

Dédicace

À feu mon père, à ma mère et à tous mes frères et soeurs,

À mon épouse Béatrice NGOABETA

À mes enfants

MALENGUINZA Hermine Jasmine,

MALENGUINZA Anaiss Léocadie,

MALENGUINZA Salomé Divine

Je dédie ce travail

Remerciements

Ce travail se présente dans le cadre d'une thèse en cotutelle entre l'université d'Abomey Calavi à l'Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi (E.P.A.C) au Bénin et l'Université de Bangui en Centrafrique, sous la direction conjointe du Professeur Antoine VIANOU, du Docteur Eusèbe AGOUA et du Docteur Luc MARBOUA BARA. L'ensemble des travaux expérimentaux et théoriques menés dans le cadre de cette thèse a été réalisé entre deux laboratoires : le Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (L.E.M.A) au Bénin et le Laboratoire d'Energétique Carnot (L.E.C) en Centrafrique.

Je tiens à remercier les différentes personnes et institutions qui ont rendu possible l'aboutissement de ce travail :

- Pr Antoine VIANOU, Dr. Luc MARBOUA BARA, Dr. Eusèbe AGOUA, mes directeurs de thèse, pour l'honneur que j'ai eu de travailler avec eux ainsi que pour leur confiance en moi,
- tous les enseignants de l'École Polytechnique d'Abomey Calavi "*Sciences Pour l'Ingénieur (S.P.I)*",
- Dr. Muriel BIGAN de l'université de Lille 1 pour sa contribution non négligeable à ma formation sur la méthode des plans d'expériences d'une part et pour le don de matériels d'autre part. Qu'elle trouve ici mes sincères remerciements,
- Pr. Jean - Marie BASSIA pour ses conseils en nous encourageant d'aller plus loin dans les études,
- Pr. Joseph MABINGUI pour ses conseils,

- Dr. Jean M'BOLIGUIPA, Responsable du Laboratoire d'Energétique Carnot,
- la Fondation Aide Populaire d'Urgence (FAPU) pour le financement des travaux de cette thèse. Que la Présidente de cette fondation Madame Henriette STEINBERG et tout son personnel trouve ici mes sincères remerciements,
- la région Nord Pas de Calais (France) pour sa dotation en kits de panneaux solaires.
- Je remercie très sincèrement l'Ambassade de France en République centrafricaine pour son soutien à l'Université de Bangui et qui se reflète dans ce travail.

Je ne peux oublier tous les membres des deux laboratoires :

- Dr. Elisabeth ALLOGNON (L.M.A),
- Dr. Aristide HOUNGAN (L.M.A),
- Dr. Christian Djidjoho AKOWANOU (L.M.A),
- Dr. OUMAROU Sanda Abbo (L.E.C),
- Dr. Yvon Simplicie Kondji le Chef de Département de physique (L.E.C),
- Doctorant Paul NGAISSONA (F.S),
- Madame Saratou FATOKE secrétaire du Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée,
- Mademoiselle Judith TELANGA TOUAFIO et Monsieur LAPELOU Crépin, étudiants en Master II de physique au Laboratoire d'Energétique Carnot (L.E.C) à l'Université de Bangui que j'ai encadrés pour leurs mémoires.
- Je remercie très sincèrement les rapporteurs qui ont bien voulu juger ce travail notamment :
- le Pr. Philippe SUPIOT de l'Université Sciences et Technologies de Lille 1

- (France),
- le Pr. Kossi NAPO de l’Université de Lomé (Togo),
 - le Pr. Luc CHOISNARD de l’Université Joseph Fourier à Grenoble (France)

Je veux remercier en particulier :

mon épouse NGOABETA Béatrice pour m’avoir soutenu dès le début de ce travail, pendant quelques moments difficiles et pour tout l’intérêt qu’elle a porté à mon travail,

Je ne peux oublier mon meilleur ami Jean - Christian Amédée MANDJEKA alias Banda pour son soutien moral.

Table des matières

Table des matières	v
Table des figures	viii
Liste des tableaux	xi
1 Étude Bibliographique	4
1.1 Le séchage solaire	4
1.1.1 Les différents modes de séchage solaire	5
1.1.1.1 Séchage en mode direct.	6
1.1.1.2 Séchage en mode indirect	7
1.2 Séchage par convection	7
1.2.1 Exemples de séchoirs solaires	8
1.2.1.1 Mode direct et convection naturelle	9
1.2.1.2 Mode indirect et convection naturelle	10
1.2.1.3 Mode indirect et convection forcée	12
1.3 Avancées sur les capteurs et la modélisation des transferts	13
2 Modélisation et simulation du capteur plan double vitrage	17
2.1 Introduction	17
2.2 Evaluation de la potentialité énergétique solaire de la Centrafrique : Cas du site de Bégoua et de l'Université de Bangui	18
2.2.1 Modèles théoriques établis.	19
2.2.2 Description des modèles	19
2.2.2.1 Relation de A. A. M. Sayigh	19
2.2.2.2 Relation de Swartman	20
2.2.2.3 Relation de Garg et al.	21
2.2.2.4 Relations de Sabbagh et al.	22
2.2.2.5 Relation de Hussain et al.	22
2.2.2.6 Relation de A.S Sambo	23
2.2.2.7 Modèle de W.E. Alnaser	23
2.2.3 Moyenne mensuelle par jour de l'irradiation diffuse.	24
2.2.3.1 Modèle de Liu et Jordan	24
2.2.3.2 Modèle de Page	25

2.2.3.3	Modèle de Collares-Pereira et al.	25
2.2.3.4	Relation de Erbs, Klein et Duffie	26
2.2.3.5	Relation d'Iqbal	26
2.3	Données utilisées	27
2.4	Données expérimentales et modèle retenu	27
2.4.1	Flux solaire mesuré sur Les deux sites	28
2.4.1.1	Site de Bégoua	28
2.4.1.2	Site de l'Université de Bangui	30
2.4.2	Modélisation par une fonction \cos^2	31
2.4.3	Modélisation par une fonction gaussienne	32
2.4.4	Méthode de comparaison	33
2.5	Éléments constitutifs du capteur plan double vitrage et instruments de mesures	34
2.5.1	Éléments constitutifs du capteur plan double vitrage	34
2.5.1.1	L'absorbeur	34
2.5.1.2	Isolation et vitrage	35
2.5.2	Instruments de mesures pour l'étude du capteur double vitrage	36
2.6	Modélisation	37
2.6.1	Hypothèse simplificatrice	37
2.6.2	Paramètres et caractéristiques du capteur plan double vitrage	38
2.6.2.1	Paramètres externes	38
2.6.2.2	Paramètres internes	38
2.6.3	Bilan thermique	40
2.6.3.1	Bilan thermique de la première vitre	42
2.6.3.2	Bilan thermique de la seconde vitre	43
2.6.3.3	Bilan thermique de l'absorbeur et du fluide caloporteur	43
2.6.3.4	Récapitulation des équations obtenues	45
2.7	Modélisation des coefficients d'échange thermique	47
2.7.1	Échange thermique par convection	47
2.7.1.1	Effet du vent : modélisation du coefficient de convection externe	47
2.7.1.2	Coefficient d'échange entre les deux vitres	48
2.8	Simulation de la température de sortie du capteur plan double vitrage	48
2.8.1	Détermination expérimentale du coefficient d'échange de chaleur du fluide caloporteur	50
2.8.1.1	Protocole expérimental	51
2.8.1.2	Réalisation de l'expérience	51

3 Optimisation du capteur plan double vitrage par la méthode des plans d'expériences 55

3.1	Présentation de la méthode des plans d'expériences	55
3.1.1	Le plan factoriel complet	56
3.1.2	Le plan composite centré réduit	59
3.1.3	Qualité des modèles	62
3.2	Optimisation du rendement du séchoir	63

3.2.1	Recherche des facteurs influents	63
3.2.2	Recherche des conditions optimales	71
3.3	Conclusion	84
4	Séchage de quelques produits alimentaires : cas de la banane et du gombo	85
4.1	Généralités sur le séchage	85
4.1.1	L'eau dans les produits agro-alimentaires considérés comme milieux poreux	86
4.1.2	Évacuation de l'eau lors du séchage	86
4.1.2.1	Activité de l'eau dans le produit	86
4.1.2.2	Cinétique de séchage	87
4.1.3	Avancée de la modélisation mathématique des transferts lors du séchage .	91
4.2	Description du séchoir solaire pliable et portatif	95
4.2.1	Capteur plan double vitrage	95
4.2.1.1	Éléments constitutifs du capteur plan	95
4.2.2	Enceinte de séchage	96
4.3	Méthodologie et instruments de mesure	96
4.3.1	Méthodologie	96
4.3.2	Instruments de mesure	97
4.4	Résultats du séchage de gombo et de banane	98
4.4.1	Optimisation du séchage de gombo et de banane en convection naturelle par la méthode des plans d'expériences	98
4.4.2	Conclusion sur l'optimisation en convection naturelle	110
4.4.3	Cinétique de séchage de produits par convection naturelle : cas du gombo et de la banane	111
4.4.3.1	Cinétique de séchage du gombo	112
4.4.3.2	Cinétique de séchage de la banane	113
4.4.4	Séchage de gombo et de banane en convection forcée par la méthode des plans d'expériences	114
4.4.4.1	Plan d'expériences en convection forcée	115
4.4.4.2	Conclusion sur la qualité du modèle et l'analyse des résultats de l'optimisation	128
4.4.5	Cinétique de séchage en convection forcée	129
4.4.6	Comparaison entre les deux modes de convection	130
4.4.6.1	Comparaison avec les résultats obtenus par optimisation . . .	130
4.4.6.2	Comparaison des cinétiques de séchage	130
4.4.7	Conclusion sur le séchage utilisant le séchoir solaire pliable et portatif (SSPP)	131
	Bibliographie	135

Table des figures

1.1	Séchoir direct	6
1.2	Séchoir indirect	7
1.3	Séchoirs directs avec une couverture en plastique	9
1.4	Séchoir indirect convection naturelle	10
1.5	Séchoir indirect convection naturelle avec réflecteur	11
1.6	Séchoir indirect à convection forcée	13
2.1	Courbe expérimentale du flux solaire : Site de Bégoua année 2008	29
2.2	Courbe expérimentale du flux solaire : Site de l'Université de Bangui 2010	31
2.3	Courbe comparative des deux modèles pour le site de Bégoua Mars 2008	33
2.4	Courbe comparative des deux modèles pour le site de l'Université de Bangui Mars 2010	33
2.5	Photo de la mini station météo	37
2.6	Photo du multiplexeur avec les thermocouples + PC pour le traitement des données	37
2.7	Capteur solaire double vitrage	41
2.8	Courbe de simulation de la température de sortie du capteur plan double vitrage pour le site de l'université de Bangui Mars 2010	50
2.9	Courbe d'évolution du coefficient d'échange de chaleur du fluide caloporteur.	52
2.10	Courbe de comparaison des températures simulées et mesurées	54
3.1	Évolution du flux solaire en fonction du temps	65
3.2	Représentation des coefficients de validité du modèle R^2 et Q^2 sur les réponses Y_1 (température de sortie) et Y_2 (rendement) du capteur	66
3.3	Histogramme des effets pour la réponse Y_1	68
3.4	Histogramme des effets pour la réponse Y_2	68
3.5	Surface de réponse pour la température de sortie (Y_1) en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement	69
3.6	Surface de réponse pour le rendement du capteur Y_2 en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement	70
3.7	Représentation des coefficients de validité du modèle R^2 et Q^2 pour les réponses Y_1 et Y_2 pour le plan composite	74
3.8	Histogramme des effets pour la réponse Y_1	77
3.9	Histogramme des effets pour la réponse Y_2	77
3.10	Réponses prédites en fonction des réponses observées pour la réponse température de sortie (Y_1)	80

3.11	Réponses prédites en fonction des réponses observées pour la réponse de rendement du capteur (Y_2)	81
3.12	Surface de réponse pour la réponse Y_1 en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement avec un intervalle de mesure de 40 minutes ainsi qu'en fonction de l'épaisseur des vitres 3 mm	82
3.13	Surface de réponse pour la réponse Y_2 en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement avec un intervalle de mesure de 40 minutes ainsi qu'en fonction de l'épaisseur des vitres 3 mm	82
3.14	Surface de réponse pour la réponse Y_2 en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement avec un intervalle de mesure de 40 minutes ainsi qu'en fonction de l'épaisseur des vitres 5 mm	83
4.1	Allure d'une cinétique de séchage à trois phases	88
4.2	Photo du séchoir solaire pliable et portatif	96
4.3	Photo de la mini station météo	98
4.4	Représentation des coefficients de validité du modèle R^2 et Q^2 pour les réponses Y_1 et Y_2 pour le plan factoriel complet pour le séchage des produits	101
4.5	Histogramme des effets sur la réponse teneur en eau	102
4.6	Histogramme des effets pour le temps de séchage	103
4.7	Surface de réponse pour le gombo avec une vitre	106
4.8	Surface de réponse pour le gombo avec deux vitres	106
4.9	Surface de réponse pour la banane avec une vitre	107
4.10	Surface de réponse pour la banane avec une vitre	108
4.11	Surface de réponse pour la banane avec deux vitres	108
4.12	Courbe des réponses observées en fonction des réponses prédites pour la réponse temps de séchage	109
4.13	Courbe des réponses observées en fonction des réponses prédites pour la réponse teneur en eau finale	109
4.14	Cinétique de séchage de gombo en tenant compte des effets du nombre de claies et de vitres	113
4.15	Cinétique de séchage de la banane en tenant compte des effets du nombre de vitres	114
4.16	Histogramme des effets des différents facteurs pour la réponse temps de séchage	117
4.17	Surface de réponse pour le temps de séchage en fonction des vitesses de ventilation pour une masse de banane de 300 g	118
4.18	Surface de réponse pour le temps de séchage en fonction des vitesses de ventilation pour une masse de banane de 500 g	118
4.19	Histogramme des effets des différents facteurs pour la réponse taux d'humidité pour la claie 1	119
4.20	Histogramme des effets des différents facteurs pour la réponse taux d'humidité pour la claie 2	121
4.21	Histogramme des effets des différents facteurs pour la réponse taux d'humidité pour la claie 3	121
4.22	Surface de réponse pour le taux d'humidité en fonction des vitesses de ventilation pour une masse de produit à sécher faible et forte pour la claie 1	123
4.23	Surface de réponse pour le taux d'humidité en fonction des vitesses de ventilation pour une masse de produit à sécher faible et forte pour la claie 2	124

4.24	Surface de réponse pour le taux d'humidité en fonction des vitesses de ventilation pour une masse de produit à sécher faible et forte pour la claie 3	125
4.25	Réponses observées en fonction des réponses prédites pour la réponse temps de séchage . .	127
4.26	Réponses observées en fonction des réponses prédites pour le taux d'humidité sur les différentes claies	128
4.27	Effet de la masse du produit à sécher sur la cinétique de séchage de banane	130
4.28	Cinétique de séchage de la banane en convection naturelle et forcée	131

Liste des tableaux

2.1	Différentes zones climatiques	20
2.2	Paramètres météorologiques des deux sites	27
2.3	Valeurs du flux solaire (W/m^2) mesuré en 2008 sur le site de Bégoua	28
2.4	Valeurs du flux solaire mesuré (W/m^2) en 2010 sur le site de l'Université de Bangui	30
2.5	Erreur relative sur les modèles retenus	34
3.1	Construction d'un plan d'expériences factoriel complet avec 2 niveaux	57
3.2	Construction d'un plan d'expériences avec interaction entre les deux facteurs	57
3.3	Exemple de construction d'un plan composite centré réduit	60
3.4	Construction d'un plan composite avec répétitions	61
3.5	Choix des facteurs étudiés et de leurs niveaux de variation pour l'étude réalisée	63
3.6	Plan factoriel complet 2^3 avec les variables en valeurs codées et naturelles ainsi que les réponses obtenues	64
3.7	Effets principaux et d'interactions sur la réponse R_1	67
3.8	Effets principaux et d'interactions sur la réponse R_2	67
3.9	Facteurs et niveaux étudiés pour le plan composite	72
3.10	Plan composite centré réduit en variables codées et naturelles et les réponses mesurées . . .	72
3.11	Effets principaux, d'interactions et quadratiques sur la réponse Y_1	75
3.12	Effets principaux, d'interactions et quadratiques sur la réponse Y_2	76
3.13	Analyse ANOVA pour la réponse Y_1	78
3.14	Analyse ANOVA pour la réponse Y_2	79
4.1	Variables naturelles et niveaux des facteurs pour le plan d'expériences	99
4.2	Plan factoriel complet et résultats obtenus	100
4.3	Valeurs des coefficients pour la réponse humidité finale du produit à sécher	102
4.4	Valeurs des coefficients pour la réponse temps de séchage	103
4.5	Analyse ANOVA pour la réponse teneur en eau	110
4.6	Analyse ANOVA pour la réponse temps de séchage	110
4.7	Variables naturelles et niveaux des facteurs pour le plan d'expériences en convection forcée : cas de la banane	115
4.8	Plan composite centré réduit en variables naturelles et résultats obtenus	116
4.9	Valeurs des coefficients pour la réponse temps de séchage en convection forcée	117
4.10	Valeurs des coefficients pour la réponse taux d'humidité pour la claie 1	120
4.11	Valeurs des coefficients pour la réponse taux d'humidité pour la claie 2	121

4.12	Valeurs des coefficients pour la réponse taux d'humidité pour la claie 3	122
4.13	Analyse ANOVA pour la réponse taux d'humidité pour les différentes claies	126
4.14	Analyse ANOVA pour la réponse temps de séchage	127
4.15	Résultats sur la comparaison de deux modes de séchage en convection naturelle et forcée . .	132

Liste des symboles

h, h_{cv}, h_f	coefficient d'échange de chaleur par convection (W/m^2C)
\vec{g}	flux solaire maximal (m/s^2)
C_{pa}	chaleur massique de l'air (J/kgC)
D_s	débit d'air (m^3/s)
E_g	flux solaire (W/m^2)
E_{max}	flux solaire maximal (W/m^2)
F_r, F'	coefficient d'efficacité du capteur
h_R	coefficient d'échange de chaleur par rayonnement (W/m^2C)
I	flux solaire incident (W/m^2)
I_a	flux solaire absorbé (W/m^2)
K_D, K_T	indice de clarté
L	longueur du capteur (m)
P_a	puissance absorbée (W)
P_p	puissance perdue (W)
P_u	puissance utile (W)
S	surface du capteur (m^2)
s_e	section d'entrée d'air du capteur (m^2)
T_3	température de l'absorbeur ($^{\circ}C$)
T_{max}	température maximale du mois ($^{\circ}C$)
T_{min}	température minimale du mois ($^{\circ}C$)
t_m	durée du jour (h)
T_s	température de sortie de l'air ($^{\circ}C$)
T_v	température de la vitre ($^{\circ}C$)

U_p	coefficient de perte thermique ($\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$)
v	vitesse du vent (m/s)
w_s	angle horaire de lever du soleil ($^\circ$)
a	duré d'ensoleillement (h)
c	constante
D	débit d'air à l'entrée du capteur (m^3/s)
DF	degré de liberté
F	coefficient de Fisher

Nombres adimensionnels

$Fr :$	nombre de Froude
$Ga :$	nombre de Grashof
$Nu :$	nombre de Nusselt
$Pr :$	nombre de Prandlt
$Pe :$	nombre de Peclet
$Re :$	nombre de Reynolds
$Ri :$	nombre de Richardson

Lettres grecques

α :	angle d'inclinaison du capteur
α_v :	coefficient d'absorption (%) du verre
α_3 :	coefficient d'absorption de l'absorbeur (%)
β :	coefficient de température (K^{-1})
ε_A :	émissivité de l'absorbeur (%)
ε_v :	émissivité de la vitre (%)
η :	rendement du capteur (%)
λ :	coefficient de conductivité thermique ($W/m^\circ C$)
λ_v :	coefficient de conductivité thermique de la vitre ($W/m^\circ C$)
λ_A :	coefficient de conductivité thermique de l'absorbeur ($W/m^\circ C$)
ρ :	masse volumique de l'air ($kg\ m^{-3}$)
σ :	constante de Stefan-Boltzmann ($5.67.10^{-8}W/m^2K^4$)
τ :	coefficient de transmittivité (%)
ϕ :	flux solaire (W/m^2)
ΔT :	différence de température ($^\circ C$)

Introduction générale

L'énergie solaire a été, depuis longtemps, utilisée pour produire la chaleur. Son domaine d'applications est vaste et varié. L'eau chaude sanitaire, le séchage des produits agro-alimentaires et la production d'électricité en sont quelques exemples sommaires dans la filière thermodynamique. En République Centrafricaine en général, et plus particulièrement au Laboratoire d'Énergétique Carnot, nous nous intéressons à l'utilisation des énergies nouvelles et renouvelables qui sont non polluantes pour aider au développement local et plus précisément à la conception de séchoir solaire pliable et portatif nécessitant l'utilisation de l'énergie solaire. Une fois construit, il est alors nécessaire de l'optimiser en vue de l'utiliser pour sécher des produits alimentaires.

En effet, l'objectif de ce séchoir est double :

- permettre l'obtention des produits agricoles disponibles au cours des différentes saisons grâce à une meilleure conservation de ces produits séchés,
- avoir des produits de qualité à la fois sur le plan hygiénique et sécuritaire que sur le plan gustatif et nutritionnel.

Il est à noter que la performance du séchoir dépend du choix des matériaux utilisés pour la fabrication de celui-ci, de la conception du capteur solaire qui lui est associé, de son orientation, de la latitude du lieu afin de recevoir le maximum du flux solaire mais également de la compréhension et de l'interprétation des phénomènes physiques notamment le mécanisme de transferts thermique et massique.

En effet, l'analyse de ces phénomènes de transfert de chaleur et de masse permet :

- de mieux connaître la relation procédé-produit,
- d'analyser un procédé afin de le transposer dans un contexte industriel en

tenant compte des critères environnementaux et économiques.

Ainsi le présent travail a donc pour but de réaliser une investigation théorique et expérimentale permettant d'expliquer au mieux les écoulements convectifs en faisant une modélisation mathématique puis d'étudier le profil des transferts de chaleur et de masse dans le séchoir solaire pliable et portatif conçu spécifiquement comme système pilote. Il présente également comme objectif d'étudier et de maîtriser tous les éléments susceptibles d'influer sur le rendement d'un capteur plan double vitrage équipant le séchoir solaire.

Ce mémoire est découpé en quatre chapitres :

- Une étude bibliographique détaillée, qui retrace les recherches engagées dans le domaine du séchage et plus particulièrement sur les différents séchoirs solaires qui ont été réalisés dans différents pays, constitue le premier chapitre de ce mémoire.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du capteur afin de proposer un modèle théorique traduisant les phénomènes de transferts thermique et massique.
- Dans le troisième chapitre, nous exposons comment l'optimisation du capteur par la méthode des plans d'expériences a pu être réalisée en étudiant l'influence des paramètres pouvant lui être liés.
- Le dernier chapitre est réservé à l'utilisation du séchoir solaire ainsi conçu et réalisé. L'expérimentation est faite sur le séchage de deux produits de caractéristiques différentes : la banane et le gombo avec deux modes de convection naturelle et forcée afin de valider les résultats théoriques énoncés au cours de ce travail.

