raisons économiques

Il y a de bonnes raisons de croire que l'augmentation des prix de l'énergie et les risques de chocs pétroliers rend les technologies d'énergies propres d'autant plus attractives. Partout à travers le monde, pendant que la demande en énergie conventionnelle augmente, le taux de découverte des nouvelles réserves de pétrole est en déclin.

De plus, les longues périodes d'hivers froids que l'on connaît au Canada poussent sans cesse les entreprises à réfléchir sur le coût de consommation énergétique pour le chauffage de l'air des lieux de travail, du fait que ce dernier a une répercussion directe sur la marge bénéficiaire de ces entreprises.

Ainsi, plusieurs techniques et outils sont adoptés dans le but réduire une partie des émissions de GES tout en répondant aux besoins de ces entreprises en matière de consommation et d'efficacité énergétique.

1.1.3 Solution

C'est dans le contexte cité précédemment qu'apparaît l'idée des murs solaire à perforations. Cette solution utilise le soleil comme source principale d'énergie. L'air préchauffé est utilisé pour l'alimentation des bâtiments en air neuf de ventilation ou introduit comme air de combustion dans les fours industriels. Il peut aussi servir à d'autres usages tels que le séchage des produits agricoles, où le préchauffage de l'air de ventilation d'immeubles résidentiels, commerciaux et industrielles (RETScreen, 2009). Cette technologie a fait l'objet de nombreuses années de recherche et de développement au sein de plusieurs centres de recherche canadiens et américains. Mentionnons entre autres l'Université de Waterloo et l'Université du Wisconsin. Elle consiste au remplacement du revêtement extérieur conventionnel en une plaque ou une tôle placée de préférence sur le mur située au sud du bâtiment à chauffer. Ce système permet de réduire les coûts énergétiques du bâtiment de

deux façons, soient en captant l'énergie solaire incidente et en récupérant la chaleur perdue par le mur extérieur du bâtiment.

Les installations en mesure de bénéficier le plus de cette technologie sont les entrepôts, les grandes institutions comme les hôpitaux et les écoles, les procédés industriels, et même les immeubles résidentiels. En général, les avantages de cette technologie sont les plus importants lorsque la saison de chauffage est longue, les besoins en ventilation sont élevés et que le coût des combustibles est important. Étant donné les faibles coûts d'installation et d'entretien et les économies générées par les UTCs, l'utilisation de cette technologie constitue une alternative aux systèmes de chauffage conventionnels (RETScreen, 2009).

1.1.4 Bénéfices des systèmes de chauffage solaire de l'air (UTCs).

Le système de chauffage solaire à plaque perforée présente les avantages suivants:

- Préchauffe l'air d'appoint, ce qui permet de réduire les coûts de chauffage;
- Améliore la qualité de l'air intérieur;
- Relativement facile à installer;
- Augmente la résistance thermique du mur déjà en place et réduit les coûts d'isolation;
- Ne nécessite pratiquement aucun entretien, ne comporte aucun liquide ni aucune pièce; mobile autre que les ventilateurs du système de ventilation.

1.2 Problématique

La recherche sur les murs solaires à perforations UTCs 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 (Kutscher, Christensen et Barker, 1993). Par la suite, les efforts de la recherche ont principalement été orientés vers le développement de modèles analytiques tels que présentés par Van Decker, Hollands et Brunger (2001), et de modèles numériques présentés par Gunnewiek, Brundrett et Hollands (1996).

Compte tenu du nombre important de variables opératoires intervenant dans les systèmes d'UTC (diamètre (D) et espace des perforations (P), revêtements de l'absorbeur (α_{abs} , ϵ_{abs}), rayonnement incident (G_T), le débit d'air dans les perforations ($\dot{m}$)). La maîtrise et l'évaluation des performances thermiques de ces derniers à partir des méthodes analytiques et numériques deviennent une opération très complexe. Cette complexité se traduit généralement par la multiplication de leurs paramètres. Cependant, ces paramètres n'ont pas tous le même niveau d'influence sur les performances thermiques de l'UTC.

Il convient de mentionner que certains auteurs développant des modèles analytiques et numériques ajustent souvent la réalité aux outils dont ils disposent (Dymond et Kutscher, 1997) et (Leon et Kumar, 2007). Cette manipulation conduit généralement en un important degré d'incertitude pouvant influencer sérieusement les prédictions des modèles. Quoiqu'il en soit, le développement de solutions approximatives aux problèmes posés, ne représente pas convenablement la réalité puisqu'elles sont basées sur des hypothèses simplificatrices ce qui limite toute analyse exhaustive des réponses. En raison de ces contraintes, nous proposons une méthode puissante et fiable dans la prise de décision, qui a gagné une bonne réputation dans le contrôle et la modélisation des systèmes complexes. Cette méthode consiste en la modélisation statistique des procédés.

Cette méthode, appelée aussi optimisation par la méthode des plans d'expériences, a été particulièrement utilisée dans les domaines de la chimie (Dufailly, 2008), du génie des procédés (Duchez et Guyonnet, 1998) et pour le contrôle de qualité (Perin-Lavasseur, 2004). Le choix de cette méthode est basé sur le fait que son utilisation est assez aisée dans les modèles possédant de nombreux paramètres d'entrée, comme c'est le cas des UTCs. Son principe consiste à déterminer, l'effet de plusieurs paramètres à la fois, et leur interaction éventuelle sur une ou plusieurs fonctions d'internée (fonctions de réponse). Ceci va nous permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, sans sacrifier la précision des résultats.

1.3 Objectifs

L'objectif principal de ce projet de recherche est de déterminer les performances thermiques (rendement et efficacité) optimales d'un prototype de mur solaire à perforations (UTC) en fonction de paramètres indépendants. Pour atteindre cet objectif, le projet comporte un volet expérimental et un volet d'analyse statistique et de modélisation. Les mesures effectuées dans le volet expérimental ont été déterminées selon une planification ordonnée d'essais élémentaires définie par un plan d'expérience appelé « plan factoriel » de type k^n . Ce plan factoriel a permis de fixer le niveau des paramètres d'entrée, leurs plages de variation ainsi que le choix des combinaisons des valeurs. Les résultats de ces expérimentations permettront la détermination d'un modèle prédictif du rendement et efficacité de l'UTC (appelé fonction de réponse) en fonction des paramètres d'entrées dans tout le domaine expérimental désigné. Plus précisément, il s'agira de :

- 1- Construire et instrumenter un prototype de mur solaire à perforations sur lequel les essais élémentaires seront effectués et procéder aux expérimentations définies par le plan factoriel de type k^n .
- 2- Suite aux résultats des expérimentations, procéder à une analyse statistique et déterminer le modèle décrivant la fonction de réponse (rendement et efficacité) qui met en valeur l'effet individuel des paramètres d'entrée et leur l'interaction.
- 3- Optimiser la fonction de réponse à un niveau désiré dans le domaine expérimental désigné.

1.4 Paramètres importants et performances thermiques des UTC

Avant de présenter les travaux antérieurs jugés importants pour cette étude, il est judicieux de définir les principaux paramètres d'entré, les notions d'efficacité et de performance des UTC ainsi que les symboles qui y sont associés.

Les principaux paramètres ayant une influence sur les performances thermiques des capteurs solaires à perforations sont de trois types:

Paramètres géométriques

- Le diamètre des perforations (D);
- Le pas entre les perforations (P);
- La porosité de l'absorbeur (σ);
- Le revêtement de l'absorbeur (absorptivité α_{abs} , et émissivité ϵ_{abs}).

Paramètres d'exploitation

- La température de sortie de l'air (T_{out});
- La température du capteur (T_{coll});
- Le débit d'air d'aspiration ($\dot{m}$), ou la vitesse de section (V_s);

Paramètres opératoires

- La température ambiante (T_{amb});
- Rayonnement solaire incidente (G_T);
- Vitesse du vent à proximité de l'absorbeur (V_{wind}).

Tous ces paramètres ont une influence plus ou moins importante sur le rendement (η_{coll}) et l'efficacité (ϵ_{HX}) du capteur perforé. En pratique, le rendement de l'UTC est fonction de l'énergie utile Q_{del} qu'on cherche toujours à augmenter. La puissance utile récupérée par l'air à travers son passage par l'absorbeur est équivalente à l'énergie solaire incidente moins les pertes thermiques par rayonnement et par convection. La figure suivante représente les modes de transfert de chaleur se produisant dans le capteur perforé.

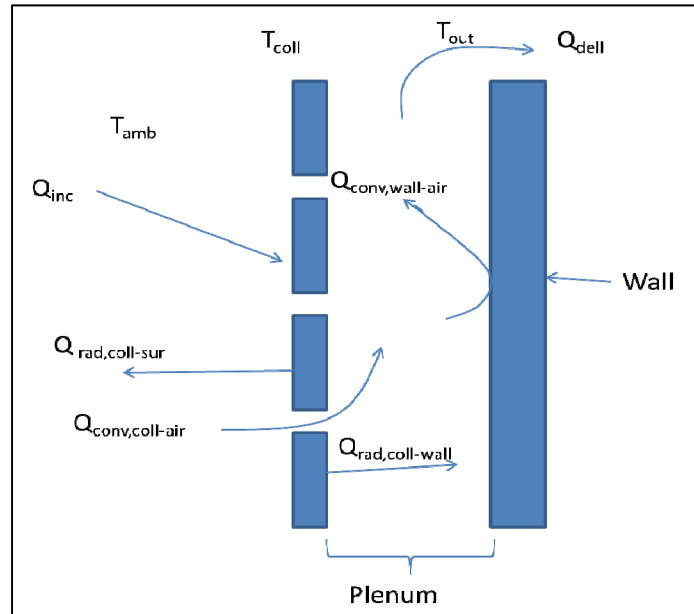


Figure 1.3 Bilan thermique sur l'UTC.

La signification physique des variables de la figure 1-3 est la suivante :

Q_{dell} : la puissance utile extraite du capteur perforé.

$Q_{conv,wall-air}$: l'énergie transférée du ou au mur pendant la circulation de l'air dans le plenum.

Q_{inc} : l'énergie solaire incidente frappant la surface de l'absorbeur.

$Q_{rad,col-wall}$ et $Q_{rad,col-sur}$: les pertes thermiques par rayonnement échangée entre l'absorbeur et le mur extérieur du bâtiment et vers l'ambiance extérieure respectivement.

Tel que mentionné précédemment, le capteur reçoit un rayonnement solaire global (direct et diffus), mais celui-ci n'est pas totalement récupéré dû aux différentes pertes thermiques existantes dans le capteur perforé. Pour une puissance de rayonnement solaire donnée, la fraction de l'énergie récupérée varie en fonction de la différence de température ambiante et de la température de l'air à la sortie de l'absorbeur. Par conséquent, le rendement du capteur solaire peut être défini comme étant la fraction d'énergie solaire ($G_T.A_{coll}$) convertie en énergie thermique utile (Q_{dell}).

$$\eta_{coll} = \frac{\text{puissance thermique utile par m}^2 \text{ de capteur}}{\text{le flux solaire incident sur le capteur}}$$

Cette définition se traduit par l'expression :

$$\eta_{coll} = \frac{Q_{dell}}{G_T \cdot A_{coll}} \quad (1.1)$$

La méthode la plus simple pour évaluer le rendement d'un capteur d'air perforé est d'exposer le capteur à la radiation solaire, puis on mesure les gains de chaleur générées. Pour déterminer les gains de chaleurs dégagées par le capteur qui seront transmises au bâtiment, il est nécessaire de mesurer le débit ($\dot{m}$) et la température (T_{out}) de l'air en aval du ventilateur

$$Q_{dell} = \dot{m}cp(T_{out} - T_{amb}) \quad (1.2)$$

Le rendement du capteur perforé devient :

$$\eta_{col} = \frac{\dot{m}cp(T_{out} - T_{amb})}{G_T \cdot A_{coll}} \quad (1.3)$$

L'efficacité du transfert de chaleur ε_{Hx} est le deuxième paramètre en importance dans les capteurs solaires à perforations. Cette efficacité est définie comme étant le rapport du taux de transfert de chaleur utile par le taux de transfert de chaleur maximum possible, Q_{dell}/Q_{max} . Cette définition se traduit par l'expression donnée par Kutscher (1992) :

$$\varepsilon_{Hx} = \frac{T_{out} - T_{amb}}{T_{coll} - T_{amb}} \quad (1.4)$$

Finalement, il existe un certain nombre de moyens par lesquels les performances des capteurs peuvent être améliorées

1. par augmentation de la chaleur reçue par l'absorbeur en augmentant la part du rayonnement absorbé (revêtement de l'absorbeur d'une teinture noire mate).

2. par diminution des pertes de chaleur vers les zones non réceptrices (nécessité d'une bonne isolation).

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Introduction

La revue de la littérature exposée dans ce chapitre est un survol des travaux jugés pertinents pour cette étude. On abordera en premier lieu les travaux effectués sur la théorie du transfert de chaleur des UTCs. Par la suite, les travaux reliés à l'efficacité du transfert de chaleur seront présentés. Ceci sera suivi par une courte description des outils d'analyse des systèmes d'UTCs.

Trois organismes ont joué un rôle majeur dans le développement des UTCs. Le Centre National d'essais d'équipements solaires (CNEES) du gouvernement fédéral, le laboratoire de recherche solaire thermique (STRL) de l'Université de Waterloo financé par Ressources Naturelles Canada et le laboratoire national d'énergies renouvelables (NREL) du département américain de l'énergie.

La recherche sur les UTCs a pris son envol au cours des années 80. Ces recherches initiales ont principalement mis l'accent sur la compréhension des phénomènes de transfert de chaleur se produisant à travers les plaques perforées. Les principaux objectifs des différentes études étaient d'améliorer la transmission de la chaleur et la diminution du coût du capteur destiné au chauffage solaire de l'air. Toutefois, les plus importantes études à ce jour sur le chauffage solaire de l'air par les UTCs ont été faites par Kutscher, Christensen et Barker (1993). Ils ont effectué une analyse théorique, numérique et expérimentale du transfert de chaleur, sur des capteurs à faible porosité. Dans ces études, Kutscher et coll. ont pu déterminer plusieurs paramètres influençant les performances de l'UTC.

Plus récemment, les chercheurs ont consacré leurs efforts sur l'amélioration de l'efficacité du transfert de chaleur (ϵ_{HX}) dans des conditions expérimentales plus représentatives des conditions réelles d'opération ainsi que le développement de modèles mathématiques (Leon et Kumar, 2007) et l'utilisation des méthodes de calcul basé sur la dynamique des fluides numériques (méthodes CFD) (Gunnewiek, Brundrett et Hollands, 1996).

2.2 La théorie du transfert de chaleur

Sparrow et Ortiz (1982) ont été parmi les premiers chercheurs qui ont étudié le transfert de la chaleur sur les plaques perforées. Leur objectif était de déterminer les coefficients de transfert de chaleur entre la plaque absorbante et l'air ambiant. Afin d'atteindre cet objectif, ils ont effectué des expériences sur des plaques perforées uniformément avec arrangement triangulaire. Ils ont obtenu une expression pour le nombre de Nusselt (Nu) en fonction de l'espace entre les trous (P), le diamètre des trous (D) et le nombre de Reynolds (Re_D) avec une vitesse (V_{wind}) égale à zéro. L'expression donnant le nombre de (Nu_p) est donnée par l'équation ci-dessous.

$$Nu_p = 0.881 Re_D^{0.476} Pr^{0.33} \quad (2.1)$$

Toutefois, la corrélation donnée par l'expression (2.1) ne s'applique pas aux capteurs perforés du fait que la porosité était beaucoup plus élevée (14% à 22%) que celle des plaques généralement utilisés dans des capteurs perforés UTCs (0,1% à 0,5%) (Delisle, 2008).

Les mécanismes de transfert de chaleur pour les capteurs perforés ont été généralement modélisés par l'hypothèse d'une plaque perforée à section homogène. Un examen de la théorie du transfert de chaleur sur les plaques perforées est présenté par Kutscher et coll (1992). Ils ont fourni un simple bilan thermique sur les capteurs perforés exprimé par l'expression (3.2), et une équation pour la radiation basée sur la température du capteur

(T_{coll}), la température équivalente du ciel (T_{sky}) et la température du sol (T_{gnd}) exprimée par l'expression (3.3).

$$\rho C_p V_s (T_{out} - T_{amb}) = G_T \alpha_{col} - Q_{rad.col-sur} - Q_{conv.col-amb} \quad (2.2)$$

$$Q_{rad.col-sur} = \epsilon_{col} \sigma_{sb} (T_{col}^4 - F_{col.sky} T_{sky}^4 - F_{col.gnd} T_{gnd}^4) \quad (2.3)$$

Les résultats obtenus sont incorporés dans un modèle numérique pour le calcul de l'efficacité du transfert de chaleur (ϵ_{Hx}). Dans le même travail, ces auteurs ont montré analytiquement que :

- Les pertes thermiques par convection se produisent seulement dans la région de la plaque appelée « *starting length* » ou longueur d'entrée thermique. Dans cette région, la couche limite thermique, et de vitesse s'accroissent de plus en plus;
- Dans la région asymptotique où la couche limite thermique et de vitesse atteint une valeur constante car il n'est à aucun flux de chaleur qui parvient de la plaque absorbante a cette dernière;
- Il n'y a pas de perte thermique par convection dans la région asymptotique et que la quantité de chaleur perdue entre le capteur et le milieu ambiant ($Q_{conv,col-amb}$) est la chaleur perdue dans la région d'entrée thermique qui se produit le long du bord de la plaque absorbante;

Kutscher et coll. (1992) ont montré que les pertes de chaleur par convection naturelle à l'air ambiant sont négligeables par rapport à ceux de la convection forcée. Ils ont proposé une corrélation permettant d'estimer le coefficient de convection forcée entre le capteur et l'air ambiant:

$$h_{conv.col-amb} = 0.82 \cdot \frac{V_{wind} \cdot \gamma \cdot \rho \cdot c_p}{L \cdot V_s} \quad (2.4)$$

Par la suite, Kutscher, Christensen et Barker (1993) ont effectué des expériences sur plusieurs plaques isothermes de différentes épaisseurs, de diamètres et pas des perforations

différents. Ces plaques possédant un arrangement triangulaire étaient soumises ou non à l'influence du vent. La figure 3.1 représente le capteur perforé utilisé par Kutscher et coll. (1993). L'objectif de ces expériences était de fournir aux concepteurs des systèmes d'UTCs les dimensions optimales, du diamètre de perforations (D) et l'espace entre les perforations (P). Ainsi, une nouvelle expression du transfert de chaleur a été développée avec une erreur maximale de 9% par rapport aux résultats expérimentaux. Cette expression s'écrit :

$$Nu_D = 2.75 \left[\left(\frac{P}{D} \right)^{-1.2} \cdot Re_D^{0.43} + 0.011 \sigma \cdot Re_D \left(\frac{V_{wind}}{V_s} \right)^{0.48} \right] \quad (2.5)$$

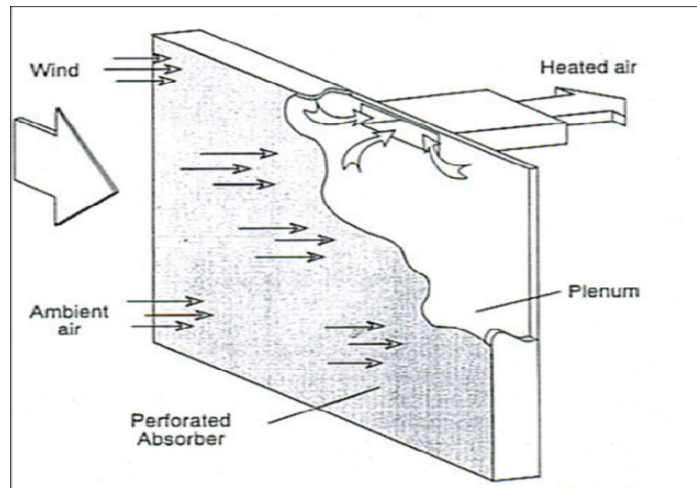


Figure 2.1 Capteur solaire perforé utilisé par Kutscher.
Tirée de Kutscher et coll. (1993).

Gunnawiek, Brundrett et Hollands (1996) de l'Université de Waterloo ont mené une étude, décrivant un outil d'analyse commercial spécialement conçu pour examiner la distribution du flux d'air dans le plénum, sous l'influence de la dépression créée par le ventilateur. Dans le but de déterminer l'importance des paramètres qui influencent le profil de vitesse de section, un modèle bidimensionnel a été développé avec des conditions aux limites spéciales imposées au plénum. Les résultats obtenus ont montré que la nature du profil de vitesse de section dépend des forces d'Archimède et du débit d'aspiration du ventilateur. Un flux

inverse est observé, avec un rapport (Q/A) inférieur à 0,0125 m/s, par conséquent un tel rapport est à éviter lors du dimensionnement du ventilateur.

Summers et coll. (1996), ont présenté une simulation de la consommation énergétique annuelle effectuée pour différents bâtiments avec le code TRNSYS (2009), dont l'UTC est simulé par l'utilisation d'un simple modèle de bilan énergétique comme le montre la Figure 2.2. L'objectif de cette étude était de déterminer le potentiel économique de ce système en se basant sur la méthode d'analyse du cycle de vie de l'UTC. Une étude paramétrique est effectuée pour déterminer l'effet de différents paramètres climatique sur la performance des systèmes d'UTC. Summers et coll. (1996), ont trouvé que la plus importante variable climatique est l'intensité du rayonnement solaire (G_T). Ils ont mentionné dans cette étude, que les systèmes d'UTCs employés sur les bâtiments existants sont compétitifs avec les systèmes de chauffage utilisant l'énergie électrique, mais pas avec les systèmes utilisant le chauffage au gaz ou mazout, et qu'il n'y a pas de potentiel économique des UTC pour les bâtiments commerciaux, agricoles et industriels existants au Wisconsin. La raison de cette conclusion est que les systèmes d'UTC sur les bâtiments existants ne peuvent entrer en concurrence qu'avec le chauffage électrique. Malheureusement, ce dernier n'est pas largement utilisé dans les bâtiments commerciaux, agricoles et industriels existants au Wisconsin.

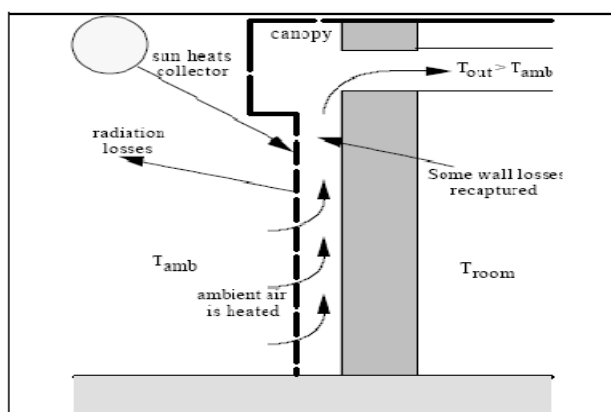


Figure 2.2 Modèle de bilan énergétique proposée par Summers et coll.
Tirée de Summers et coll. (1996)

2.3 L'efficacité des capteurs perforés

Après un examen de plusieurs documents présentant différents modèles d'efficacité du transfert de chaleur, on remarque que Kutscher et coll. (1993) ont été les premiers à développer un modèle prédictif de l'efficacité des capteurs perforés. Ils ont constaté que l'efficacité du transfert de chaleur ε_{HX} est pratiquement constante et indépendante de la vitesse du vent pour des vitesses de section supérieure à 0,05 m/s, et que des résultats satisfaisants peuvent être obtenus si on définit un coefficient de transfert de chaleur global basé sur la différence de température logarithmique moyenne (DTLM), et non pas à ce lui définie par les surfaces des perforations.

$$\varepsilon_{HX} = 1 - e^{\frac{-UA}{\dot{m}Cp}} \quad (2.6)$$

Arulanandam et coll. (1999), ont publié un article, dans lequel un modèle mathématique est développé pour un élément représentatif de l'absorbeur. Cet élément comprend, un trou et la moitié de la distance de la région entre deux trous adjacents. Un code CFD est utilisé, pour déterminer l'efficacité de l'UTC, pour un arrangement carré des perforations. Les simulations ont été réalisées sur un large éventail de conditions sauf pour la vitesse du vent, qu'ils ont considéré nulle. Les résultats sont incorporés dans un modèle numérique, cependant le modèle est limité dans son utilisation en raison de cette hypothèse. Malgré tout, ce dernier lorsqu'il est utilisé en parallèle avec des données expérimentales, il peut, être employé sur un large domaine d'application.