Enfin nous terminons par une conclusion afin de dresser un bilan du travail effectué et de dégager ainsi les points forts de l'étude théorique et expérimentale réalisée sur le séchoir solaire pliable et portatif et les perspectives de recherches et de développement sont énoncées.

Chapitre 1

Étude Bibliographique

1.1 Le séchage solaire

Le séchage est l'opération qui consiste à éliminer d'un corps la totalité ou une partie d'un solvant y étant contenu, ce solvant étant bien généralement de l'eau.

Il peut être utilisé dans de larges domaines variés allant du séchage du papier [1] aux textiles [2] jusqu'à certains déchets. Toutefois le domaine où il est le plus appliqué est celui du séchage des produits agro-alimentaires. En effet, il permet ainsi de répondre à la conservation des denrées alimentaires et au stockage de ces derniers. Aussi un certain nombre d'études de séchage ont été réalisées sur de la tomate [3], le manioc [4], la pomme de terre [5] ou encore le poisson [6]. Cependant, afin d'obtenir une qualité de produit à la fois gustative et nutritionnelle, le séchage doit être contrôlé tout en ayant une demande énergétique la plus basse possible.

Aussi les séchoirs diffèrent en raison de la source énergétique qui peut être utilisée comme l'énergie fossile, le gaz, l'électricité ou l'énergie solaire et de par la nature du transfert de chaleur qui est transmise au produit.

Si la combustion d'énergie fossile est à proscrire en raison de la pollution que peuvent générer les carburants, les vapeurs ou encore les suies non brûlées pouvant

entrer en contact avec les produits à sécher, le séchage au gaz et le séchage électrique sont quant à eux très coûteux et non adaptés dans des pays d'Afrique tel que la République centrafricaine (RCA).

Aussi, le séchage solaire représente une alternative intéressante dans des pays comme la RCA où le flux solaire est satisfaisant ($5kW/m^2$). De plus cette énergie abondante est peu coûteuse et non polluante. L'utilisation de cette énergie renouvelable permet de répondre au procédé de séchage dans un souci de développement durable.

1.1.1 Les différents modes de séchage solaire

Dans le séchage solaire on peut distinguer deux modes selon les données bibliographiques, soit le séchage direct lorsque la matière à sécher reçoit directement l'énergie solaire soit le séchage indirect (Ben Fathallah et al.1987) [7] lorsque l'énergie solaire est captée par un dispositif appelé généralement capteur solaire qui permet alors de préchauffer l'air qui sera ensuite envoyé vers les produits à sécher.

La chaleur ainsi apportée au produit va diffuser à l'intérieur de celui-ci qui verra alors sa température augmenter, l'eau contenue dans le produit va migrer du produit vers la surface puis s'évaporer. Afin d'éviter que l'humidité reste dans l'air ambiant, un renouvellement de l'air est alors réalisé soit par un écoulement d'air naturel ou forcé : on parlera de convection naturelle ou de convection forcée selon l'écoulement d'air qui est adopté.

1.1.1.1 Séchage en mode direct.

Dans les pays d'Afrique ou dans certaines zones rurales, le séchage solaire le plus répandu est celui qui consiste à sécher les produits à même le sol. Mais cette technique pose des problèmes car les conditions de séchage ne sont pas hygiéniques et beaucoup de produits sont alors perdus par : contamination par la saleté, infestation par les insectes ou encore quand la pluie survient pendant le séchage. Toutefois on note une évolution dans ce mode de séchage qui consiste à placer cette fois-ci les produits à sécher dans une enceinte de séchage qui peut être en verre (Saleh et al., 2009) [8], en métal ou en bois tout en assurant une circulation d'air grâce à des ouvertures bien positionnées (figure 1.1).

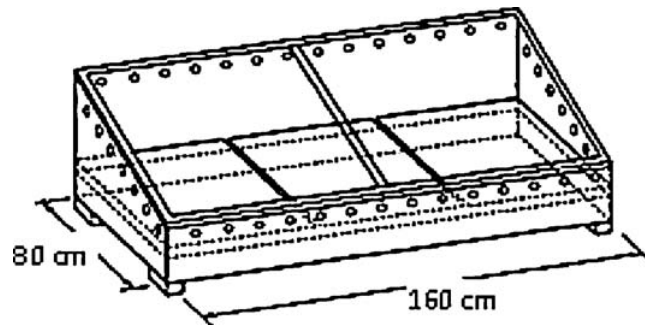


Figure 1.1: Séchoir direct

Cependant ce mode de séchage direct par convection naturelle n'est pas le plus efficace car il est très difficile de pouvoir contrôler le taux de séchage et celui-ci n'est pas uniforme en raison de surchauffe qui peut se produire par exposition directe des produits au soleil. Ces conséquences aboutissent à un très faible rendement du fait de la faible capacité de séchage (Daguenet 1985) [9] et une perte de qualité (perte en vitamine ou changement de couleur) des produits ainsi séchés (Öztekin et al. 1999) [10]. On peut améliorer ce séchage si on passe du mode de convection naturelle en mode de convection forcée.

1.1.1.2 Séchage en mode indirect

Des dispositifs ont été fabriqués de façon à ce que le séchage s'effectue de manière indirecte afin d'obtenir un produit séché avec un meilleur contrôle du taux d'humidité et de la température de ce dernier. Dans ce cas, le séchoir comprend deux parties, une partie constituée d'un capteur solaire qui préchauffe ainsi l'air de séchage et une deuxième partie qui constitue la chambre de séchage comme on peut le voir sur la figure 1.2.

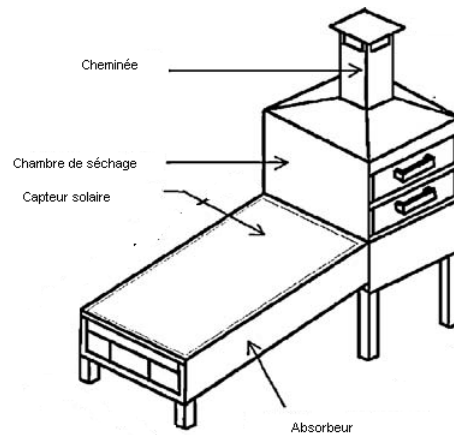


Figure 1.2: Séchoir indirect

Il y a aussi possibilité d'amélioration du séchage si le système est en convection forcée.

1.2 Séchage par convection

Lorsqu'un produit humide est placé dans une enceinte en présence d'air chaud et sec des différences de température et de pression partielle vont se créer entre le produit et l'air. On peut alors observer :

- Un transfert de chaleur de l'air vers le produit sous l'effet d'un gradient de température
- Un transfert de matière (eau) du produit vers l'air sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

Si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est égale à celle apportée par l'air chaud on dit que le séchage est isenthalpique. Cet air chaud peut être assimilé à un gaz et les propriétés thermophysiques qui le constituent lui permettent d'être un fluide caloporteur et un vecteur d'élimination de l'eau évaporée. Lorsque cet écoulement d'air peut se faire de manière naturelle on parle alors de convection naturelle, mais parfois l'ajout de ventilateurs permet de passer de convection naturelle en convection forcée. Dans ce dernier cas la circulation d'air à l'intérieur du dispositif se fait plus rapidement et l'efficacité du séchage peut en être améliorée puisque le coefficient d'échange de chaleur en convection forcée est supérieur à celui par convection naturelle.

1.2.1 Exemples de séchoirs solaires

Les séchoirs ont beaucoup évolué ces trente dernières années en fonction du produit à sécher mais aussi de la quantité à sécher. Aussi, les efforts se sont portés sur la quantité d'énergie solaire qui pouvait être récupérée par effet de serre, l'amélioration des écoulements ou transports de l'air chaud ou d'énergie nécessaire au séchage du produit. Ci-dessous nous retraçons cette évolution en fonction des données bibliographiques répertoriées.

1.2.1.1 Mode direct et convection naturelle

Les premiers séchoirs cités et les plus simples en terme de conception sont ceux constitués d'un espace de séchage fermé avec quelques trous pour le passage de l'air de séchage (figure 1.3).

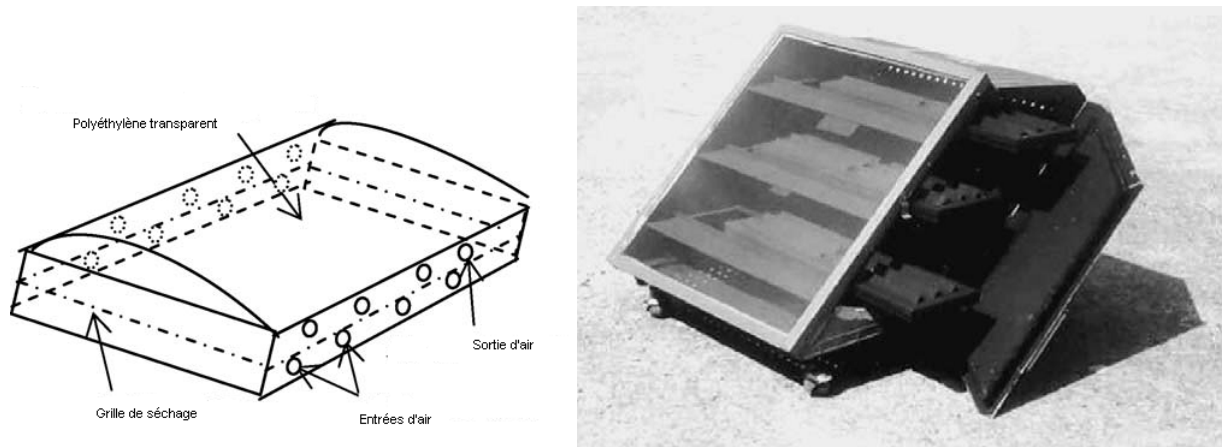


Figure 1.3: Séchoirs directs avec une couverture en plastique

Le principe est alors basé sur l'effet de serre. Les rayonnements du soleil auxquels sont soumis les produits à sécher et la différence de pression de vapeur d'eau entre ceux-ci et l'air ambiant permettent donc le séchage. Les trous d'aération doivent être réalisés en haut et en bas de l'espace de séchage pour permettre une circulation d'air par convection, toutefois celle-ci est très limitée. Le problème majeur de ces séchoirs malgré leur faible coût de fabrication est qu'ils sont inadaptés à l'application industrielle. En effet, les quantités de produit à sécher sont souvent faibles en raison de la circulation d'air limitée.

1.2.1.2 Mode indirect et convection naturelle

Comme nous l'avons signalé précédemment, en mode indirect les séchoirs comprennent deux parties : une chambre de séchage et un capteur solaire qui va servir au préchauffage de l'air de séchage. On peut citer l'un des plus simples (Ratti et Mujumdar, 1997) [11]. Par la suite ces dispositifs ont été équipés d'une cheminée en sortie pour accélérer l'évacuation de l'air chaud et humide comme le montre la figure 1.4 (Duran 1983) [12], Pangavhane et al. 2002) [13]. A partir de ces études, il a été montré que la dimension et la conception du capteur sont des paramètres importants.

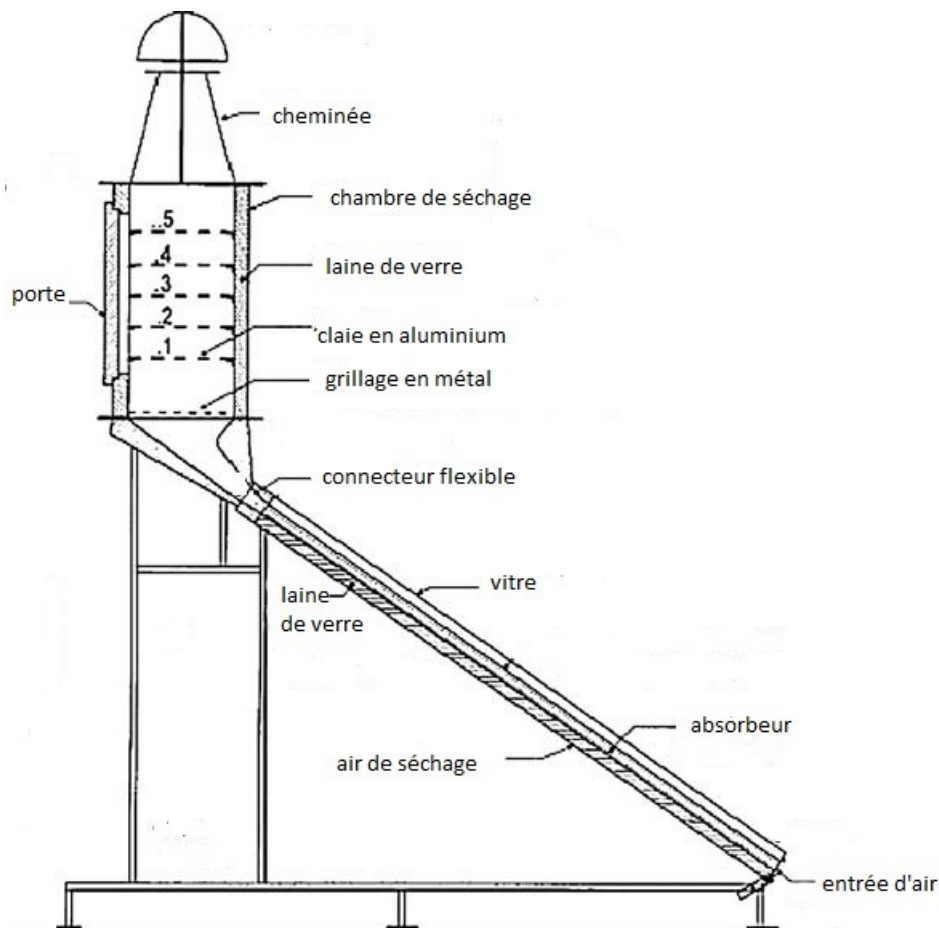


Figure 1.4: Séchoir indirect convection naturelle

L'influence des dimensions du capteur sur les effets de la convection naturelle a été étudiée par Bennamoun [14] puis Bahnasawy et Shenana en 2003 [15]. Ils ont également montré l'intérêt du séchage en mode indirect par rapport au séchage direct avec un dispositif regroupant les deux modes à la fois. Ainsi le rôle du capteur est donc essentiel en mode indirect car il facilite et améliore le transfert d'énergie. Aussi différents types de capteurs ont été conçus et on peut citer les travaux de Wijesundera et al. en 1982 [16], Choudhury et al. en 1995 [17] ou encore Kalogirou en 2004 [18]. Si dans la plupart des travaux, les capteurs sont plans, certains auteurs (Goyal et Tiwari) [19] ont proposé des capteurs comparables au four solaire, c'est à dire composés d'un réflecteur cylindrique qui capte le rayonnement solaire et le renvoie en direction de l'absorbeur, dans le but d'améliorer le préchauffage de l'air (figure 1.5).

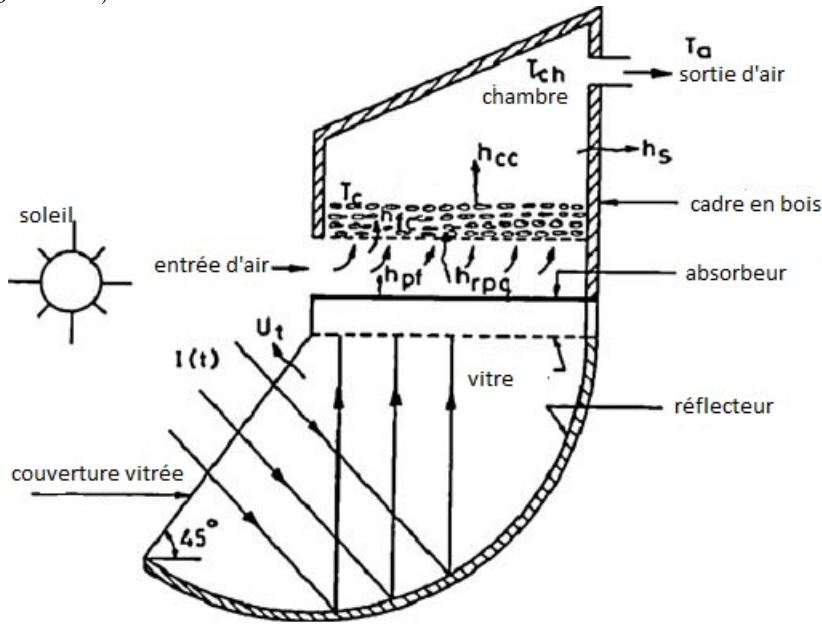


Figure 1.5: Séchoir indirect convection naturelle avec réflecteur

h_{cc} : coefficient d'échange conducto-convectif

h_s : coefficient d'échange du réflecteur

h_{pf} : coefficient d'échange du fluide à la température du film

h_{rpc} : coefficient d'échange par rayonnement de l'absorbeur

1.2.1.3 Mode indirect et convection forcée

Aux installations précédemment passées en revue est parfois ajouté un ventilateur (figure 1.6, Özdemir et Desvres 1999 [20], Yaldiz et al. 2001 [21]). Celui-ci permet alors un écoulement d'air plus rapide et est surtout préconisé lorsque les quantités de produits à sécher deviennent importantes. Par le biais du ventilateur le débit d'air sera plus intense mais surtout pourra être contrôlé. A. Fudholi et K. Sopian [22] ont repertorié de façon complète l'ensemble des séchoirs solaires qui ont pu être conçus et expérimentés. Toutefois ces systèmes continuent d'évoluer et l'objectif de notre travail dans ce sens a été de concevoir, fabriquer et expérimenter un séchoir solaire pliable et portatif pouvant fonctionner soit en convection naturelle soit en convection forcée. Pour le fonctionnement en convection forcée, un kit de panneaux solaire a été installé pour alimenter Les ventilateurs ainsi que le multiplexeur et un ordinateur ont également été utilisés pour l'acquisition des données.

Le caractère pliable de ce séchoir permet de préserver la fragilité du capteur composé en partie de vitres et l'aspect portatif offre l'avantage de pouvoir déplacer le séchoir d'un point de récolte à un autre afin d'éviter la dégradation des produits frais due à la chaleur lors des transports.

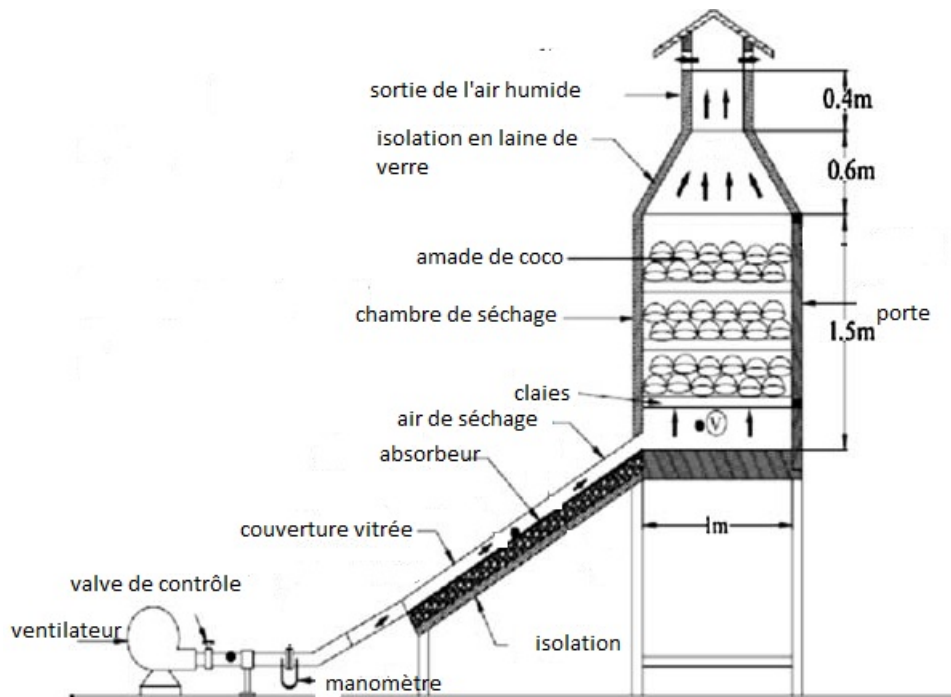


Figure 1.6: Séchoir indirect à convection forcée

1.3 Avancées sur les capteurs et la modélisation des transferts

L'étude sur les capteurs a commencé depuis des décennies. Les capteurs solaires jouent le rôle de convertisseur du rayonnement solaire en chaleur. Ils sont généralement constitués des vitres permettant de piéger les radiations infra rouges afin d'augmenter la température et d'une plaque métallique peinte en noir appelée absorbeur. L'efficacité d'un capteur dépend de son aptitude à :

- absorber un maximum de rayonnement solaire
- perdre moins de chaleur vers l'extérieur.

Aussi il est nécessaire d'évaluer le coefficient de pertes de chaleur dans les capteurs plans. A l'époque, comme l'a souligné A. Benkhélifa en 1998 [23], à défaut de calcul, la détermination du coefficient global de pertes des capteurs plans se faisait en se basant sur les corrélations empiriques.

En effet, l'historique de ces relations empiriques remonte vers 1942 avec Hottel et Woertz [24] qui ont été les premiers à proposer ces relations. Quelques années plus tard, Klein [25], se basant sur les travaux de Hottel et Woertz, proposa une succession de relations empiriques qu'il essaya d'améliorer. D'autres auteurs, notamment Argawal et Larsen en 1975 [26] constatant l'insuffisance des résultats obtenus en appliquant les relations de Klein, suggérèrent une autre équation en se référant aux travaux de Klein. Cependant Malhotra et al en 1981 [27] ont recommandé une autre équation qui donne de meilleurs résultats. Cette équation prend en compte l'inclinaison du capteur d'une part et le nombre de vitres composant celui-ci. Ces avancées ont été confirmées par A. Benkhélifa qui a comparé la concordance de ces relations empiriques avec les résultats de ses travaux obtenus numériquement. Ce dernier a souligné que les difficultés rencontrées sont souvent liées à l'évaluation du coefficient d'échange entre l'absorbeur et la vitre ou entre Les deux vitres lorsqu'il s'agit des capteurs double vitrage. Il est à noter qu'entre deux vitres ou entre la vitre et l'absorbeur, il existe un phénomène couplé de chaleur et de masse.

On peut distinguer deux sortes de fluides :

- Les fluides dits newtoniens lorsque le tenseur des contraintes visqueuses est une fonction linéaire du tenseur des déformations. Le facteur de proportionnalité se nomme viscosité et celle ci est indépendante du taux de cisaillement . En général ils sont caractérisés par un coefficient de viscosité qui dépend de la température et de la pression.

- Les fluides non newtoniens (comme le sang, les gels, les boues, les pâtes, les suspensions, les émulsions,...) que l'on rencontre dans beaucoup d'industries et qui peuvent avoir des comportements très variés. Ils sont généralement inclus dans la rhéologie avec Les solides plastiques et des corps aux comportements plus complexes. Ils ont alors un coefficient de chaleur relativement élevée (≥ 100) [28].

Aussi, en ce qui concerne le séchage, l'air de séchage est un fluide newtonien et son coefficient d'échange de chaleur est relativement bas de l'ordre de 5 à 30 $W/m^2.^{\circ}C$ en convection naturelle et de 10 à 100 $W/m^2.^{\circ}C$ en convection forcée [29].

Afin d'améliorer ce coefficient d'échange, plusieurs configurations de capteurs ont été étudiées [29, 30]. Toutefois la majeure partie de ces études a été faite en régime permanent [31, 32]. Les études en régime transitoire sont moins nombreuses. Ceci n'est pas dû à un manque d'applications mais s'explique par la difficulté à appréhender physiquement des écoulements convectifs et à les modéliser mathématiquement en régime transitoire. Dans le but d'améliorer le rendement d'un capteur plan, plusieurs recherches ont été menées pour comprendre le mécanisme de ce transfert de chaleur et de masse aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire. Certains résultats ont montré le faible rendement d'un capteur plan simple vitrage à cause du coefficient de déperdition élevé [23]. Ce résultat a ouvert la voie à plusieurs axes d'investigations. Certains auteurs ont centré leurs études sur la compréhension de transfert de chaleur et de masse s'effectuant entre une plaque horizontale et un fluide newtonien [33-36]. La difficulté à appréhender physiquement Les mouvements convectifs, à les modéliser et celle liée à la résolution analytique du système d'équations différentielles souvent non linéaires ont fait que la majorité des travaux concernent le régime permanent [37, 38, 39, 40]. A. Zerrouki et B. Tedjiza en 1999 [35], dans leur

article portant sur la modélisation mathématique d'un capteur solaire à air à deux passes (circulation d'air de part et d'autre de l'absorbeur), ont fait un bilan thermique en régime permanent. Ainsi ils ont pu trouver Les expressions mathématiques exactes des paramètres U_p , F_r et F' qui sont respectivement le coefficient global de pertes et les facteurs d'efficacité du capteur. Dans la même logique, A. Benkhélifa (1998), dans son article a présenté un modèle mathématique permettant de calculer les pertes thermiques vers l'avant d'un capteur solaire plan (perte entre l'absorbeur et l'ambiance). Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux issus des relations empiriques [41, 42].

Si la réalisation d'un séchoir solaire pliable et portatif permet de contribuer au développement local en favorisant la disponibilité des denrées alimentaires séchées durant toute l'année, évitant ainsi la punérie, une attention particulière doit être portée sur l'étude théorique et expérimentale de sa composante principale qui est le capteur double vitrage.

Chapitre 2

Modélisation et simulation du capteur plan double vitrage

2.1 Introduction

Le soleil fournit une énergie très importante à la Terre (10 000 fois l'énergie nécessaire au besoin de la planète) sous forme lumineuse. Mais le problème réside en ce que la forme sous laquelle nous la recevons n'est pas nécessairement celle sous laquelle elle est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. L'appauvrissement des sources énergétiques traditionnelles (pétrole,...) dû à une utilisation accrue de celles-ci et l'augmentation considérable du prix du pétrole, demande une attention plus accrue sur l'étude des énergies renouvelables qui revêt une importance cruciale pour les années à venir. Les énergies renouvelables utilisables actuellement sont l'énergie hydraulique, le chauffage solaire actif, l'énergie éolienne, la géothermie, l'énergie solaire (photovoltaïque, thermique), la biomasse, etc. Les capteurs photovoltaïques et les capteurs thermiques permettent de transformer directement le rayonnement solaire en énergie électrique continue et en énergie thermique sous forme de chaleur et ceci respectivement à travers des panneaux photovoltaïques (PV) et des capteurs. En général, deux types de capteurs PV peuvent être distingués : collecteurs PV avec une couverture en verre qui

produisent la chaleur de haute température mais ont un rendement électrique légèrement inférieur, et les capteurs PV sans vitre qui produisent de la chaleur relativement basse température mais possèdent de hautes performances électriques [29, 43]. Les capteurs hybrides sans vitre supplémentaire délivrent relativement de faibles températures, et doivent être combinés avec des pompes à chaleur pour chauffer de l'espace environnant ou de l'eau sanitaire [29, 30]. Une des applications des capteurs photovoltaïques, en combinaison non directe avec les capteurs thermiques, est le système SDHW (Solar Domestic Hot Water) [44] qui consiste principalement à alimenter la résistance électrique interne, nécessaire au chauffage de l'eau par l'électricité générée par les capteurs photovoltaïques [31].

2.2 Evaluation de la potentialité énergétique solaire de la Centrafrique : Cas du site de Bégoua et de l'Université de Bangui

L'évaluation à long terme des performances de conversion de l'énergie solaire s'établit à l'aide de programme de simulation numérique. Pour cela, suivant le système considéré, les concepteurs utilisent généralement un pas de temps des moyennes mensuelles par jour ou par heure dans la mesure de disponibilité. Ainsi les composantes du flux solaire requises sont le flux solaire global incident sur les capteurs selon l'inclinaison considérée. Cette composante peut être déterminée avec précision si les composantes diffuses et directes sont disponibles.

La rareté des stations de mesure de ces composantes fait que pour estimer ces paramètres (flux global et diffus), certains auteurs ont eu recours aux modèles théoriques. Ces modèles sont établis sous forme de corrélation sur certains sites. Pour qu'ils soient appliqués aux sites considérés, ces modèles doivent être comparés aux valeurs réellement mesurées sur le site considéré sur une période qui couvre les dif-

férentes saisons de l'année.

2.2.1 Modèles théoriques établis.

Sur les différents sites géographiques, des modèles théoriques ont été établis [45]. Ils donnent la relation entre les composantes du rayonnement solaire et les principaux paramètres météorologiques tels que la température ambiante, l'humidité relative, la durée d'insolation et des paramètres astronomiques.

2.2.2 Description des modèles

2.2.2.1 Relation de A. A. M. Sayigh

Le modèle de Sayigh *et al.* [46] a été développé moyennant les données relatives à plusieurs sites indiens, où la latitude est comprise entre 8° et 28° Nord et la longitude comprise entre 72° et 88° Est. Cette relation tient compte des paramètres géographiques comme la latitude et la longitude. Il tient compte aussi des paramètres astronomiques, à savoir la durée du jour théorique, l'irradiation extra-terrestre calculée sur un plan horizontal. Les paramètres météorologiques, qui sont utilisés dans ce modèle sont : la durée d'insolation DI , l'humidité relative HR et la température maximale T_{max} . Dans ce modèle, Sayigh et al. ont caractérisé des zones climatiques par un facteur $\psi_{i,j}$. Ainsi, suivant la moyenne mensuelle par jour de l'humidité relative et suivant le mois considéré, ils ont défini trois zones climatiques respectivement caractérisées par les plages de l'humidité relative, $HR \leq 65\%$, $65\% < HR < 70\%$ et $HR \geq 70\%$. Connaissant ainsi la valeur de HR à partir du graphe reliant les paramètres HR et le numéro du mois considéré, on détermine la valeur de $\psi_{i,j}$ correspondante. Le modèle de Sayigh est donc donné par la relation suivante :

$$G_H = 116KNe\exp \left[\phi \left(\frac{DI}{T_m} \right) - \left(\frac{HR}{15} \right) - \left(\frac{1}{T_{max}} \right) \right] \quad (2.1)$$

avec

$$N = 1.7 - 0.458\phi \quad (2.2)$$

$$K = 100 (n.t_m + \psi_{i,j}.\cos(\phi)) \quad (2.3)$$

$$n = \frac{1}{(1 + 0.1\phi)} \quad (2.4)$$

avec :

G_H : moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale

$\psi_{i,j}$: facteur climatique

DI : durée d'insolation

t_m : durée du jour

HR : humidité relative

N : constante dépendant de la latitude

ϕ : la latitude du site exprimée en radian.

Tableau 2.1: Différentes zones climatiques

$I \downarrow$	$J \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	$HR < 65$	1.28	1.38	1.54	1.77	2.05	2.30	2.48	2.41	2.36	1.73	1.38	1.17
2	$65 < HR < 70$	1.46	1.77	2.05	2.15	2.05	2.05	2.10	2.17	2.14	1.96	1.60	1.43
3	$HR > 70$	1.60	1.81	2.00	2.17	2.25	2.26	2.24	2.20	2.10	1.92	1.74	1.60

2.2.2.2 Relation de Swartman

De même, moyennant les données relatives de 14 stations indiennes, deux relations ont été établies par Swartan. Ces relations permettent d'estimer l'irradiation sur un plan horizontal à partir de la durée d'insolation et de l'humidité relative. Dans ce modèle, comme la durée astronomique du jour, l'auteur suppose que cette dernière est égale à 12 heures par jour pour chacun des mois de l'année. Ces deux relations sont données comme suit.

$$G_{h1} = 11.6 \times 490 \times \left(\frac{DI}{12} \right) (0.357HR)^{-0.262} \quad (2.5)$$

$$G_{h2} = 11.6 \times 460 \exp \left[0.607 \left(\frac{DI}{12} - HR \right) \right] \quad (2.6)$$

avec :

DI : durée d'insolation

T_m : durée du jour

HR : humidité relative

2.2.2.3 Relation de Garg et al.

A partir de la courbe de saturation de l'air, Garg et al. [47], moyennant la méthode des moindres carrés, ont développé une relation multilinéaire reliant l'humidité absolue H_a à l'humidité relative HR , à la température ambiante T_a . A partir de cette corrélation et de la fraction d'insolation définie par le rapport durée d'insolation DI sur la durée astronomique du jour T_m et à partir de l'irradiation extraterrestre G_{h0} calculée sur un plan horizontal, Garg et al. ont développé la relation suivante :

$$G_h = G_{h0} \left(0.14 - 0.4 \left(\frac{DI}{T_m} \right) - 0.0055 H_a \right) \quad (2.7)$$

avec

H_a : humidité absolue donnée par l'expression suivante.

$$H_a = HR (4.7923 + 0.364 T_a + 0.0055 T_a^2 + 0.0003 T_a^3) \quad (2.8)$$

où T_m est la durée astronomique et T_a la température ambiante.

Dans ces relations, G_h est exprimé en Wh/m^2

2.2.2.4 Relations de Sabbagh et al.

En se basant sur des données relatives à plusieurs pays du Golfe, en particulier, les sites d'Arabie Saoudite, Sabbagh et al. [48] ont développé deux relations empiriques liant les différents paramètres météorologiques qui affectent l'atténuation du rayonnement solaire, à savoir : la durée d'insolation DI , l'humidité relative HR , la température maximale T_{max} , l'altitude alt , la situation géographique (longitude L , latitude φ) et sa situation par rapport à la mer et un lac d'eau caractérisé par le facteur de zone caractéristique, qui sont données par les relations suivantes :

$$G_h = 18,1 \text{Kexp} \left[\varphi \left(\frac{DI}{12} \right) - \left(\frac{HR}{100} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{1}{T_{max}} \right) \right] \quad (2.9)$$

$$G_h = 18,4 [419,391DI - 292,73HR + 330,571] \quad (2.10)$$

DI , HR et T_{max} sont respectivement les moyennes mensuelles par jour de la durée d'insolation, de l'humidité relative et de la température moyenne maximale du mois considéré.

2.2.2.5 Relation de Hussain et al.

Le modèle de Hussain [49] est basé sur le modèle de Garg et al. Ainsi, cette expression permet d'estimer l'irradiation globale en fonction des moyennes mensuelles par jour de l'humidité absolue et de la durée d'insolation. Cette expression est donnée comme suit :

$$G_h = G_{h0} \left(0.394 - 0.364 \left(\frac{DI}{T_m} \right) - 0.0035H_a \right) \quad (2.11)$$

avec :

DI : durée d'insolation

T_m : durée du jour

H_a : humidité absolue

2.2.2.6 Relation de A.S Sambo

Une période de 60 mois de mesure de la durée d'insolation, des températures maximales et minimales, de la température moyenne et de l'humidité spécifique, a été utilisée pour développer 12 corrélations différentes avec lesquelles la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale pourra être calculée pour le site de Kano au nord du Nigeria [50]. Les corrélations obtenues ont été combinées pour aboutir à une forme d'équation de type Angström simplifiée, cette corrélation est donnée ci-dessous :

$$K_T = 0,62 - 0,294 \frac{DI}{t_m} + 0,178 \left(\frac{DI}{t_m} - HR - \frac{T_{min}}{T_{max}} \right) + 0,491 \left(\frac{DI}{t_m} \frac{T_{min}}{T_{max}} \right) \quad (2.12)$$

DI : durée d'insolation

t_m : durée du jour

HR : humidité relative

T_{min} : température minimale

T_{max} : température maximale

2.2.2.7 Modèle de W.E. Alnaser

Pour la reconstitution de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale sur un plan horizontal, Alnaser [51] a développé un nouveau modèle pour Bahrayn. Dans ce modèle, il utilise six validations statistiques des modèles de reconstitution des moyennes mensuelles par jour 79 paramètres (astronomiques et météorologiques). Ainsi, il a essayé de mettre en évidence l'effet du choix du nombre de paramètres sur la précision de ce modèle. Ainsi, il propose :

$$G_h = 1066,167 + 0,5133G_{h0} - 8,924HR + 2647,32\frac{DI}{t_m} - 34,604T_a + 31,202T_{Sol} \quad (2.13)$$

DI : durée d'insolation

t_m : durée du jour

HR : humidité relative

T_a : température ambiante

T_{sol} : temps solaire

2.2.3 Moyenne mensuelle par jour de l'irradiation diffuse.

Une recherche bibliographique a été effectuée dans le but de trouver des modèles analytiques ou empiriques qui permettent de reconstituer la composante diffuse à partir des principales données météorologiques. La seule relation trouvée dans la littérature, est celle proposée par Hussain [49]. Comme pour la composante globale, cette relation exprimant l'irradiation diffuse dépend aussi de la durée d'insolation et de l'humidité absolue. Par contre certains auteurs se sont limités à utiliser la durée d'insolation et respectivement l'irradiation extraterrestre et l'irradiation globale mesurée sur un plan horizontal [52]. Tandis que d'autres ont mentionné que la partie diffuse du rayonnement solaire dépend essentiellement de l'irradiation globale, ainsi ils ont exprimé cette quantité seulement en fonction de l'indice de clarté K_T . Nous citons ci-dessous les différents modèles que nous avons retenus dans notre travail.

2.2.3.1 Modèle de Liu et Jordan

Une première relation a été établie par Liu et Jordan [53] ; elle exprime la fraction de l'irradiation diffuse par rapport à l'irradiation globale K_D en fonction de l'indice de clarté K_T . Les données utilisées sont relatives au site de Blue Hill Massachusetts (USA), cette corrélation est donnée comme suit :

$$K_D = 1.39 - 4.027K_T + 5.531K_T^2 - 3.108K_T^3 \quad (2.14)$$

2.2.3.2 Modèle de Page

Page [54], utilisant les données relatives à dix sites, dont la latitude s'étale entre 40°Nord et 40°Sud, a établi une corrélation linéaire reliant l'irradiation diffuse à l'indice de clarté, donnée par la relation suivante :

$$K_D = 1.0 - 1.13K_T \quad (2.15)$$

2.2.3.3 Modèle de Collares-Pereira et al.

Collares-Pereira et Rabl [55], moyennant les données relatives de cinq sites aux Etats-Unis, ont proposé une corrélation polynomiale d'ordre 4, énoncée ci-dessus :

$$K_D = 1,1882 - 2,72K_T + 9,473K_T^2 - 21,856K_T^3 - 14,648K_T^4 \text{ pour } 0.17 < K_T < 0,8 \quad (2.16)$$

$$K_D = 0.99 \text{ pour } K_T \leq 0,17 \quad (2.17)$$

Une autre relation a été développée par Collares-Pereira et Rabl elle dépendra, cette fois-ci, de l'angle horaire du lever du soleil w_s , paramètre caractérisant la saison considérée. Cette relation est donnée comme suit :

$$K_T = 0,775 + 0.347 \left(\frac{\pi}{180} \right) (w_s - 90) - \left[0,505 + 0.261 \left(\frac{\pi}{180} \right) (w_s - 90) \right] \cos [2 (K_T - 0.9)] \quad (2.18)$$

w_s est l'angle horaire du lever du soleil en degrés ; $w_s \simeq 90^\circ$ pour les mois de Février, Mars, Avril, Août, Septembre et Octobre, $w_s \simeq 100^\circ$ pour les mois de Mai, Juin et Juillet et $w_s \simeq 80^\circ$ pour les mois de Novembre, Décembre et Janvier.

2.2.3.4 Relation de Erbs, Klein et Duffie

Erbs et al. [56], ont utilisé des mesures à l'échelle horaire établie sur quatre stations américaines, des irradiances globale et diffuse pour développer un modèle dépendant de la saison reliant les deux grandeurs indiquées. Ainsi ils proposèrent les relations suivantes :

$$K_D = 1,391 - 3,560K_T + 4,189K_T^2 - 2,137K_T^3 \quad (2.19)$$

pour $w \leq 80^\circ$ et $0,30 \leq K_T \leq 0,80$

$$K_D = 1,311 - 3,022K_T + 3,427K_T^2 - 1,821K_T^3 \quad (2.20)$$

$w \geq 80^\circ$ et $0,30 \leq K_T \leq 0,80$

2.2.3.5 Relation d'Iqbal

Iqbal [57] a utilisé des données relatives à différents sites canadiens, et a établi une relation linéaire donnée par :

$$K_D = 0,958 - 0,982K_T \quad \text{pour} \quad 0,30 \leq K_T \leq 0,860 \quad (2.21)$$

Synthèse partielle et modèle retenu pour le présent travail.

Les modèles utilisés par les auteurs sus-cités nous ont permis de comprendre les différents paramètres à prendre en compte afin de modéliser le flux solaire d'un site donné. Tous ces modèles mathématiques sont basés sur des données expérimentales. Chaque auteur choisit un modèle empirique qui explique mieux les résultats expérimentaux. Dans ce travail, nous nous sommes inspirés de la relation de Swartman et celle de Garg et al. (cf 2.2.2.2 & 2.2.2.3). Nous avons réalisé une modélisation mathématiques, après avoir tracé les courbes expérimentales, fait une modélisation mathématique. Le modèle retenu est l'objet de paragraphe suivant.

2.3 Données utilisées

Les données utilisées dans ce travail sont celles relatives aux sites de Bégoua et de l'Université de Bangui en République centrafricaine dont les paramètres météorologiques sont indiqués dans le tableau 2.2

Tableau 2.2: Paramètres météorologiques des deux sites

Site	Bangui	Bégoua
Latitude (°)	4°27'	4°45'
Longitude (°)	18°37'	18°53'
Altitude (<i>m</i>)	395	412

2.4 Données expérimentales et modèle retenu

Dans ce travail, nous nous sommes basés sur les données expérimentales de deux sites (Bangui et Bégoua) de la République centrafricaine. Ces mesures ont été faites en utilisant la mini station Vantage Pro 2 de CIMA Technologie [58]. Cet instrument prend en compte les paramètres météorologiques du site à savoir, la latitude, la longitude et l'altitude. De ce fait, les données de mesures correspondent alors à celles faites sur un plan incliné. Les courbes expérimentales ont été tracées en utilisant le logiciel Scilab [59]. Pour l'estimation de la puissance radiative, nous nous proposons de trouver un modèle mathématique très simple pour représenter la variation du flux solaire au cours de la journée. La fonction de Gauss fournit une réponse acceptable, basée sur les seuls paramètres $E_{g_{max}}$ (flux solaire maximal) et la durée d'ensoleillement.

2.4.1 Flux solaire mesuré sur Les deux sites

2.4.1.1 Site de Bégoua

Tableau 2.3: Valeurs du flux solaire (W/m^2) mesuré en 2008 sur le site de Bégoua

Mois → Heure ↓	<i>Janvier</i>	<i>Février</i>	<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>
6h	2,066	0	2,200	4	5,842	7,667
7h	34,269	28,736	41,867	75,818	92,053	83,600
8h	111,333	124,579	165,933	210,727	213,103	233,533
9h	271,133	307,895	385	383,909	382,579	390,467
10h	463,067	496,263	550	583,727	573,211	532,333
11h	582,933	640,947	704,067	670,364	702,895	627,800
12h	660,800	705,579	753,600	708,364	758,421	672,800
13h	626,800	658,526	693,667	680,091	771,579	667,400
14h	567,133	591	643,667	532,909	622,3684	617,400
15h	408,267	436,526	446,267	415	479,789	448,667
16h	235,200	271,211	288,400	252,364	287,211	343,200
17h	84,267	104,053	103,467	120,364	148,474	160,667
18h	12,933	19,722	20,533	19,727	17,474	23,867

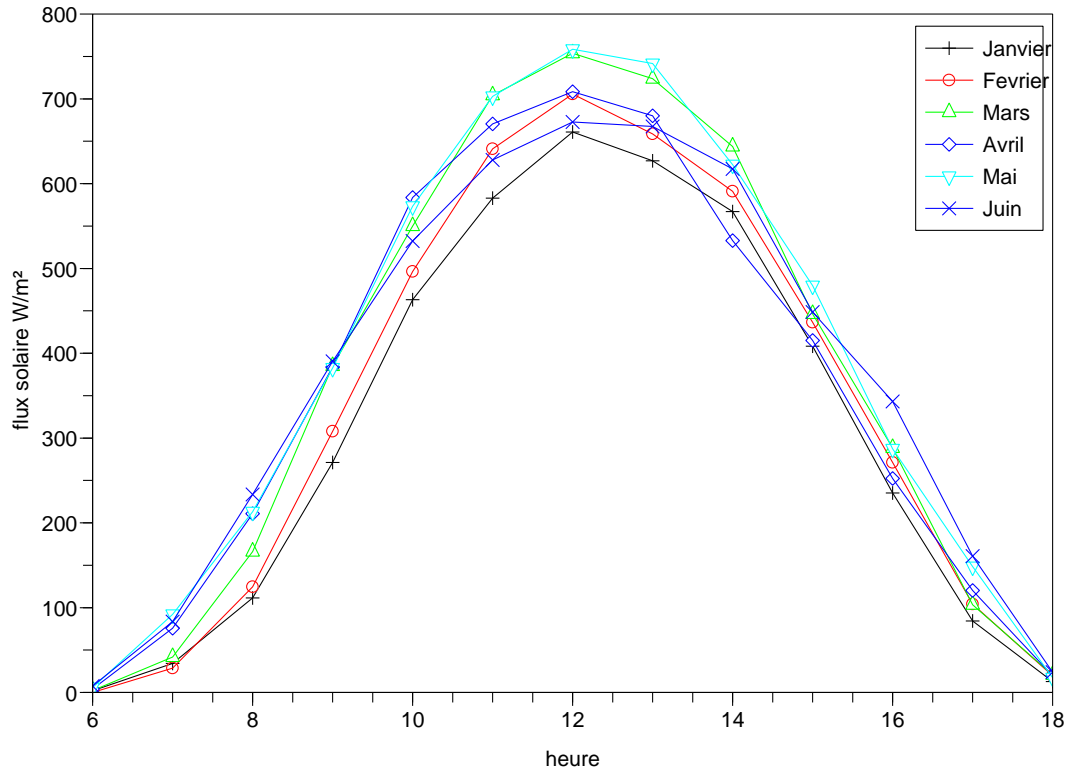


Figure 2.1: Courbe expérimentale du flux solaire : Site de Bégoua année 2008

En fait, les mesures réelles s'écartent (pour différentes raisons) de ce modèle théorique comme le montre la figure 2.1 correspondant à une situation de Mars 2008 et 2010.