À la suite des études de Kutscher (1994) sur l'efficacité des capteurs, Van Decker, Hollands et Brunger (2001) ont mené des expériences avec le même dispositif expérimental que celui utilisé par Golneshan (1995). Ils ont étudié neuf plaques avec différentes conditions opératoires (matérielles, diamètres, espace entre les trous, épaisseur et conductivité thermique de la plaque absorbante). Un modèle prédictif de l'efficacité de l'UTC était développé par division de la région totale du transfert de chaleur en trois régions distinctes.

Une région correspondant à l'avant de la plaque, une région associée à la perforation, et une région incluant l'arrière de la plaque. L'efficacité du transfert de chaleur totale, ε_{Hx} , est la contribution des efficacités des trois régions, soit en face de l'absorbeur (ε_f), dans la perforation (ε_h) et à l'arrière de la plaque (ε_b). Ces différentes efficacités sont données par les expressions suivantes :

$$\varepsilon_f = \frac{T_{01} - T_{amb}}{T_p - T_{amb}} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_h = \frac{T_{02} - T_{01}}{T_p - T_0} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_b = \frac{T_0 - T_{02}}{T_p - T_{02}} \quad (2.9)$$

L'efficacité totale est :

$$\varepsilon_{Hx} = 1 - (1 - \varepsilon_f)(1 - \varepsilon_h)(1 - \varepsilon_b) \quad (2.10)$$

Van Decker, Hollands et Brunger (2001), ont constaté que, sous certaines conditions de fonctionnement de l'UTC, la face avant contribue à environ 62% de l'augmentation de température de l'air, 28% de l'augmentation se produit lors du passage de l'air dans la perforation et l'arrière de la plaque contribue à seulement 10% de l'augmentation de température.

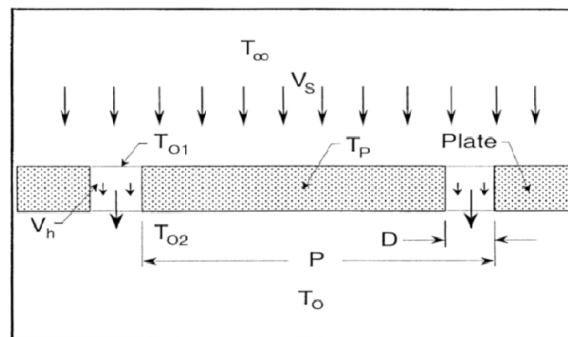


Figure 2.3 Configuration du modèle proposé par Van Decker.
Tirée de Van Decker et coll. (2001)

Mentionnons l'étude réalisée par Fleck, Meier et Matovic (2002) qui ont mis en place un montage expérimental pour étudier l'effet du vent sur la performance d'un UTC commercialisé sous le nom de « *Solarwall* ». Dans cette étude, un anémomètre ultrasonique est placé au centre du capteur *Solarwall* pour étudier l'écoulement tridimensionnel du vent près du mur. Ensuite une analyse statistique a été faite. Cette analyse suggère que la direction du vent a une influence sur le rendement et l'efficacité du système de chauffage. Cette efficacité est généralement supérieure lorsque le vent s'écoule perpendiculairement au mur comparativement au cas où le vent s'écoulerait parallèlement au mur.

L'étude de Gawlik, Christensen et Kutscher (2005) est également digne d'être mentionnée. Une détermination numérique et expérimentale des performances des UTC à faible conductivité thermique y est présentée. Le travail numérique consistait dans la modélisation de la géométrie et la conductivité de l'absorbeur avec un nouvel outil d'analyse numérique. Le travail expérimental consistait dans la comparaison des performances de deux absorbeurs l'un à haute conductivité thermique et l'autre à conductivité thermique faible. Les résultats obtenus ont montré que les performances des deux absorbeurs sont pratiquement identiques et l'effet de la conductivité thermique sur les performances des UTCs est très faible, ce qui confirme les observations de Van Decker et Hollands.

Récemment, Leon et Kumar (2007) ont développé un modèle mathématique sur une échelle étendue de conditions opératoires. Ce modèle est basé sur les équations de bilan thermique et les corrélations empiriques du transfert de chaleur données par Kutscher (1994). En tenant compte du transfert de chaleur sur l'absorbeur, le plénum d'air et les différentes parties du capteur solaire tel, qu'illustrés dans la même étude, les résultats du modèle ont été analysés afin de prédire l'effet des paramètres clés sur les performances thermiques du mur solaire pour des températures de sortie entre 45 °C et 55°C.

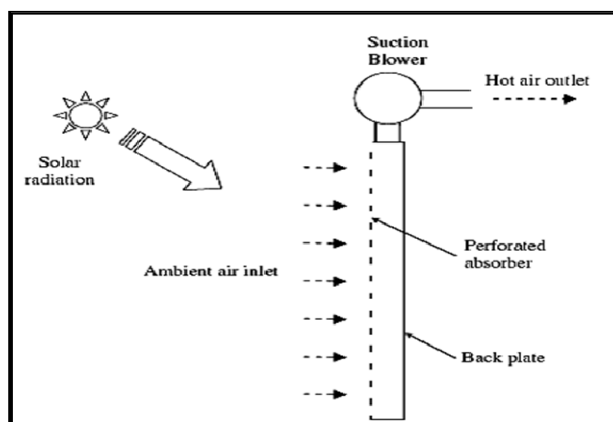


Figure 2.4 Configuration du modèle Leon et Kumar.
Tirée de (Leon et Kumar, 2007)

2.4 Les outils d'analyse des systèmes de chauffage solaire de l'air

Deux modèles ont été développés par Enermodal Engineering au profit de Ressources Naturelle Canada (NRcan), pour faciliter la conception des UTCs. Ces modèles, sont connus sous les noms de RETScreen et Swift.

Le modèle RETScreen (2009) permet l'analyse des projets de chauffage solaire de l'air et contient six feuilles de calcul. Une feuille de calcul reliée au modèle d'analyse énergétique, l'évaluation de la ressource solaire, l'analyse des coûts, l'analyse des réductions d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et une dernière feuille de calcul permettant à l'utilisateur d'obtenir un sommaire financier. RETScreen permet d'évaluer la production d'énergie, la viabilité financière et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre pour deux applications de base soit le chauffage de l'air de ventilation et le chauffage de l'air de procédé.

L'approche de RETScreen est basée sur des corrélations empiriques et l'évaluation mensuelle des performances des systèmes de chauffage. Par contre, l'approche de Swift (2009) est basée sur calcul des performances du système sur une base horaire avec des équations issues des principes fondamentaux de la thermodynamique.

Carpenter et Meloche (2002) ont démontré par une série de simulations pour différents bâtiments que les modèles RETScreen et Swift donnent des résultats similaires.

Il est très important de mentionner une étude publiée par Gogakis (2005). Une comparaison des résultats de simulation des deux modèles (RETScreen et Swift) y est présentée. L'étude conclue que le modèle RETScreen offre une meilleure approche dans le calcul de l'énergie solaire absorbée parce qu'il convertit le rayonnement solaire horizontal global en une irradiance solaire plane verticale selon la théorie de Liu et Jordan (1961) alors que le modèle Swift est plus fiable dans le calcul des gains de chaleur repris dans le bâtiment par le système de chauffage. Il a montré aussi que la différence d'économies d'énergie entre les deux modèles était de l'ordre de 10%.

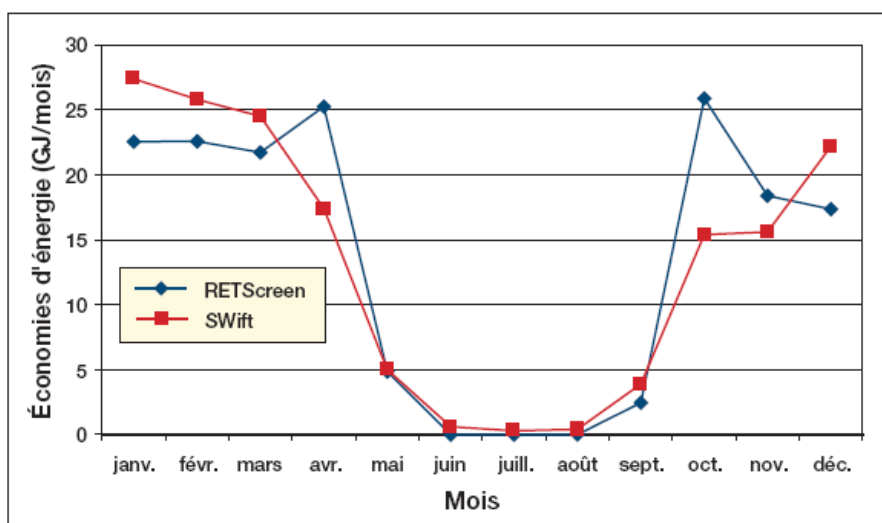


Figure 2.5 Comparaison des économies d'énergie annuelles calculées par RETScreen et Swift (bâtiment industriel, Toronto).

Tirée de (RETScreen, 2009)

Outre ces deux modèles, le modèle TRNSYS, qui est un environnement intégré de simulation, élaboré par le Laboratoire de l'énergie solaire de l'Université du Wisconsin, a été conçu pour modéliser les performances des systèmes d'énergie thermique.

Carpenter et Meloche (2002) ont mis au point un modèle sur TRNSYS pour prévoir les performances d'un système photovoltaïque-UTC. Ils ont monté une cellule photovoltaïque au-dessus d'un capteur de surface ondulée. Avec cette configuration, Carpenter et Meloche ont constaté que l'adjonction de cellules PV sur l'UTC a diminué les économies d'énergie thermique de 5,9% mais que 13,6% de l'énergie thermique des économies pourraient être récupérés dans la production d'électricité par la cellule photovoltaïque.

Les recherches entreprises au NREL sur les capteurs perforés ont permis le développement d'un nouveau modèle de simulation numérique appelé TSCFLOW développé par Dymond et Kutscher (1997). La circulation de l'air à l'intérieur du capteur est modélisée comme si elle était limitée à des flux dans un réseau de conduits d'air fictifs connectés entre eux. L'intérêt de l'utilisation de ce modèle réside dans le fait qu'il est simple et qu'il peut facilement manipuler les corrélations des pertes de pression et de l'efficacité d'échange de chaleur au sein du capteur solaire. La figure 3.6 présente un réseau de canalisation utilisé pour modéliser le capteur. Chaque nœud représente l'intersection de cinq conduits, quatre correspondent aux flux dans le plenum et le cinquième correspond au flux d'air venant de l'extérieur du capteur.

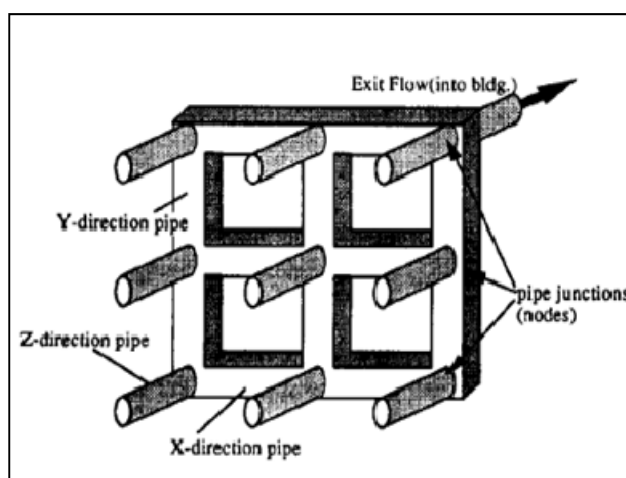


Figure 2.6 Réseau de conduites fictives développées par Dymond et Kutscher.
Tirée de (Dymond et Kutscher, 1997).

CHAPITRE 3

CONVERSION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE DANS LE BÂTIMENT

3.1 Introduction

L'énergie solaire est transmise à la terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnement électromagnétique. Cette énergie peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés. Comparée aux différentes formes d'énergies classiques existantes, l'énergie solaire possède les avantages suivants :

- Après avoir recouvré les coûts initiaux de l'installation, l'énergie solaire est pratiquement gratuite;
- L'utilisation de l'énergie solaire remplace l'énergie fossile non propre;
- L'utilisation de l'énergie solaire permet de diminuer de façon significative les émissions des gaz à effet de serre;

L'énergie du soleil peut être utilisée de différentes façons en employant trois grandes technologies soient, l'énergie solaire passive, l'énergie solaire active et l'énergie photovoltaïque.

L'énergie solaire passive

Elle remplace avantageusement les énergies conventionnelles utilisées pour chauffer ou refroidir les bâtiments. L'énergie solaire passive, capable de fonctionner seule sans apport d'énergie extérieure, elle utilise l'architecture des bâtiments, l'orientation des murs, toits et fenêtres pour capter les rayons du soleil.

L'énergie photovoltaïque

Par l'utilisation de panneaux photovoltaïques, une partie du rayonnement solaire est directement transformée en électricité. Ces panneaux solaires sont composés de cellules

photovoltaïques constituées principalement de silicium. Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques se nomme effet photoélectrique, qui consiste à l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière. Cette production d'énergie électrique peut alors être stockée dans des batteries ou converties à l'aide d'un onduleur pour être distribuée dans le réseau électrique.

L'énergie solaire active.

À l'aide de capteurs solaires, le capteur solaire actif transforme les rayons solaires en énergie thermique. Il emploie une source d'électricité supplémentaire pour actionner des pompes ou des ventilateurs qui distribuent l'énergie solaire à l'intérieur du bâtiment. Celle-ci est acheminée vers un autre endroit, où elle sera utilisée immédiatement ou stockée en vue d'un usage ultérieur. Le transfert de chaleur s'effectue au moyen d'un fluide caloporteur, qui peut-être de l'eau, de l'antigel ou de l'air. Au Canada, on utilise les systèmes solaires actifs principalement pour le chauffage de l'air et de l'eau. Il existe d'autres applications telles que la climatisation, le séchage de produit, la détoxification d'eau contaminée et la production d'énergie électrique d'origine thermique. Les systèmes solaires actifs ont plusieurs applications. Essentiellement, on distingue deux grandes catégories. Le système de chauffage solaire de l'eau, et le système de chauffage solaire de l'air qui est le thème de cette étude.

3.2 Le système UTC de chauffage solaire de l'air

Parmi les techniques les plus répandues pour capter l'énergie solaire actif dans le bâtiment, on peut distinguer le système de chauffage solaire de l'air à plaque perforée parfois appelé capteur solaire non vitré (UTC). Constitué d'une plaque perforée généralement en aluminium ou en acier galvanisé de couleur foncée, la plaque peut-être uniforme, ondulée ou de forme trapézoïdale. La forme trapézoïdale est utilisée pour augmenter la rigidité de la structure du mur solaire. Ce système est disponible en un large éventail de couleurs correspondant à l'esthétique du bâtiment. Il peut être installé soit sur la face verticale sud ou sur le toit du bâtiment. La figure 2.1 présente une plaque perforée typique disponible sur le marché.



Figure 3.1 Plaque noire perforée de Matrix Energy.

Tirée de Matrix Energy (2008)

3.3 Description des systèmes de chauffage solaire de l'air

Un système de chauffage solaire de l'air comprend deux parties : un capteur solaire monté sur la façade sud du bâtiment et un système de distribution d'air. Ce dernier se compose d'un ventilateur permettant l'aspiration de l'air extérieur à travers le mur, une conduite de distribution et un registre de recirculation d'air, comme illustré à la figure 2.2. Tel que mentionné précédemment, le capteur solaire UTC est constitué d'une plaque uniforme ou ondulée de couleur foncée et perforée uniformément. Ces perforations de quelques millimètres de diamètre permettent l'admission de l'air provenant de l'extérieur du bâtiment à travers la plaque. Cet air s'échauffe par contact avec la plaque perforée avant d'être introduit dans le bâtiment. L'air réchauffé est ensuite dirigé à travers un plénum situé entre le mur du bâtiment et la plaque (l'absorbeur), pour ensuite être acheminé vers le distributeur d'air situé juste à l'entrée de la gaine de distribution d'air. L'admission de l'air est assurée par un ventilateur d'aspiration qui impose typiquement une dépressurisation de quelques dizaines de pascals. Cet air est distribué dans les conduits de ventilation à l'intérieur du bâtiment, déstratifiant l'air chaud accumulé au plafond, réduisant ainsi les pertes de chaleur par la toiture (RETScreen, 2009).

Durant les jours ensoleillés, la température de la plaque perforée augmente au-dessus de la température de l'air ambiant, pouvant atteindre, jusqu'à 30°C à 40 °C, dépendant du débit d'air aspiré par le ventilateur.

Selon le programme de l'Shc (IEA, 1999), les UTCs fonctionnent par temps nuageux, car le rayonnement diffus peut représenter jusqu'à 25% de la radiation solaire totale. La neige peut refléter jusqu'à 70% du rayonnement solaire direct et 40% sera dirigée vers la surface extérieure du capteur solaire, augmentant ainsi la performance de l'UTC.

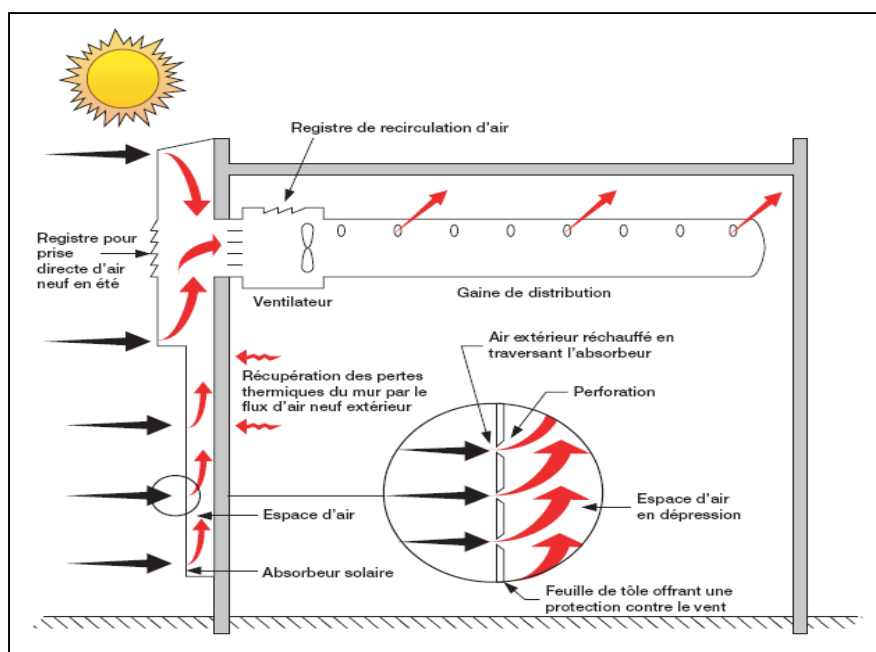


Figure 3.2 Représentation schématique d'un système de chauffage solaire de l'air.
Tirée de (RETScreen, 2009)

3.4 Contrôle des capteurs perforés

La figure 2.3 montre un système de contrôle de la température de l'air de préchauffage. On remarque que le système de distribution est pourvu d'un ventilateur à débit constant, relié avec des canalisations perforées qui permettent d'acheminer l'air d'appoint dans les différents

secteurs du bâtiment qui nécessitent de la ventilation. Et un ensemble de registres de circulation servant à contrôler le mélange de l'air en provenance du capteur solaire perforé et de l'air de reprise.

Le contrôle de la température de l'air à l'entrée du bâtiment est assuré par un thermostat placé à la sortie du ventilateur. Des registres de circulation s'ouvrent et de se ferment selon la demande en air chaud du bâtiment. Le système est conçu pour se passer entièrement du capteur solaire (UTC), si la température extérieure de l'air ambiant est supérieure à une température de consigne, en se servant des registres permettent l'admission directe de l'air à partir de l'extérieur du bâtiment. Par contre si la température de l'air provenant de l'UTC se maintient au-dessous d'une certaine température préétablie, un contrôle de la température est requis. Cet air est mélangé avec une portion de l'air de reprise à l'intérieur du bâtiment. Par conséquent, de basses températures de l'air en provenance de l'UTC signifient une proportion plus grande de l'air de reprise (Shc. IEA, 1999) ou l'ajout d'un serpentin de chauffage dans la conduite.

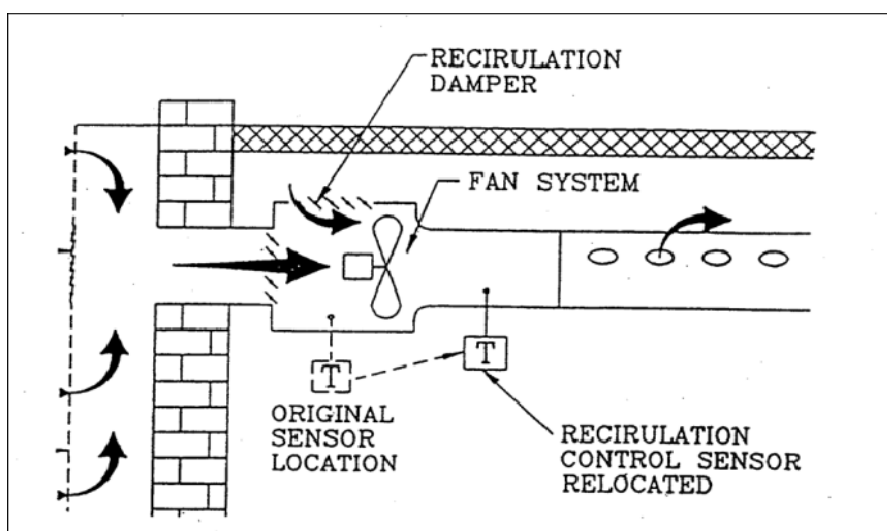


Figure 3.3 Système de contrôle de la température.
Tirée de (Shc. IEA, 1999)

3.5 Classement des systèmes d'UTCs

Les systèmes de chauffage solaire de l'air sont classés en fonction des types de bâtiments à ventiler. Ils peuvent être divisés en trois catégories :

3.5.1 Systèmes d'UTCs de bâtiment commercial et résidentiel

Généralement dans les bâtiments commerciaux et résidentiels, déjà conçus avec un système de ventilation, il n'est généralement pas nécessaire d'envisager l'ajout des ventilateurs ou des conduits supplémentaires pour se contenter au système solaire. Le capteur solaire peut s'adapter au niveau de la prise d'air neuf du système conventionnel de ventilation. Les UTCs préchauffent l'air neuf de ventilation avant de l'introduire dans le bâtiment, environ 10 à 15% du flux d'air total. Lors des journées fraîches et ensoleillées, l'UTC peut aisément fournir toute la chaleur nécessaire pour assurer les besoins du bâtiment en air chaud. Durant l'hiver, un serpentin de chauffage permet de fournir la quantité de chaleur supplémentaire nécessaire.

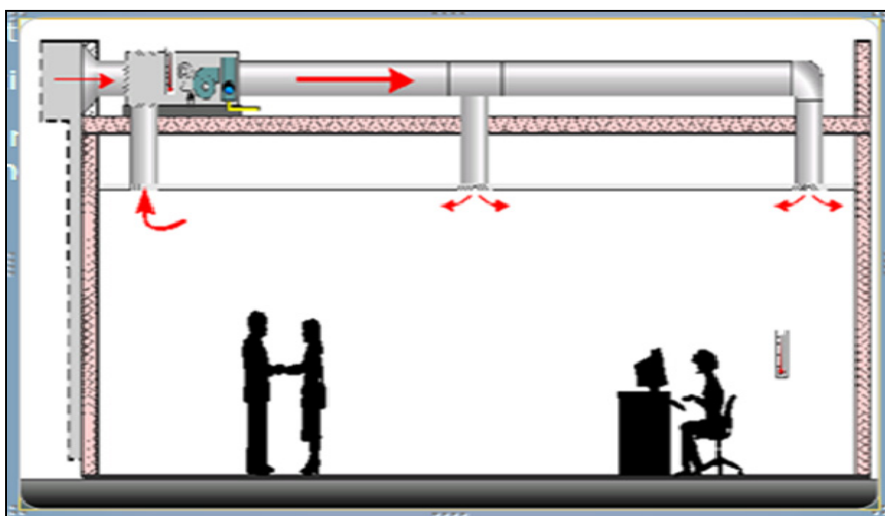


Figure 3.4 Chauffage solaire de l'air, pour bâtiment commercial et résidentiel.
Tirée de (RETScreen, 2009)

3.5.2 Systèmes d'UTCs des bâtiments industriels

Pour remplacer l'air issu des opérations industrielles, le système de chauffage solaire de l'air doit fournir de grands volumes d'air de ventilation. Dans les bâtiments industriels ayant de grandes hauteurs de plafond, l'air chaud s'accumule sous le toit, ce qui provoque un phénomène de stratification. L'installation d'un système de chauffage solaire de l'air permet de diminuer ce phénomène en mélangeant l'air neuf de ventilation avec l'air chaud coincé sous le plafond. La différence entre ce système de chauffage, et le système de chauffage solaire de l'air des bâtiments commerciaux et résidentiels, réside dans trois points :

- Le débit d'air dans le capteur solaire destiné aux bâtiments industriels varie alors que dans les systèmes de type commercial ou résidentiel, le débit est constant;
- Dans les systèmes commerciaux, l'UTC est raccordé à la conduite de la prise d'air neuf du système conventionnel de ventilation, alors que dans les systèmes de type industriels, les conduits de distribution de l'air neuf sont fournis avec l'UTC;
- Dans ce système on admet des températures d'air de distribution au dessous de la température de consigne, du fait que ce dernier sera mélangé avec l'air chaud accumulé sous le plafond.