La formule suppose que le soleil soit au plus haut à 12 : 00 *UTC* ; ceci n'est pas complètement vrai, comme le montre l'exemple du mois de Février pour le site de l'université de Bangui pour l'année 2010 (figure 2.2). Pour nos calculs approximatifs, nous allons alors négliger ce fait.

Puisque le modèle théorique n'est donc pas "trop" applicable, on pourrait se contenter de caler les valeurs sur une fonction mathématique qui donne une meilleure

concordance, en dépit de toute réalité physique sous-jacente. La fonction \cos^2 et la fonction gaussienne centré sur 12 : 00 sont des candidates appropriées.

2.4.1.2 Site de l'Université de Bangui

Tableau 2.4: Valeurs du flux solaire mesuré (W/m^2) en 2010 sur le site de l'Université de Bangui

Mois → Heure ↓	<i>Février</i>	<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>
6h	11, 875	15, 571	10, 25	5, 6	4, 222
7h	56, 813	91, 928	64, 875	66, 3	76, 778
8h	136, 500	212, 928	213, 75	216, 7	186, 778
9h	242, 189	371, 357	323, 375	395, 5	304, 667
10h	407, 438	541, 428	506, 625	541, 6	451, 778
11h	579, 938	670, 429	702, 375	666, 6	553, 111
12h	669, 625	707, 929	767, 375	735, 6	636, 222
13h	724, 6875	688.928	752, 375	687	585, 333
14h	638, 625	575, 857	683	633, 2	461, 333
15h	512, 5625	432, 429	552, 75	516, 3	329, 333
16h	219, 3125	185, 071	215, 125	155, 2	120, 444
17h	81, 125	56, 357	57	45, 4	39, 333
18h	10, 689	13, 429	4, 875	7, 9	3, 777

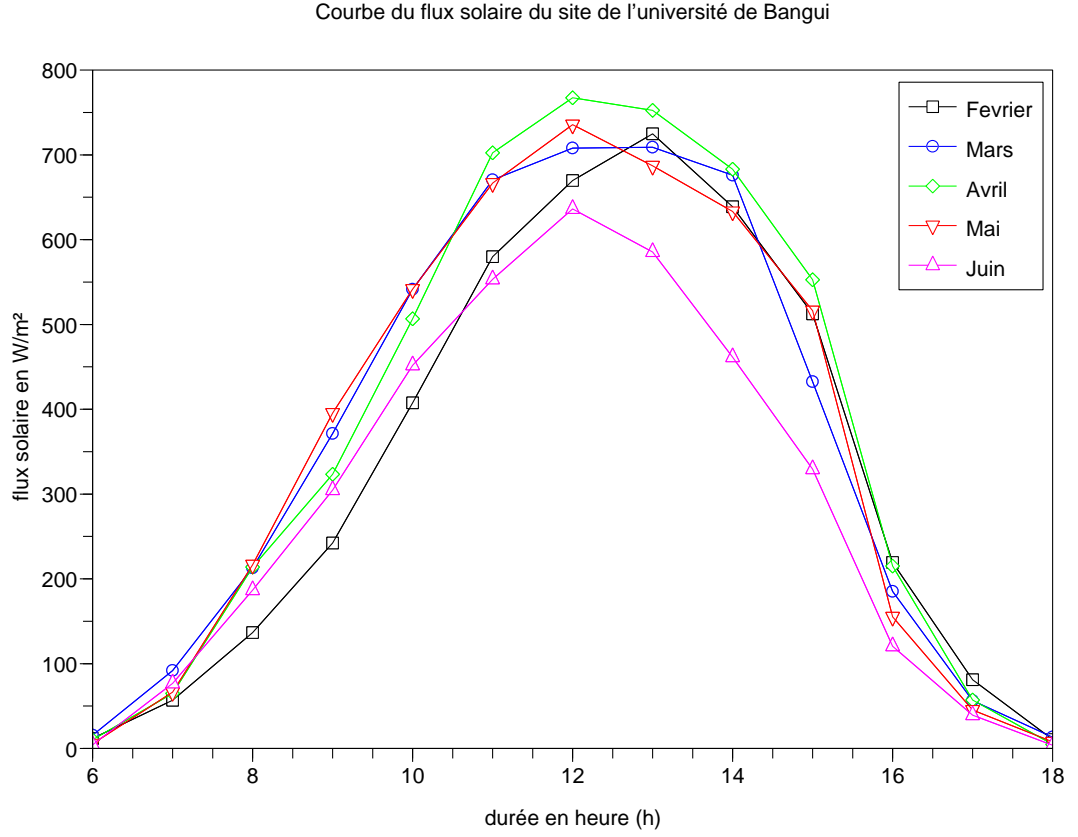


Figure 2.2: Courbe expérimentale du flux solaire : Site de l'Université de Bangui 2010

2.4.2 Modélisation par une fonction \cos^2

Si on admet que le soleil brille dès que la puissance reçue dépasse $75W/m^2$, alors cette durée est à peu près de 12 heures d'après les mesures faites par la mini station Vantage Pro 2 décrite au chapitre IV de cette thèse. La période à introduire dans la fonction est (environ) le double de la durée d'ensoleillement.

On peut modéliser le flux par une fonction \cos^2 de la façon suivante :

$$E_g = E_{g_{max}} \cdot \cos^2 \left[\frac{2\pi}{2a} (t - b) \right] \quad (2.22)$$

avec :

$E_{g_{max}}$: le flux maximal

a : la durée de l'ensoleillement $a = 12$

b : l'heure à laquelle le flux est maximal
 t : le temps

2.4.3 Modélisation par une fonction gaussienne

Les courbes expérimentales ressemblent à des courbes gaussiennes. On peut alors modéliser le flux par une fonction gaussienne comme suit :

$$E_g = E_{g_{max}} e^{-c(t-b)^2} \quad (2.23)$$

avec

$E_{g_{max}}$: le flux maximal
 c : une constante $c = 0.076$
 b : l'heure à laquelle le flux est maximal
 t : l'heure à laquelle E_g est calculé

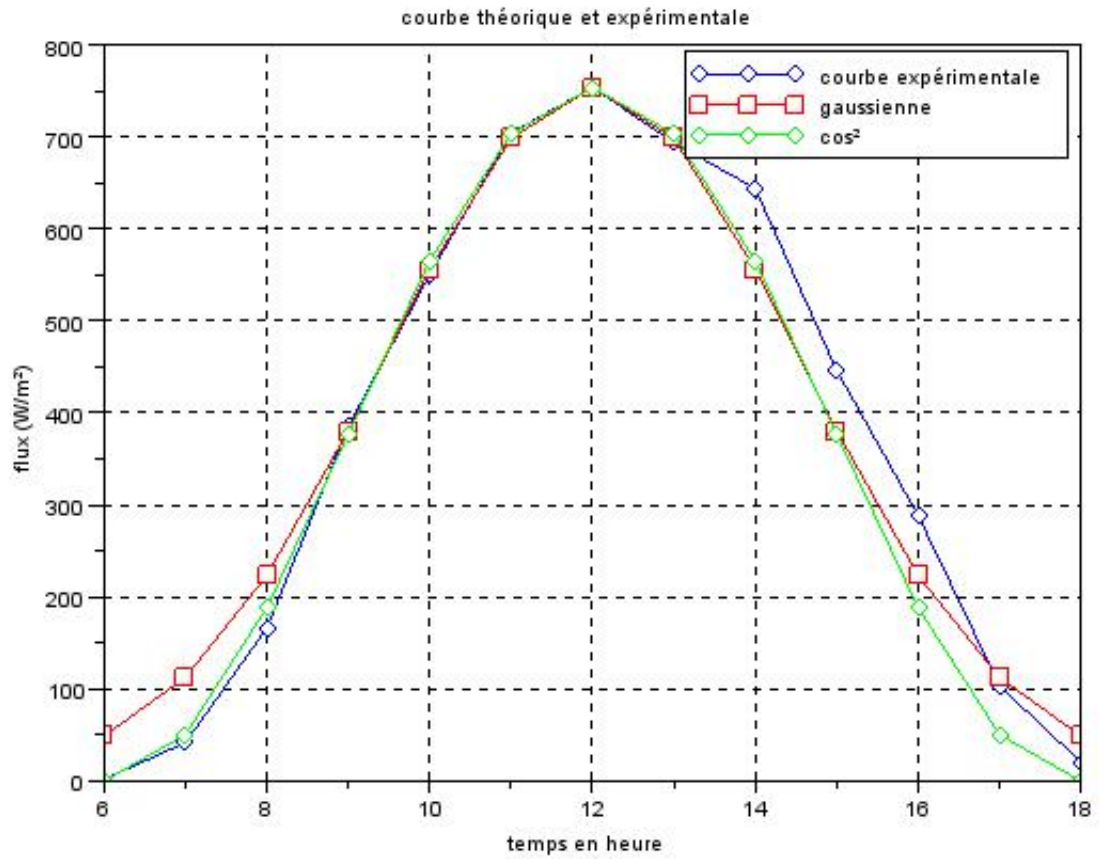


Figure 2.3: Courbe comparative des deux modèles pour le site de Bégoua Mars 2008

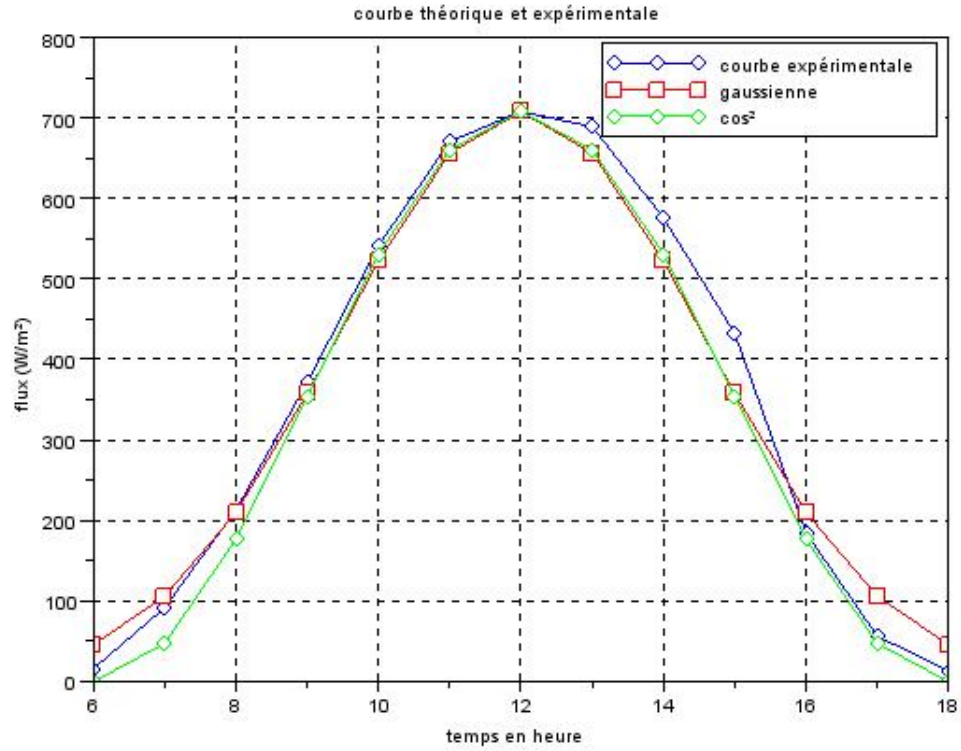


Figure 2.4: Courbe comparative des deux modèles pour le site de l'Université de Bangui Mars 2010

2.4.4 Méthode de comparaison

Pour la comparaison des valeurs mesurées et celles estimées, nous avons élaboré, pour chacun des modèles étudiés, un programme sous Scilab. A partir de chacun de ces programmes, pour chaque site étudié, nous avons d'une part dressé sur un même graphe, les courbes représentatives des valeurs mesurées et celles estimées par chacun des modèles (*Figure 2.3 et 2.4*) et d'autre part nous avons calculé l'écart relatif moyen entre les valeurs mesurées et celles estimées par chacun des modèles. Cet écart est calculé par la relation suivante :

$$Err = \left| \left(\frac{E_{\text{expérimentale}} - E_{\text{théorique}}}{E_{\text{expérimentale}}} \right) \times 100 \right| \quad (2.24)$$

Tableau 2.5: Erreur relative sur les modèles retenus

Site : Bégoua	Cas du mois de Mars 2008	
Type de modèle	\cos^2	<i>gaussienne</i>
<i>Err (%)</i>	3,96	4,75

Site : Université de Bangui	Cas du mois de Mars 2010	
Type de modèle	\cos^2	<i>gaussienne</i>
<i>Err (%)</i>	3,29	3,85

Le calcul d'erreur relative nous montre que la fonction \cos^2 est celle qui correspond le mieux pour l'estimation du flux solaire. On voit que les résultats sont excellents, avec en plus de l'asymptote horizontale respectant les conditions nocturnes et une erreur relative de l'ordre 3,96% pour le site de Bégoua et 3,29% pour le site de l'Université de Bangui. Entre 9 à 12h la courbe expérimentale, \cos^2 et la gaussienne sont confondues. Les erreurs relatives calculées, pour chacun des modèles sont inférieures à 5%.

Afin de minimiser l'erreur entre le modèle expérimental et théorique, la fonction \cos^2 peut valablement être retenue.

2.5 éléments constitutifs du capteur plan double vitrage et instruments de mesures

2.5.1 éléments constitutifs du capteur plan double vitrage

2.5.1.1 L'absorbeur

C'est l'élément essentiel du capteur thermique. Il a pour rôle d'absorber le rayonnement solaire, ensuite de le transformer en chaleur et enfin transmettre cette chaleur

au fluide caloporteur. Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse (étude de l'inclinaison et de l'orientation). Cette surface doit être dotée d'un coefficient d'absorption de la couche superficielle le plus élevé possible. Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0,95. Seules les couleurs foncées permettent d'obtenir des valeurs aussi élevées, l'idéal étant le noir évidemment. Par ailleurs, il vaut mieux que cette couleur ait été obtenue par un traitement (chimique ou autre) plutôt que par une couche de peinture (celle-ci étant toujours plus ou moins isolante). Pour limiter les pertes par réémission de rayonnement infra-rouge, il importe que l'absorbeur possède aussi la propriété d'émissivité superficielle la plus faible possible (valeur inférieure à 0,15). Dans ce cas, l'absorbeur sera qualifié de sélectif. Après transformation du rayonnement en chaleur sur la face superficielle exposée, il y a lieu de transmettre cette chaleur au fluide. Pour ce faire, la plaque doit être métallique, car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre : $300W/m^{\circ}C$; aluminium : $200W/m^{\circ}C$; acier : $60W/m^{\circ}C$).

2.5.1.2 Isolation et vitrage

Le capteur devant recevoir et absorber le rayonnement solaire, doit être nécessairement en contact avec le milieu extérieur, les conditions de température et de climat risquent de perturber considérablement son bon fonctionnement. Limiter les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur est primordial si on cherche à optimiser les performances de ce dernier. Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation arrière et latérale. Vers l'avant, comme le rayonnement solaire doit arriver sur l'absorbeur, on ne peut utiliser que des matériaux transparents : verre en simple ou en double vitrage, trempé ou non, ou certains

matériaux plastiques ayant la propriété de réaliser l'effet de serre (c'est le cas de matériaux comme le polycarbonate, le méthacrylique et le tedlar). Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés, avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres. Les pertes par transmission peuvent également être éliminées en plaçant l'absorbeur sous vide, ce qui permet d'obtenir un rendement élevé même à hautes températures. Ce type de capteur est d'ailleurs surtout utilisé pour certaines applications demandant des températures plus élevées du fluide caloporteur (jusqu'à 150°C).

2.5.2 Instruments de mesures pour l'étude du capteur double vitrage

Dans le but d'étudier la performance de notre capteur, nous avons utilisé des instruments suivants dont les photographies se trouvent ci-après :

1. une mini station météo pouvant mesurer plusieurs paramètres. Elle est dotée d'une console. La mini station et la console communiquent entre elles via les antennes.
2. un multiplexeur qui est relié à un ordinateur pour l'acquisition des données.
3. des thermocouples de type K pour la mesure des températures des différentes parois du capteur (vitres et absorbeur) et les températures à l'entrée et à la sortie de celui-ci
4. d'un ordinateur pour le traitement des données.



Figure 2.5: Photo de la mini station météo



Figure 2.6: Photo du multiplexeur avec les thermocouples + PC pour le traitement des données

2.6 Modélisation

2.6.1 Hypothèse simplificatrice

Pour la bonne conduite des calculs, nous avons fait des hypothèses suivantes :

- le fluide est newtonien

- la vitesse du vent sur la face avant du capteur est supposée constante
- le flux de chaleur reçu par le capteur est fonction du temps,
- les propriétés physiques (les coefficient d'échange de chaleur) ne sont pas fonction de la température à l'exception de la masse volumique (ρ) qui est fonction de la température,
- les températures des composantes du capteur sont fonction du temps

2.6.2 Paramètres et caractéristiques du capteur plan double vitrage

2.6.2.1 Paramètres externes

Les paramètres externes pouvant jouer sur la performance du capteur plan ne sont que les conditions météorologiques à savoir :

- l'ensoleillement,
- la latitude du lieu,
- le taux d'humidité relative de l'air,
- la température ambiante.

Plus l'ensoleillement est élevé, plus la température ambiante sera élevée et la teneur de la vapeur d'eau sera quant à elle faible et donc le pouvoir évaporatoire de l'air sera grand.

2.6.2.2 Paramètres internes

Paramètres géométriques

Afin de pouvoir recevoir le maximum de l'ensoleillement, le capteur doit avoir une valeur de l'angle d'inclinaison égale à la latitude du lieu [43].

La distance entre l'absorbeur et le fond du capteur ne doit pas dépasser une valeur critique (5cm).

Paramètres de fonctionnement

Les principaux paramètres du fonctionnement sont le rendement du capteur et les différentes températures. Les expressions de ces grandeurs seront données dans la suite.

Le critère qui permet de caractériser la performance d'un capteur plan est son rendement global défini comme étant le rapport de la puissance utile sur la puissance absorbée. Dans le cas d'un capteur simple vitrage, le rendement est donné par :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (2.25)$$

Or la puissance utile peut être exprimée par :

$$P_u = P_a - P_p \quad (2.26)$$

donc

$$\eta_1 = \frac{P_{u1}}{P} \quad (2.27)$$

$$\eta_2 = \frac{P_{u2}}{P} \quad (2.28)$$

avec

$$P_{u1} = \alpha_A \tau S E_g - U_{p1} (T_p - T_0) \quad (2.29)$$

$$P_{u2} = \alpha_A \tau^2 S E_g - U_{p2} (T_p - T_0) \quad (2.30)$$

$$P = S E_g \quad (2.31)$$

d'où le rendement d'un capteur simple vitrage est donné par

$$\eta_1 = \alpha_A \tau - U_{p1} \frac{T_p - T_0}{S E_g} \quad (2.32)$$

et celui d'un capteur double vitrage est donné par :

$$\eta_2 = \alpha_A \tau^2 - U_{p2} \frac{T_p - T_0}{SE_g} \quad (2.33)$$

avec

α_A : le coefficient d'absorption

τ : le coefficient de transmission

U_{p1} : le coefficient de pertes thermiques pour un simple vitrage

U_{p2} : le coefficient de pertes thermiques pour un double vitrage

T_p : la température de plaque absorbante

T_0 : la température extérieure ou température ambiante

S : la surface effective du capteur

E_g : le flux solaire

2.6.3 Bilan thermique

Avant de faire le bilan thermique, considérons notre capteur plan double vitrage incliné d'un angle α (voir figure 2.5).

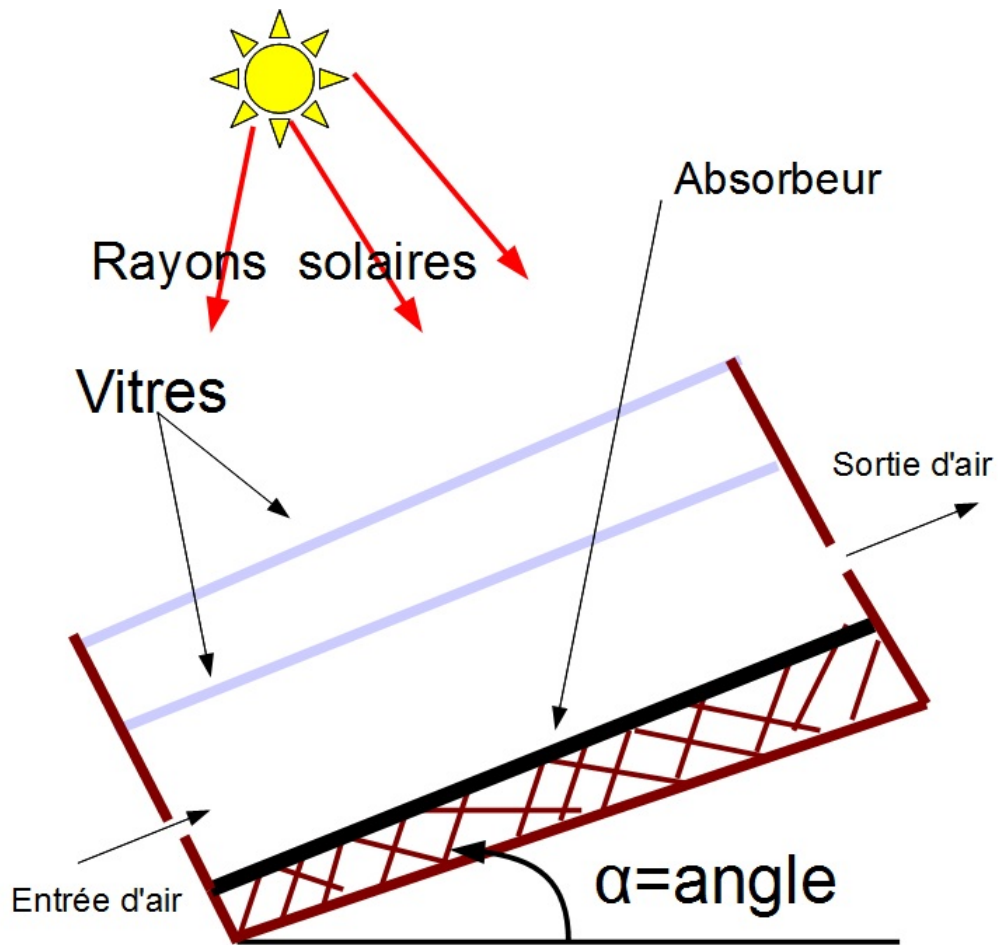


Figure 2.7: Capteur solaire double vitrage

avec

α : l'angle d'inclinaison du capteur

\vec{g} : vecteur accélération de pesanteur

Dimension du capteur plan double vitrage.

Notre dispositif est un prototype donc les caractéristiques sont les suivantes :
il s'agit d'une enceinte parallélépipédique de longueur 72.5 *cm* de largeur 34.5 *cm*

et d'épaisseur 10 *cm*. Il est incliné d'un angle $\alpha = 4^\circ$ (latitude de site de bangui (4.18°)). L'entrée de l'air de séchage est un orifice rectangulaire de $2\text{ cm} \times 17,5\text{ cm}$ et la dimension de la sortie est la moitié de celle de l'entrée afin de favoriser la vitesse d'écoulement à la sortie du capteur selon le principe de Bernoulli.

2.6.3.1 Bilan thermique de la première vitre

Considérons le schéma de la figure 2.7 :

la première vitre de température T_{v1} reçoit :

- le flux solaire exprimé en watt (W)

$$\phi_1 = S\alpha_v E_g \quad (2.34)$$

- le flux d'énergie par convection et par rayonnement de la part de la vitre n° 2 de température T_{v2} :

$$\phi_2 = \phi_{cv1} + \phi_{r1} = S(h_{cv1} + h_{r1})(T_{v2} - T_{v1}) \quad (2.35)$$

Elle perd vers la face avant un flux d'énergie par convection et par rayonnement.

Ce flux perdu est :

$$\phi_p = \phi_{cv0} + \phi_{r0} = S(h_{cv0} + h_{r0})(T_{v1} - T_0) \quad (2.36)$$

Le bilan global nous donne :

$$m_{v1}c_{p1}\frac{dT_{v1}}{dt} = S\alpha_v E_g + S(h_{cv1} + h_{r1})(T_{v2} - T_{v1}) - S(h_{cv0} + h_{r0})(T_{v1} - T_0) \quad (2.37)$$

2.6.3.2 Bilan thermique de la seconde vitre

La seconde vitre de température T_{v2} reçoit :

- le flux solaire transmis par la première vitre

$$\phi_3 = S\alpha_v\tau_v E_g \quad (2.38)$$

- le flux d'énergie par convection et par rayonnement de la part de l'absorbeur de température T_3 :

$$\phi_4 = \phi_{cv2} + \phi_{r2} = S(h_{cv2} + h_{r2})(T_3 - T_{v2}) \quad (2.39)$$

Elle perd vers la première vitre un flux d'énergie par convection et par rayonnement :

$$\phi_p = \phi_{cv1} + \phi_{r1} = S(h_{cv1} + h_{r1})(T_{v2} - T_{v1}) \quad (2.40)$$

Le bilan global nous donne :

$$m_{v2}c_{p2}\frac{dT_{v2}}{dt} = S\alpha_v\tau_v E_g + S(h_{cv2} + h_{r2})(T_3 - T_{v2}) - S(h_{cv1} + h_{r1})(T_{v2} - T_{v1}) \quad (2.41)$$

2.6.3.3 Bilan thermique de l'absorbeur et du fluide caloporteur

Bilan thermique de l'absorbeur

- Celui-ci absorbe une partie du flux transmis par la seconde vitre :

$$\phi_3 = S\alpha_3\tau^2 E_g \quad (2.42)$$

- Il perd vers la seconde vitre les flux d'énergie par convection et par rayonnement :

$$\phi_{p3} = S (h_{cv2} + h_{r2}) (T_3 - T_{v2}) \quad (2.43)$$

le bilan global sur l'absorbeur nous donne :

$$m_3 c_{p3} \frac{dT_3}{dt} = S \alpha_3 \tau^2 E_g - S (h_{cv2} + h_{r2}) (T_3 - T_{v2}) \quad (2.44)$$

Bilan thermique sur le fluide caloporteur.

Hypothèse : on néglige la perte thermique entre le fluide et la deuxième vitre

Le bilan thermique du fluide caloporteur par unité de surface de l'absorbeur est donc :

$$\frac{m_4 c_{p4}}{S} \frac{dT_4}{dt} + \frac{\dot{m} c_{p4}}{l} \frac{dT_4}{dx} = h_f (T_3 - T_4) \quad (2.45)$$

En utilisant l'expression donnant la puissance absorbée en fonction de la puissance utile et de la puissance perdue, on a :

$$\phi_{a4} = \phi_u + \phi_p \quad (2.46)$$

d'où

$$\phi_u = \phi_{a4} - \phi_p \quad (2.47)$$

et donc

$$\frac{m_4 c_{p4}}{S} \frac{dT_4}{dt} + \frac{\dot{m} c_{p4}}{l} \frac{dT_4}{dx} = \alpha_3 \tau^2 E_g - U_{p2} (T_3 - T_0) \quad (2.48)$$

La difficulté de cette dernière équation (2.48) est l'évaluation du coefficient global de perte U_{p2} . Dans la suite, c'est l'équation (2.45) qui sera utilisée au lieu de (2.48). Par ailleurs, la résolution de l'équation (2.45) en régime permanent, combinée avec

celle de (2.48) est un moyen efficace de l'évaluation du coefficient global de perte d'un capteur double vitrage d'une manière expérimentale.

2.6.3.4 Récapitulation des equations obtenues

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{v1}c_{p1} \frac{dT_{v1}}{dt} = S\alpha_v E_g + S(h_{cv1} + h_{r1})(T_{v2} - T_{v1}) \\ \qquad \qquad \qquad - S(h_{cv0} + h_{r0})(T_{v1} - T_0) \\ m_{v2}c_{p2} \frac{dT_{v2}}{dt} = S\alpha_v \tau_v E + S(h_{cv2} + h_{r2})(T_3 - T_{v2}) \\ \qquad \qquad \qquad - S(h_{cv1} + h_{r1})(T_{v2} - T_{v1}) \\ m_3c_{p3} \frac{dT_3}{dt} = S\alpha_3 \tau^2 E_g - S(h_{cv2} + h_{r2})(T_3 - T_{v2}) \\ \frac{m_4c_{p4}}{S} \frac{dT_4}{dt} + \frac{\dot{m}c_{p4}}{l} \frac{dT_4}{dx} = h_f(T_3 - T_4) \end{array} \right. \quad (2.49)$$

Dans la pratique, les variations dans le temps de l'enthalpie des composants du capteur sont faibles, c'est-à-dire que les termes en $m.Cp.dT/dt \approx 0$ [32].

Le système à résoudre devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} S\alpha E_g + S(h_{cv1} + h_{r1})(T_{v2} - T_{v1}) - S(h_{cv0} + h_{r0})(T_{v1} - T_0) = 0 \\ S\alpha \tau_v E_g + S(h_{cv2} + h_{r2})(T_3 - T_{v2}) - S(h_{cv1} + h_{r1})(T_{v2} - T_{v1}) = 0 \\ S\alpha_3 \tau^2 E_g - S(h_{cv2} + h_{r2})(T_3 - T_{v2}) = 0 \\ \frac{\dot{m}c_{p4}}{l} \frac{dT_f}{dx} = h_f(T_3 - T_f) \end{array} \right. \quad (2.50)$$

Ou encore :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} -(h_{cv0} + h_{r0} + h_{cv1} + h_{r1}) T_{v1} + (h_{cv1} + h_{r1}) T_{v2} & = & -(h_{cv0} + h_{r0}) T_0 - \alpha_v E_g \\ (h_{cv1} + h_{r1}) T_{v1} - (h_{cv2} + h_{r2} + h_{cv1} + h_{r1}) T_{v2} + (h_{cv2} + h_{r2}) T_3 & = & -\alpha_v \tau E_g \\ (h_{cv2} + h_{r2}) T_{v2} - (h_{cv2} + h_{r2}) T_3 & = & -\alpha_3 \tau^2 E_g \\ \frac{\dot{m} c_{p4}}{l} \frac{dT_f}{dx} = & & h_f (T_3 - T_f) \end{array} \right. \quad (2.51)$$

En résolvant les trois premières équations dont les inconnues sont : T_{v1} , T_{v2} , T_3 , on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} T_{v1} & = & T_0 + \frac{\alpha_v}{a_0} E_g \left(1 + \tau + \frac{\alpha_3}{\alpha_v} \tau^2 \right) \\ T_{v2} & = & T_{v1} + \frac{\alpha_v \tau E_g}{a_1} \left(1 + \frac{\alpha_3}{\alpha_v} \tau \right) \\ T_3 & = & T_{v2} + \frac{\alpha_3 \tau^2 E_g}{a_2} \end{array} \right. \quad (2.52)$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{lcl} a_0 & = & h_{cv0} + h_{r0}, \\ a_1 & = & h_{cv1} + h_{r1} \\ a_2 & = & h_{cv2} + h_{r2} \end{array} \right. \quad (2.53)$$

La résolution de l'équation différentielle

$$\frac{\dot{m} c_{p4}}{l} \frac{dT_f}{dx} = h_f (T_3 - T_f) \quad (2.54)$$

donne

$$\frac{dT_f}{T_f - T_3} = -\frac{h_f l}{\dot{m} c_p} dx \quad (2.55)$$

soit en tenant compte de la condition initiale $T_f = T_0$ pour $x = 0$

$$\frac{T_s - T_3}{T_0 - T_3} = \exp \left(-\frac{h_f}{\dot{m} c_p} l L \right) = \exp \left(-\frac{h_f S}{\dot{m} c_p} \right) \quad (2.56)$$

Pour $x = L$, alors la température de sortie du capteur est donnée par la relation

$$\frac{T_s - T_3}{T_0 - T_3} = \exp\left(-\frac{h_f}{\dot{m}c_p}lL\right) = \exp\left(-\frac{h_f S}{\dot{m}c_p}\right) \quad (2.57)$$

Le flux solaire étant fonction du temps alors la température des deux vitres, de l'absorbeur et celle de sortie du capteur sont fonctions du temps. Ainsi l'expression de la température de sortie est donnée par :

$$T_s(L, t) = T_3(t) - (T_3(t) - T_0) \exp\left(-\frac{h_f S}{\dot{m}c_p}\right) \quad (2.58)$$

2.7 Modélisation des coefficients d'échange thermique

2.7.1 échange thermique par convection

2.7.1.1 Effet du vent : modélisation du coefficient de convection externe

Pour déterminer le coefficient de convection externe, on utilise la corrélation de Hottel et Woertz [44]

$$h_{cv0} = 5,67 + 3,86v \quad (2.59)$$

avec v la vitesse du vent prise égale à la valeur mesurée le jour des expérimentations du séchoir solaire pliable et portatif.

2.7.1.2 Coefficient d'échange entre les deux vitres

Pour déterminer le coefficient d'échange thermique convectif interne, h_{cv1} dans le cas des conduites rectangulaires inclinées, on utilise la corrélation suivante.

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra_d \cos(\alpha)} \right] \cdot \left[1 - \frac{1708 \cdot (\sin(1,8\alpha))^{1,6}}{Ra_d \cos(\alpha)} \right] + \left[\left(\frac{Ra_d \cdot \cos(\alpha)}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (2.60)$$

Les nombres de Nusselt(Nu), Reynolds(Re), Prandtl(Pr) qui sont des nombres adimensionnels sont définis comme suit :

$$Nu = \frac{h_{cv1} \cdot D_h}{\lambda_f} \quad (2.61)$$

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D_h}{\mu_f} \quad (2.62)$$

$$Pe = \frac{\mu_f \cdot c_{p_f}}{\lambda_f} \quad (2.63)$$

$$Ra_d = \frac{g \beta (T_3 - T_f) d^3}{\alpha \nu} \quad (2.64)$$

Le Diamètre hydraulique est donné par :

$$D_h = \frac{4S}{P} = \frac{4 \cdot d \cdot l}{2 \cdot (d + l)} = 2 \frac{d \cdot l}{(d + l)} \quad (2.65)$$

2.8 Simulation de la température de sortie du capteur plan double vitrage

Coefficient d'échange entre le fluide caloporteur et la vitre

Nous avons fait une hypothèse simplificatrice sur les coefficients d'échange de chaleur. Le système d'équation (2.46) nous permet de déterminer les différentes valeurs

des température des vitres et celle de l'absorbeur alors que l'équation (2.52) est celle qui nous permet de déterminer la température de sortie du capteur solaire double vitrage connaissant la température des deux vitres et celle de l'absorbeur.

$$h_{r2} = h_{r1} = h_{r0} = h_{cv2} = h_{cv1} = h_{cv0} \quad (2.66)$$

$$h_f = \frac{1}{2}a_0 \quad (2.67)$$

La simulation a été faite en utilisant un code développé sous le logiciel Scilab. Nous nous sommes basés sur les données de mesure du flux solaire. Une hypothèse simplificatrice a été faite sur les coefficients d'échange de chaleur. Cette simulation montre que la température de sortie du capteur évolue comme le flux solaire. La température de sortie moyenne est de $61^{\circ}C$. La partie expérimentale abordée au chapitre suivant nous permettra de faire une comparaison entre cette température simulée et celle réellement mesurée à l'aide de thermocouples de type K connectés sur le capteur et reliés à un multiplexeur et un ordinateur pour l'acquisition des données.

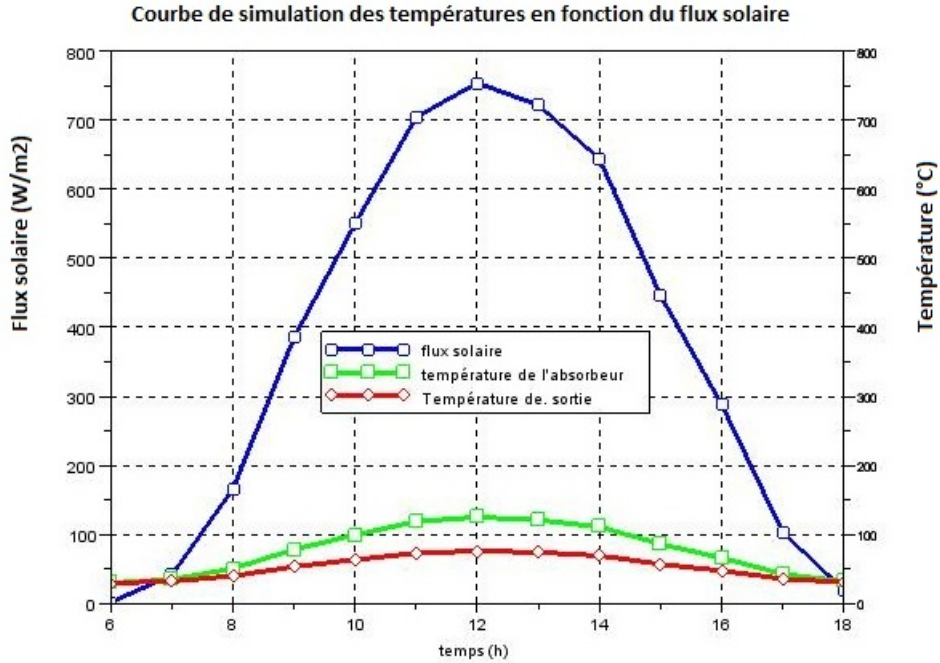


Figure 2.8: Courbe de simulation de la température de sortie du capteur plan double vitrage pour le site de l'université de Bangui Mars 2010

2.8.1 Détermination expérimentale du coefficient d'échange de chaleur du fluide caloporteur

Le problème le plus difficile à traiter est celui de la détermination du coefficient d'échange de chaleur du fluide caloporteur. La performance d'un séchoir solaire indirect est basée implicitement sur ce paramètre car plus ce coefficient est élevé, plus le séchage est rapide. Dans ce travail nous avons pu déterminer ce coefficient grâce à un certain nombre de mesures dont nous essayons de décrire le protocole dans le paragraphe suivant.

2.8.1.1 Protocole expérimental

1. Multiplexeur Agilent 34970A
2. 15 thermocouples de type k
3. Un anémomètre

2.8.1.2 Réalisation de l'expérience

Les étapes préliminaires pour la réalisation de cette expérience est décrite ci-dessous :

1. connecter les bouts libres de chaque thermocouple au multiplexeur en prenant soin de bien connecter les bornes positives et négatives aux bons endroits ;
2. placer les bouts soudés de chaque thermocouple à l'endroit où on veut mesurer la température ;
3. placer 5 thermocouples sur l'absorbeur, 5 autres à l'entrée du capteur et les 5 derniers autres thermocouples, à la sortie du capteur double vitrage ;
4. paramétrer le multiplexeur de telle sorte que les données soient envoyées 30 minutes après l'opération de la connectivité des thermocouples le temps de minimiser toute perturbation. L'expérimentateur peut configurer l'intervalle de mesure de telle sorte que les données soient reçues toutes les 5 minutes ;
5. placer l'anémomètre à l'entrée du capteur, à défaut un débitmètre à air ;
6. lancer l'expérience.

A partir de l'équation (5.28), on peut déduire l'expression du coefficient d'échange de chaleur du fluide caloporteur d'après l'équation ci-après :

$$h_f = \frac{\dot{m}_f C_p}{S} \text{Log} \left[\frac{T_A - T_0}{T_A - T_s} \right] \quad (2.68)$$

Avec :

h_f : coefficient d'échange de chaleur en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

\dot{m}_f : débit d'air en kg/s

C_p : chaleur massique en $J/kg \text{ } ^\circ C$

T_A : température de l'absorbeur $^\circ C$

T_0 : température ambiante $^\circ C$

T_s : température de sortie de l'air $^\circ C$

Les données de ces mesures nous ont permis de tracer la courbe de l'évolution du coefficient d'échange de chaleur du fluide caloporteur.

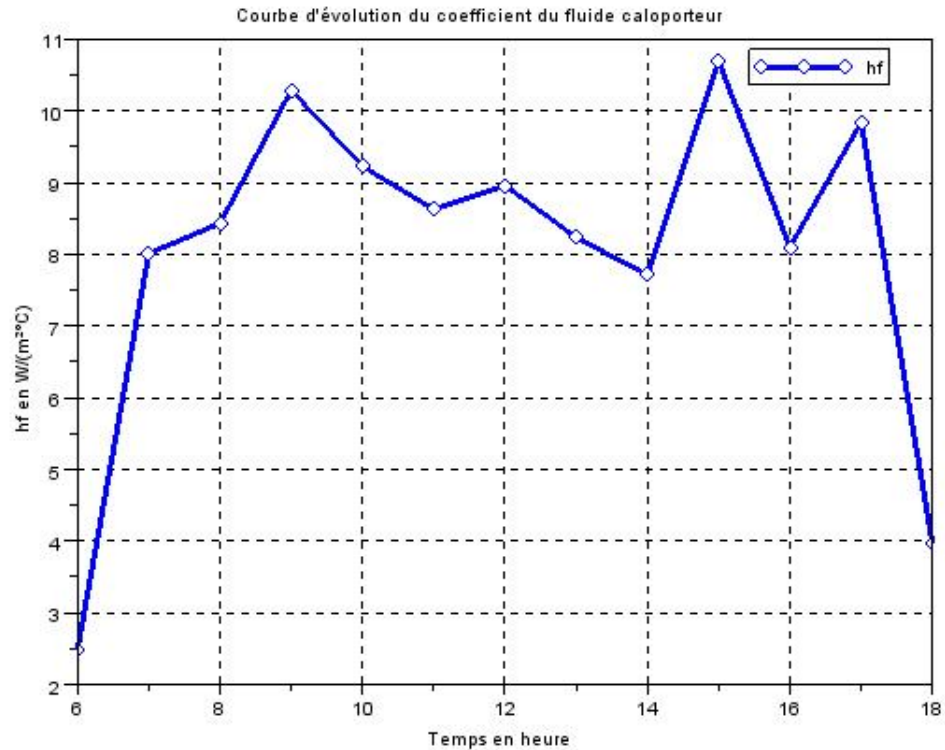


Figure 2.9: Courbe d'évolution du coefficient d'échange de chaleur du fluide caloporteur.

Cette courbe montre que le coefficient d'échange de chaleur du fluide caloporteur varie avec le flux solaire puisque les températures des parois en dépendent. Ce coefficient faible au début lorsque le soleil se lève ou se couche, devient très important entre 9 h et 17 h, intervalle qui correspond à la période de séchage. La valeur moyenne de ce coefficient est de $8 \text{ W/m}^2\text{°C}$ et la valeur maximale est de $10,69 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Confrontation des valeurs des températures simulées et mesurées

Nous nous intéressons plus particulièrement à la comparaison entre la température simulée des différentes parois que sont les vitres, l'absorbeur et la sortie du capteur et la température mesurée sur celles-ci.

Pour les températures simulées, nous avons écrit un code sous Scilab en fixant la température ambiante égale à 30°C et tous les coefficients d'échange de chaleur sont égaux sauf celui du fluide caloporteur qui est égale à la moitié des autres ; ceci résulte du mélange air froid - air chaud. Les températures expérimentales sont celles mesurées lors de notre campagne de mesure sur le site de l'Université de Bangui pour le 15 Mars 2010.

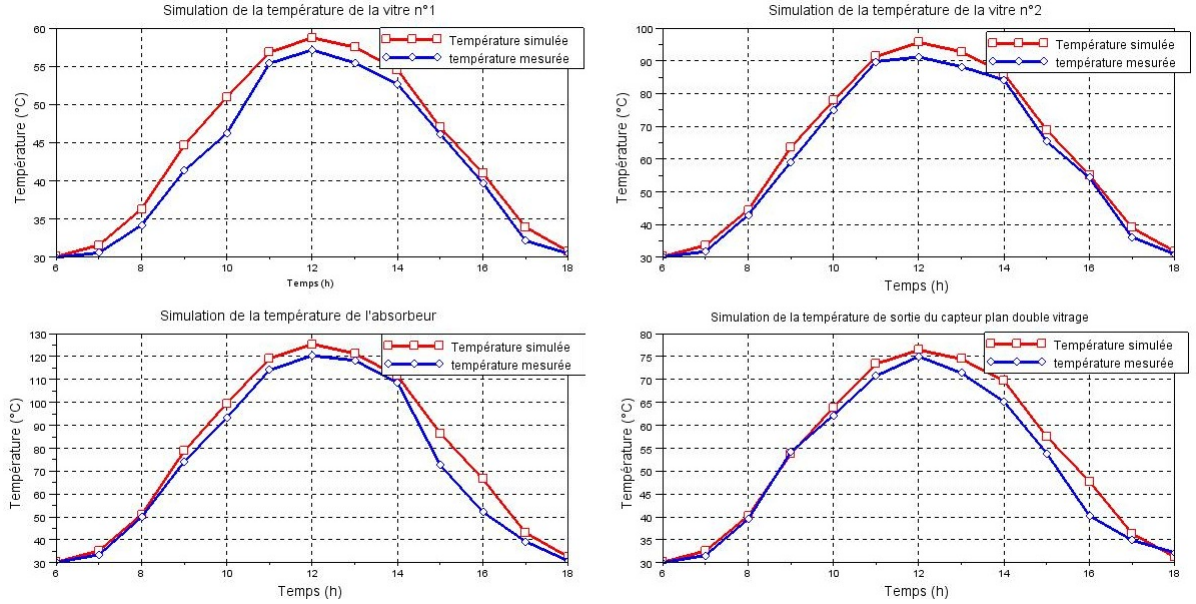


Figure 2.10: Courbe de comparaison des températures simulées et mesurées

On peut déduire que les courbes expérimentales et théoriques sont des fonctions \cos^2 . Elles suivent la même allure que celle du flux solaire. Aussi les températures mesurées sont inférieures aux températures simulées et les températures maximales obtenues se situent à 12 heures puisque la République centrafricaine est située proche de l'équateur. On constate aussi une bonne corrélation entre les températures simulées et mesurées par le modèle retenu et adapté à cette étude.