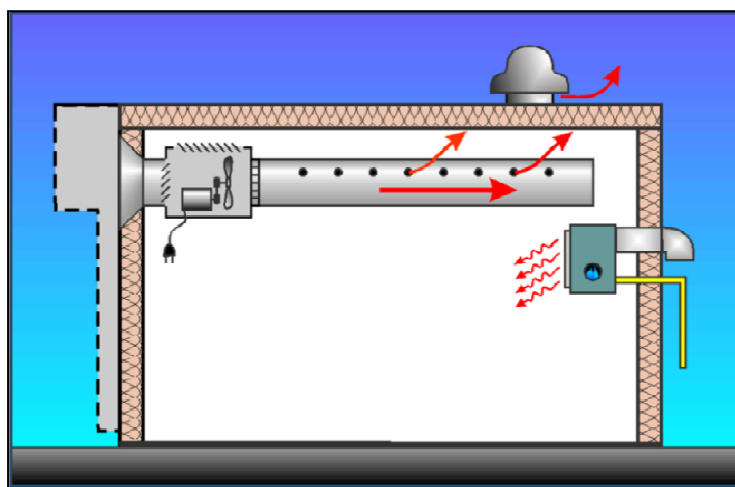


Figure 3.5 Projet CSA sur un bâtiment industriel.
Tirée de (RETScreen, 2009)

3.5.3 Systèmes d'UTCs pour procédés industriels

Dans les systèmes d'UTC destinés aux procédés industriels, l'air préchauffé est introduit directement dans le procédé industriel, ce qui signifie qu'il n'y a pas de registre de mélange. Un débit d'air constant est aspiré à travers le capteur et est amené au procédé avec une température de référence. Le séchage de produits agricoles et l'air de combustion sont des applications typiques des systèmes UTC. Le lecteur intéressé par des exemples d'applications de ces systèmes est invité à consulter l'annexe IV.



Figure 3.6 Station d'épuration des eaux usées: Alberta Cold Lake.
Tirée de (RETScreen, 2009)

3.6 Revêtement de l'absorbeur

La faisabilité économique et l'exploitation de l'énergie solaire par les systèmes de chauffage solaire de l'air dépendent principalement de l'efficacité de ces derniers. Cependant, l'efficacité est limitée par les pertes thermiques par convection et par rayonnement se produisant au sein de l'absorbeur (plaque perforée).

Un des éléments principaux pour la rentabilité économique de cette technologie est la qualité de l'absorbeur. Cet élément essentiel du capteur solaire, doit avoir la capacité de capter le

maximum d'énergie solaire incidente tout en limitant les pertes sous forme de rayonnement infrarouge.

D'une manière précise, l'exploitation efficace de l'énergie thermique provenant du soleil nécessite une surface d'absorption efficace. Puisque les surfaces métalliques tendent à réfléchir une partie de la lumière incidente, il est possible d'accroître leur efficacité par des revêtements sélectifs qui ont la capacité de combiner deux fonctions en même temps. D'une part, permettre l'absorption de la quasi-totalité du rayonnement solaire incident et d'autre part minimiser les pertes par rayonnement vers l'environnement extérieur.

Au niveau du sol, la plus grande portion du rayonnement solaire incident se situe pour des longueurs d'onde comprises entre $0,3\ \mu\text{m}$ et $2,5\ \mu\text{m}$. Un absorbeur efficace devra posséder un coefficient d'absorption élevé ($\alpha \geq 0,9$) sur cette intervalle. De plus, la température typique d'un absorbeur se situe généralement entre $0\ ^\circ\text{C}$ et $60\ ^\circ\text{C}$. De façon à minimiser les pertes par rayonnement, un absorbeur devra idéalement avoir une faible émissivité ($\epsilon \leq 0,1$) pour des longueurs d'onde supérieures à $2,5\ \mu\text{m}$ (Peuser, 2005).

Les revêtements des capteurs solaires peuvent être classés en deux catégories :

- Revêtements sélectifs;
- Revêtements non sélectifs.

3.6.1 Revêtement non sélectif

La grande majorité des UTC actuellement installées au Canada, sont composés de revêtements non sélectifs. Ces revêtements non sélectifs sont simplement des peintures « standard » de couleur foncée. Ils ont l'inconvénient, par rapport aux peintures sélectives, d'avoir une émissivité beaucoup plus élevée pour des longueurs d'onde supérieures à $2,5\ \mu\text{m}$ ce qui fait en sorte qu'une portion significative de l'énergie reçue est réémise sous forme de rayonnement infrarouge vers l'environnement extérieur.

3.6.2 Revêtement sélectif

Un revêtement sélectif est une peinture spéciale déposée sur l'absorbeur d'un capteur solaire, qui peut retenir presque entièrement le rayonnement solaire incident auquel il est exposé et réduit simultanément les pertes par émission du rayonnement thermique de l'absorbeur vers l'ambiance extérieure.

La figure 2.7 montre l'émissivité en fonction de la longueur d'onde pour une surface sélective utilisée dans un capteur solaire. Cette figure montre que le rayonnement solaire est concentré aux longueurs d'onde relativement faible parce qu'elle est émise par une source à haute température (le soleil). Cependant, le capteur émet un rayonnement à des longueurs d'onde relativement élevé parce qu'il est froid par rapport au soleil. Par conséquent, une surface idéale d'un capteur solaire aurait une absorptivité (qui, conformément à la loi de Kirchhoff, est égale à l'émissivité) qui est élevée à basses longueurs d'onde afin de capter le maximum de rayonnement solaire et une émissivité faible aux longueurs d'onde élevée afin de minimiser les pertes de chaleur par radiation.

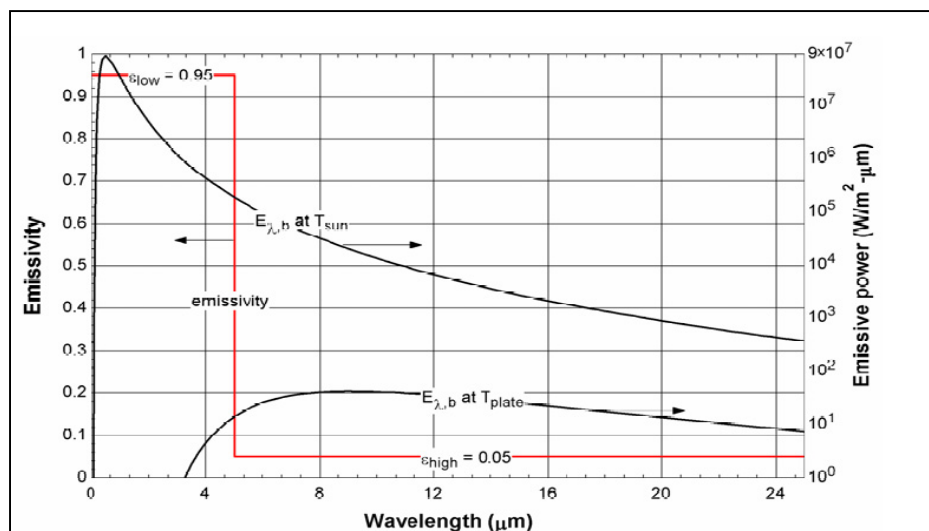


Figure 3.7 L'émissivité en fonction de la longueur d'onde d'une surface sélective d'un capteur plan.

Tirée de (Nellis, 2002)

Il existe différents types de revêtements sélectifs. Le Tableau 3.1 présente quelques exemples de revêtement, ainsi que les facteurs d'absorption et d'émission correspondants.

Tableau 3.1 Surfaces sélectives pour la conversion photo thermique à basse et à moyenne température

Tiré de (Spitz, 1984)

Substrat	Traitement	Dépôt	Facteur d'absorption	Facteur d'émissivité
Cuivre	Conversion	Cu-Cu ₂ O	0,85	0,1
Cuivre	Électrolyse	CrO _x	0,97	0,09
Aluminium	Conversion	CuO-CuO ₂	0,93	0,11
Acier	Électrolyse	CrO _x	0,95	0,13
Acier	Électrolyse	NiS-ZnS	0,95	0,07
Acier	Conversion	Fe ₃ O ₄	0,85	0,12
Cu nickelé	Électrolyse	CrO _x	0,98	0,15

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE DES PLANS EXPÉRIMENTAUX

Dans ce chapitre, nous allons définir la méthodologie des plan d'expériences à effectuer sur l'UTC afin d'atteindre les objectifs fixés dans le premier chapitre soit l'évaluation de l'influence des différents paramètres sur les performances thermiques de l'UTC. Les principales étapes qu'il convient de suivre pour la mise en œuvre de la technique des plans expérimentaux sont présentées comme suit :

- Définitions des objectifs;
- Définition des facteurs d'entrée (X_i) et de sortie (Y_i) étudiés et du domaine expérimental;
- Construction du plan d'expériences;
- Réalisation de l'expérimentation;
- Analyse statistique des résultats;
- Modélisation et optimisation de la fonction de réponse;
- Conclusion.

Pour atteindre ces objectifs, ce projet comporte également un volet expérimental dans lequel un prototype de mur UTC a été construit. Des mesures expérimentales de température, rayonnement et vitesse d'écoulement, selon la stratégie définie par le plan d'expériences permettront :

- L'affectation du traitement du plan d'expériences aux paramètres d'entrées, et d'en mesurer les réponses;
- L'évaluation expérimentale du rendement et de l'efficacité selon plusieurs conditions d'opération;
- La construction d'une matrice de données qui pourra être une plateforme pour l'analyse, à l'aide de l'outil statistique.

L'objectif du volet statistique consiste, d'une part, en la spécification et l'élaboration d'un modèle statistique représentant les performances de l'UTC et la compréhension du comportement de ce modèle vis-à-vis ces paramètres, de la cohérence entre le modèle et le système qu'il représente et de la manière dont ses différentes parties (paramètres) interagissent. D'autre part, le volet statistique permet la représentation graphique des performances thermiques de l'UTC et de leur optimisation.

4.1 Principe

Un plan expérimental peut-être défini comme suit : « ensemble des modalités selon lesquelles un programme expérimental doit être réalisé et choix des variantes (niveaux) d'un ou de plusieurs facteurs, ou des combinaisons de facteurs, à introduire dans l'expérience » (Dagnelie et coll. 2000).

Dans le cas présentement étudié (UTC), nous sommes confrontés à un problème complexe. En effet, de multiples paramètres sont susceptibles d'influer sur les performances du système. Les performances qu'on cherche à améliorer sont caractérisées par une ou plusieurs réponses (T_{out} , T_{abs}). Dans ce contexte, quels sont les paramètres responsables des variations des réponses observées, et quel est le domaine de validité pour chacun des paramètres retenus ? C'est-à-dire le domaine expérimental dans lequel on souhaite connaître l'influence de ces paramètres sur les performances de l'UTC.

Le plan d'expériences sert à mettre en évidence et à quantifier l'influence des paramètres pris en compte, suite à une série d'expériences planifiée de manière optimale. Une fois les essais réalisés, un modèle statistique peut être déterminé et validé. Celui-ci décrit le comportement de la réponse en fonction des différents paramètres retenus dans leurs domaines de validité.

4.2 Objectif

L'objectif assigné au plan expérimental élaboré dans cette étude, est de trouver le point de fonctionnement optimal de l'UTC. Il s'agit de quantifier l'influence des différentes conditions opératoires (rayonnement G_T), contraintes géométriques (diamètre des perforations de l'absorbeur) et contraintes d'exploitations (débit de l'air) sur ce dernier. Plus précisément, il s'agit de la mise en œuvre d'un plan d'expérience de type factoriel complet à trois niveaux pour la détermination du modèle polynomial d'ordre 2 représentant les performances thermiques de l'UTC et qui met en valeur l'influence des facteurs mentionnés précédemment. La meilleure stratégie consiste à choisir les points de mesures aux extrémités du domaine expérimental, le niveau bas du facteur est noté par « -1 », le niveau intermédiaire par « 0 » et le niveau haut par « 1 ». Le domaine de variation de chaque paramètre est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut. Une fois le modèle expérimental déterminé, il sera alors possible de prédire le rendement maximal et l'optimisation des conditions expérimentales de l'UTC.

4.3 Définition des paramètres

Cette étape est cruciale pour la mise en œuvre du plan expérimental. Elle consiste à identifier l'ensemble des facteurs influant les réponses de l'UTC. Les facteurs identifiés sont classés en trois types :

- Paramètres de contrôle;
- Paramètres bruits;
- Paramètres de réponse (sortie).

4.3.1 Paramètres de contrôle

Ce sont les paramètres dont le changement de niveau (-1, 0, 1) modifie l'état de la variable dépendante. Les connaissances préliminaires sur l'UTC sont essentielles afin de pouvoir

planifier l'expérimentation. Elles ont permis dans un premier temps de dénombrer de manière exhaustive les paramètres expérimentaux susceptibles d'influencer les performances de l'UTC. La revue de la bibliographie a permis de faire un inventaire de tous les paramètres importants. En tout, 11 paramètres ont été identifiés : 1) le diamètre des trous, 2) le pas entre les trous, 3) la porosité de l'absorbeur, 4) le type de revêtement de l'absorbeur, 5) et 6) la conductivité thermique et l'épaisseur de l'absorbeur, 7) l'arrangement des trous, 8) l'intensité du rayonnement incident, 9) la température ambiante, 10) le débit d'air aspiré par le ventilateur, 11) la vitesse du vent proximité de l'UTC et 12) l'espace entre l'absorbeur et le mur (plénum). Compte tenu du nombre important de paramètres de contrôle, il est difficilement envisageable de quantifier l'influence de tous les paramètres influençant les performances de l'UTC. Des contraintes matérielles et de temps, nous ont incités à fixer plusieurs paramètres de contrôle réduisant ainsi l'ordre du problème à étudier. Parmi les paramètres dont la valeur a été fixée, mentionnons le pas (P) entre les trous dans l'absorbeur. La variation de ce paramètre entre trois niveaux (-1, 0, 1) nécessite l'évaluation expérimentale des performances de neuf absorbeurs chacun constitué de 15570 trous ce qui aurait nécessité un temps considérable à mettre en œuvre. La vitesse du vent (V_{wind}) a également été fixée à zéro du fait que l'imposition d'une vitesse uniforme et constante sur l'absorbeur était difficile à réaliser avec le matériel expérimental à notre disposition.

D'autre part, si on prend en considération les contraintes liées à la méthode statistique, il est possible d'exclure la porosité de l'absorbeur (σ), puisqu'elle dépend du diamètre (D) et du pas entre les trous (P). Ceci nous a finalement conduit à réduire le nombre de paramètres pris en compte à 4 paramètres. Ces quatre paramètres identifiés comme étant susceptibles d'influencer les performances thermiques de l'UTC sont :

- Le diamètre des perforations;
- Le débit d'air à la sortie du ventilateur;
- Le rayonnement incident du simulateur de soleil;
- Le revêtement de l'absorbeur.

Ainsi, le nombre d'expériences retenues pour le conduit de ce plan expérimental, pour quatre facteurs et trois niveaux (bas, intermédiaire, élevé) correspondent à 3^4 (81) expériences comparativement à 3^{12} (531441) expériences pour l'étude de l'ensemble des paramètres. Le nombre d'expériences à réaliser est ainsi réduit de façon significative avec la diminution du nombre de variables prises en compte.

4.3.2 Paramètres bruits

Les paramètres bruits incluent tout les facteurs qui ne sont pas maîtrisables. C'est-à-dire les facteurs dont le niveau ne peut être réglé, mais dont la variation est susceptible d'avoir un impact sur les sorties du système à l'étude. Le facteur le plus important sur lequel il n'a pas été possible d'exercer un contrôle est la température ambiante du laboratoire (T_{amb}) où les expériences ont eu lieu.

La variation de la température ambiante a un impacte majeur sur les sorties du modèle de l'UTC du fait qu'elle est liée directement à la température de l'air à la sortie du ventilateur (T_{out}) et à la température de l'absorbeur (T_{abs}) qui sont les facteurs de sortie de l'UTC. En pratique l'ordre de grandeur de la variation de la température ambiante mesurée était de 23°C à 25°C.

4.3.3 Paramètres de réponses

Les grandeurs présumées avoir le pouvoir de décrire le comportement du système, suite à une variation ou changement des niveaux des grandeurs d'entrées. Ces grandeurs s'appellent les paramètres de réponse.

Les paramètres de réponses permettant la prédiction du comportement des performances thermique de l'UTC sont :

- La température de sortie de l'air (T_{out});
- La température de l'absorbeur (T_{abs}).

Les températures T_{out} et T_{abs} sont liés aux performances (efficacité et le rendement) de l'UTC par les équations (1.3) et (1.4) données dans le chapitre 1.

Dans ce cas, les réponses retenues seront le rendement et l'efficacité du transfert de chaleur de l'UTC. Ce choix est basé sur les travaux de plusieurs études parmi lesquelles on distingue l'étude de Kutscher et coll. (1993) et Van Decker et coll. (2001). Une fois (T_{out}) et (T_{abs}) mesurés, on détermine le rendement et l'efficacité qui leur correspond par les équations (4.1) et (4.2).

4.4 Domaine expérimental

Le domaine expérimental correspond aux valeurs limites entre lesquelles les différents facteurs vont être étudiés. Ce domaine doit être établi avec le maximum de précautions. Il arrive souvent que la définition de ce domaine demande quelques études complémentaires. Il faut s'assurer aussi que les plages de variation des paramètres de contrôle génèrent une variation significative des réponses et ainsi obtenir un modèle statistique pertinent. La procédure suivie pour définir le domaine expérimental est la suivante :

4.4.1 Contraintes expérimentales

L'intensité du rayonnement incident sur le capteur peut-être contrôlée en partie en réduisant la distance qui sépare le capteur du système d'éclairage. Cependant, une distance insuffisante aura comme conséquence de créer des zones d'intensité de rayonnement élevé conduisant à des températures du capteur plus ou moins uniforme. Plusieurs essais ont permis de déterminer la distance minimale admissible entre les lampes et le capteur. Les valeurs retenues de l'intensité du rayonnement des lampes sont 348 W/m^2 , 399 W/m^2 et 605 W/m^2 . Ces valeurs correspondent aux distances lampes-capteur 140 cm, 120 cm, 100 cm respectivement.

4.4.2 Contraintes d'appareillage

En se rapportant aux études de Leon et Kumar (2007) et Van Decker et coll. (2001), la plage de variation du diamètre des trous est comprise entre 0,8 mm et 3,6 mm. On aurait dû travailler avec des absorbeurs ayant les mêmes dimensions des diamètres. Comme les tôles perforées ne sont pas disponibles dans le marché avec cette géométrie, nous étions obligés de faire les trous par nous-mêmes, mais avec les dimensions suivantes (1,5 mm, 2 mm et 2,4 mm).

4.4.3 Renseignements bibliographiques

Les renseignements disponibles dans la littérature, ont été très utiles dans la caractérisation de certains paramètres, car ils ont permis de déterminer la plage typique de variation de ces derniers. Se rapportant aux résultats de l'étude (Kutscher, Christensen et Barker, 1993) le débit d'air sera fixé entre (0,011 kg/m².s et 0,04 kg/ m².s). Le Tableau 4.1 montre les niveaux des facteurs du plan d'expérience.

4.5 Construction du plan d'expériences

Une fois tous les paramètres sont identifiés ainsi que leur domaine expérimental, l'étape suivante consiste à préparer la liste des expériences à réaliser. La liste des expériences doit contenir toutes les combinaisons possibles des facteurs retenus à l'étude. Par conséquent, si 4 facteurs sont considérés à 3 niveaux (-1, 0, 1), un plan expérimental de 3⁴ expériences sera effectué. Chaque condition expérimentale est souvent représentée dans un tableau appelé « tableau des expériences » ou « matrice des expériences ». Le résumé des combinaisons possibles est donné à l'annexe II.

Après la construction du plan d'expériences, la réalisation des expériences a été menée suivant un ordre préalablement choisi. L'ordre de réalisation des essais doit tenir compte de la

difficulté de changement de niveau des facteurs. Dans la présente étude, on a organisé les essais de sorte que le niveau le plus difficile ne change qu'un nombre de fois minimum.

Tableau 4.1 Niveaux des facteurs du plan d'expériences

niveaux	Paramètres de contrôles			
	Revêtement	Diamètre D (mm)	Rayonnement G_T (W/m ²)	Débit $\dot{m}$ (kg/s)
-1 Minimum	Sans revêtement	1,5	348	0,011
0 Intermédiaire	sélective	2	399	0,025
1 Maximum	Noir	2,4	605	0,039

CHAPITRE 5

DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Introduction

Ce chapitre présente la description des éléments qui entrent dans la composition du mur solaire perforé et expose les choix effectués en fonction des objectifs tracés précédemment. La méthodologie expérimentale et les différents essais effectués y sont également présentés.

5.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental présenté à la figure 5.1 comprend essentiellement trois parties :

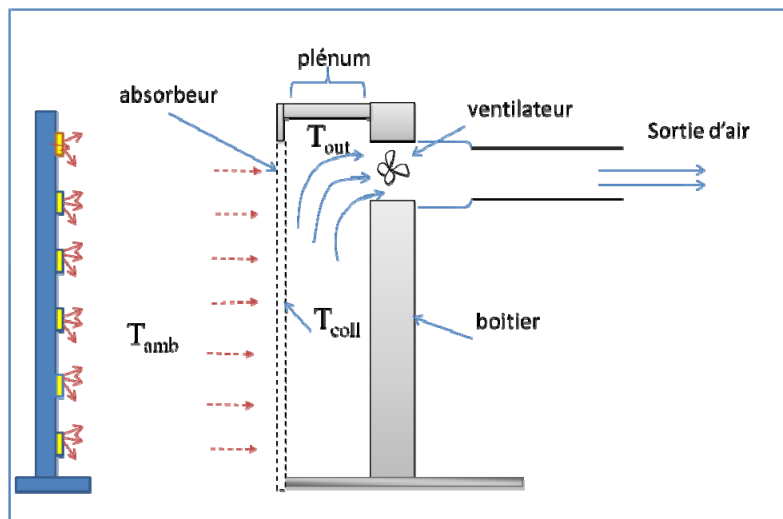


Figure 5.1 Coupe longitudinale de l'UTC construit au CTT.

1. Le capteur perforé sur lequel les performances thermiques seront mesurées. Ce capteur a été construit sur mesure au Centre de technologies thermiques (CTT). Il a été conçu comme une composante de façade. Positionné verticalement, ce capteur intègre les trois éléments suivants: capteur solaire, mur extérieur et isolant de façade. Il comprend un

boîtier réalisé en bois, de dimension $1,778 \text{ m} \times 0,60 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$. Le choix de ces dimensions découle des recommandations de l'étude de (Kutscher, 1992). Le capteur est couvert sur le côté exposé au rayonnement par une tôle perforée uniforme en acier galvanisé (absorbeur). Sur la face arrière, le capteur est muni d'une ouverture dans la partie supérieure pour la sortie de l'air d'aspiration. Il est également positionné sur une base, constitué de deux pieds en bois qui assurent un support et la stabilité de l'ensemble.

La partie arrière et les cotés du capteur sont conçus pour être intégrés à un mur porteur. Ils sont isolés du milieu extérieur pour limiter les pertes thermiques. Pour se faire, la partie non exposée au rayonnement (boîtier) est recouverte par une couche isolante de polystyrène de 3 cm d'épaisseur pouvant résister à des températures entre 80-90°C, Cette couche de polystyrène est renforcée a son tour par une couche de contre-plaqué 9,5 mm. La résistance thermique de l'ensemble est estimée à $12 \text{ m}^2\text{C/W}$.