Chapitre 3

Optimisation du capteur plan double vitrage par la méthode des plans d'expériences

3.1 Présentation de la méthode des plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences permet une gestion des processus expérimentaux sur des installations réelles pour lesquelles il y a modification effective des conditions expérimentales. Outre le fait de structurer une démarche expérimentale, elle consiste à optimiser un procédé tout en affinant les connaissances du processus étudié. Ainsi elle permet d'étudier l'influence de paramètres encore appelés facteurs notés X (paramètres d'entrées) sur un paramètre de sortie noté Y (encore appelé réponse) et donc de relier ces paramètres par une relation de cause à effet. L'avantage de cette méthode réside dans le fait que le nombre d'expériences à réaliser est limité et doit être le plus faible possible, toutefois ces expériences doivent être structurées et organisées. Au modèle expérimental qui est exprimé peut correspondre une modélisation mathématique. Celle-ci permet de relier la variation des facteurs étudiés à la variation de la réponse mesurée $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$. Ainsi ce modèle ma-

thématique permet une interprétation plus profonde des phénomènes. Il possède des qualités prédictives et rend les orientations de recherche plus sûres. Ces méthodes ont surtout montré leur intérêt pour les secteurs industriels car elles permettent d'optimiser un procédé afin de répondre à des soucis de compétitivité et de rentabilité qui sont les objectifs principaux de tout industriel. Toutefois ces méthodes sont de plus en plus utilisées en recherches dans la mesure où le domaine de recherche peut être appliqué intégrant les nouveaux procédés mais également en recherche fondamentale puisqu'elle permet une démarche méthodologique aboutissant à une acquisition des connaissances sur le système étudié par des lois physiques ou physicochimiques. Ces méthodes d'optimisation font intervenir plusieurs plans d'expériences, les plans d'Hadamard [61], Les plans factoriels complets et fractionnaires, les plans composites centrés réduits, le simplex [62-64]. Notre travail consistant à mettre au point un séchoir solaire, il était opportun d'utiliser ces méthodes afin d'optimiser le rendement de notre séchoir. Les deux plans d'expériences qui ont été utilisés à cette fin sont le plan factoriel complet et la matrice composite centrée réduite présentés ci-dessous.

3.1.1 Le plan factoriel complet

Le principe consiste à étudier un certains nombre de facteurs que l'on fait varier entre deux niveaux de variation souvent appelés -1 et +1 ou encore variables codées, ainsi pour k facteurs étudiés le nombre d'essais à réaliser sera de 2^k . Les facteurs peuvent être soit qualitatifs soit quantitatifs de même que la réponse étudiée est qualitative et/ou quantitative . La construction du plan d'expériences se fait pour chacun des facteurs par alternance de 2^{k-1} valeurs de -1 suivies de 2^{k-1} valeurs de +1. Ainsi, si le nombre de facteurs étudiés est égal à 2, le plan d'expériences comporte $2^2 = 4$ essais illustrés de la façon suivante :

Tableau 3.1: Construction d'un plan d'expériences factoriel complet avec 2 niveaux

<i>Essai</i>	X_1	X_2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

L'avantage de ce type de plan d'expériences réside dans le fait de pouvoir déterminer des interactions entre facteurs. Ainsi dans ce cas nous pouvons déterminer l'interaction entre le facteur 1 et le facteur 2 en exprimant la matrice des effets ci-dessous :

Tableau 3.2: Construction d'un plan d'expériences avec interaction entre les deux facteurs

<i>Essai</i>	X_1	X_2	X_1X_2
1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1

Les variables codées sont alors remplacées par les variables naturelles correspondant aux conditions expérimentales définies par l'étude et les expériences sont réalisées. Ce plan d'expériences permet donc de déterminer quels sont les effets les plus influents à la fois sur les facteurs principaux mais également d'interactions. Ces effets sont déterminés à partir d'une relation simplifiée :

$$b = \frac{1}{2}[\bar{M}_{X_i=1} - \bar{M}_{X_i=-1}] \quad (3.1)$$

Avec

b : coefficient constant
 $\overline{M}_{X_i=1}$: moyenne de réponse au niveau +1
 $\overline{M}_{X_i=-1}$: moyenne de réponse au niveau -1
 $X_i = +1$: niveau le plus haut
 $X_i = -1$: niveau le plus bas

Toutefois ce modèle expérimental peut être modélisé mathématiquement afin d'exprimer la variation de la réponse en fonction des différents facteurs étudiés. Si la réponse étudiée est notée Y alors le modèle mathématique associé aux plans factoriels complets est de la forme suivante :

$$Y = b_0 + \sum_i^N b_i X_i + \sum_{ij}^N b_{ij} X_i X_j + \sum_{ij\dots k}^N b_{ij\dots k} X_i X_j \dots X_k + \varepsilon \quad (3.2)$$

b_0 est une constante qui représente généralement la moyenne de tous les résultats

b_i l'effet du facteur i , b_{ij} l'effet d'interaction d'ordre 1 entre le facteur i et j

et ε l'erreur expérimentale.

Ce modèle mathématique, outre ces qualités prédictives, nous permet d'accéder aux surfaces de réponses. Il est à noter que lorsque le nombre de facteurs à étudier devient trop important, il est possible de diminuer le nombre d'expériences en réalisant un plan factoriel fractionnaire. Toutefois, il est basé sur le même principe et donne accès aux mêmes informations.

Par ailleurs, à partir du même plan, il est possible d'étudier plusieurs réponses. Le fait que les facteurs étudiés puissent être comme les réponses étudiées soient qualitatifs soient quantitatifs fait que ces plans d'expériences peuvent être appliqués à des domaines d'études très variés. Ces plans factoriels complets ou fractionnaires

ne sont pas assez perfectionnés pour cibler un « optimum » mais ils permettent de mettre en évidence les facteurs qui peuvent être influents lors d'une étude et de déterminer si des interactions entre facteurs peuvent exister, en outre ils constituent une première tendance à l'optimum.

3.1.2 Le plan composite centré réduit

Le plan composite centré réduit est un plan d'expériences qui est composé de plusieurs parties. La première partie comporte un plan factoriel complet ou fractionnaire explicité au paragraphe 3.1.1 auquel s'ajoute un plan en étoile où chacun des facteurs étudiés prend une valeur de $\pm\alpha$ et une partie au centre du domaine où toutes les variables étudiées prennent la valeur 0. Ainsi pour deux facteurs étudiés (X_1 et X_2) le plan composite centré réduit est constitué de la façon suivante :

Tableau 3.3: Exemple de construction d'un plan composite centré réduit

<i>Essai</i>	X_1	X_2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	$-\alpha$	0
6	$+\alpha$	0
7	0	$-\alpha$
8	0	$+\alpha$
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

La valeur de α dans le plan en étoile en général est égale à $^4\sqrt{N_f}$ où N_f représente le nombre d'expériences de la matrice factorielle complète. Ici $N_f = 4$, α est donc égal à $^4\sqrt{4} = 1.21$. On dit encore que cette partie du plan permet le critère de rotabilité du système étudié. La matrice au centre du domaine est en réalité une répétition d'une expérience où chacun des paramètres en variables codées est égal à 0. Cette dernière partie permet donc de s'assurer du critère répétabilité ou reproductibilité du système étudié. Comme pour les plans factoriels complets, cette matrice permet également de déterminer les effets de chacun des facteurs mais également les effets d'interactions entre facteurs. Ces effets sont cette fois ci -déterminés à partir de la relation matricielle suivante :

$$B = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (3.3)$$

Où X représente la matrice des effets en variables codées, X^t la matrice transposée et Y le vecteur colonne réponse. Ainsi la matrice des effets X est représentée au tableau 3.4 :

Tableau 3.4: Construction d'un plan composite avec répétitions

<i>Essai</i>	M	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	$X_1 X_2$
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	+1	+1	-1
3	+1	-1	+1	+1	+1	-1
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1
5	+1	$-\alpha$	0	α^2	0	0
6	+1	$+\alpha$	0	α^2	0	0
7	+1	0	$-\alpha$	0	α^2	0
8	+1	0	$+\alpha$	0	α^2	0
9	+1	0	0	0	0	0
10	+1	0	0	0	0	0
11	+1	0	0	0	0	0
12	+1	0	0	0	0	0

Dans cette matrice figure les termes quadratiques représentés par les colonnes de X_1^2 et X_2^2 et le modèle mathématique associé à ce type de plan est donc une modélisation mathématique de degré 2. Aussi le modèle général s'exprime de la manière suivante :

$$Y = b_0 + \sum_i^N b_i X_i + \sum_i^N b_{ii} X_i^2 + \sum_{ij}^N b_{ij} X_i X_j + \sum_{ij...k}^N b_{ij...k} X_i X_j ... X_k + \varepsilon \quad (3.4)$$

Ayant donc un modèle de degré 2, il est possible alors de déterminer un extremum, cet extremum pouvant constituer l'optimum du système étudié. Aussi ce type de plan est riche en informations transmises et très performant, il est qualifié de plan d'optimisation.

3.1.3 Qualité des modèles

Afin de tester la qualité du modèle mathématique, les coefficients de corrélation R^2 , $R_{ajusté}^2$ et Q^2 sont souvent déterminés à partir des relations exprimées ci-dessous :

$$R^2 = \frac{(\sum Y_p^2 - \sum \bar{Y}^2)}{(\sum Y_m^2 - \sum \bar{Y}^2)} \quad (3.5)$$

$$R_{ajusté}^2 = 1 - \left(\frac{\frac{\sum (Y_m - Y_p)^2}{DF}}{\frac{\sum (Y_m^2 - \bar{Y}^2)}{DF}} \right) \quad (3.6)$$

$$Q^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N Y_m^2 - \sum_{i=1}^N \bar{Y}_m^2 - \sum_{i=1}^N \frac{(Y_i - Y_{iprédit})^2}{(1-h_i)^2} \right)}{\sum Y_m^2 - \sum \bar{Y}_m^2} \quad (3.7)$$

avec :

Y_p : la réponse prédite

Y_m : la réponse mesurée

\bar{Y} : moyenne des réponses

\bar{Y}_m : moyenne des réponses mesurées

DF : degré de liberté

h_i : le terme en diagonale de la matrice de Hat $\left(X (X^t X)^{-1} X^t \right)$

R^2 est la fraction de la variation des réponses expliquées par le modèle, $R_{ajusté}^2$ est la fraction de la variation des réponses expliquées par le modèle ajusté au degré de liberté et Q^2 , la fraction de la variation des réponses prédites par le modèle.

Si le modèle est satisfaisant alors R^2 et Q^2 sont positifs et proches de 1. De la même façon, l'analyse ANOVA (ANalyse Of Variance) comprenant l'analyse de la variance permet de juger de la fiabilité du modèle et donc des expériences réalisées. Ces études seront effectuées dans les parties expérimentales ci-après.

3.2 Optimisation du rendement du séchoir

3.2.1 Recherche des facteurs influents

Une première étude a consisté à établir un plan d'expériences pour optimiser le rendement du séchoir solaire. Plusieurs paramètres ont été étudiés pour déterminer l'influence qu'ils avaient sur la température de sortie du capteur et l'efficacité thermique de celui-ci. Ces paramètres sont l'intervalle de mesure, l'heure de la mise en fonctionnement du séchoir et la distance entre les vitres constituant le capteur double vitrage. Pour chacun des facteurs les niveaux de variation -1 et +1 ont été fixés et sont représentés dans le tableau (3.5) :

Tableau 3.5: Choix des facteurs étudiés et de leurs niveaux de variation pour l'étude réalisée

Facteurs	Variables	Niveau -1	Niveau +1
X_1	Intervalle de mesure (min)	40	60
X_2	heure de départ (h)	10	12
X_3	distance entre les vitres (cm)	4	7

Le plan d'expériences qui a été utilisé est un plan factoriel complet dont la construction générale a été décrite au paragraphe 3.1.1. Ainsi on peut voir dans le tableau (3.6) les expériences qui ont été réalisées, ayant trois facteurs à 2 niveaux cela représente donc $2^3 = 8$ expériences ainsi que les réponses mesurées. La réponse notée Y_1 concerne la température de sortie du capteur et la réponse notée Y_2 le rendement du capteur déterminée à partir de la relation ci-dessous :

$$\eta = \frac{1,2vs_e\Delta T}{3600E_G S} \quad (3.8)$$

Avec

- v : vitesse d'écoulement de l'air mesurée à l'aide d'un anémomètre ;
- s_e : section d'entrée de l'air dans le capteur ;
- ΔT : différence entre la température de sortie du capteur et celle à l'entrée qui est égale à la température ambiante ;
- E_G : flux solaire sur l'intervalle de mesure ;
- S : surface du capteur.

Tableau 3.6: Plan factoriel complet 2^3 avec les variables en valeurs codées et naturelles ainsi que les réponses obtenues

<i>Essais</i>	X_1	X_2	X_3	U_1	U_2	U_3	Y_1	Y_2
1	-1	-1	-1	40	10	4	45.43	33.59
2	+1	-1	-1	60	10	4	54.32	32.07
3	-1	+1	-1	40	12	4	41.41	28.26
4	+1	+1	-1	60	12	4	41.82	10.95
5	-1	-1	+1	40	10	7	43.67	28.33
6	+1	-1	+1	60	10	7	43.62	28.54
7	-1	+1	+1	40	12	7	54.32	42.45
8	+1	+1	+1	60	12	7	44.49	33.28
9	0	0	0	50	11	5.5	43.54	30.005
10	0	0	0	50	11	5.5	48.73	31.45

Dans ce plan factoriel complet deux expériences au centre du domaine étudié ont été rajoutées afin de voir si le modèle était linéaire ou non. Le choix des niveaux pour le paramètre heure de mise en fonctionnement a été fixé en fonction de l'étude de la variation du flux solaire en fonction du temps qui avait été exploité sur le site où est installé le séchoir et dont on peut voir l'évolution sur la figure 3.1 ci-après :

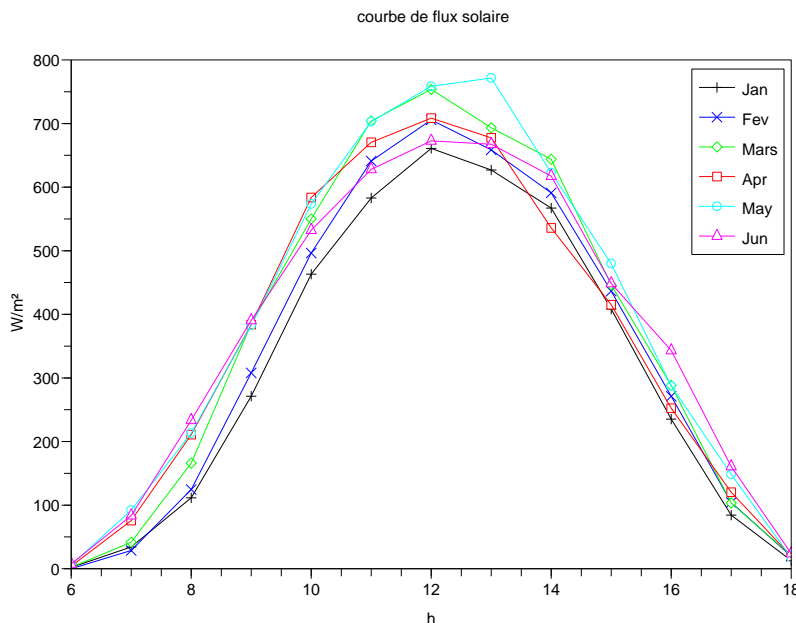


Figure 3.1: Évolution du flux solaire en fonction du temps

On peut donc constater sur cette figure 3.1 que le flux solaire est donc maximum entre 10 heures et 14 heures avec un pic à 12h, aussi les deux niveaux fixés pour l'heure de mise en fonctionnement du séchoir ont été 10 et 12 heures respectivement du fait de la symétrie de la courbe. D'autre part, le capteur possédant un double vitrage, il nous a paru important d'étudier l'impact de ce facteur en faisant varier la distance entre les vitres du capteur. L'analyse des résultats de ces expériences sur les deux réponses température de sortie du fluide (Y_1) et rendement du capteur (Y_2) a pu être réalisée à partir d'un logiciel Modde [65]. On peut constater à partir du

coefficient de régression linéaire (R^2) calculé sur les réponses Y_1 et Y_2 et représenté sur la figure 3.2 que le modèle étudié est satisfaisant. En effet ce coefficient étant supérieur ou égal à 0.9 ceci indique que plus de 90% des variables sont expliquées par le modèle

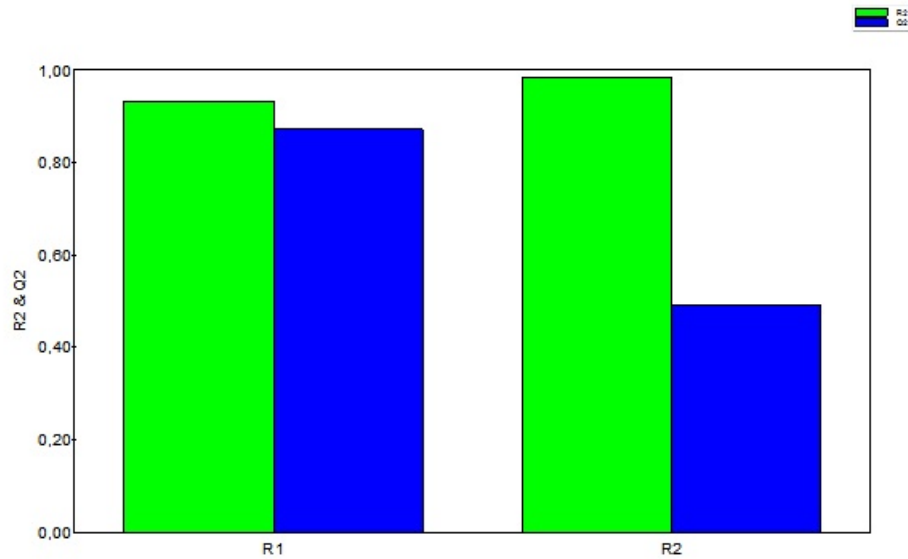


Figure 3.2: Représentation des coefficients de validité du modèle R^2 et Q^2 sur les réponses Y_1 (température de sortie) et Y_2 (rendement) du capteur

Les effets (encore appelés coefficients) de chacun des facteurs ainsi que les effets d'interactions entre facteurs ont été déterminés à partir de la relation(3.1) décrite au paragraphe 3.1.1. Les valeurs de ces effets sont représentées dans les tableaux 3.7 et 3.8 :

Tableau 3.7: Effets principaux et d'interactions sur la réponse R_1

Réponse 1	Coeff.	Err. de Student	Probabilité	Intervalle de Confiance.
constante	46,13	0,67	0	2,14
X_1	-0,072	0,75	0,929	2,40
X_2	-0,62	0,75	0,46	2,40
X_3	0,39	0,75	0,64	2,40
$X_1.X_2$	-2,28	0,75	0,05	2,40
$X_1.X_3$	-2,39	0,75	0,05	2,40
$X_2.X_3$	3,50	0,75	0,01	2,40
$Q^2 = 0.872$; $R^2 = 0.933$; $R_{ajusté}^2 = 0.799$; <i>Intervalle de confiance</i> = 0.95				

Tableau 3.8: Effets principaux et d'interactions sur la réponse R_2

Réponse 2	Coefficient	Err.de Student	Probabilité	Intervalle de confiance
constante	29,94	0,53	0	1,70
X_1	-3,40	0,59	0,01	1,9
X_2	-0,88	0,59	0,23	1,90
X_3	3,53	0,59	0,01	1,90
$X_1.X_2$	-3,07	0,59	0,01	1,90
$X_1.X_3$	1,30	0,59	0,11	1,90
$X_2.X_3$	5,73	0,59	0,00	1,90
$Q^2 = 0.491$; $R^2 = 0.985$; $R_{ajusté}^2 = 0.957$; <i>Intervalle de confiance</i> = 0.95				

On peut encore visualiser ces effets sous forme d'histogrammes représentés sur les figures 3.3 et 3.4 :

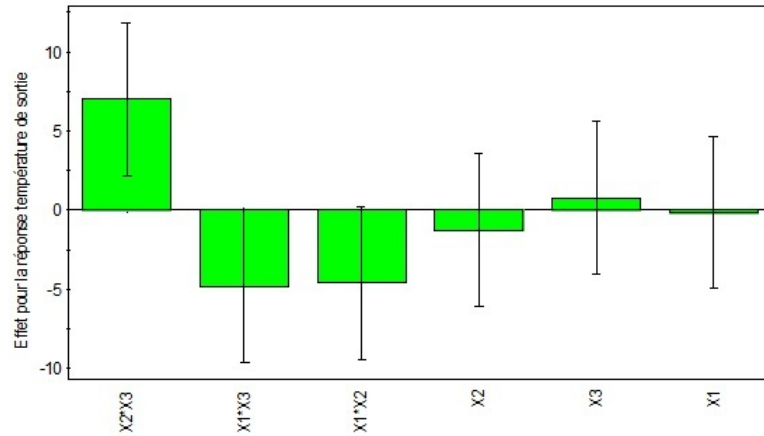


Figure 3.3: Histogramme des effets pour la réponse Y_1

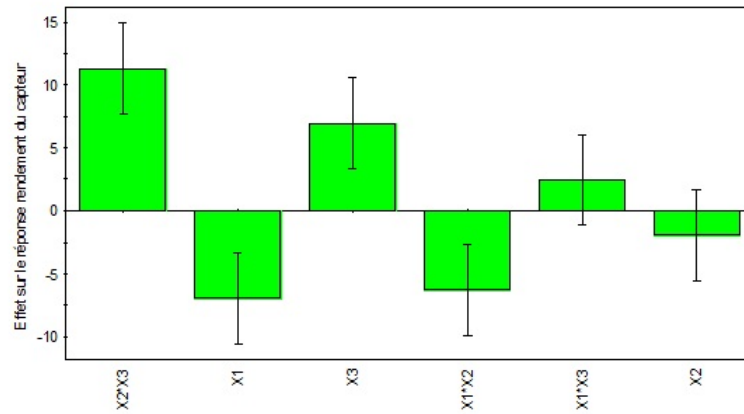


Figure 3.4: Histogramme des effets pour la réponse Y_2

On peut observer à partir des tableaux 3.7 et 3.8 pour les deux réponses Y_1 et Y_2 que les facteurs : heure de mise en fonctionnement, distance entre les vitres et interaction entre heure de mise en fonctionnement et distance entre les vitres sont les plus significatifs avec une valeur de $p < 0.01$. En ce qui concerne le facteur intervalle de mesure, ce paramètre est insignifiant pour la température de sortie (Y_1), par contre, il est significatif pour le rendement du capteur (Y_2) ceci s'explique par le

fait que cette réponse dépend de la vitesse d'écoulement de l'air d'après l'équation (3.8). Si l'intervalle de mesure coïncide au moment où la vitesse d'écoulement est faible alors cela se fait ressentir sur la réponse (Y_2) . A partir des valeurs des effets ou coefficients on peut exprimer les modèles mathématiques suivants pour les deux réponses :

$$Y_1(^{\circ}C) = 46.13 - 0.07X_1 - 0.62X_2 + 0.39X_3 - 2.28X_1X_2 - 2.39X_1X_3 + 3.5X_2X_3 \quad (3.9)$$

$$Y_2(\%) = 29.94 - 3.4X_1 - 0.88X_2 + 3.53X_3 - 3.07X_1X_2 + 1.3X_1X_3 + 5.73X_2X_3 \quad (3.10)$$