2. Système d'aspiration d'air, l'air est guidé à travers le plénum entre l'absorbeur et le boîtier (15 cm d'épaisseur) pour être aspiré par un ventilateur de type axial (modèle DB206) d'un débit nominal de 160 CFM. Le choix du ventilateur dépend, des conditions opératoires recommandées par (Kutscher, Christensen et Barker, 1993). Le contrôle de la vitesse du ventilateur est rendu possible grâce à un variateur de vitesse modèle (3PN116B USA) branché sur une alimentation à courant alternatif de 110/120 volts et 60 Hz. La variation dans la résistance du variateur de vitesse modifie la vitesse du ventilateur ce qui permet à son tour la variation du débit d'écoulement de l'air dans l'UTC. En plus du ventilateur, le système d'aspiration d'air comprend un tuyau de 15 cm de diamètre et 150 cm de longueur, placé en aval du ventilateur. Une telle de dimension fut choisie afin de conduire l'air chaud le plus loin possible du banc d'essai, de sorte que la chaleur qu'elle dégage et qui se dissipe dans le local n'affecte pas les mesures de la température ambiante (T_{amb}) au voisinage du capteur.

3. Simulateur solaire (insolateur), il comprend 28 projecteurs de marque globe®-6550 chacun comprenant une ampoule T3/J-TYPE /78mm de 150 Watts, pour une intensité total de 4,2 KW. Le simulateur solaire a pour objectif de créer un soleil artificiel avec un spectre d'émission qui est comparable avec celui du soleil. Initialement des lampes au xénon à haute pression ou des lampes de type «*Metal Halide Short Arc* » ont été suggérées. Ces lampes possèdent un spectre d'émission qui s'approche beaucoup de celui du soleil. Cependant, du fait qu'elles sont très chères, difficile à trouver et qu'elles exigent des précautions de mise en œuvre spéciales, on a préféré utiliser des lampes halogènes "classiques". Ces lampes ont un spectre d'émission comparable à celui d'un corps noir à 3500 K. Les lampes doivent pouvoir produire une irradiance au niveau du capteur comprise entre 300 et 700 W/m² (Norme européenne. 2005). On peut généralement faire varier l'éclairement par la variation de la tension d'alimentation des lampes, en augmentant (ou diminuant) la distance lampes-capteur ou en modifiant l'angle d'incidence du flux lumineux (Dufresne, Lahellec et Chounet, 1990). Pour des raisons de simplicité de mise en œuvre et pour conserver une bonne uniformité de rayonnement incident sur toute la surface du capteur, l'intensité du rayonnement a été modifiée en changeant la distance lampes-capteur. Ce choix présente la solution idéale pour varier l'éclairement de l'insolateur à condition de conserver une bonne uniformité de la température de l'absorbeur.

Le capteur perforé et la source de lumière sont placés l'un en face de l'autre à une distance bien précise. Des tests préliminaires de la température de l'absorbeur sont faits pour déterminer la distance optimale pour laquelle il n'y aura pas des pics de température à la surface de l'absorbeur. La figure 5.2 montre le banc d'essai construit au CTT qui comprend le simulateur et le capteur solaire recouvert avec une peinture sélective.

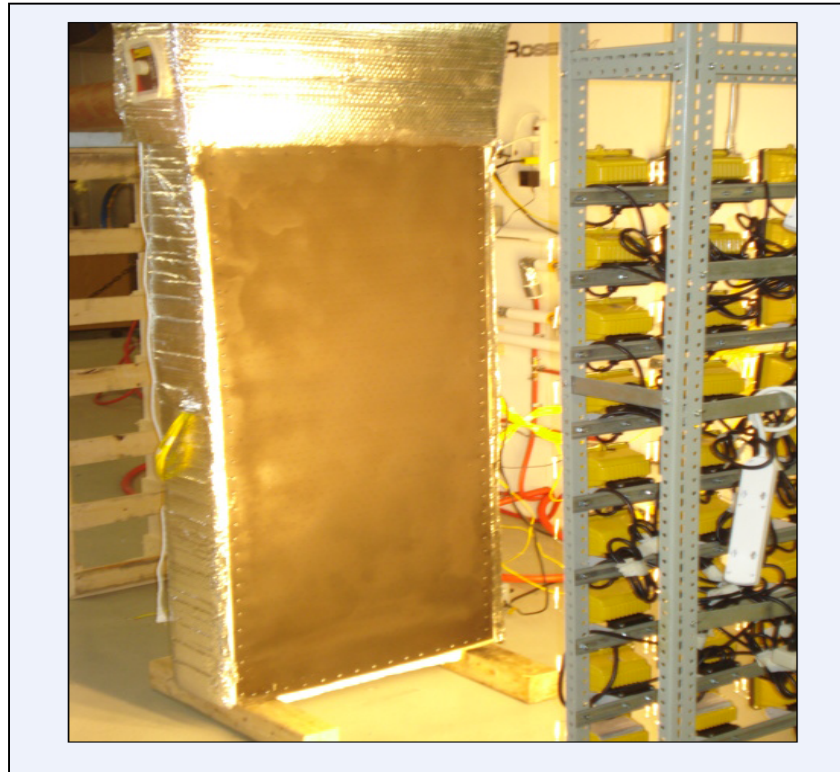


Figure 5.2 Photo de l'UTC construit au CTT.

5.2 Instrumentation

L'instrumentation doit permettre de mesurer les paramètres nécessaires à la réalisation des expériences. Les mesures effectuées concernent les données suivantes :

- flux du rayonnement global reçu par l'absorbeur (G_T);
- températures à différents endroits de l'absorbeur (T_{abs} , T_{amb} et T_{out});
- débit de l'air à la sortie du ventilateur ($\dot{m}$);
- émissivité de la couche extérieure de l'absorbeur (ϵ_{coll}).

Bien que certains paramètres nécessitent une grande précision de l'instrument de mesure, d'autres nécessitent certaines mesures relatives au montage et à l'emplacement de l'UTC. Par analogie aux exigences relatives aux tests des capteurs solaires (Afnor, 2005). Le capteur solaire doit être monté de manière spécifique avant d'être mis à l'essai.

- Il doit être monté de sorte que son bord inférieur se situe au moins à 0,5 m au-dessus de la surface du sol afin de réduire l'influence du rayonnement réfléchi par le sol;
- Il doit être également protégé des surfaces chaudes, telles que les radiateurs, les conduits et appareillages de conditionnement d'air, et des surfaces froides telles que les fenêtres et les parois extérieures;
- Il doit être monté de sorte que l'air puisse circuler librement au niveau du côté avant du capteur;
- La température des surfaces adjacentes au capteur doit être la plus proche possible de celle de l'air ambiant afin de réduire au minimum l'influence d'irradiance thermique.

5.3 Mesure de l'irradiation

Le rayonnement des lampes est mesuré par un pyranomètre fabriqué par Kipp & Zonen. Il s'agit du modèle CMP 11, avec une erreur de $\pm 7 \text{ W/m}^2$. Cet appareil peut fonctionner avec un multimètre ou un système d'acquisition de données. L'instrument est classifié selon la classe 1 du WMO (ISO 9060). Il est composé d'un corps cylindrique en aluminium, d'une thermo pile à 32 jonctions connectés en série et d'un double dôme en verre et un revêtement blanc protégeant l'appareil du réchauffement dû au rayonnement. La radiation globale reçue sur la surface plane de l'absorbeur (G_T) en W/m^2 peut facilement être calculée en divisant le signal de la tension de sortie (U_{emf}) par la sensibilité nominale propre de l'appareil (S) égal à $9,17 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$. Comme indiqué dans la relation suivante.

$$G_T = \frac{U_{emf}}{S} \quad (5.1)$$

Avant de réaliser les essais, certaines précautions d'utilisation du pyranomètre sont nécessaires. Ces précautions sont :

- Il faut s'assurer que le verre protecteur du pyranomètre soit propre et ne présente aucune poussière ou égratignure susceptible de nuire à la réception du rayonnement;

- Un examen de l'état du dessiccateur doit être fait sur une base régulière prévenant ainsi toute accumulation d'humidité susceptible de causer de la condensation au niveau des surfaces de l'instrument et pouvant affecter la lecture;
- À l'aide de la bulle de niveau, s'assurer que le pyranomètre est placé sur le même plan que l'absorbeur;
- Le pyranomètre ne doit projeter aucune ombre sur l'absorbeur au cours de la période d'essai, et il doit être monté de manière à être soumis au même niveau d'irradiance solaire que l'absorbeur lui-même.

5.4 Mesure du débit

La vitesse de l'air est mesurée par un anémomètre à fil chaud (VELOCICHECK modèle 8340). Ce modèle est équipé d'une sonde thermique et d'une sonde de mesure de vitesse. Cet appareil est très sensible au changement de température de l'air et permet la mesure de la vitesse sur une plage comprise entre 0,13 m/s à 10,16 m/s avec une précision de 0,03 m/s. Pour une précision optimale, il est important de diriger correctement la sonde par rapport au courant d'air à mesurer.

Pour obtenir la valeur de la vitesse réelle de l'air, la vitesse mesurée doit être corrigée par un facteur de correction qui dépend des conditions environnementales. La vitesse réelle de l'air est donnée par la formule suivante :

$$V_{réel} = V_{mesuré} \cdot \frac{101.4}{P_{mesurée}} \left[\frac{273 + T_{mesurée}}{273 + 21.1} \right] \quad (5.2)$$

Le débit massique de l'air à la sortie du ventilateur est calculé par la multiplication de la vitesse de l'air mesurée par la masse volumique de l'air (ρ_{air}) que multiplie la surface du tuyau de (S_{tuyau}) comme indiqué dans la relation suivante.

$$\dot{m} = V_{réel} \cdot S_{tuyau} \cdot \rho \quad (5.3)$$

5.5 Mesure de la température

Trois mesures de température sont nécessaires pour les essais de l'UTC. Il s'agit de :

- la température de l'air ambiant;
- la température de l'air à la sortie de l'UTC;
- la température de la surface de l'absorbeur.

Les mesures de température dans le montage sont obtenues à partir de thermocouples de type K de Oméga Inc. La plage d'utilisation de ces thermocouples (0°C à 1370°C) couvre largement la plage de températures de fonctionnement de l'UTC. Ces thermocouples sont au nombre de 27. Les figures 5.3 et 5.4 montrent leurs positionnements. Il est à noter que tous les thermocouples ont été calibrés afin de connaître leurs degrés de précisions dans un intervalle de température 0-50 °C. Les incertitudes résultantes en fonction de la température sont présentées en annexe V.

Pour la mesure de température de l'air ambiant (T_{amb}), le thermocouple est protégé contre l'irradiation des lampes du simulateur solaire par un abri revêtu d'une couche de peinture blanche et suffisamment aérée. L'aération étant assurée par un ventilateur standard.

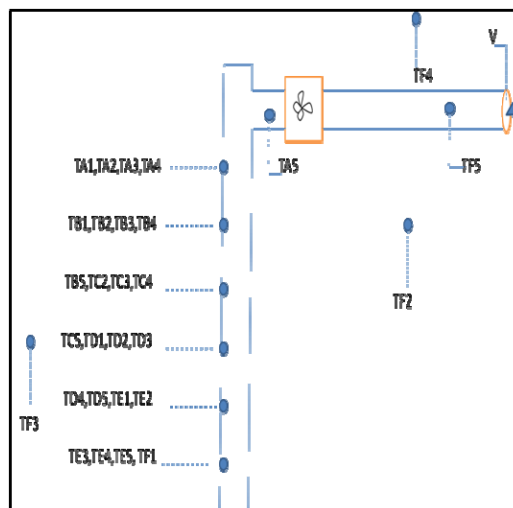


Figure 5.3 Positionnement des thermocouples dans l'UTC.

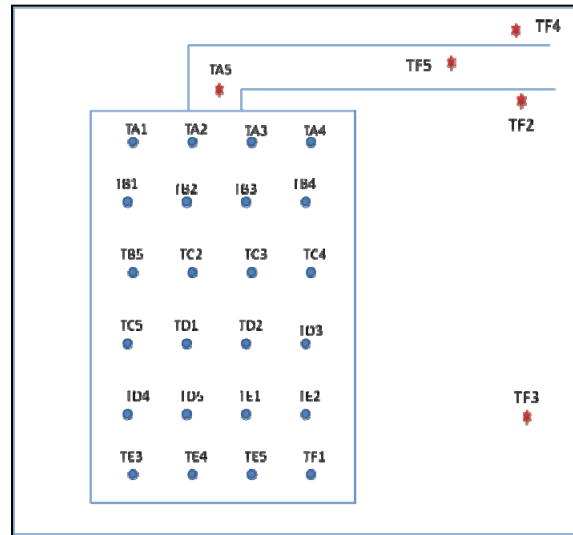


Figure 5.4 Vue de face des thermocouples dans l'UTC.

5.6 Systèmes d'acquisition de données

L'ensemble des thermocouples est relié à un système d'acquisition de données composé d'une carte d'acquisition 32 sorties de marque National Instrument-USA modèle SCXI-1000 connecté à un ordinateur équipé du logiciel Labview, permet de recueillir automatiquement les données provenant des thermocouples. Les valeurs mesurées peuvent être enregistrées dans des fichiers texte, qui sont ensuite convertis en fichiers Excel où ils seront préparés à l'exploitation.

5.7 Mesure de l'émissivité.

Trois mesures indirectes d'émissivité ont été réalisées. Pour ce faire, un thermomètre infrarouge de type OS 101 MV-F de Omega® a été utilisé. Ce thermomètre est composé d'un capteur infrarouge fixe relié par un câble à un conditionneur de signaux, monté à son tour sur un boîtier robuste en aluminium de type IP65 (NEMA-4). Il est caractérisé par une émissivité réglable de 0,1 à 1,0 et une sortie de tension linéaire, courant ou thermocouple type K étalonnée à 1mV/°C.

Trois plaques, de mêmes types de matériau (acier galvanisé) ont été préparés. Sur la première plaque, une peinture noire matte a été appliquée, la deuxième plaque a été recouverte d'une peinture sélective commercialisée sous le nom de ThurmaloX 250 (Danpney) dont les caractéristiques sont présentées à l'annexe VI. Finalement, la troisième plaque d'acier galvanisé est laissée telle quelle.

L'estimation des émissivités pour les trois plaques s'effectue comme suit.

Le réflecteur du thermomètre infrarouge est placé face à la plaque d'acier. La mesure de la température du thermomètre est comparée à la lecture d'un thermocouple indépendant. Puisque l'émissivité du thermomètre est ajustable, celle-ci est réglée de façon à ce que la température donnée par le thermomètre infrarouge soit la même que la température lue par le thermocouple.

Tableau 5.1 Résultats de mesure de l'émissivité des plaques

Surface	Émissivité
Peinture noir matte	0,95
Peinture sélective	0,45
Surface sans peinture	0,1

5.8 Déroutement des expériences

La procédure employée lors de l'exécution des essais est basée sur la mesure des températures T_{abs} , T_{amb} et T_{out} . Comme le mentionne Dagnelie (2000), « Il est recommandé lorsqu'on fait un plan expérimental, d'effectuer les essais dans un ordre aléatoire pour équilibrer les effets des variables qui ne sont pas contrôlés ». Dans le cadre de ce travail et tel mentionné au chapitre 4. La réalisation des expériences a été menée suivant un ordre préalablement choisi. Ceci est dû principalement à des contraintes d'ordre pratique et la difficulté de changer certains paramètres. Dans un premier temps, le paramètre le plus

contraignant qui est le revêtement de l'absorbeur a été fixé. En effet, le changement du revêtement de l'absorbeur demande du temps et exige certaines précautions par rapport au changement du débit d'air ou de l'intensité du rayonnement. Une fois le revêtement de l'absorbeur maintenu fixe, l'étape suivante consiste à ajuster le diamètre des trous. L'ajustement du diamètre des perforations débute par le niveau le plus bas ($D= 1,5$ mm) puis le niveau intermédiaire ($D= 2$ mm) puis le niveau le plus élevé ($D=2,4$ mm). En procédant ainsi, on évite de changer le niveau de l'absorbeur à chaque fois qu'on change le niveau du diamètre, ce qui nous permet d'effectuer une importante économie de temps et de coûts de réalisation des expériences. La figure 5.5 montre l'ordre et le nombre de changement des niveaux des 4 paramètres de contrôles.

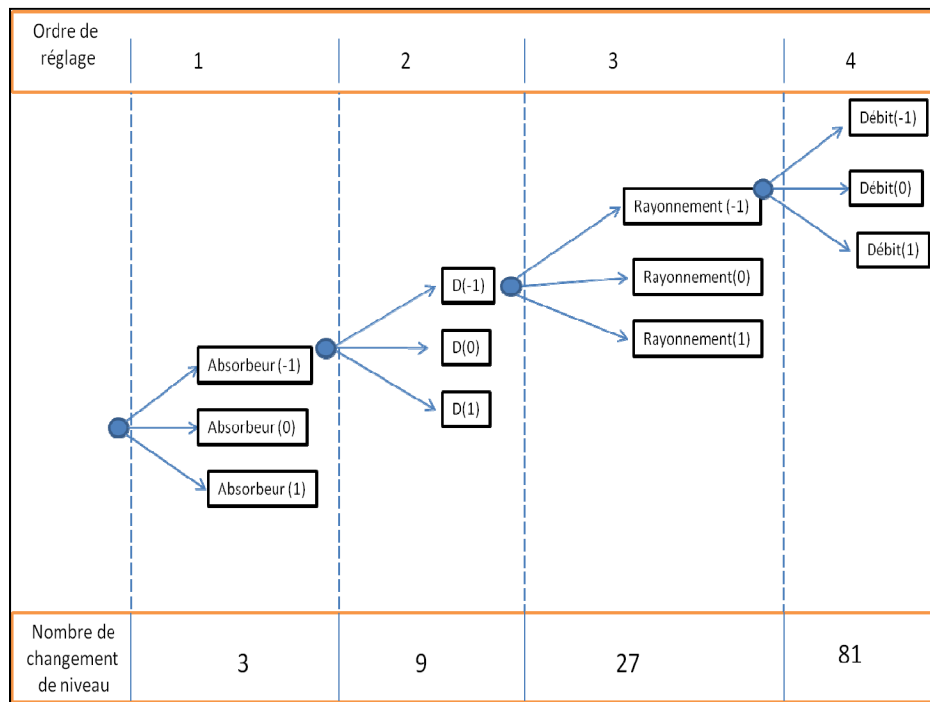


Figure 5.5 Ordre et nombre de changement des niveaux des paramètres.

CHAPITRE 6

MODÉLISATION ET OPTIMISATION DU RENDEMENT ET DE L'EFFICACITÉ DE L'UTC

Ce chapitre présente les modèles qui découlent de l'analyse statistique des résultats des performances thermiques de l'UTC, obtenus par le plan expérimental. De plus, les effets principaux des paramètres sont discutés ainsi que leurs interactions. Finalement, une optimisation des performances thermique de l'UTC est effectuée par la méthode des surfaces de réponses.

Les paramètres les plus influents sur le rendement et l'efficacité de l'UTC ainsi que leurs niveaux ont été identifiés au chapitre 4. Les essais réalisés dans le cadre de ce plan expérimental et les résultats obtenus (T_{out} et T_{amb} et T_{coll}) dans le chapitre 5 ont permis de calculer l'énergie utile (Q_u), le rendement (η_{coll}) et l'efficacité (ϵ_{Hx}) de l'UTC. Les résultats correspondants sont reportés dans le tableau en annexe I. Ils regroupent 81 expériences caractérisées par 3 paramètres quantitatifs (D , G_T , $\dot{m}$), un paramètre qualitatif (ϵ_{abs}) et deux réponses η_{coll} et ϵ_{Hx} .

L'analyse statistique de l'ensemble des résultats a tout d'abord permis de décrire le modèle et la contribution des paramètres. Dans une deuxième partie (optimisation), les résultats de l'étude précédente sont approfondis en utilisant la méthodologie des surfaces de réponses pour identifier les niveaux ou les intervalles optimums des paramètres garantissant les réponses du modèle $\eta=f(\dot{m}, D, G_T, \epsilon_{abs})$ les plus favorables. Dans la présente étude, deux types de modèles statistiques décrivant les performances de l'UTC peuvent être élaborés. Le premier est un modèle à effets principaux, le second est un modèle qui prend en considération les effets principaux et leurs interactions. Ce dernier nous a semblé le plus approprié puisque plusieurs interactions entre les quatre paramètres ont été identifiées comme étant statistiquement significative.

La démarche suivie pour réaliser l'analyse du plan expérimental consiste dans les étapes suivantes :

- Modélisation par régression multiple;
- Validation du modèle;
- Analyse des résultats du modèle.

Rappelant que les deux fonctions de réponse de l'UTC : η_{coll} et ε_{Hx} sont liées aux paramètres indépendants par un modèle quadratique de type :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon_i \quad (6.1)$$

Dans le cas présent, le modèle quadratique associé au rendement et l'efficacité de l'UTC a la forme générale suivante :

$$\begin{aligned} Y = & \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{44} X_4^2 \\ & + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{14} X_1 X_4 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{24} X_2 X_4 + \beta_{34} X_3 X_4 + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (6.2)$$

Les coefficients inconnus du modèle ($\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$) sont appelés coefficients de régression. Ces coefficients sont estimés par la technique des moindres carrés (Jayaraman, 1999) . Les coefficients inconnus du modèle établis par l'équation (6.2) sont au nombre de 15 dont 6 sont des coefficients d'interaction non linéaire.

6.1 Modélisation

Dans la présente étude, la définition du modèle statistique et l'analyse du plan d'expériences (plan 3^4 complet constitué de 4 facteurs et deux réponses) sont réalisées avec le logiciel STATGRAPHICS Centurion XV (2009). Le modèle considéré pour décrire les réponses et un modèle de type polynomial à 4 paramètres avec interactions.

L'ensemble des données issues des résultats expérimentaux forme une matrice de 6 colonnes et 81 lignes. Cette dernière comporte les valeurs des paramètres codés « -1, 0, 1 » ainsi que leurs réponses mesurées pour chaque essai. Cette matrice est introduite dans le logiciel STATGRAPHICS Centurion XV en vue d'une étude statistique voir annexe III.

Afin d'établir le modèle qui explique la fonction de réponse, il faut tout d'abord vérifier la qualité de celui-ci. Le test statistique qui mesure la qualité de la modélisation est le coefficient de corrélation multiple (R^2). Ce dernier exprime le rapport entre la variance expliquée par le modèle et la variance totale. Pour déterminer le meilleur modèle statistique ayant un nombre minimum de facteurs et un coefficient de corrélation le plus élevé possible, deux méthodes sont disponibles à partir du logiciel STATGRAPHICS. La méthode d'élimination pas à pas et la méthode d'élimination complète. Cette dernière a été utilisée. Elle consiste à éliminer du modèle tous les effets dont la valeur «P-value» est supérieure à 0,05 en une seule étape.

6.1.1 Hypothèses

Afin d'exploiter les résultats du plan d'expériences et de distinguer les facteurs et les interactions prépondérants, quelques hypothèses ont été posées :

- Hypothèse 1 : Les interactions d'ordre 3 ou d'ordre plus élevé sont en général très faibles par rapport aux effets principaux, c'est pourquoi elles sont fréquemment négligées dans la représentation du modèle mathématique. Un grand nombre d'inconnues est ainsi éliminé. Donc, seules les interactions d'ordre 2 sont retenues dans le modèle;
- Hypothèse 2 : Exclure tous les effets directs non significatifs et qui ne sont pas présents dans les interactions significatives;
- Hypothèse 3 : Si deux effets sont faibles, leur interaction pourrait l'être également. Selon cette hypothèse les facteurs qui, séparément, n'ont aucun effet, sont éliminés même s'ils peuvent avoir un effet lorsqu'ils sont couplés.