Ces modèles permettent de tracer les surfaces de réponse que l'on peut voir sur les figures 3.4 et 3.5

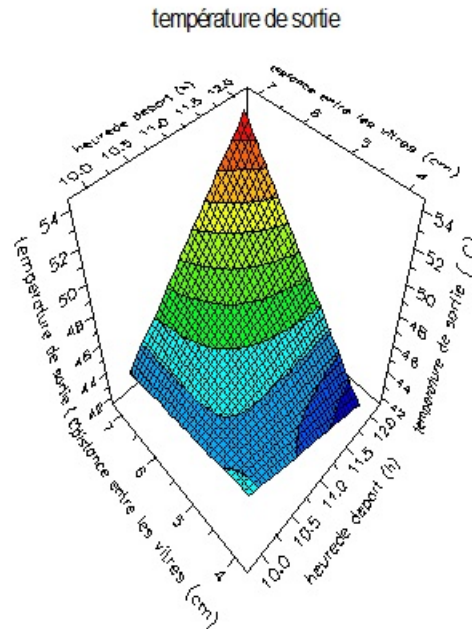


Figure 3.5: Surface de réponse pour la température de sortie (Y_1) en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement

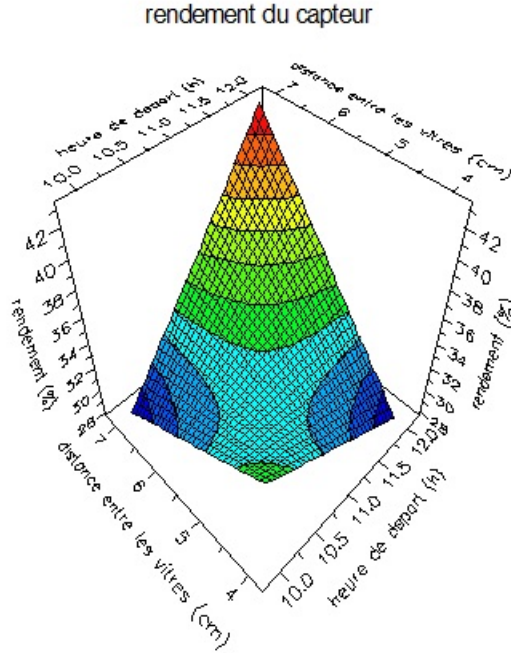


Figure 3.6: Surface de réponse pour le rendement du capteur Y_2 en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement

Pour chacune de ces surfaces le facteur intervalle de mesure a été fixé à son plus bas niveau c'est-à-dire 40 minutes car ce paramètre était important pour la réponse rendement (Y_2) mais le coefficient de ce facteur étant négatif cela signifie que l'augmentation de l'intervalle de mesure est défavorable au rendement du capteur. De plus, ce niveau étant fixé, il permet de mieux rendre compte de l'effet d'interaction entre les facteurs distance entre les vitres du capteur et l'heure de mise en fonctionnement du séchoir qui est très importante quelque soit la réponse Y_1 ou Y_2 . En observant les surfaces de réponses pour les deux réponses, on peut remarquer que la température de sortie la plus élevée et le rendement le plus élevé du capteur sont obtenus pour un temps de mise en fonctionnement à partir de 11 – 12 heures et une distance entre les vitres de 6 à 7 cm. Il est tout à fait logique que l'heure de mise en fonctionnement soit de 11-12 heures puisque à ce créneau horaire le flux solaire est à

son maximum, quant à la distance entre les vitres du capteur qui à l'origine était de 2,5 cm nous voyons qu'il est préférable d'augmenter cette distance. Ce premier plan d'expériences nous a permis de déterminer les facteurs les plus influents, cependant nous avons cherché à compléter cette première étude avec un plan plus performant qui est un plan composite centré réduit. Ce dernier permet grâce à une modélisation mathématique de second ordre de préciser au mieux les réponses optimales pouvant être obtenues.

3.2.2 Recherche des conditions optimales

Afin de déterminer la température de sortie maximale pouvant être obtenue ainsi que le meilleur rendement, l'étude précédente a été complétée à l'aide d'un autre plan d'expériences appelé plan composite centré réduit. Toutefois, nous avons ajouté l'étude d'un quatrième facteur qui correspond à l'épaisseur de la vitre. En effet, dans la littérature on peut remarquer que différentes épaisseurs de vitres allant de 2 mm à 5 mm sont utilisées sans réellement savoir l'impact que peut donner cette différence d'épaisseur, aussi il nous semblait important d'introduire ce facteur. Toutefois, pour ce dernier facteur son domaine de variation a été limité en raison des contraintes d'approvisionnement des vitres en RCA. Le tableau 3.9 résume donc les facteurs étudiés ainsi que leurs niveaux de variation choisis.

Tableau 3.9: Facteurs et niveaux étudiés pour le plan composite

Facteurs		Niveaux				
		$-\alpha$	-1	0	$+1$	$+\alpha$
X_1	intervalle de mesure (min)	25	40	50	60	75
X_2	heure de mise en fonctionnement (h)	8.5	10	11	12	13.5
X_3	distance entre les vitres (cm)	2	4	5.5	7	9.4
X_4	épaisseur des vitres (mm)	—	3	—	5	—

Le plan composite a été construit selon la méthode décrite au paragraphe 3.1.2 mais pas tout à fait de manière standard. En effet, il nous fallait tenir compte ici de la contrainte de l'épaisseur des vitres pour laquelle nous n'avions que deux niveaux accessibles mais également de la valeur de α qui a également été modifiée et fixée à 2.5 en raison de fortes contraintes sur les distances entre les vitres du capteur pouvant être choisies. Ce plan ainsi que les réponses mesurées, la température de sortie (Y_1) et le rendement du capteur Y_2) suite aux expériences réalisées sont consignés dans le tableau (3.10) :

Tableau 3.10: Plan composite centré réduit en variables codées et naturelles et les réponses mesurées

Essai	X_1	X_2	X_3	X_4	U_1	U_2	U_3	U_4	Y_1	Y_2
1	-1	-1	-1	-1	40	10	4	3	45.43	33.59
2	+1	-1	-1	-1	60	10	4	3	54.32	32.07
3	-1	+1	-1	-1	40	12	4	3	41.41	28.26
4	+1	+1	-1	-1	60	12	4	3	41.82	10.95
5	-1	-1	+1	-1	40	10	7	3	43.67	28.33
6	+1	-1	+1	-1	60	10	7	3	43.62	28.54
7	-1	+1	+1	-1	40	12	7	3	54.32	42.45
8	+1	+1	+1	-1	60	12	7	3	44.49	33.82
9	-1	-1	-1	+1	40	10	4	5	40.51	30.04
10	+1	-1	-1	+1	60	10	4	5	47.97	41.77
11	-1	+1	-1	+1	40	12	4	5	43.28	32.094
12	+1	+1	-1	+1	60	12	4	5	37.75	7.56
13	-1	-1	+1	+1	40	10	7	5	37.04	20
14	+1	-1	+1	+1	60	10	7	5	35.55	35.99
15	-1	+1	+1	+1	40	12	7	5	52.69	27.22
16	+1	+1	+1	+1	60	12	7	5	41.46	16.93
17	$-\alpha$	0	0	+1	25	11	5.5	5	37.55	8
18	$+\alpha$	0	0	+1	75	11	5.5	5	36.04	23
19	0	$-\alpha$	0	+1	50	8.5	5.5	5	33.25	46.40
20	0	$+\alpha$	0	+1	50	13.5	5.5	5	40.65	15.39
21	0	0	$-\alpha$	+1	50	11	2	5	40.19	13.36
22	0	0	$+\alpha$	+1	50	11	9.4	5	43.26	27.35
23	0	0	0	-1	50	11	5.5	3	43.54	30.005
24	0	0	0	-1	50	11	5.5	3	48.73	31.45
25	0	0	0	-1	50	11	5.5	3	43.8	30.8

A partir des résultats expérimentaux les coefficients R^2 et Q^2 ont été calculés. Ces coefficients de corrélation sont indiqués sur la figure (3.7) et les tableaux 3.11 et 3.12 et sont supérieurs à 90% (0.941 et 0.953 pour chaque réponse respectivement). Ces coefficients indiquent ainsi que plus de 90% des variables sont expliqués par le modèle mathématique.

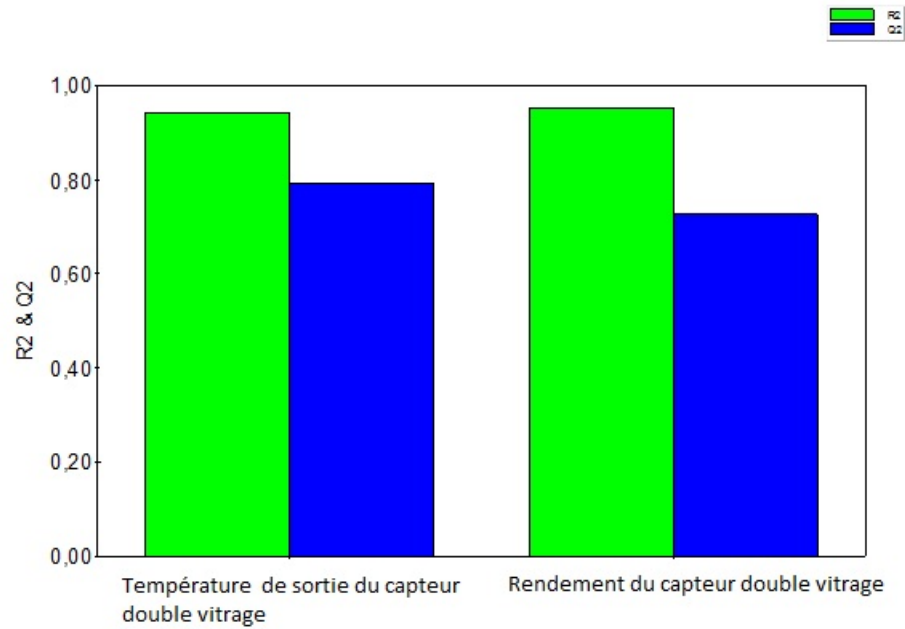


Figure 3.7: Représentation des coefficients de validité du modèle R^2 et Q^2 pour les réponses Y_1 et Y_2 pour le plan composite

Tableau 3.11: Effets principaux, d'interactions et quadratiques sur la réponse Y_1

Température de sortie	coeff.SC
Constante	36.26
X_1	-0.43
X_2	0.69
X_3	0.39
X_4	-1.30
$X_1.X_1$	-0.76
$X_2.X_2$	-0.65
$X_3.X_3$	0.24
$X_4.X_4$	7.95
$X_1.X_2$	-2.92
$X_1.X_3$	-2.66
$X_1.X_4$	-0.18
$X_2.X_3$	4.52
$X_2.X_4$	1.14
$X_3.X_4$	0.02

$Q^2 = 0.793$; $R^2 = 0.941$; $R_{ajusté}^2 = 0.85$; *Intervalle de confiance* = 0.95

Tableau 3.12: Effets principaux, d'interactions et quadratiques sur la réponse Y_2

Rendement	coeff.SC
Constante	20.50
X_1	0.28
X_2	-4.47
X_3	2.03
X_4	-1.31
$X_1.X_1$	-1.89
$X_2.X_2$	1.03
$X_3.X_3$	-0.85
$X_4.X_4$	8.05
$X_1.X_2$	-5.35
$X_1.X_3$	0.60
$X_1.X_4$	2.46
$X_2.X_3$	6.50
$X_2.X_4$	-3.79
$X_3.X_4$	-0.19

$Q^2 = 0.726$; $R^2 = 0.953$; $R_{ajusté} = 0.879$; *Intervalle de confiance* = 0.95

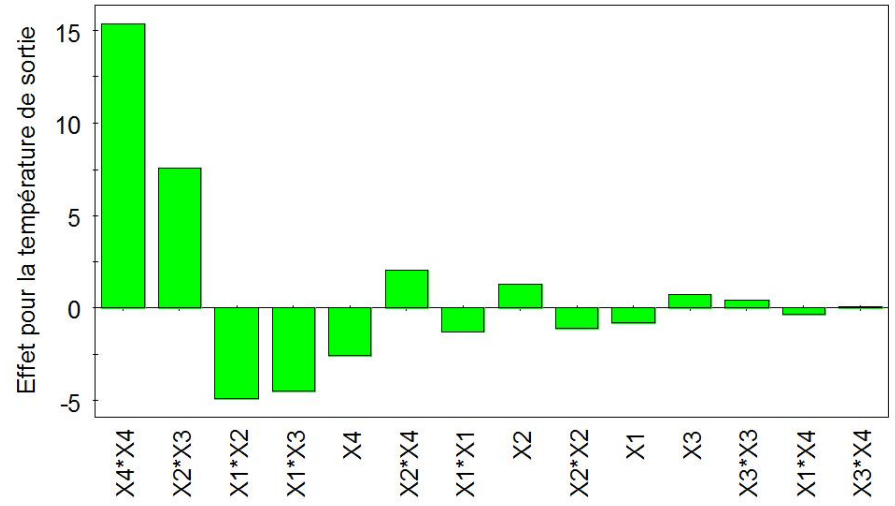


Figure 3.8: Histogramme des effets pour la réponse Y_1

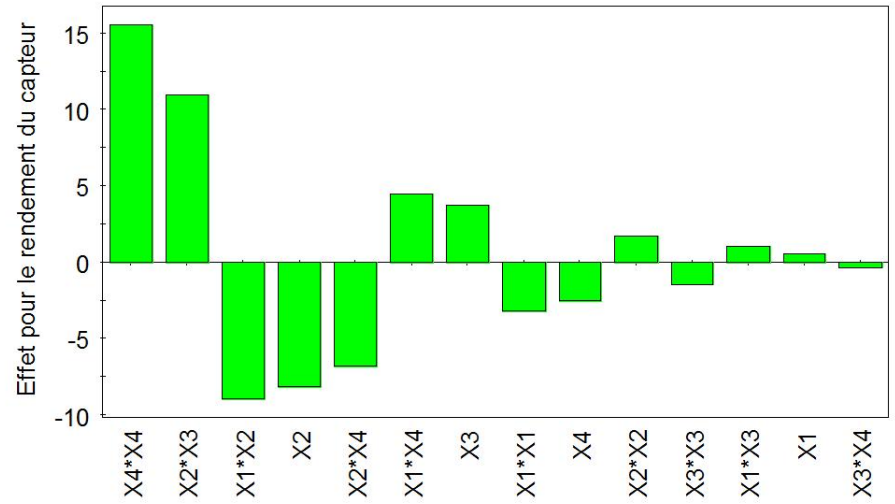


Figure 3.9: Histogramme des effets pour la réponse Y_2

Les effets de chacun des facteurs et les effets d'interaction sont déterminés à partir de la relation matricielle (équation 3.3) définie au paragraphe 3.2 et sont listés dans

les tableaux 3.11 et 3.12. Le modèle mathématique du second degré peut alors être donné pour chacune des réponses de la manière suivante :

modèle mathématique pour la première réponse

$$Y_1(^{\circ}C) = 36.56 - 0.43X_1 + 0.69X_2 + 0.39X_3 - 1.3X_4 - 0.76X_1^2 - 0.65X_2^2 + 0.24X_3^2 + 7.95X_4^2 - 2.92X_1X_2 - 2.66X_1X_3 - 0.18X_1X_4 + 4.52X_2X_3 + 1.14X_2X_4 + 0.02X_3X_4 \quad (3.11)$$

modèle mathématique pour la deuxième réponse

$$Y_2(\%) = 20.50 + 0.28X_1 - 4.47X_2 + 2.03X_3 - 1.31X_4 - 1.89X_1^2 + 1.03X_2^2 - 0.85X_3^2 + 8.05X_4^2 - 5.35X_1X_2 + 0.6X_1X_3 + 2.46X_1X_4 + 6.5X_2X_3 - 3.79X_2X_4 - 0.19X_3X_4 \quad (3.12)$$

L'analyse statistique ANOVA a été réalisée et est exposée (voire tableau (3.13) et (3.14)) :

Tableau 3.13: Analyse ANOVA pour la réponse Y_1

Température de sortie	DF	SS	MS	F	P	SD
(Variance)						
Total	24	44858, 5	1869, 11			
Constante	1	44123, 5	44123, 5			
Total corrigé	23	735, 02	31, 9574			5, 65309
Régression	14	691, 948	49, 4249	10, 3276	0, 001	7, 0028
Résidus	9	43, 0741	4, 78571			2, 18763
Lack of Fit (Model Error)	8	29, 6033	3, 70042	0, 274755	0, 907	1, 92365
Erreur pure	1	13, 468	13, 468			3, 66988

Tableau 3.14: Analyse ANOVA pour la réponse Y_2

Efficacité du capteur	DF	SS	MS	F	P	SD
(Variance)						
Total	24	19812,1	825,503			
Constante	1	17241,2	17241,2			
Total corrigé	23	2570,82	111,775			10,5724
Régression	14	2449,5	174,964	12,9796	0	13,2274
Résidus	9	121,32	13,48			3,67151
Erreur sur le modèle	8	120,276	15,0345	14,4006	0,201	3,87743
Erreur Pure	1	1,04401	1,04401			1,02177

DF : degré de liberté

SS : somme des carrés

MS : moyenne des carrés

F : coefficient de Fisher

P : probabilité

SD : racine de MS

comme on peut constater dans les tableaux 3.13 et 3.14 que la valeur de F de la régression est élevée (10.32 et 12.97 respectivement) ce qui indique que la plupart des variations de la variable réponse est expliquée par les équations de régression. La valeur de P associée est utilisée pour estimer F . Une valeur de p inférieure à 0.01 indique que le modèle est considéré comme étant statistiquement significatif. Les tables ANOVA 3.13 et 3.14 montrent également une erreur résiduelle qui exprime la quantité de la variation des réponses qui sont inexpliquées par le modèle. Le type de modèle choisi ici pour expliquer la relation exprimant la variation de la réponse en fonction de la variation des facteurs est correcte car, dans ce cas, l'analyse ANOVA indique que le modèle polynomial de second ordre est significatif et adéquat pour

représenter la relation actuelle entre les réponses et les variables étudiées. Ainsi, on peut examiner dans les tableaux 3.11 et 3.13 que l'heure de mise en fonctionnement et la distance entre les vitres du capteur sont les paramètres les plus importants avec une forte interaction entre ces deux facteurs que se soit pour la température de sortie du capteur ou pour le rendement du capteur. Cependant, nous pouvons voir que l'épaisseur des vitres est non négligeable pour le rendement du capteur. Les figures 3.10 et 3.11 montrent la corrélation entre les valeurs des réponses observées par le modèle expérimental et celles des réponses prédites par le modèle mathématique pour chacune des réponses étudiées Y_1 et Y_2 .