La procédure de l'analyse des résultats du plan d'expériences par le logiciel STATGRAPHICS, affiche un ensemble de résultats sous forme de tableaux et de graphiques concernant le modèle statistique. Parmi ces résultats, on présente les plus pertinentes :

- Les modèles résultants de la régression quadratique pour le rendement et l'efficacité de l'UTC sont donnés par les équations (6.3) et (6.4) respectivement. Rappelant que les coefficients des paramètres du modèle statistique sont formés à partir du principe de la modélisation par la régression multiple. Le Tableau 6.1 affiche les coefficients de régression codée du modèle. Le signe négatif ou positif des coefficients de régressions indique le sens de la contribution du paramètre dans la réponse.

$$\begin{aligned} \eta_{coll} = & 68,691 + 24,110\varepsilon_{abs} - 24,110D - 3,1659G_T + 16,106m - 23,528\varepsilon_{abs}^2 \\ & + 0,5980\varepsilon_{abs} \cdot D - 2,66046\varepsilon_{abs} \cdot G_T + 10,107\varepsilon_{abs} \cdot m - 0,21515D^2 - 1,040D \cdot G_T \\ & - 0,124519D \cdot m - 4,13778G_T^2 - 0,446087G_T \cdot m - 6,19252m^2 \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{HX} = & 61,118 + 5,4606\varepsilon_{abs} - 1,4299D - 1,2160G_T - 2,6043m - 7,5120\varepsilon_{abs}^2 \\ & + 1,6328D\varepsilon_{abs} - 1,3384\varepsilon_{abs} \cdot G_T + 1,0123m\varepsilon_{abs} + 0,21083D^2 + 0,5108D \cdot G_T \\ & - 1,5167D \cdot m + 0,39174G_T^2 + 1,163G_T \cdot m + 0,03118m^2 \end{aligned} \quad (6.4)$$

- L'analyse de la variance du rendement montre un coefficient de corrélation (R^2) égal à 0,948. Le coefficient R^2 est une valeur comprise entre -1 et 1. Il donne une appréciation de la qualité d'un ajustement de données. Cette valeur de R^2 indique que le modèle du rendement trouvé explique 94,8% de la variabilité des données du rendement. Ce qui permet de confirmer la bonne qualité de la modélisation du rendement de l'UTC.
- L'analyse de la variance de l'efficacité de l'UTC montre un coefficient (R^2) égal à 0,584. En effet, le modèle actuel de l'efficacité décrit mal la variation des données. L'étude de ce paramètre nécessite l'introduction des effets d'interactions d'ordre plus élevé (d'ordre trois ou quatre). Selon les hypothèses citées précédemment, l'étude des interactions d'ordre trois sort du cadre de notre étude. Pour cette raison l'étude de l'efficacité de l'UTC ne sera pas traitée lors des étapes prochaines de ce mémoire.

- Le Tableau 6.1 montre tous les effets estimés et les interactions, ainsi que leur intervalle de confiance indiqués à 95,0 %. À partir de ce tableau, il est possible de mettre en évidence les effets les plus importants du modèle. Dans un premier temps le revêtement de l'absorbeur qui contribue à 24 % du rendement, le débit d'air aspiré à 16 %, le diamètre des trous à 1,13 % et le rayonnement à 3,16 %.

Tableau 6.1 Coefficients de régression pour le rendement du capteur

Coefficient	Estimation
constante	68,6913
A:Revêtement	24,1107
B:Diamètre	-1,1371
C:Rayonnement	-3,1659
D:Débit	16,1067
AA	-23,5285
AB	0,5980
AC	-2,6604
AD	10,1071
BB	-0,2151
BC	-1,0402
BD	-0,1245
CC	-4,1377
CD	0,4460
DD	-6,1925

- Le graphique de Pareto de la figure 6.1 montre l'ordre décroissant en importance de tous les paramètres ainsi que leurs interactions. 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 quels effets sont statistiquement significatifs. Toutes les barres qui s'étendent au-delà de la ligne correspondante ont des effets statistiquement significatifs au niveau de confiance de 95,0 %. Dans ce cas, 8 effets sont significatifs. Les paramètres dont leur effet se situe à gauche de la ligne verticale sont statistiquement non significatifs et seront retirés du modèle.

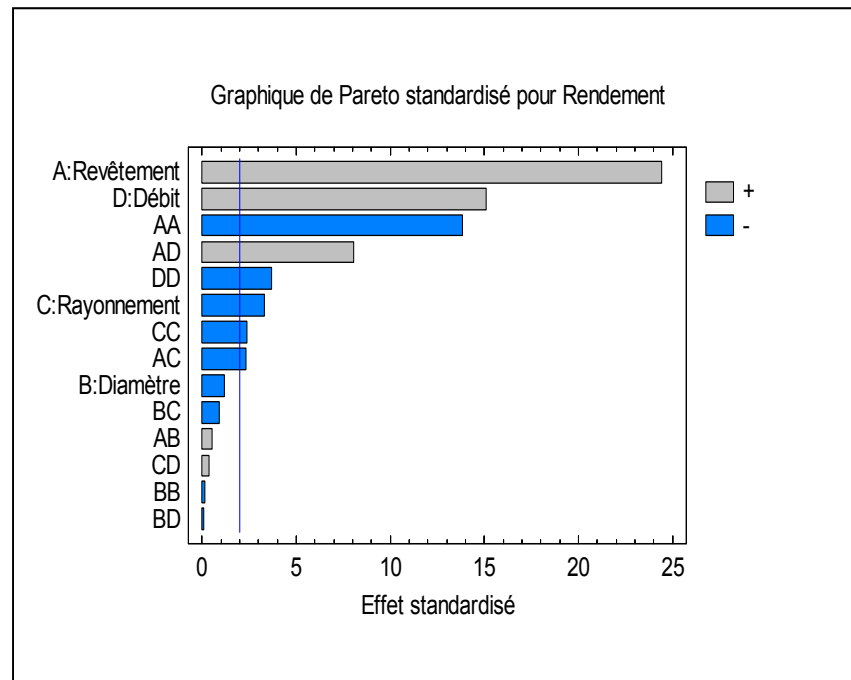


Figure 6.1 Graphique de Pareto pour tous les effets.

- Le graphique de normalité présenté à la figure 6.2 peut être utilisé pour nous aider à séparer les vrais effets des effets de bruit. Il y a un point dans le graphique pour chaque effet dans le modèle. L'idée de base de ce graphique est que les effets qui ne sont pas significatifs et qui ne sont que de simples manifestations de bruits sont affichés comme des points centrés sur la droite de normalité. Les effets qui s'écartent de la droite de normalité en dessous ou en dessus selon que les effets sont positionnés, positifs ou négatifs sont considérés comme probablement significatifs.

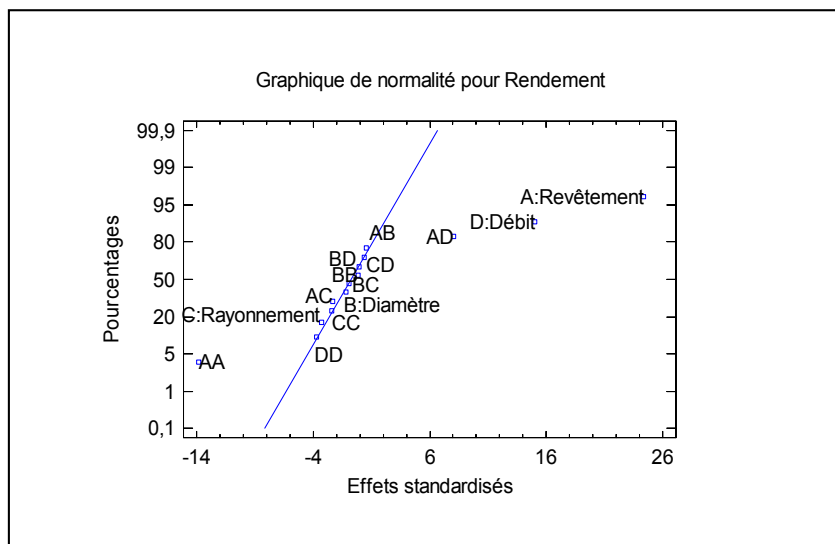


Figure 6.2 Graphique de normalité pour le rendement.

6.1.2 Ajustement du modèle du rendement

Le choix du modèle est crucial puisque l'objectif est d'obtenir le modèle le plus convenable (avec un nombre réduit de paramètres) décrivant la fonction de réponse de l'UTC. À cette fin, on utilise des tests d'ajustement du modèle afin de sélectionner le meilleur modèle suivi d'une étape de validation. Pour déterminer si le modèle résultant du rendement qui est donné par l'équation (6.3) peut être simplifié ou non, il suffit de vérifier l'existence d'un ou de plusieurs effets, dont la probabilité p -value est supérieure à 0,05. Par exemple, la plus grande valeur de probabilité pour les variables explicatives est de 0,92, et est associée à l'interaction entre le Diamètre et le débit d'air (terme BD). Comme la valeur de la probabilité est supérieure à 0,05, ce terme n'est pas statistiquement significatif au niveau de confiance de 95,0 %. Ainsi, on peut envisager de supprimer l'interaction (BD) du modèle.

Pour éliminer du modèle les effets restant peu influents, pour ne conserver que les paramètres les plus significatifs, le graphique de Pareto semble le mieux approprié à ce genre d'ajustement. Pour cela nous devons exclure tous les effets, dont le niveau de signification apparue à gauche de la ligne verticale du graphique de Pareto. Rappelant que les hypothèses

citées précédemment (section 6.11) doivent être pris en considération. Après élimination des effets et des interactions non significatives, nous obtenons le diagramme de Pareto représenté à la figure 6.3. Les termes inclus et exclus du modèle sont reportés au Tableau 6.2. Ainsi, le modèle ajusté pour le rendement de l'UTC est donné par l'équation :

$$\eta_{\text{coll}} = 68,5101 + 24,0422\varepsilon_{\text{abs}} - 3,222G_T + 16,012\dot{m} - 23,546\varepsilon_{\text{abs}}^2 - 2,733\varepsilon_{\text{abs}} \cdot G_T + 10,004\varepsilon_{\text{abs}} \cdot \dot{m} - 4,063G_T^2 - 6,286\dot{m}^2 \quad (6.5)$$

Tableau 6.2 paramètres inclus et exclus du modèle

Termes inclus	Termes exclus
A:Revêtement	AB
AA	B:Diamètre
AC	BB
AD	BC
C:Rayonnement	BD
CC	CD
D:Débit d'air	
DD	

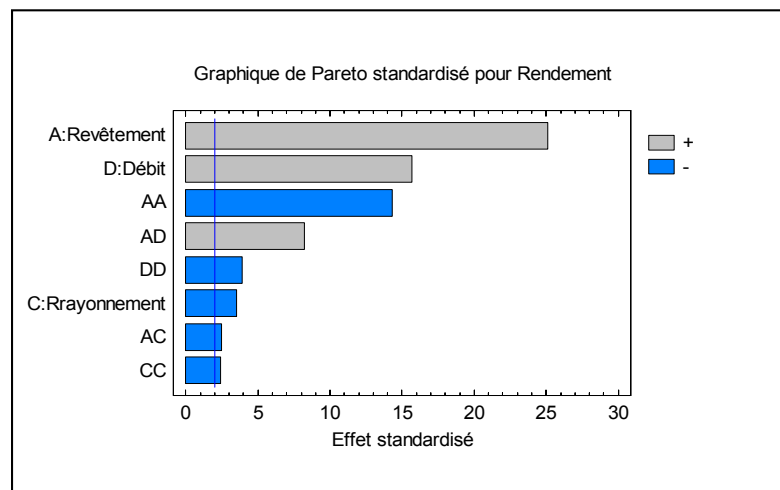


Figure 6.3 Graphique de Pareto pour les effets significatifs.

6.2 Validation du modèle

Avant d'accepter le modèle proposé, il est impératif de vérifier sa validité au moyen de tests statistiques (Tests des résidus, analyse de la variance, test de Student-Fischer) (M. Vigier, 1988).

6.2.1 L'analyse de variance

L'analyse de variance permet de tester l'influence ou l'absence d'influence des paramètres sur la réponse (η_{coll}). Le Tableau 6.3 et le Tableau 6.4 présente un résumé de l'Anova pour un rendement du modèle non ajusté et du modèle ajusté respectivement.

L'Anova décompose la variabilité du rendement de l'UTC en lignes horizontales séparées pour chacun des effets. La signification statistique de chacun des effets et leur interaction sont vérifiées en comparant la moyenne quadratique des effets par rapport à une estimation de l'erreur expérimentale. En effet, il existe deux sources de variation entre les 81 mesures tirées des expériences. L'une est la variation due aux traitements ($SS_{traitement}$) et l'autre est due à l'erreur expérimentale (SS_{erreur}). Les expressions suivantes donnent les équations fondamentales de l'analyse de variance.

$$SS_T = SS_{traitement} + SS_{erreur} \quad (6.6)$$

Avec :

$$SS_{traitement} = n \sum_{i=1}^a (Y_{i.} - \bar{Y}_{..})^2 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{i.}^2}{n} - \frac{Y_{..}^2}{N} \quad (6.7)$$

Et

$$SS_{erreur} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{\sum_{i=1}^a Y_{i.}^2}{N} \quad (6.8)$$

Tableau 6.3 Analyse de la variance pour le rendement du modèle non ajusté

Source	Somme des carrés	DDL	Moyenne quadratique	Rapport F	P-value
A:Revêtement	26264,6	1	26264,6	595,56	0,0000
B:Diamètre	60,1155	1	60,1155	1,36	0,2479
C:Rayonnement	485,494	1	485,494	11,01	0,0016
D:Débit	10023,7	1	10023,7	227,29	0,0000
AA	8439,17	1	8439,17	191,36	0,0000
AB	11,441	1	11,441	0,26	0,6125
AC	237,182	1	237,182	5,38	0,0240
AD	2844,61	1	2844,61	64,50	0,0000
BB	0,711247	1	0,711247	0,02	0,8994
BC	36,2639	1	36,2639	0,82	0,3683
BD	0,449254	1	0,449254	0,01	0,9200
CC	254,193	1	254,193	5,76	0,0196
CD	6,11071	1	6,11071	0,14	0,7111
DD	609,478	1	609,478	13,82	0,0005
Erreur totale	2513,74	57	44,1007		
Total (corr.)	48921,2	71			

Tableau 6.4 Analyse de la variance pour le rendement du modèle ajusté

Source	Somme des carrés	DDL	Moyenne quadratique	Rapport F	P-value
A:Revêtement	26412,3	1	26412,3	631,28	0,0000
C:Rayonnement	514,07	1	514,07	12,29	0,0008
D:Débit	10314,1	1	10314,1	246,52	0,0000
AA	8562,86	1	8562,86	204,66	0,0000
AC	253,504	1	253,504	6,06	0,0166
AD	2831,15	1	2831,15	67,67	0,0000
CC	245,589	1	245,589	5,87	0,0183
DD	638,491	1	638,491	15,26	0,0002
Erreur totale	2635,86	63	41,8391		
Total (corr.)	48921,2	71			

La taille de $SS_{\text{traitement}}$ 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 dans une mesure significative l'erreur expérimentale. Cela veut dire qu'un facteur est estimé significatif si la valeur absolue de son influence est supérieure à l'incertitude expérimentale. Cependant, il faut noter que la somme liée à l'erreur ($SS_{\text{erreur}}=2635,86$) représente 5,4% de la variabilité totale ($SS_T=48921,2$). Ainsi (94,6%), 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 toutes leurs interactions sont responsables de la variabilité totale de la fonction de réponse η_{coll} dans une proportion de 94,6%. Les termes retenus sont ceux qui respectent des valeurs «P-value» inférieures à 0,05 tel que suggéré par Douglas et Montgomery (2005). Dans ce cas, 8 effets présentés précédemment dans le Tableau 6.3 ont des probabilités inférieures à 0,05, ce qui confirme les résultats des effets trouvés dans le graphique de Pareto.

La statistique du R-carré indique que le modèle du rendement trouvé explique 94,6% de la variabilité des données du rendement. Plus précisément, il donne la proportion de la variation totale des données qui est expliquée par le modèle. L'erreur-type d'estimation indique que l'écart-type des résidus est de 6,46 et erreur absolue moyenne est de 4,95.

Le Tableau 6.5 montre que tous les paramètres retenus influencent la réponse, mais particulièrement le revêtement de l'absorbeur et le débit d'air qui influence le plus le rendement de l'UTC. Ces deux paramètres ont les effets estimés les plus grands, soit 48,08 et 32,02 respectivement. Il est intéressant aussi de rappeler que le signe négatif de l'effet du rayonnement indique que plus le rayonnement augmente, plus le rendement de l'UTC diminue. On conclue de l'analyse de variance, qu'il est possible d'affirmer que 3 paramètres influencent le rendement de l'UTC, et que 94,6% de la variabilité est due aux paramètres choisis, soit le revêtement de l'absorbeur, le débit d'air et le rayonnement et non à l'erreur expérimentale.

Tableau 6.5 Effets estimés du rendement

Effet	Estimation	Erreur-type
moyenne	68,5101	1,99804
A:Revêtement	48,0844	1,91378
C:Rayonnement	-6,44493	1,83865
D:Débit	32,0253	2,03972
AA	-47,0921	3,29177
AC	-5,46762	2,22125
AD	20,0086	2,43235
CC	-8,127	3,35441
DD	-12,5731	3,21851

6.2.2 Analyse des résidus

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. On les note comme suit :

$$\varepsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (6.9)$$

L'analyse des résidus a pour objectif de tester la validité d'un modèle. Leur étude permet de détecter la présence de défaillances dans ce dernier. Ce sont principalement des méthodes d'analyse graphique. En effet, il s'agit de vérifier que la représentation des résidus ne présente aucune structure particulière.

Indépendance des résidus : en traçant les résidus en fonction de l'ordre des essais, un profil entièrement aléatoire devrait être retrouvé. Une tendance particulière dans les résidus indiquerait qu'il y a une corrélation entre eux. Ceci poserait un important problème pour la validité du modèle. L'examen du graphique des résidus en fonction du numéro de l'observation donnée par la figure 6.4 a permis de détecter un profil aléatoire des résidus. À la vue de ce graphique, il n'y a pas de raison de mettre en doute l'hypothèse de l'indépendance des résidus.

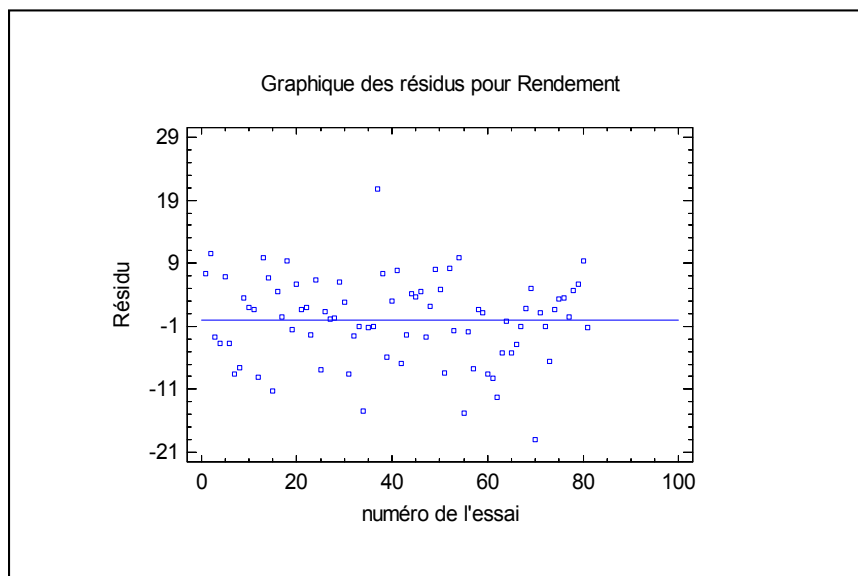


Figure 6.4 Graphique des résidus en fonction du numéro de l'essai.

Homogénéité des variances : il faut s'assurer que les résidus possèdent une variance homogène. Cette vérification peut se faire par plusieurs façons. Les graphiques des résidus en fonction des valeurs prédites ou des résidus en fonction de chaque facteur significatif. En fait, si le modèle est adéquat et que les hypothèses sont satisfaites, alors les graphes des résidus ne devraient présenter aucune tendance particulière. Comme on peut le voir dans la figure 6.5, les résidus semblent assez dispersés, cela veut dire que les variances sont toutes égales et homogènes.

Normalité des résidus : la vérification de la normalité des résidus consiste à positionner les résidus sur un graphique probabilité – Normale. Si la distribution des résidus est normale, alors le graphique devrait ressembler à une ligne droite. L'examen du graphique de normalité des résidus donnée par la figure 6.6 ne montre aucun écart significatif à cette ligne droite ce qui indique qu'il n'y a aucun signe de non-normalité des résidus.

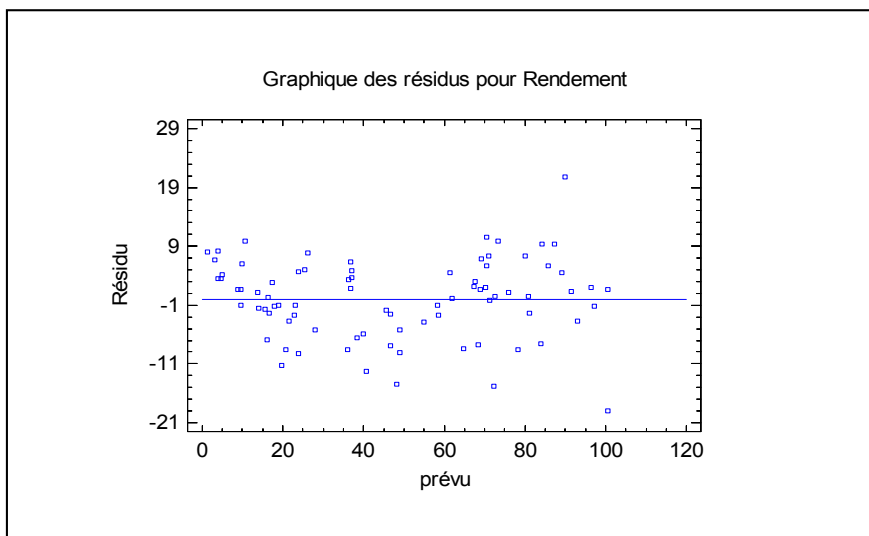


Figure 6.5 Les résidus en fonction valeur prévue.

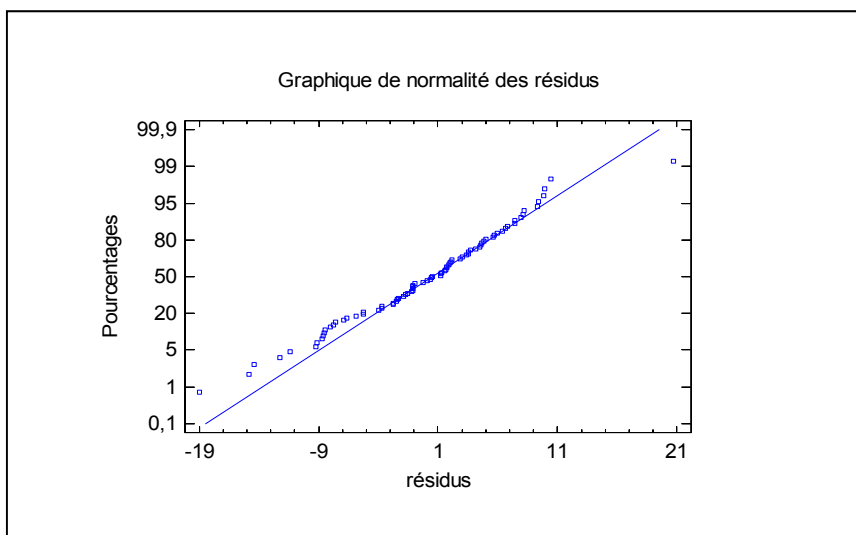


Figure 6.6 Graphique probabilité – Normale

Après avoir vérifié les trois conditions de base de l'Anova avec succès, un autre graphique semble très utile pour la validation du modèle ajusté du rendement. Ce graphique affiche les valeurs observées du rendement par rapport aux valeurs prévues par le modèle ajusté. Plus les points sont proches de la ligne diagonale, meilleur est le modèle dans la prévision des données observées. Comme on peut le voir dans le graphique de la figure 6.7, les points

semblent assez près de la diagonale. On conclue que le modèle prévu du rendement de l'UTC décrit fidèlement les données observées.

Toutes ces analyses permettent d'affirmer que le modèle considéré est valide et que les résultats obtenus sont valables. De ces résultats, il est possible de tirer la conclusion qui suit : trois principaux paramètres influencent le rendement de l'UTC, soit le revêtement de l'absorbeur, le débit d'air aspiré par le ventilateur, et le rayonnement. Rappelons finalement que le revêtement de l'absorbeur et le débit d'air sont les paramètres les plus importants du modèle.

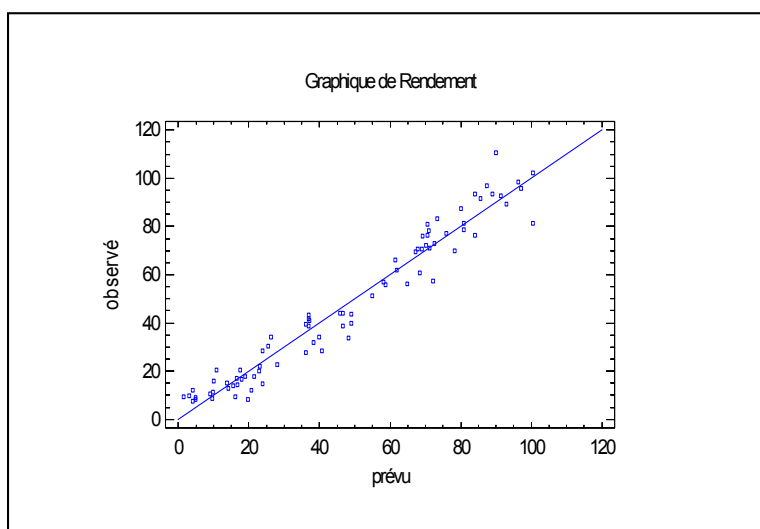


Figure 6.7 Valeurs observées Vs valeurs prévues du rendement.

6.2.3 Discussion des résultats et analyse des effets

Une autre Anova plus approfondie qui s'appelle Anova de type III a été effectuée à partir du modèle quadratique ajusté pour le rendement de l'UTC. Le tableau de l'Anova type III décompose la variabilité du rendement en contributions dues aux divers paramètres. La contribution de chaque paramètre est mesurée après élimination des effets des autres paramètres. Les valeurs des probabilités «P-value» testent la signification statistique de

chacun des paramètres en jeux. Comme 6 valeurs des probabilités sont inférieures à 0,05, ces facteurs ont un effet statistiquement significatif sur rendement au niveau de confiance de 95,0%. À partir de ce tableau, il est possible de mettre en évidence les effets les plus importants ainsi que leurs interactions. Les deux paramètres les plus influents sont le revêtement de l'absorbeur et le débit d'air. Le diamètre des trous et le rayonnement étant moins influents. Trois effets d'interactions significatifs ont été constatés, l'effet (AB) qui correspond à l'interaction entre le revêtement de l'absorbeur et le diamètre des trous, l'effet (AC) entre le revêtement de l'absorbeur et le rayonnement et l'effet (AD) entre revêtement de l'absorbeur et le débit d'air, parmi les interactions mentionnées ci-dessus, l'effet entre revêtement de l'absorbeur et le débit d'air est le plus important.

Tableau 6.6 Analyse de la variance pour Rendement -Somme des carrés de type III

Source de variation	Somme des Carrés	DDI	Carré moyen	F	P-value
EFFETS PRINCIPAUX					
A:Revêtement	33966,0	2	16983,0	855,10	0,0000
B:Diamètre	109,864	2	54,9319	2,77	0,0753
C:Rayonnement	893,892	2	446,946	22,50	0,0000
D:Débit	11138,2	2	5569,1	280,40	0,0000
INTERACTIONS					
AB	275,234	4	68,8085	3,46	0,0163
AC	611,257	4	152,814	7,69	0,0001
AD	3757,69	4	939,423	47,30	0,0000
BC	74,1858	4	18,5465	0,93	0,4545
BD	62,9796	4	15,7449	0,79	0,5371
CD	38,681	4	9,6702	0,49	0,7452
RESIDU	774,577	39	19,8609		
TOTAL	48921,2	71			

6.2.4 Effets principaux et d'interactions

Afin de faciliter l'interprétation des résultats, des graphes de tendances des effets sont fréquemment utilisés. Ils représentent graphiquement la contribution des effets et des interactions, et permettent une sélection rapide des effets les plus influents. Le graphique de

la figure 6.8 montre les valeurs estimées du rendement de l'UTC en fonction de chaque paramètre expérimental. Dans ce graphique, le paramètre considéré varie entre un niveau bas (-1) et un niveau élevé (1), alors que tous les autres paramètres sont fixés à leur niveau central désigné par la valeur (0). Un examen rapide de cette figure indique que le rendement (η_{coll}) de l'UTC augmente, lorsque :

- le débit d'air passe de son niveau bas à son niveau le plus élevé;
- Le revêtement de l'absorbeur passe de son niveau bas à son niveau moyen;
- Le rayonnement passe de son niveau bas à son niveau moyen.

Le rendement de l'UTC diminue, lorsque :

- Le rayonnement passe de son niveau moyen à son niveau élevé. Cela peut être expliqué 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.

De plus, on a constaté que la contribution due à l'effet du revêtement de l'absorbeur (67% - 21%) est plus importante que la contribution due à l'effet du débit d'air (78% - 48%) et la contribution du rayonnement est très faible de l'ordre de (6% à 7%).

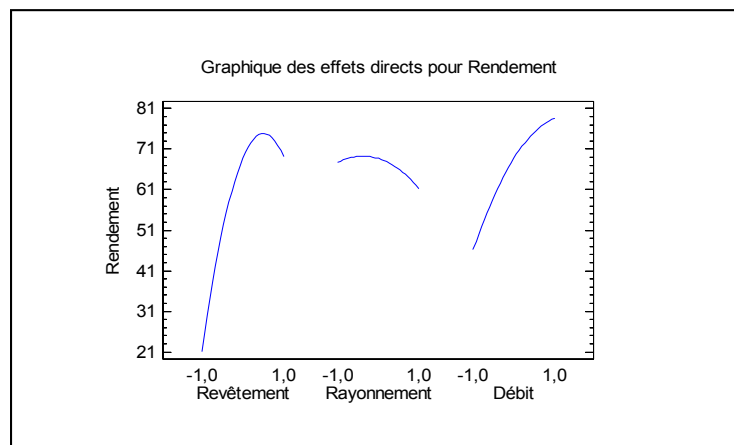


Figure 6.8 Graphique des effets principaux pour le rendement.

Le graphique de la figure 6.9, représente l'effet d'interaction entre le revêtement de l'absorbeur et le débit d'air. Les 3 lignes affichées dans le graphique représentent chacun des niveaux du revêtement de l'absorbeur. Elles relient les moyennes estimées par les moindres carrés des 3 niveaux du débit d'air. Ce graphique montre que le changement du niveau du revêtement de l'absorbeur de son niveau bas à son niveau médium pour un débit d'air maintenu à son niveau élevé, augmente le rendement de 18% à 90%, soit 72%. Toutefois, une augmentation de seulement 27% est observée avec le niveau (-1) du débit d'air. Cela veut dire que l'augmentation du débit d'air de 0,011 kg/s à 0,039 kg/s pour un absorbeur avec revêtement sélectif (niveau 0) augmente, le rendement de l'UTC de 72%. Alors que la même augmentation du débit d'air pour un absorbeur sans revêtement produit seulement une augmentation de 27%. Dans une telle situation lorsque l'effet d'un paramètre dépend du niveau de l'autre, on dira qu'une forte interaction existe entre les deux paramètres. Dans cette même figure, on peut voir également que le changement du revêtement de l'absorbeur du niveau médium (absorbeur avec revêtement sélective) à un niveau élevé (absorbeur avec revêtement noire matte) pour un débit d'air maintenu à un niveau bas, n'entraîne presque aucune augmentation du rendement. Cela est également observé lors du changement du niveau du revêtement de (0) à (1) pour les autres niveaux du débit (0 et 1). On dit alors qu'une interaction est faible entre le revêtement et le débit d'air pour un niveau du revêtement compris entre (0 et 1). Puisque les valeurs du rendement augmentent fortement lorsque le revêtement de l'absorbeur est fixé au niveau moyen ou à son niveau élevé, le rendement est meilleur lorsque l'UTC fonctionne avec un absorbeur recouvert par une peinture noire, et que le rendement sera supérieur s'il est recouvert par une peinture sélective.

L'examen des graphiques de la figure 6.11 nous indique une faible interaction entre le revêtement de l'absorbeur et les deux autres paramètres (diamètre de trous et rayonnement). Cela est expliqué par une contribution presque nulle du rendement de l'UTC pour n'importe quel niveau du revêtement de l'absorbeur lorsqu'on augmente le niveau du diamètre ou du rayonnement du niveau bas au niveau élevé. En effet, les contributions dues au diamètre et au

rayonnement ne sont pas affectées par le changement du niveau du revêtement de l'absorbeur. On dit alors que les interactions revêtement-diamètre et revêtement-rayonnement sont très faibles.

Finalement, ces graphiques rendent compte d'un effet très important dû à l'effet du revêtement de l'absorbeur sur le rendement de l'UTC. Ce résultat confirme l'importance de l'utilisation des UTCs ayant un absorbeur avec revêtement sélective. De plus, ces graphiques révèlent la présence d'une forte interaction entre le revêtement de l'absorbeur et le débit d'air. En revanche, une faible interaction entre le revêtement de l'absorbeur et les deux autres paramètres (diamètre des trous et rayonnement).

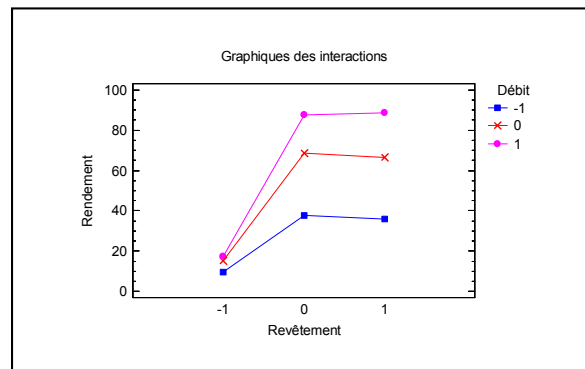


Figure 6.9 Effet d'interaction revêtement-débit.

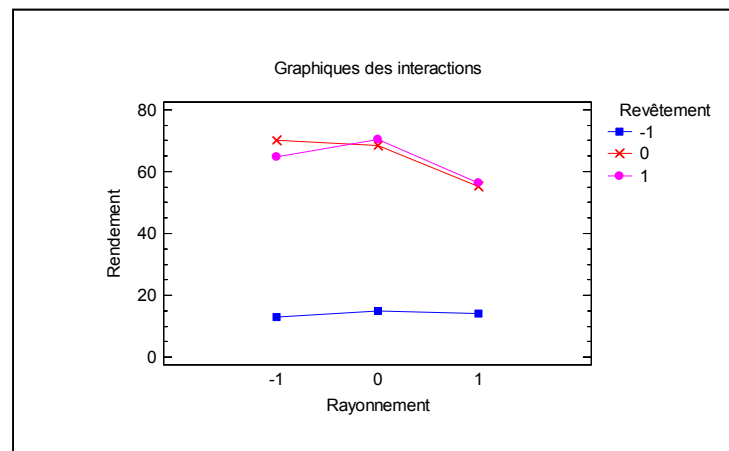


Figure 6.10 Effet d'interaction revêtement – rayonnement.

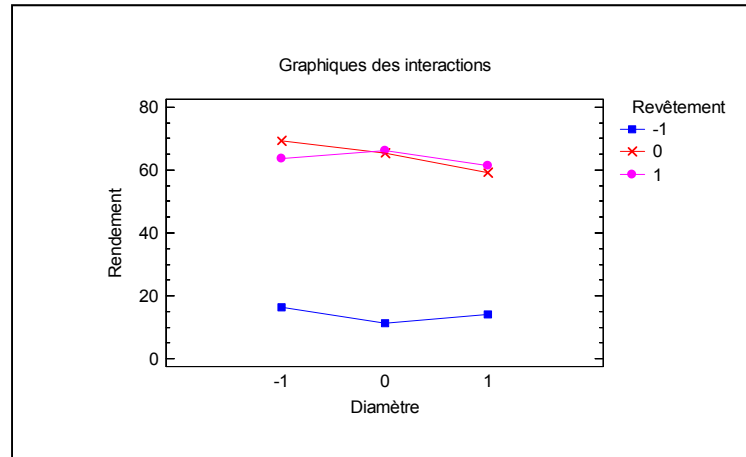


Figure 6.11 Effet d'interaction revêtement – diamètre.

6.3 Optimisation du rendement de l'UTC

L'objectif de cette section étant d'optimiser le modèle statistique pour le rendement de l'UTC obtenue précédemment (section 6.1.2). Après l'étape d'ajustement du modèle, on représente graphiquement celui-ci à l'aide de graphiques de type surface de réponse et de contours surface de réponse. Ces derniers permettent de visualiser le comportement de la fonction de réponse (rendement) en fonction des paramètres en étude. Également, l'utilisation de ces graphiques procure une aide appréciable dans l'exploitation et la simulation du modèle dans le domaine d'étude en vue d'une optimisation du rendement de l'UTC.

Le but de cette optimisation est d'optimiser au mieux les performances thermiques de l'UTC, c'est-à-dire trouver un rendement maximum. Notre souhait est d'obtenir une valeur du rendement la plus élevée possible. Lorsque le modèle contient deux variables prédictives, l'équation du modèle représente une surface dans l'espace 3D. Dans notre cas, nous avons un modèle à quatre paramètres prédictives. Afin de pallier ce problème, le tracé du graphique surface de réponse est utilisé. Ce graphique consiste à tracer la fonction de réponse en fonction de deux paramètres. Les deux autres paramètres sont généralement maintenus fixes

au niveau médian. L'examen du graphique surface de réponse du rendement de l'UTC de la figure 6.12 indique la hauteur de la surface de réponse. Cette hauteur représente la valeur prévue du rendement de l'UTC dans les intervalles affichés du revêtement de l'absorbeur et du débit d'air avec les deux autres paramètres maintenus fixés aux valeurs moyennes respectives.

La figure 6.13 et la figure 6.14 représentent les contours de surfaces de réponse pour les effets significatifs des interactions des facteurs sur le rendement :

- Effet du revêtement de l'absorbeur et du débit d'air sur la réponse;
- Effet du revêtement de l'absorbeur et du rayonnement sur la réponse.

D'autres graphiques de surface de réponse sont présentés en annexe VII.

L'examen de la figure 6.13 Contours surface de réponse revêtement-débit, nous indique que les plus grands rendements sont compris entre 80% et 90%. Ils sont obtenus pour un revêtement dont le niveau varie entre «0,2 et 1» et un débit d'air au niveau «1». Nous tirons de ce graphique des informations importantes, concernant les paramètres étudiés du modèle à savoir :

- Le niveau minimum du débit d'air pour lequel le rendement de l'UTC est compris entre 80% et 90% est égal à 0,3 équivalent à $0,029 \text{ kg/s m}^2$.
- Les meilleurs rendements sont obtenus pour un niveau de revêtement compris entre «0,2 et 1» et non pas par un revêtement sélectif dont le niveau est «0». Le tableau montre les combinaisons des niveaux des paramètres qui maximisent le rendement.

Tableau 6.7 Niveaux optimums des paramètres

Facteur	Bas	Haut	Optimum
Revêtement	-1,0	1,0	0,73
Diamètre	-1,0	1,0	-0,99
Rayonnement	-1,0	1,0	-0,5
Débit	-1,0	1,0	1,0

Un tel graphique nous 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 un haut niveau de revêtement de l'absorbeur, un haut niveau du débit d'air, les autres facteurs sont peu influents et ils peuvent être fixés à n'importe quel niveau. Ce choix est souhaitable puisque nous voulons atteindre notre objectif qui est de maximiser le rendement. En revanche, si on se rapporte aux conditions réelles d'exploitation des UTC, nous devons tenir compte de la puissance requise pour le fonctionnement du ventilateur et du potentiel d'ensoleillement de l'endroit où l'UTC est installé. Sachant que la puissance fournie à un ventilateur est liée directement au débit d'air aspiré par la loi de similitude des ventilateurs.

$$\frac{w_2}{w_1} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 \quad (6.10)$$

Une augmentation du débit d'air nécessite une augmentation de la puissance du ventilateur qui pourra engendrer des coûts d'exploitation de l'UTC très élevés. Cependant pour diminuer la charge électrique du ventilateur il faut diminuer le débit d'air aspiré. Par ailleurs, une diminution de ce dernier entraîne une diminution du rendement de l'UTC. Dans une telle situation, un choix du niveau du débit apparaît un peu difficile à effectuer. Dans ce cas, il est nécessaire de trouver la combinaison des autres paramètres pour lequel le rendement de l'UTC atteint son optimum tout en opérant à des faibles valeurs du débit d'air.

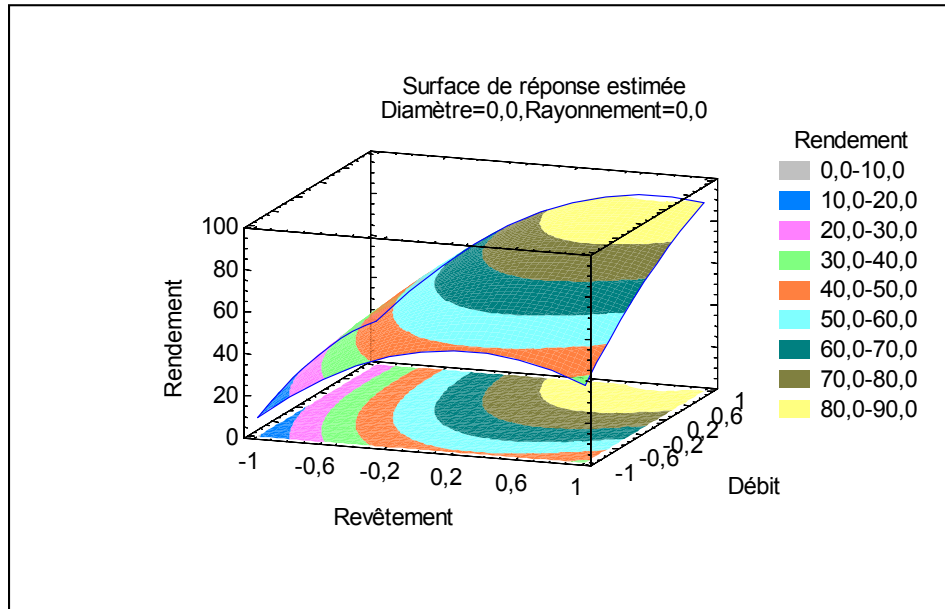


Figure 6.12 Graphique surface de réponse.

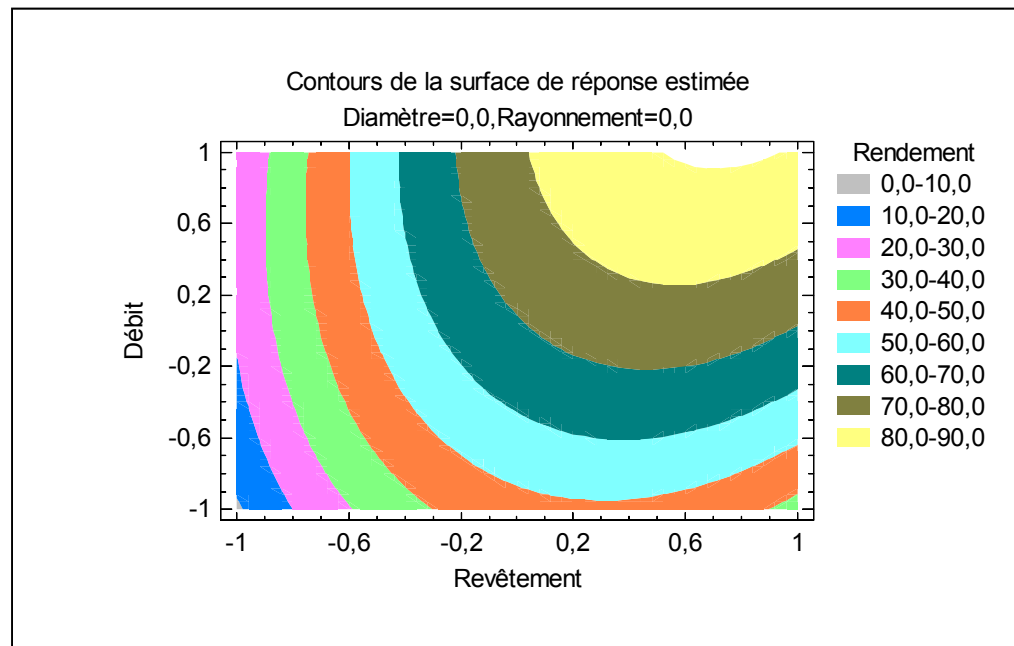


Figure 6.13 Contours surface de réponse revêtement-débit.

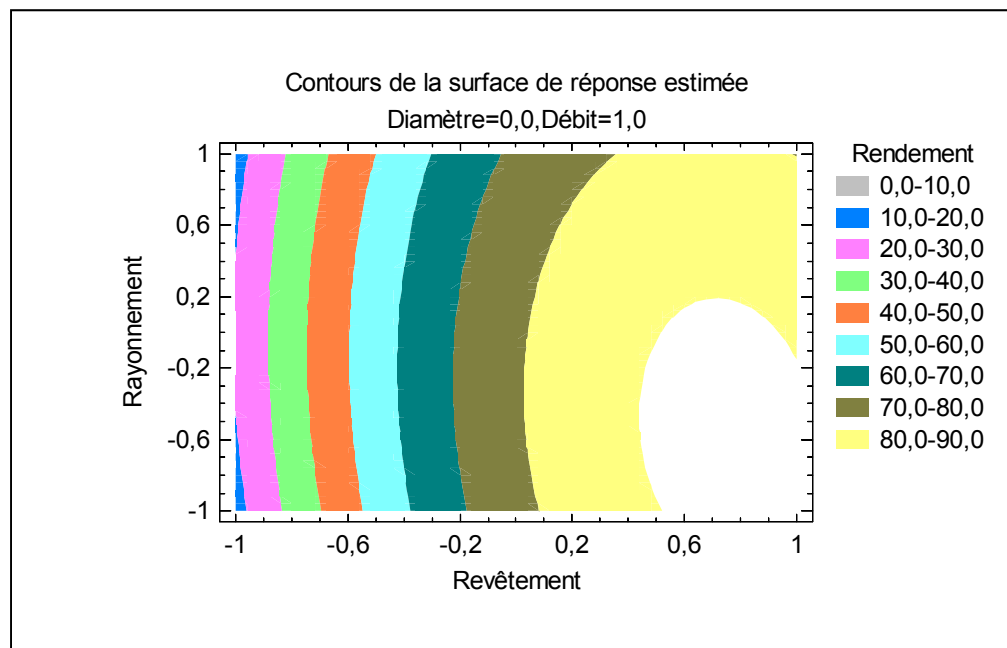


Figure 6.14 Contours surface de réponse revêtement-rayonnement.

Dans l'analyse précédente, nous avons démontré l'importance de l'utilisation du revêtement sélectif dans les UTCs. En excluant l'utilisation de l'absorbeur sans revêtement, cela nous permet de fixer le paramètre du revêtement à son niveau optimum «0,73».

Le diamètre des trous ayant peu d'influence, il peut être fixé à une valeur quelconque dans son intervalle de variation. En particulier sa contribution se traduit par un effet légèrement négatif, nous avons donc choisi le niveau bas pour avoir la plus grande valeur du rendement. 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 6.15, représente les contours de surface de réponse du débit – rayonnement. Cette figure nous indique un intervalle du débit d'air compris entre les niveaux «0,25 et 1» et un rendement compris entre 80% et 90% pour un absorbeur dont le niveau du revêtement et du débit est égal à «0,73» et «-1» 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 80% et 90%. Finalement, nous pouvons conclure que la méthodologie des surfaces de réponse a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le paramètre le plus influent est le revêtement de l'absorbeur dont le niveau optimum est à 0,73;
- Le niveau du débit d'air pour un rendement de l'UTC entre 80% et 90% est compris entre «0,25 et 0,75» équivalent $0,0285 \text{ kg/s.m}^2$ à $0,0355 \text{ kg/s.m}^2$;
- La méthode des surfaces de réponse nous a permis d'obtenir un intervalle de fonctionnement du débit d'air par simulation d'un absorbeur dont les caractéristiques se situent dans l'intervalle de caractéristiques des absorbeurs testés précédemment expérimentalement.

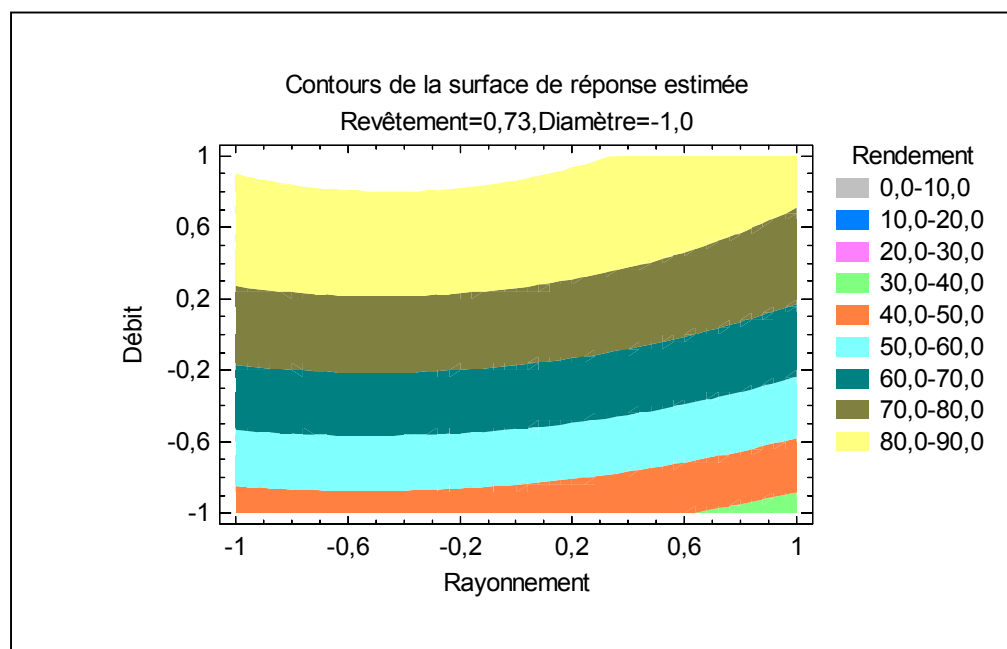


Figure 6.15 Contours de surface de réponse débit-rayonnement.

CONCLUSION

Les murs solaires à perforations (UTC) sont généralement considérés comme un moyen énergétiquement efficace, pour récupérer une partie de l'énergie émise par le soleil. Un grand éventail d'applications en découle : séchage de produit, préchauffage de l'air de ventilation ainsi que certains procédés industriels. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes intéressés à estimer de façon rigoureuse les performances thermiques fournies par un UTC construit à cet effet et soumis à différents scénarios d'opération (géométrie, contraintes opératoires et d'exploitation). Pour répondre à cet objectif, l'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences a été privilégiée. Cette méthode est bien adaptée à la modélisation et l'optimisation des systèmes ayant un grand nombre de paramètres. L'utilisation de cette méthode a permis entre autres de répondre à un certain nombre de questions telles que :

- Quel est le paramètre opératoire le plus influent ?
- Dans quel sens le modifier ?
- Comment les paramètres réagissent entre eux ?

L'objectif assigné au plan expérimental élaboré dans cette étude, était de trouver le point de fonctionnement optimal de l'UTC, et de quantifier l'influence des différents paramètres (le revêtement de l'absorbeur, rayonnement, le diamètre des perforations et le débit de l'air) sur les performances thermiques de ce dernier.

Dans un premier temps, lors de la mise en œuvre du plan expérimental, il a été nécessaire de déterminer les paramètres responsables des variations de réponses observées et pour chaque paramètre, déterminer leur domaine de validité.

La revue de la bibliographie a permis de faire un inventaire de tous les paramètres importants. En tout, 11 paramètres ont été identifiés comme étant susceptibles d'influencer les performances de l'UTC. Compte tenu du nombre important de paramètres de contrôle, il a été difficile de quantifier l'effet de tous les paramètres. Des contraintes liées au matériel disponible, au temps et à la méthode statistique, nous ont incités à fixer plusieurs paramètres

de contrôle réduisant ainsi l'ordre du problème à 4 paramètres. D'autre part, l'étude bibliographique et les tests préliminaires ont permis de déterminer le domaine expérimental des paramètres ainsi que leurs niveaux respectifs. Une fois tous les paramètres identifiés ainsi que leur domaine de variation, l'étape suivante consistait à préparer la liste des expériences à réaliser. Cette dernière est constituée de toutes les combinaisons possibles des 4 facteurs retenus à l'étude. Les 4 paramètres considérés répartis sur 3 niveaux de variation notés «-1, 0, 1», ont nécessité un plan expérimental de 3^4 expériences, soit 81 expériences.

Deuxièmement, la mise en œuvre d'une unité expérimentale a permis la réalisation des différents traitements planifiés par le plan expérimental. La méthodologie employée lors de l'exécution des essais est basée sur la mesure des températures T_{abs} , T_{amb} et T_{out} . L'ensemble des données issues des résultats expérimentaux forment une matrice de 6 colonnes et 81 lignes. Cette dernière comporte les valeurs des paramètres codés « -1, 0, 1 » ainsi que leurs réponses mesurées (η_{coll} , ε_{HX}) pour chaque essai. Cette matrice est introduite dans le logiciel STATGRAPHICS Centurion XV en vue d'une analyse statistique.

Troisièmement, la modélisation a permis après réalisation des plans d'expériences et calcul des effets de chaque facteur ainsi que leur interaction, d'établir une expression analytique reliant la fonction de réponse aux paramètres et leurs interactions les plus influentes. Dans cette étude, nous avons envisagé un modèle quadratique ne comportant pas les effets d'interaction d'ordre 3. Les coefficients inconnus du modèle ($\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$) ont été estimés par la technique des moindres carrés. Ils sont au nombre de 15, dont 6 sont des coefficients d'interaction non linéaire d'ordre 2. Pour vérifier la validité du modèle, deux tests statistiques ont été utilisés, soit :

- L'analyse de la variance;
- L'analyse des résidus.

Les résultats, des analyses de variance (Anova) effectuées à partir du modèle associé au rendement de l'UTC, indiquent un coefficient de corrélation R^2 égale à 94,8%. Cette valeur de R^2 indique que 94,8% de la variabilité des données est expliquée par le modèle et non pas par l'erreur expérimentale. L'analyse de résultats a été conclue par une analyse des résidus,

qui permet de déterminer la présence d'anomalie dans les résultats. Pour ce faire, on a dû vérifier trois hypothèses :

- Indépendance des résidus;
- Homogénéité des variances;
- Normalité des résidus.

Après avoir confirmé la validité du modèle, par l'Anova et l'analyse de résidus. Nous avons pu tirer la conclusion qui suit : trois principaux paramètres 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. Rappelons finalement que le revêtement de l'absorbeur et le débit d'air sont les paramètres les plus influents du modèle. Ils constituent à eux seulement, 92% de la variabilité du rendement de l'UTC.

Finalement, l'étude des surfaces de réponses a montré, que leur utilisation procure une aide appréciable dans l'exploitation et la simulation du modèle dans le domaine étudié. L'utilisation de ces dernières a permis d'identifier le réglage optimum des quatre paramètres pour obtenir le rendement maximal de l'UTC.

RECOMMANDATIONS

Dans cette étude, nous avons ouvert une voie vers l'utilisation des plans d'expériences pour l'étude et l'optimisation de certains systèmes en mécanique du bâtiment pour lesquels le modèle du premier degré est inadéquat et qui peuvent être décrits par des modèles du deuxième degré. La méthode des plans d'expériences a démontré sa fiabilité sur les systèmes qui ont un caractère fortement non linéaire. De plus, les besoins industriels font appel de plus en plus aux techniques ou des outils d'optimisation permettant d'améliorer leurs performances. Ceci nous incite à poursuivre la recherche commencée dans ce domaine que nous estimons très prometteur. Les recommandations qu'il est possible d'émettre suite à cette étude sont de deux ordres :

Recommandations relatives à l'unité expérimentale.

- L'étude du plan expérimental sur les UTCs a montré que le capteur non perforé est soumis à un très grand nombre de paramètres explicatifs. Des contraintes, matérielles et de temps, nous ont incités à exclure plusieurs paramètres de contrôle. Ceci est susceptible de limiter l'interprétation des résultats de l'étude. Parmi les paramètres exclus, mentionnons-le pas (P) entre les trous dans l'absorbeur et la vitesse du vent (V_{wind}). Par conséquent, il serait souhaitable de les inclure dans les études à venir.
- Les expériences réalisées dans cette étude sont faites au laboratoire, pour un UTC d'une surface de $0,9 \text{ m}^2$. Ces dernières pourraient être étendues aux UTCs de surfaces plus grandes. De plus, il sera intéressant de les effectuer dans des conditions climatiques extérieures.

Recommandations relatives à la méthode statistique.

- L'étude présente, nous a conduits à effectuer 3^4 expériences. L'utilisation des résultats de ces expériences peut être améliorée en envisageant des plans fractionnaires 3^{4-2} dont le nombre d'expériences à effectuer est moins important. Donc, il serait très intéressant d'entreprendre à l'avenir l'utilisation de la méthodologie de plan expérimental fractionnaire. De plus, la réalisation des expériences a été menée suivant un ordre préalablement choisi. Ceci est dû principalement à des contraintes d'ordre pratique et la

difficulté de changer certains paramètres. L'allocation aléatoire des différents traitements garantit l'objectivité et la fiabilité des conclusions. Toutefois, il est recommandé d'effectuer les essais dans un ordre aléatoire pour équilibrer les effets des variables qui ne sont pas contrôlées.

- Dans cette étude, l'effet du revêtement de l'absorbeur ne montre pas l'effet individuel de l'émissivité sur le rendement de l'UTC. Puisque l'effet de l'émissivité est combiné avec l'effet de l'absorptivité. Par conséquent, il serait judicieux d'effectuer un plan expérimental à deux niveaux dont on étudie l'effet de l'émissivité seul, tout en prenant des revêtements ayant des coefficients d'absorption similaire et des coefficients d'émissivités différentes.

ANNEXE I

RESULTATS DU PLAN EXPÉRIMENTAL

N° Essaie	Tcol (°C)	Tout (°C)	Tamb (°C)	Tout-Tamb (°C)	Tcol-Tamb (°C)	efficacité	Qu(W)	Rendement
1,00	33,14	28,59	25,08	3,51	8,06	43,48	45,53	7,53
2,00	31,20	27,82	24,75	3,07	6,45	47,54	86,65	14,32
3,00	30,27	27,24	24,67	2,57	5,60	45,77	107,97	17,85
4,00	30,50	27,96	24,44	3,52	6,06	58,07	45,69	11,45
5,00	29,92	27,53	24,70	2,83	5,22	54,28	80,07	20,07
6,00	29,07	27,09	24,93	2,16	4,14	52,13	90,84	22,77
7,00	30,43	28,27	24,98	3,29	5,44	60,42	42,70	12,27
8,00	28,84	27,37	24,86	2,51	3,98	63,07	70,92	20,38
9,00	27,94	26,67	24,86	1,82	3,09	58,90	76,49	21,98
10,00	33,14	29,57	25,02	4,55	8,12	56,00	59,02	9,76
11,00	31,13	28,16	24,96	3,20	6,17	51,90	90,49	14,96
12,00	30,37	27,63	25,21	2,43	5,17	46,94	102,08	16,87
13,00	30,49	27,44	24,76	2,68	5,73	46,78	34,81	8,73
14,00	28,83	26,37	24,67	1,70	4,16	40,81	47,95	12,02
15,00	28,33	26,06	24,68	1,38	3,65	37,88	58,26	14,60
16,00	28,49	25,99	23,74	2,25	4,75	47,40	29,24	8,40
17,00	26,90	24,82	23,66	1,15	3,23	35,59	32,52	9,35
18,00	26,49	24,27	23,58	0,69	2,91	23,79	29,13	8,37
19,00	34,80	30,77	26,30	4,47	8,50	52,59	58,04	9,59
20,00	32,70	29,56	26,13	3,43	6,57	52,21	96,91	16,02
21,00	31,66	29,09	26,13	2,96	5,53	53,53	124,60	20,60
22,00	32,25	29,32	26,09	3,23	6,16	52,44	41,94	10,51
23,00	30,83	28,39	26,03	2,36	4,80	49,17	66,68	16,71
24,00	30,06	27,93	26,24	1,69	3,82	44,24	71,14	17,83
25,00	30,18	27,83	25,39	2,44	4,79	50,94	31,68	9,10
26,00	28,91	26,97	25,41	1,56	3,50	44,57	44,08	12,67
27,00	28,15	26,49	25,34	1,15	2,81	40,93	48,41	13,91
28,00	53,76	42,63	24,98	17,65	28,78	61,31	206,24	34,09
29,00	51,25	40,68	24,96	15,72	26,29	59,80	399,70	66,07
30,00	48,60	39,98	25,04	14,94	23,56	63,40	565,81	93,52
31,00	47,48	37,96	24,73	13,23	22,74	58,16	154,58	38,74
32,00	45,22	36,37	24,91	11,46	20,31	56,42	291,30	73,01
33,00	42,97	35,52	24,77	10,75	18,19	59,06	407,11	102,03
34,00	40,97	32,00	23,79	8,21	17,18	47,78	95,92	27,56
35,00	38,92	31,56	23,71	7,85	15,21	51,61	199,61	57,36
36,00	38,06	31,72	24,24	7,48	13,82	54,12	283,38	81,43
37,00	49,30	39,84	24,13	15,72	25,18	62,43	183,69	30,36
38,00	47,01	37,32	24,03	13,29	22,97	57,83	337,83	55,84
39,00	45,56	36,39	24,19	12,21	21,38	57,10	462,46	76,44
40,00	46,23	39,05	24,26	14,79	21,97	67,31	172,83	43,32
41,00	43,31	36,30	24,35	11,95	18,97	63,02	303,94	76,18
42,00	41,65	34,65	24,29	10,36	17,36	59,66	392,33	98,33

43,00	42,10	36,71	24,24	12,47	17,86	69,81	145,67	41,86
44,00	40,09	34,90	24,18	10,72	15,92	67,37	272,66	78,35
45,00	38,26	33,00	24,19	8,81	14,07	62,60	333,65	95,88
46,00	52,54	40,73	25,97	14,76	26,57	55,55	172,49	28,51
47,00	49,51	37,97	25,82	12,15	23,69	51,29	308,95	51,07
48,00	47,61	37,08	25,94	11,14	21,67	51,41	422,04	69,76
49,00	48,05	39,72	26,19	13,53	21,86	61,89	158,12	39,63
50,00	44,89	37,05	25,95	11,10	18,94	58,61	282,25	70,74
51,00	42,89	35,82	26,06	9,76	16,83	57,99	369,76	92,67
52,00	43,93	38,11	25,93	12,18	18,00	67,67	142,34	40,90
53,00	41,29	35,85	26,17	9,68	15,12	64,02	246,14	70,73
54,00	39,82	34,11	25,90	8,21	13,92	58,98	311,03	89,38
55,00	52,52	40,78	26,00	14,78	26,52	55,72	172,67	28,54
56,00	49,40	39,39	25,98	13,41	23,42	57,24	340,88	56,34
57,00	47,19	38,36	25,80	12,56	21,39	58,74	475,98	78,68
58,00	48,62	41,17	26,24	14,93	22,38	66,70	174,42	43,71
59,00	46,21	39,25	26,18	13,07	20,02	65,27	332,32	83,29
60,00	43,98	37,86	26,21	11,65	17,77	65,58	441,43	110,64
61,00	44,75	39,06	26,00	13,06	18,75	69,65	152,60	43,85
62,00	42,07	37,37	26,28	11,08	15,79	70,20	281,79	80,97
63,00	40,34	35,00	26,12	8,89	14,22	62,47	336,61	96,73
64,00	52,96	43,68	26,05	17,63	26,91	65,51	206,03	34,06
65,00	50,15	40,79	26,05	14,74	24,10	61,15	374,70	61,93
66,00	48,05	38,61	26,29	12,32	21,76	56,61	466,74	77,15
67,00	47,30	39,44	25,83	13,60	21,47	63,37	158,97	39,84
68,00	44,34	37,19	26,04	11,15	18,30	60,90	283,44	71,04
69,00	42,38	35,48	25,85	9,62	16,52	58,25	364,60	91,38
70,00	44,35	39,06	25,93	13,13	18,43	71,28	153,49	44,11
71,00	41,37	36,47	26,06	10,41	15,31	68,01	264,73	76,07
72,00	39,67	34,69	26,10	8,58	13,56	63,28	325,16	93,44
73,00	52,69	41,94	25,52	16,42	27,17	60,43	191,89	31,72
74,00	48,63	38,85	25,26	13,59	23,37	58,15	345,56	57,12
75,00	47,05	37,00	25,47	11,53	21,58	53,43	436,81	72,20
76,00	44,68	36,13	24,58	11,55	20,10	57,46	134,98	33,83
77,00	42,83	34,39	24,86	9,53	17,97	53,03	242,33	60,73
78,00	41,41	33,13	24,56	8,57	16,85	50,86	324,67	81,37
79,00	42,84	37,11	25,57	11,54	17,27	66,82	134,86	38,75
80,00	40,50	34,86	25,35	9,51	15,15	62,77	241,82	69,49
81,00	38,96	33,31	25,28	8,03	13,68	58,70	304,21	87,42

ANNEXE II

MATRICE DES EXPÉRIENCES

essaie	ε_{abs}	D	G_T	$\dot{m}$		Essaie	ε_{abs}	D	G_T	$\dot{m}$
1	-1	-1	-1	-1		41	0	0	0	0
2	-1	-1	-1	0		42	0	0	0	1
3	-1	-1	-1	1		43	0	0	1	-1
4	-1	-1	0	-1		44	0	0	1	0
5	-1	-1	0	0		45	0	0	1	1
6	-1	-1	0	1		46	0	1	-1	-1
7	-1	-1	1	-1		47	0	1	-1	0
8	-1	-1	1	0		48	0	1	-1	1
9	-1	-1	1	1		49	0	1	0	-1
10	-1	0	-1	-1		50	0	1	0	0
11	-1	0	-1	0		51	0	1	0	1
12	-1	0	-1	1		52	0	1	1	-1
13	-1	0	0	-1		53	0	1	1	0
14	-1	0	0	0		54	0	1	1	1
15	-1	0	0	1		55	1	-1	-1	-1
16	-1	0	1	-1		56	1	-1	-1	0
17	-1	0	1	0		57	1	-1	-1	1
18	-1	0	1	1		58	1	-1	0	-1
19	-1	1	-1	-1		59	1	-1	0	0
20	-1	1	-1	0		60	1	-1	0	1
21	-1	1	-1	1		61	1	-1	1	-1
22	-1	1	0	-1		62	1	-1	1	0
23	-1	1	0	0		63	1	-1	1	1
24	-1	1	0	1		64	1	0	-1	-1
25	-1	1	1	-1		65	1	0	-1	0
26	-1	1	1	0		66	1	0	-1	1
27	-1	1	1	1		67	1	0	0	-1
28	0	-1	-1	-1		68	1	0	0	0
29	0	-1	-1	0		69	1	0	0	1
30	0	-1	-1	1		70	1	0	1	-1
31	0	-1	0	-1		71	1	0	1	0
32	0	-1	0	0		72	1	0	1	1
33	0	-1	0	1		73	1	1	-1	-1
34	0	-1	1	-1		74	1	1	-1	0
35	0	-1	1	0		75	1	1	-1	1
36	0	-1	1	1		76	1	1	0	-1
37	0	0	-1	-1		77	1	1	0	0
38	0	0	-1	0		78	1	1	0	1
39	0	0	-1	1		79	1	1	1	-1
40	0	0	0	-1		80	1	1	1	0
						81	1	1	1	1

ANNEXE III

MATRICE INTRODUITE DANS LE LOGICIEL STATGRAPHICS

Ordre de l'expérience	Revêtement	Diamètre	Rayonnement	Débit	efficacité	Qu(W)	Rendement
54	0	1	-1	1	58,98	311,03	89,3774
35	0	-1	-1	0	51,614	199,61	57,3585
5	-1	-1	0	0	54,281	80,069	20,0674
81	1	1	-1	1	58,699	304,21	87,4179
44	0	0	-1	0	67,368	272,66	78,3509
3	-1	-1	1	1	45,771	107,97	17,8465
61	1	-1	-1	-1	69,654	152,6	43,8511
66	1	0	1	1	56,61	466,74	77,147
1	-1	-1	1	-1	43,483	45,525	7,52484
48	0	1	1	1	51,407	422,04	69,7579
22	-1	1	0	-1	52,435	41,941	10,5116
40	0	0	0	-1	67,311	172,83	43,3161
21	-1	1	1	1	53,526	124,6	20,5948
10	-1	0	1	-1	56	59,017	9,75482
18	-1	0	-1	1	23,788	29,129	8,37044
56	1	-1	1	0	57,244	340,88	56,3444
51	0	1	0	1	57,992	369,75	92,6703
36	0	-1	-1	1	54,124	283,38	81,4303
26	-1	1	-1	0	44,571	44,075	12,6651
42	0	0	0	1	59,661	392,33	98,3293
60	1	-1	0	1	65,575	441,43	110,635
69	1	0	0	1	58,253	364,6	91,379
2	-1	-1	1	0	47,536	86,652	14,3226
67	1	0	0	-1	63,367	158,97	39,8424
52	0	1	-1	-1	67,667	142,34	40,9026
78	1	1	0	1	50,861	324,67	81,3714
38	0	0	1	0	57,831	337,83	55,8401
12	-1	0	1	1	46,942	102,08	16,8724
20	-1	1	1	0	52,207	96,908	16,0178
8	-1	-1	-1	0	63,065	70,915	20,3779
75	1	1	1	1	53,429	436,81	72,2001
43	0	0	-1	-1	69,808	145,67	41,8597
24	-1	1	0	1	44,241	71,139	17,8293
49	0	1	0	-1	61,894	158,12	39,6285
23	-1	1	0	0	49,167	66,677	16,711
47	0	1	1	0	51,287	308,95	51,0655
33	0	-1	0	1	59,063	407,11	102,032
71	1	0	-1	0	68,006	264,73	76,0712
37	0	0	1	-1	62,432	183,69	30,3616
77	1	1	0	0	53,033	242,33	60,7333
55	1	-1	1	-1	55,721	172,67	28,5401
17	-1	0	-1	0	35,591	32,519	9,3446
30	0	-1	1	1	63,399	565,81	93,522
25	-1	1	-1	-1	50,939	31,683	9,1044
79	1	1	-1	-1	66,821	134,86	38,7534
57	1	-1	1	1	58,743	475,98	78,6749
65	1	0	1	0	61,153	374,7	61,9343
53	0	1	-1	0	64,021	246,14	70,7299
19	-1	1	1	-1	52,588	58,043	9,59385

70	1	0	-1	-1	71,28	153,49	44,1063
29	0	-1	1	0	59,802	399,7	66,0658
7	-1	-1	-1	-1	60,419	42,695	12,2686
27	-1	1	-1	1	40,925	48,408	13,9104
32	0	-1	0	0	56,417	291,3	73,0074
62	1	-1	-1	0	70,201	281,79	80,9741
34	0	-1	-1	-1	47,776	95,923	27,5639
50	0	1	0	0	58,606	282,25	70,7387
80	1	1	-1	0	62,772	241,82	69,4878
11	-1	0	1	0	51,896	90,494	14,9577
14	-1	0	0	0	40,813	47,945	12,0164
15	-1	0	0	1	37,876	58,258	14,6011
28	0	-1	1	-1	61,314	206,24	34,0897
31	0	-1	0	-1	58,159	154,58	38,7411
41	0	0	0	0	63,017	303,94	76,1748
6	-1	-1	0	1	52,126	90,839	22,7667
74	1	1	1	0	58,151	345,56	57,1178
13	-1	0	0	-1	46,781	34,813	8,72498
58	1	-1	0	-1	66,701	174,42	43,7144
64	1	0	1	-1	65,51	206,03	34,0549
63	1	-1	-1	1	62,465	336,61	96,7257
39	0	0	1	1	57,103	462,46	76,4394
9	-1	-1	-1	1	58,898	76,485	21,9784
46	0	1	1	-1	55,551	172,49	28,5111
4	-1	-1	0	-1	58,069	45,694	11,4522
76	1	1	0	-1	57,463	134,98	33,8292
16	-1	0	-1	-1	47,401	29,242	8,40291
59	1	-1	0	0	65,267	332,31	83,2869
73	1	1	1	-1	60,434	191,89	31,7176
68	1	0	0	0	60,903	283,44	71,0382
45	0	0	-1	1	62,603	333,65	95,8766
72	1	0	-1	1	63,282	325,16	93,438

ANNEXE IV

DIFFÉRENTES INSTALLATIONS DES UTCs

PLANT NAME	LOCATION	SIZE	YEAR
CANMET	Ontario, Canada	7,500 ft ²	1997
Ft. Carson Battery Storage Building	Colorado Springs, Colorado, U.S.	300 ft ²	1997
Ontario Hydro and Maintenance Building	Ontario, Canada	800 ft ²	1997
Ontario Ministry of Housing	Ontario, Canada	1,350 ft ²	1997
Spices Board of India, spice drying test	Cochin, India	100 ft ²	1997
Steeltech Building Products Inc., metal fabrication plant	Bloomfield, Connecticut, U.S.	6,200 ft ²	1997
Canadair Division of Bombardier Airplane Manufacturer	Quebec, Canada	108,000 ft ²	1996
Federal Express	Littleton, Colorado, U.S.	5,000 ft ²	1996
Ontario Hydro and Maintenance Building	Ontario, Canada	800 ft ²	1996
Avum Hanger	Colorado Springs, Colorado, U.S.	7,800 ft ²	1995
Bombardier	Quebec, Canada	5,000 ft ²	1995
Bombardier	Quebec, Canada	5,000 ft ²	1995
Bombardier Inc., Rail Cars Manufacturer	Quebec, Canada	4,420 ft ²	1995
Canadian Tool & Die	Winnipeg, Canada	5,400 ft ²	1995
Domco Manufacturing Plant	Quebec, Canada	1,880 ft ²	1995
Ford New Holland Tractor Factory	Manitoba, Canada	22,000 ft ²	1995
Joint Research Centre Engineering Research Facility	Italy	5,630 ft ²	1995
Office Building	Switzerland	5,000 ft ²	1995
Ontario Hydro North West Hydroelectric Headquarters	Ontario, Canada	700 ft ²	1995
Ontario Ministry of Housing	Ontario, Canada	4,500 ft ²	1995
Stampsli Factory	Switzerland	1,000 ft ²	1995
Versatile Farm Equipment (Ford New Holland) Tractor Manufacturer	Manitoba, Canada	21,700 ft ²	1995
ASEAN-Canada Project on Solar-Energy-Drying Processes, Tea-Processing Plant	Malaysia	3,990 ft ²	1994
AVEDA Corporation	Blaine, Minnesota, U.S.	1,270 ft ²	1994
Centre D'Enseignement Professional School	St. Hyacinthe, Pennsylvania, U.S.	6,800 ft ²	1994
Ontario Ministry of Housing	Ontario, Canada	3,580 ft ²	1994
Bombardier Inc., Manufacturing Plant	Quebec, Canada	12,900 ft ²	1993
C.I.M.I.C. Secondary Public School	Quebec, Canada	1,330 ft ²	1993
Eder	Volkermarkt, Austria	2,260 ft ²	1993
General Motors of Canada Wastewater Plant	Ontario, Canada	2,700 ft ²	1993
Ontario Ministry of Housing	Canada	1,200 ft ²	1993
Ontario Ministry of Housing	Ontario, Canada	2,820 ft ²	1993
Stadtwerke Gottingen Cogeneration Plant	Gottingen, Germany	3,980 ft ²	1993
Acier CMP Steel Service Centre	Quebec, Canada	4,225 ft ²	1992
General Motors of Canada Oshawa Battery Plant	Ontario, Canada	4,680 ft ²	1992
National Renewable Energy Laboratory	Golden, Colorado	351 ft ²	1991
Ensite Engine Plant	Ontario, Canada	10,500 ft ²	1990
Ford Motor Company of Canada Oakville Assembly Plant	Ontario, Canada	20,000 ft ²	1990

ANNEXE V

INCERTITUDE DES THERMOCOUPLES

Température (°C)	ERTA1 (°C)	ERTA2 (°C)	ERTA3 (°C)	ERTA4 (°C)	ERTA5 (°C)
0	0,067	-0,037	-0,03	-0,036	-0,098
20	-0,072	-0,079	-0,116	-0,112	-0,128
30	0,265	0,424	0,542	0,252	0,196
40	0,265	0,462	0,186	0,18	0,212
50	0,039	0,067	0,029	-0,058	-0,161
Température (°C)	ERTB1 (°C)	ERTB2 (°C)	ERTB3 (°C)	ERTB4 (°C)	ERTB5 (°C)
0	-0,018	-0,104	-0,005	0,02	-0,109
20	-0,037	-0,165	-0,18	0,11	0,156
30	0,152	0,152	0,086	0,007	0,004
40	0,393	0,345	0,414	0,441	0,55
50	-0,126	-0,268	-0,184	-0,14	-0,254
Température (°C)	ERTC1 (°C)	ERTC2 (°C)	ERTC3 (°C)	ERTC4 (°C)	ERTC5 (°C)
0	*	-0,072	0,008	0,006	-0,116
20	*	-0,03	-0,107	-0,18	-0,088
30	*	-0,013	*	-0,154	-0,226
40	*	0,061	0,017	-0,042	-0,016
50	*	-0,072	-0,099	-0,045	-0,052
Température (°C)	ERTD1 (°C)	ERTD2 (°C)	ERTD3 (°C)	ERTD4 (°C)	ERTD5 (°C)
0	0,013	0,009	-0,075	-0,219	-0,049
20	0,115	0,025	0,107	-0,103	-0,119
30	-0,045	-0,075	-0,263	-0,204	-0,162
40	-0,025	-0,133	0,08	0,106	0,266
50	-0,202	-0,163	-0,114	0,079	0,2
Température (°C)	ERTE1 (°C)	ERTE2 (°C)	ERTE3 (°C)	ERTE4 (°C)	ERTE5 (°C)
0	-0,026	0,018	0,185	0,08	-0,022
20	-0,128	-0,113	-0,072	0,064	0,177
30	-0,084	-0,154	0,064	-0,056	-0,006
40	-0,409	-0,273	-0,3	-0,366	-0,474
50	-0,183	-0,215	-0,493	-0,176	-0,14
Température (°C)	ERTF 1(°C)	ERTF 2(°C)	ERTF 3(°C)	ERTF 4(°C)	ERTF 5(°C)
0	0,117	0,123	-0,01	-0,103	-0,084
20	-0,098	-0,132	-0,001	-0,109	-0,171
30	-0,005	-0,18	-0,167	-0,087	-0,078
40	-0,398	-0,43	-0,424	-0,161	-0,144
50	-0,395	-0,548	-0,399	-0,121	-0,24

- ERTA1 : indique l'erreur dans la température du thermocouple A1.

ANNEXE VI

CARACTÉRISTIQUES DE LA PENTURE THERMALOX 250

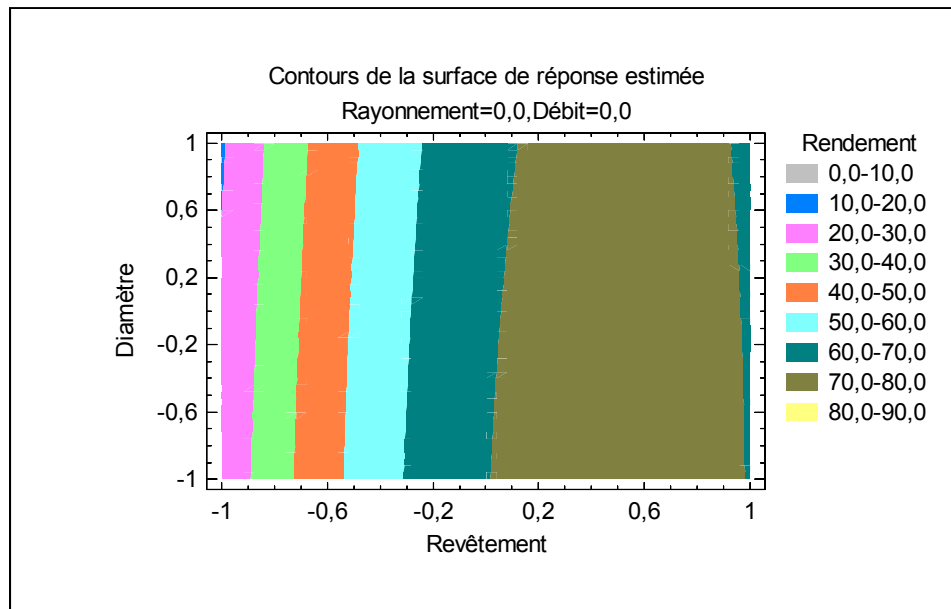
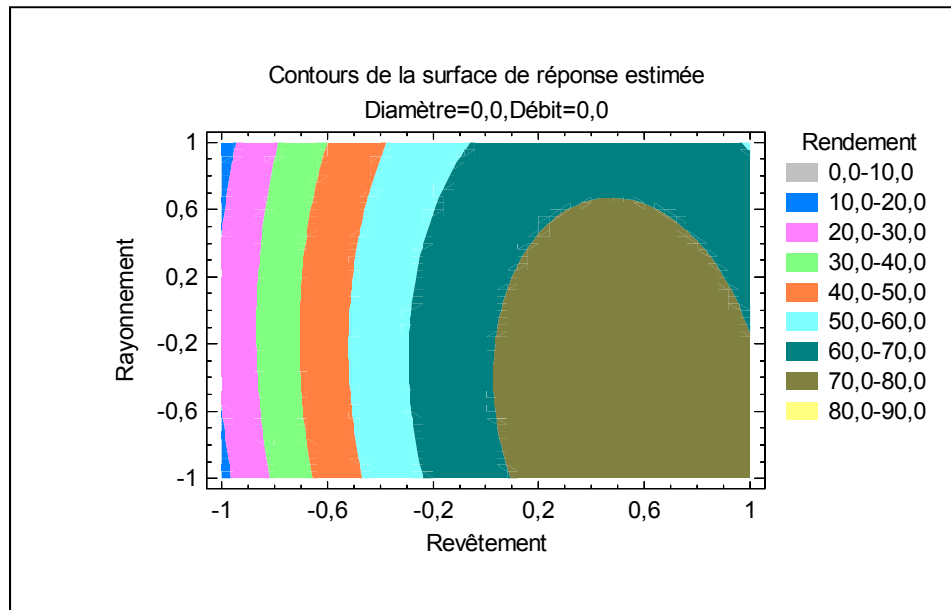
TECHNICAL DATA

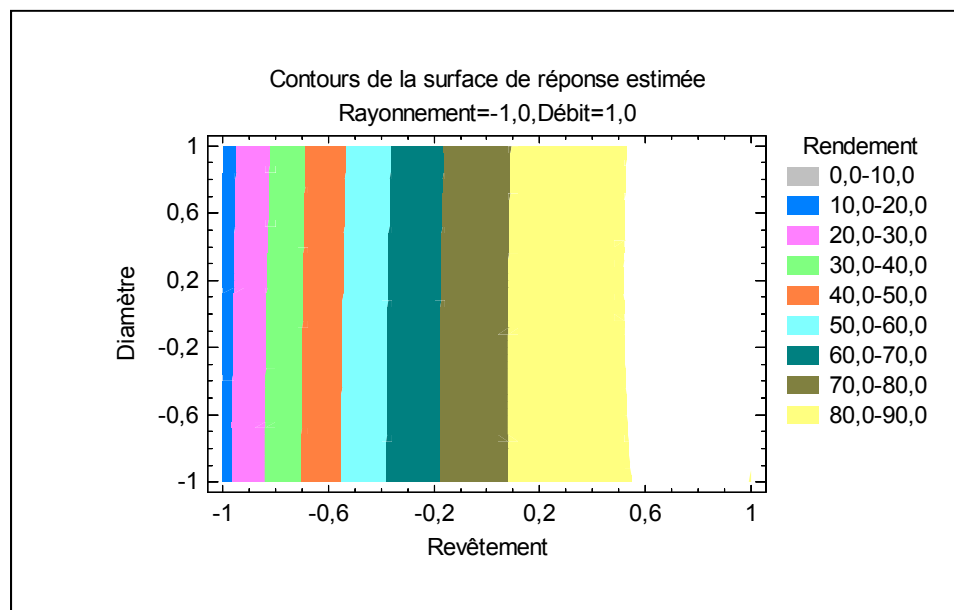
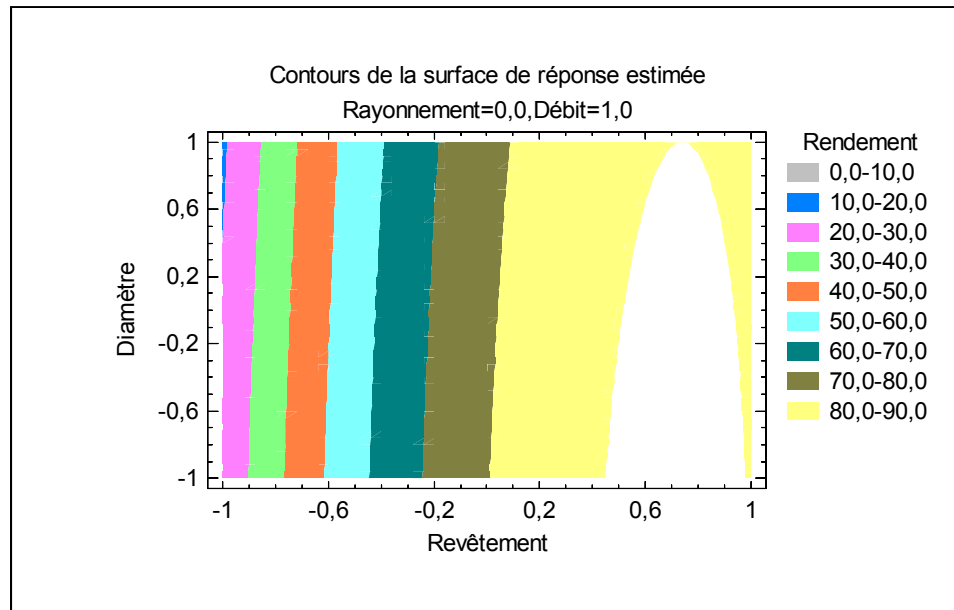
Characteristics	Thurmalox 250
Color	Black
Operating temperature range	Ambient to 500°F (260°C)
Surface temperature at time of application	50-120°F (10-49°C) max. (spray cans, 75°F (24°C) max.
Maximum temperature resistance	1000°F (538°C)
Percent (%) Solids by volume	20
Weight per gallon	9.24 lbs. (1.1 kg/liter)
Theoretical coverage per gallon*	320 mil. sq. ft. (7.9 sq. m. / liter)
Selectivity Data	50°F-500°F (10°C-260°C)
Absorptivity (alpha)-reduced 1:1 with Thurmalox 295 Thinner	
0.5 mils wet (.06 mils dry) [1.5 microns dry]	0.96
1.0 mils wet (.13 mils dry) [3.3 microns dry]	0.96
2.0 mils wet (.25 mils dry) [6.4 microns dry]	0.96
180°F (83°C) Emissivity (epsilon) – reduced 1:1 with Dampney 100 Thinner	
0.5 mils wet (.06 mils dry) [1.5 microns dry]	0.52
1.0 mils wet (.13 mils dry) [3.3 microns dry]	0.65
2.0 mils wet (.25 mils dry) [6.4 microns dry]	0.80
180°F (83°C) Emissivity (epsilon) – unreduced 2.0 mils wet (.50 mils dry) [12.7 microns dry]	0.90
Flash point (Pensky-Martens)	
Thurmalox 250	81°F (27°C)
Thurmalox 295 Thinner	81°F (27°C)
Drying time at 77°F	
Set to touch	10-15 minutes
Heat cure at 350°-400°F	1 hour
Shelf life	1 year

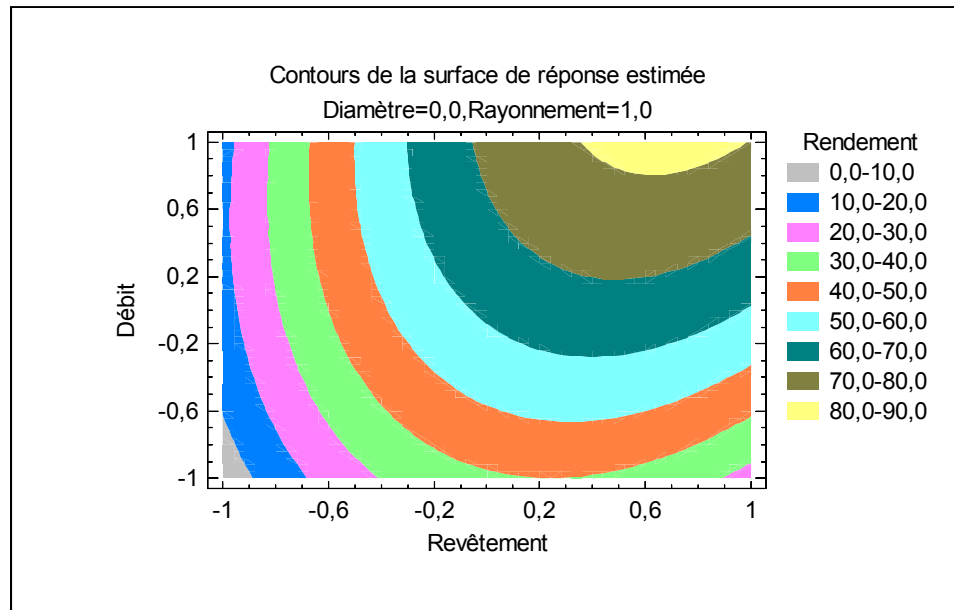
* Note: Actual coverage rate will vary depending upon material losses during mixing and application, and upon type and condition of surface to be coated. Allowance must be made for losses when estimating material requirements. See Bulletin 3110 "Calculating Coating Requirement" for additional information.

ANNEXE VII

GRAPHIQUES DE SURFACES DE RÉPONSE







BIBLIOGRAPHIE

- Arulanandam, S. J., K. G. Terry Hollands et E. Brundrett. 1999. « A CFD heat transfer analysis of the transpired solar collector under no-wind conditions ». *Solar Energy*, vol. 67, n° 1-3, p. 93-100.
- Carpenter, S, et N Meloche. 2002. « The Retscreen Model for Simulating the Performance of Solar Air Heating Systems ». *Proceedings eSim*, p. 11-13.
- Delisle, Veronique. 2008 «Analytical and Experimental Study of a PV/Thermal Transpired Collector ». Master of Applied Science, Waterloo, University of Waterloo, 216 p.
- Douglas C. Montgomery. 2005. *Experimental design*, 6th édition. New York : J. Wiley 643 p. Consulté le 9 septembre 2009.
- Duchez, L., et R. Guyonnet. 1998. « Optimization of wood retification by fractional factorial design (in French) ». *Analisis*, vol. 26, n° 8, p. 39-43.
- Dufailly, V. 2008. « Speciation of arsenic in seafood samples by HPLC-ICP-MS coupling after microwaves assisted extraction (MAE). Contribution to the evaluation of risks by assessment of its bioaccessibility ».
- Dufresne, JL, A Lahellec et LM Chounet. 1990. « Procédure d'identification inclusive d'un système thermique. Etude de cas: caractérisation d'un capteur solaire à air en régime dynamique ». *revue générale de thermique*, vol. 339.
- Dymond, C., et C. Kutscher. 1997. « Development of a flow distribution and design model for transpired solar collectors ». *Solar Energy*, vol. 60, n° 5, p. 291-300.
- Environnement Canada. 2009. « Graphique linéaire montrant le changement de la température globale, de 1860 à 1999 ». en ligne. Ottawa: <http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/maps/climatechange/figure_2.gif/image_view>. Consulté le 10 septembre 2009.
- Fleck, B. A., R. M. Meier et M. D. Matovic. 2002. « A field study of the wind effects on the performance of an unglazed transpired solar collector ». *Solar Energy*, vol. 73, n° 3, p. 209-216.
- Gawlik, Keith, Craig Christensen et Charles Kutscher. 2005. « A Numerical and Experimental Investigation of Low-conductivity Unglazed, Transpired Solar Air Heaters ». *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 127, n° 1, p. 153-155.

- Gogakis, C. 2005. « Theoretical and Experimental Analysis of SolarWall R Technology ». *MASc Thesis. The University of Reading, UK.*
- Golneshan, AA. 1995. « Forced convection heat transfer from low porosity slotted transpired plates ». University of Waterloo.
- Gunnawiek, L. H., E. Brundrett et K. G. T. Hollands. 1996. « Flow distribution in unglazed transpired plate solar air heaters of large area ». *Solar Energy*, vol. 58, n° 4-6, p. 227-237.
- J. Dagnelie. 2000. « La planification des expériences: Choix des traitements et dispositif expérimental ». *Journal de la Société française de statistique*, vol. 141, n° 1-2, p. 5-69.
- Jayaraman, K. 1999. « Manuel de statistique pour la recherche forestière ». en ligne. FO: GCP/RAS. <<http://www.fao.org/DOCREP/003/X6831F/X6831F00.HTM>>. Consulté le 10 septembre 2009.
- Kutscher. 1992. « An investigation of heat transfer for air flow through low porosity perforated plates ». Boulder, university of colorado, 250 p.
- Kutscher, C. F., C. B. Christensen et G. M. Barker. 1993. « Unglazed transpired solar collectors: heat loss theory ». *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 115, n° 3, p. 182-188.
- Kutscher, C.F. 1994. « Heat exchange effectiveness and pressure drop for air flow through perforated plates with and without crosswind ». *Journal Name: Journal of Heat Transfer (Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Series C); (United States); Journal Volume: 116:2, p. Medium: X; Size: Pages: 391-399.*
- Leon, M. Augustus, et S. Kumar. 2007. « Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors ». *Solar Energy*, vol. 81, n° 1, p. 62-75.
- Liu, B., et R. Jordan. 1961. « Daily insolation on surfaces tilted towards equator ». *Journal Name: ASHRAE J.; (United States); Journal Volume: 10, p. Medium: X; Size: Pages: 53.*
- M. Vigier. 1988. *Pratique des plans d'expériences : methodologie Taguchi et complements* Paris : Éditions d'Organisation, 189 p.
- Matrix Energy. 2008. « le systeme Air Matrix de chauffage solaire de l'air ». Montreal: <<http://www.matrixenergy.ca/a-propos/presse.html>>. Consulté le septembre 2009.

- Nellis, GF. Klein, SA, . 2002. *Intermediate Heat Transfer with Software Tools*. Madison WI: Cambridge University Press.
- Afnor. 2005. *Installations solaires thermiques et leurs composants - Capteurs solaires - Partie 2 : Méthode d'essai*. en ligne. Comité Technique CEN/TC 312. <http://enr.cstb.fr/file/rub12_doc106_7.pdf>. Consulté le 9 septembre 2009.
- Office de l'efficacité énergétique. 2008. « Base de données complète sur la consommation d'énergie au canada ». En ligne. ottawa: ressources naturelles canada. <http://oe.e.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/tableaux_complets/index.cfm?attr=0>. Consulté le 10 septembre 2009.
- Perin-Lavasseur, Zoe. 2004. « Etude experimentale d'un systeme de retention des particules fines dans un formeur de laboratoire ». M.Sc.A, 101 p. <<http://proquest.umi.com/pqdweb?did=766854901&Fmt=7&clientId=46962&RQT=309&VName=PQD>>. Consulté le 28 septembre 2009.
- Peuser, Felix A. 2005. *Installations solaires thermiques : conception et mise en oeuvre 1*, le moniteur. Coll. « paris ». systemes solaires, 403 p. Consulté le 28 septembre 2009.
- RETSscreen. 2009. « Analyse des systèmes de chauffage solaire de l'air ». en ligne. Ressources naturelles Canada. <<http://www.retscreen.net/fr/12.php>>. Consulté le 5 septembre 2009.
- RETSscreen. 2009. *Logiciel d'analyse de projets d'énergies propres*. En ligne. Varenne-Montréal <<http://www.retscreen.net/fr/download.php>>. Consulté le 7 septembre 2009.
- Shc. IEA. 1999. *Low cost, High Performance Solar Air- Heating Systemes Using Perforated Absorbers*. Coll. « Solar heating and cooling programme », 14. USA. <<http://www.iea-shc.org/task14/publications/index.html>>. Consulté le 10 septembre 2009.
- Sparrow, E. M., et M. Carranco Ortiz. 1982. « Heat transfer coefficients for the upstream face of a perforated plate positioned normal to an oncoming flow ». *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 25, n° 1, p. 127-135.
- Spitz, J 1984. « Matériaux sélectifs pour la conversion photothermique de l'énergie solaire ». *J. Optics (Paris)*, vol. 15, n° 5, p. 325-332.
- St-Joseph. 2006. « Évolution de l'efficacité énergétique au canada 1990-2004 ». En ligne. <<http://www.oe.e.nrcan.gc.ca/Publications/statistiques/evolution06/pdf/evolution06.pdf>>. Consulté le 8 septembre 2009.

- STATGRAPHICS Centurion XV. 2009. *Statgraphics Centurion XV*, version. XV. École de technologie supérieure (Montréal) <<http://www.etsmtl.ca/>>.
- Statistique Canada. 2008. « Dépenses de l'industrie canadienne liées à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ». Ottawa: <<http://www.statcan.gc.ca/pub/16-002-x/2008002/article/10623-fra.htm>>. Consulté le 10 septembre 2009.
- Summers, DN, JW Mitchell, SA Klein et WA Beckman. 1996. « Thermal simulation and economic assessment of unglazed transpired collector systems ». In.
- Swift. 2009. *outil de conception d'installations de capteurs Solarwall*, version. 2009. en ligne. Canmet énergie,. <http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-rncan.gc.ca/fra/outils_logiciels/swift.html>. Consulté le 23 septembre 2009.
- Trnsys. 2009. *TRaNsient SYstems Simulation program*. University of Wisconsin, Madison <<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/default.htm>>. Consulté le 10 septembre 2009.
- Van Decker, G. W. E., K. G. T. Hollands et A. P. Brunger. 2001. « Heat-exchange relations for unglazed transpired solar collectors with circular holes on a square or triangular pitch ». *Solar Energy*, vol. 71, n° 1, p. 33-46.