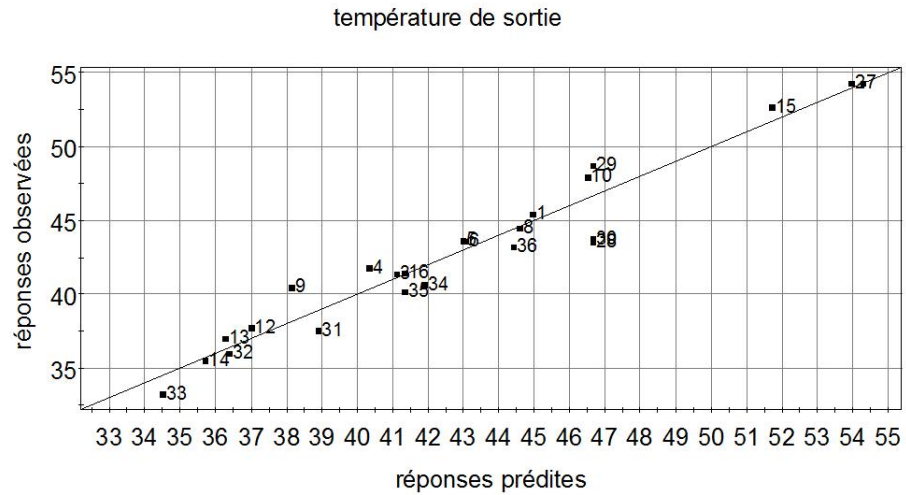


Figure 3.10: Réponses prédites en fonction des réponses observées pour la réponse température de sortie (Y_1)

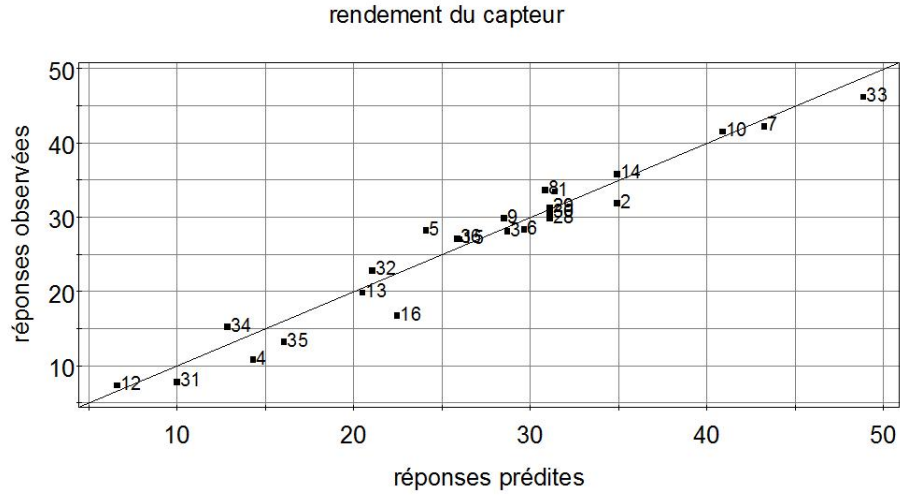


Figure 3.11: Réponses prédites en fonction des réponses observées pour la réponse de rendement du capteur (Y_2)

Ces figures montrent bien une relation linéaire entre ces valeurs qui témoigne de la bonne adéquation entre les réponses pouvant être obtenues par le modèle expérimental et celles qui pourraient être prédites par la relation mathématique proposé à partir des equations ((3.8) et (3.9)) citées précédemment. Par ailleurs, à partir de ces mêmes equations, on peut obtenir les surfaces de réponses pour chacune des réponses Y_1 et Y_2 illustrées sur les figures (3.12) et (3.13) :

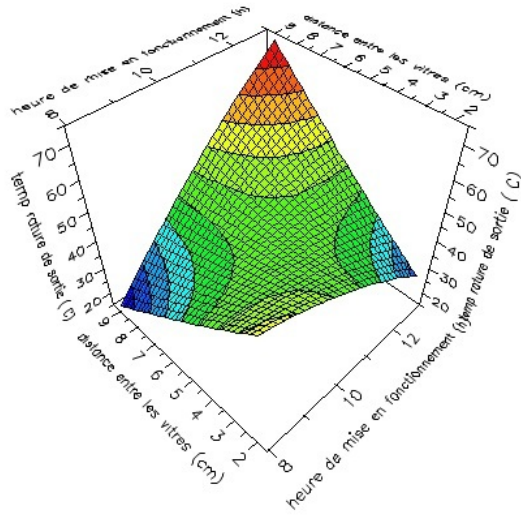


Figure 3.12: Surface de réponse pour la réponse Y_1 en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement avec un intervalle de mesure de 40 minutes ainsi qu'en fonction de l'épaisseur des vitres 3 mm

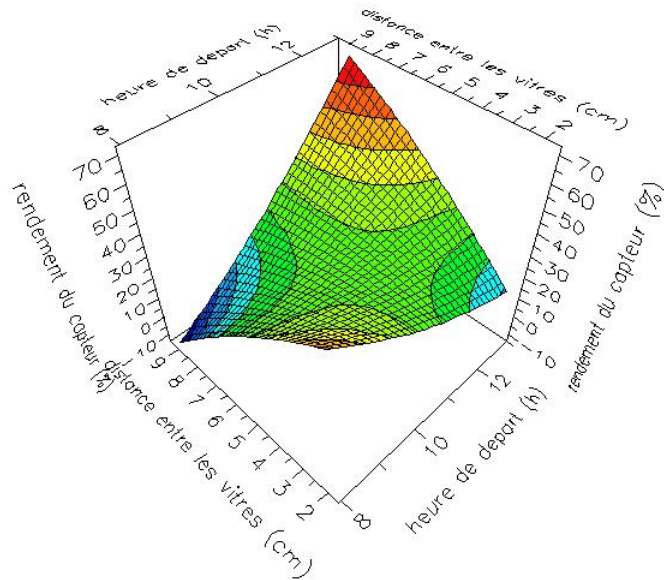


Figure 3.13: Surface de réponse pour la réponse Y_2 en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement avec un intervalle de mesure de 40 minutes ainsi qu'en fonction de l'épaisseur des vitres 3 mm

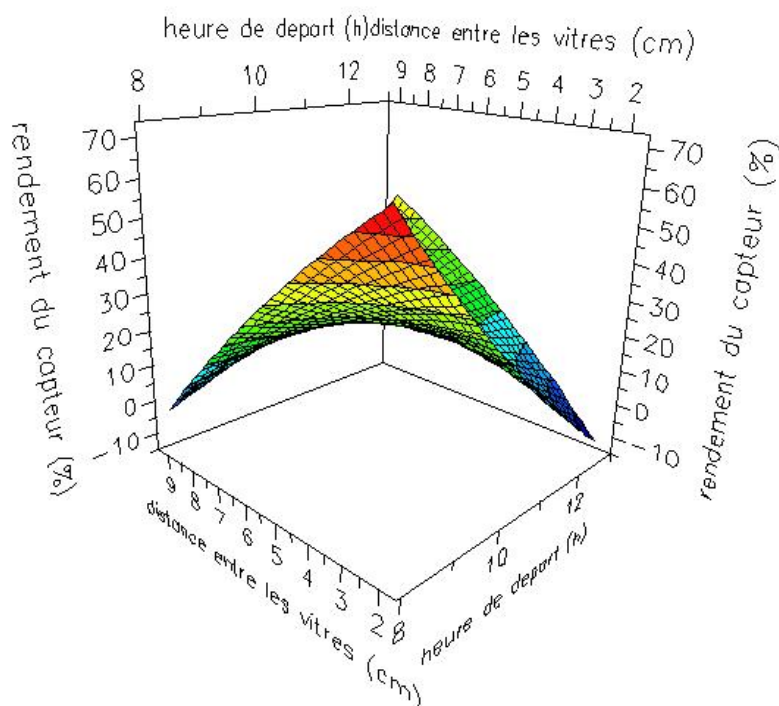


Figure 3.14: Surface de réponse pour la réponse Y_2 en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement avec un intervalle de mesure de 40 minutes ainsi qu'en fonction de l'épaisseur des vitres 5 mm

Les surfaces de réponses figures 3.12 et 3.13 pour les réponses température de sortie Y_1 et rendement Y_2 en fonction de la distance entre les vitres et l'heure de mise en fonctionnement, pour un intervalle de mesure fixé à 40 minutes et une épaisseur de vitre de 3 mm, montrent que le maximum pouvant être obtenu pour ces deux réponses sont pour les conditions suivantes : une distance maximale entre les vitres et une heure de mise en fonctionnement de 11–12 heures. Ainsi le rendement pouvant être obtenu est de 70% et une température de sortie de 73°C dans ces conditions. La figure 3.14 montre l'effet de l'épaisseur de la vitre sur le rendement. Dans ce cas pour une épaisseur de vitre de 5 mm, on peut constater que le rendement maximum est obtenu pour une heure de mise en fonctionnement pouvant être plus basse et

une distance entre les vitres la plus petite possible, toutefois dans ces conditions le rendement est de 50%.

3.3 Conclusion

L'application de la méthode des plans d'expériences nous a permis de montrer les paramètres influents sur la température de sortie du capteur mais également sur le rendement. Ces paramètres sont essentiellement la distance entre les vitres du capteur et l'heure de mise en fonctionnement. Elle a également permis de détecter une interaction entre ces deux facteurs les plus importants. D'autre part les réponses optimales pouvant être obtenues à partir de cette méthode ont été identifiées et sont une température de sortie du capteur de $73^{\circ}C$ et un rendement pouvant aller jusqu'à 70%. Ces valeurs sont conformes à des séchoirs performants dont le rendement se situe entre 60 et 70% décrits dans la littérature [66] et permettent donc de valider l'efficacité de notre système pilote en apportant les modifications nécessaires par rapport au système initial. Avec les modifications ainsi réalisées afin d'obtenir le rendement théorique le plus élevé, il est tout naturel de valider ces résultats par une application de séchage sur les produits alimentaires. Ainsi le chapitre suivant est consacré au séchage de gombo et de la banane.

Chapitre 4

Séchage de quelques produits alimentaires : cas de la banane et du

gombo

4.1 Généralités sur le séchage

Le séchage est une opération ayant pour but l'évacuation de l'eau contenu dans le produit. Le mode de séchage le plus utilisé dans les pays en voie de développement et même dans les industries agro-alimentaires est le séchage par entraînement. Il s'agit d'un séchage à basse température car ces produits agro-alimentaires ont chacun une température maximale de séchage inférieure à 100°C , n'entraînant pas sa détérioration tout en maintenant toutes les qualités gustatives. Le fluide caloporteur utilisé dans le séchage est l'air. En fonction de son pouvoir évaporatoire, il cède sa chaleur sensible au produit et reçoit ensuite l'humidité du produit. Ainsi donc, on assiste à un phénomène simultané de transfert de chaleur et de masse (phénomène de thermodiffusion).

4.1.1 L'eau dans les produits agro-alimentaires considérés comme milieux poreux

La caractérisation d'un matériau poreux en terme de transferts exige de définir un certain nombre de paramètres physiques caractérisant la structure géométrique de la matrice de ce milieu et les interactions entre celle-ci et les phases fluides qu'elle contient. Dans notre cas il y a deux phases : la phase liquide comportant l'eau libre et l'eau faiblement liée et fortement liée. Les deux premières sont à l'origine de la dégradation des produits agro-alimentaires. La seconde phase est la phase gazeuse qui est l'air humide constitué d'un mélange d'air sec et de la vapeur d'eau. L'eau fortement liée par la force de Van Der Waals, ne peut être extraite lors du séchage mais seulement lors d'une opération de calcination.

L'eau libre remplit la majeure partie des pores de la structure du milieu et est retenue sous forme liquide par des forces d'origine capillaire. C'est elle qui est responsable de la dégradation des produits agro-alimentaires.

L'eau liée par contre est adsorbée physiquement en couche multimoléculaires. Elle est liée par la force de Van Der Waals.

4.1.2 Évacuation de l'eau lors du séchage

Le but du séchage est d'extraire l'eau du produit à sécher. Pour ce faire, l'eau se déplace tout d'abord de l'intérieur vers la surface du produit. Ensuite, elle est arrachée de la surface par le fluide séchant (ici l'air). Le déplacement de l'humidité dans le corps poreux se décompose en une migration sous forme liquide et une migration sous forme de vapeur.

4.1.2.1 Activité de l'eau dans le produit

L'activité de l'eau dans le produit a été définie par G.Lewis et M. Randall en 1923 [67] puis par G. Scott en 1957 [68] et enfin par M. Loncin [69] en 1961 comme

étant le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit (P_{vp}) et la pression de vapeur de l'air saturée (P_{vs}).

$$A = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (4.1)$$

De la même façon, l'humidité relative (Hr) a été exprimée selon la relation (4.2). Ainsi, l'activité de l'eau dans le produit est liée à l'humidité relative par l'équation suivante :

$$A = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{H_r (\%)}{100} \quad (4.2)$$

Toutefois la valeur de l'humidité relative peut différer d'un produit à un autre et bien souvent cette humidité d'équilibre est déterminée à partir des isothermes de sorption du produit de manière expérimentale [70-71].

4.1.2.2 Cinétique de séchage

L'évolution du séchage en fonction du temps est liée à la vitesse de séchage. Celle-ci est définie par le transfert de l'eau de l'intérieur du produit à sa surface. Ainsi la migration de l'eau dans les produits humides est expliquée par les phénomènes de transferts de masse et de chaleur sous toutes les phases quelles soient solides, liquides ou vapeurs et qui tiennent un rôle primordial. Selon la théorie de Bimbenet [72], on peut observer trois phases dans le séchage d'un produit (Figure 4.1) :

Phase I : Période de mise en température du produit

Phase II : Séchage isenthalpique, vitesse de séchage constante ou l'eau libre s'évapore

Phase III : Période de ralentissement, évaporation de l'eau liée.

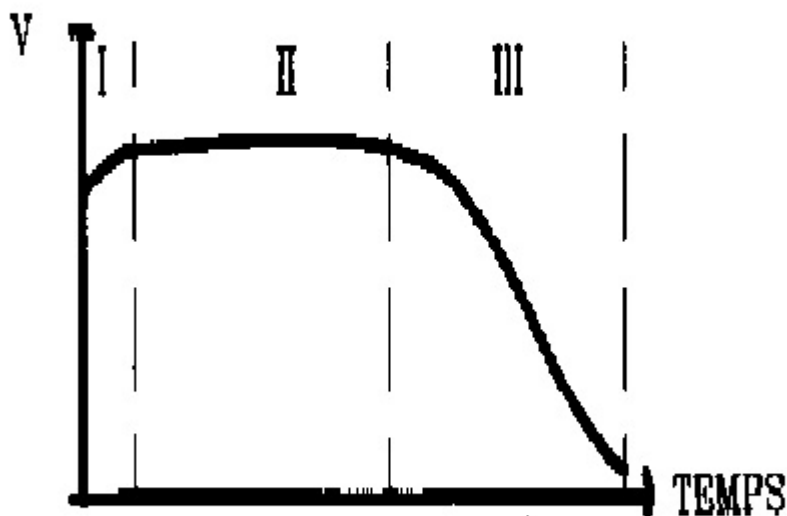


Figure 4.1: Allure d'une cinétique de séchage à trois phases

Lorsqu'un produit est mis à sécher il est soumis à un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière vont alors avoir lieu entre le produit et l'air. La phase I est souvent très courte parfois même inexistante ; elle apparaît lorsque les produits à sécher sont de grande taille ou si la différence entre la température de l'air et du produit est importante. Aussi cette phase ne porte que peu d'intérêt.

La phase II doit son existence à une pellicule d'eau libre comparable à un film en surface du produit. L'activité de l'eau à la surface (A_s) du produit est considérée comme étant égale à 1 et le séchage est une évaporation isenthalpique de cette eau libre. La température de surface du produit est égale à la température humide (Th)

de l'air asséchant. A cette température le flux de chaleur amené par l'air va être égal au flux thermique nécessaire à l'évaporation de l'eau. La vitesse de séchage va donc dépendre des conditions externes que sont l'humidité , la température et la vitesse de circulation de l'air.

O .Kricher et K.Kroll, 1963 [73] ont défini le débit d'eau pouvant être évaporé en supposant que la nature du produit n'est pas censée intervenir mais sa forme. Ainsi ce débit noté \dot{m}_e est exprimé par la relation suivante :

$$\dot{m}_e = -m_{prs} \frac{dM}{dT} = K_m (P_{sat}(T_{pr}) - P_v(T_{fs})) \quad (4.3)$$

avec :

$P_{sat}(T_{pr})$ la pression de vapeur d'eau saturante à la température (T_{pr}) à la surface du produit lors de la phase à vitesse constante ou pression saturante à la température humide en pascal.

$P_v(T_{fs})$ la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air à la température locale (T_{fs}) en pascal.

K_m le coefficient global de transfert de matière exprimé en s/m .

Si le transfert de matière correspondant à l'évaporation de l'eau s'accompagne d'un transfert thermique dirigé en sens inverse alors la vitesse d'évaporation est établie selon la relation suivante :

$$\dot{m}_e = -m_{prs} \frac{dM}{dT} = \frac{h_{vfpr} S_{fpr} (T_{fs} - T_{pr})}{L_v} \quad (4.4)$$

avec

h_{vfpr} et S_{fpr} , les coefficients d'échange par convection entre l'air et le produit en W/m^2K , L_v la chaleur latente de vaporisation en J/kg et S_{fpr} la surface d'échange entre l'air et le produit en m^2 .

Si la vitesse de transport de l'eau liquide dans les pores du produit vers sa surface est rapide par rapport à la vitesse globale d'évaporation alors la phase d'évaporation est observable mais la durée de cette phase diminue lorsque le taux d'humidité de l'air du séchage diminue. Lorsque la vitesse de l'air de séchage augmente, on observe une augmentation des coefficients de transfert de matière et de chaleur et si la surface d'échange air-produit augmente alors la température de séchage augmente.

Cette phase n'est pas observable s'il n'y a pas de pellicule d'eau libre en surface des produits et, pour ceux, pourtant, riches en eau, les parois cellulaires peuvent perturber la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure [5].

La phase III est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage. Ce ralentissement est dû aux contraintes de la migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface résultant de plusieurs causes :

- la disparition de l'eau libre en surface : si une migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectue sous forme liquide et vapeur, on peut admettre qu'un front de vaporisation s'enfonce alors progressivement à l'intérieur du produit
- l'épaisseur du produit : lorsque l'épaisseur est de plus en plus importante, alors la vapeur d'eau devra suivre un chemin plus long ce qui explique en partie le ralentissement de séchage
- la diffusivité (D) de l'eau dans le produit, cette diffusivité varie avec la teneur en eau du produit ; plus celui-ci est sec et moins il devient perméable à l'eau
- la résistance mécanique des parois cellulaires ; si celle-ci sont intactes, elles empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit
- le croutage qui résulte de la cristallisation à la surface de composés solubles comme le sel ou les sucres lors de l'évaporation de l'eau pendant la phase

II, cette cristallisation bouche alors les pores du produit et l'accumulation et l'assèchement de ces composés imperméabilisent la surface du produit. Ainsi cette phase dépend essentiellement des propriétés des produits et de la diffusion de l'eau dans ces produits.

Cette diffusion suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du produit est gouverné par la seconde loi de Fick qui décrit une relation linéaire entre le flux de matière ϕ_m (kg/m^2s) et le gradient de concentration volumique de l'eau C ($kg\ eau/m^3$) au sein d'un même volume de produit selon l'expression suivante :

$$\phi_m = D_e \vec{grad} C \quad (4.5)$$

Avec D_e la diffusivité de l'eau dans le produit à sécher en m^2/s .

4.1.3 Avancée de la modélisation mathématique des transferts lors du séchage

Lors du séchage convectif, les transferts de chaleur et de masse ont fait l'objet d'études théoriques et expérimentales. La modélisation de ces transferts devient alors de plus en plus précise.

Les premières études datent de 1921 avec W.K.Lewis [74] qui traite les échanges thermiques et massiques lors de l'évaporation ainsi que le mécanisme du transfert de l'eau à l'intérieur du produit. Le séchage est alors défini en deux étapes, l'une concernant l'évaporation de l'humidité à la surface du produit et l'autre la diffusion de l'humidité de l'intérieur du produit vers la surface. Par la suite, T.K.Sherwood [75] en 1932 décrit le séchage en deux périodes successives, une première phase constante et une deuxième relative au ralentissement du séchage. C'est en 1962 que Krishner [73] établit le séchage en trois périodes et qui est décrit au paragraphe précédent.

Les isothermes de sorption à partir des propriétés d'équilibres et la conductivité thermique équivalente pour plusieurs produits sont alors définies.

A.V.Liuka [76] en 1966 établit alors les équations de transferts couplés de chaleur et de masse dans un milieu poreux. Par la suite, d'autres travaux sont parus pour permettre de définir au mieux la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse ayant lieu pendant le séchage. On peut citer M. Dagueneat en 1985 [9], A.Hamed [77], J.Khmer [78], A.Durham en 1990 [79] jusqu'à S.Shaikh en 2008 [80].

Toutefois, la modélisation est souvent complexe en raison de coefficients qui restent difficiles à déterminer, mais des modèles simplifiés ont permis d'obtenir des résultats très intéressants. Il existe trois types de modèles :

-Le modèle empirique

Il est directement lié à l'expérimentation mais il est peu exploitable du fait qu'il dépend de la spécificité du produit à sécher.

-Le modèle diffusif

Il est basé sur la loi de Fick selon l'équation suivante :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D\nabla X) \quad (4.6)$$

D : coefficient de diffusion de l'eau dans le produit, il est fonction de l'humidité (m^2/s)

X : teneur en eau du produit

t : le temps si la diffusivité massique est constante alors l'équation devient :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (4.7)$$

-Le modèle transfert couples de chaleur et de masse

Il représente les différents phénomènes se produisant au cours du séchage. Liuka a décrit tout un système d'équations différentielles qui régit le transport de chaleur et de masse pour un séchage à une pression de la phase gazeuse uniforme et pour des températures entre 0 et 100°C. Ces équations sont les suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = \text{div} \left[a_m \vec{grad} X + \delta \vec{grad} T \right] \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (a_q \vec{grad} T) + \frac{\varepsilon r}{C} \frac{\delta X}{\delta t} \end{cases} \quad (4.8)$$

a_m : diffusivité massique (m^2/s)

a_q : diffusivité thermique (m^2/s)

C : chaleur spécifique ($J/kg^\circ C$)

r : chaleur spécifique d'évaporation (J/kg)

T : température ($^\circ C$)

t : temps (s)

ε : taux de changement de phase

δ : coefficient du gradient thermique basé sur la différence de teneur en eau ($1/^\circ C$)

La particularité de ce modèle est la mise en évidence de l'influence de la température et de la pression interne sur la migration de la vapeur d'eau. Cependant le taux de changement de phase ε n'étant pas issu d'une loi physique reste difficile à déterminer. Par la suite Philip et De Vries [81] ont établi un autre modèle basé sur le couple des transferts thermiques et massiques mais en tenant compte de l'effet de la pesanteur g . Ce modèle est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial X}{\partial t} = \text{div} [D_m \vec{grad}(X) + D_T \vec{grad}(T) - \frac{\rho_e}{\rho_0} K] \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} [\lambda \vec{grad}(T) + \rho_e L_V (D_{MV} \vec{grad}(X) + D_{TV} \vec{grad}(T))] \end{cases} \quad (4.9)$$

D_M : coefficient de diffusion massique isotherme (m^2/s)

D_T : coefficient de diffusion massique non isotherme (m^2/s)

D_{MV} : coefficient de diffusion isotherme de la vapeur (m^2/s)

D_{TV} : coefficient de diffusion non isotherme de la vapeur (m^2/s)

K : conductivité hydraulique du milieu ($W/m^2^\circ C$)

ρC : capacité calorifique équivalente ($J/m^3^\circ C$)

ρ_0 : masse volumique de la phase solide (kg/m^3)

ρ_e : masse volumique de la phase liquide

λ : conductivité thermique apparente ($W/m^2^\circ C$).

L_v : chaleur latente de vaporisation (J/kg)

Ce modèle est aussi adapté pour le séchage des sols et des matériaux de construction pour lesquels la migration de l'eau par gravité joue un rôle non négligeable. Parallèlement à ces modélisations la notion de courbe caractéristique de séchage a été définie. Elle résulte des teneurs en eau moyennes et des vitesses de séchages pour un produit donné indépendamment des conditions aérothermiques (vitesse, température, hygrométrie de l'air de séchage). Aussi la teneur en eau réduite X^* est exprimée par la relation suivante :

$$X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} \quad (4.10)$$

$X(t)$: teneur en eau moyenne du produit ($kg\ eau/kg\ ms$)

X_{eq} : teneur en eau d'équilibre thermodynamique déterminée par les isothermes de sorption

X_{cri} : teneur en eau critique marquant la transition entre la phase de séchage à vitesse constante (phase I) et celle à vitesse décroissante (phase II).

La teneur en eau à l'équilibre correspond à la valeur limiter obtenue au bout d'un temps infini pour un produit soumis à des conditions données de température et d'hygrométrie. La vitesse de séchage ($-dX/dt$) est réduite par la vitesse $(-dX/dt)_0 = cte$, qui peut être déduite théoriquement ou mesurée sur la courbe expérimentale $-dX/dt = f(X)$.

Ainsi :

$$X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} \quad (4.11)$$

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0 = \frac{h_0 S_0 \Delta T}{m_s L_v(T_h)} \quad (4.12)$$

h_0 : coefficient de transfert de chaleur air-produit

S_0 : surface d'échange entre le produit et l'air à l'instant initial

$\Delta T = T_s - T_h$: écart psychométrique défini par les conditions de l'air de séchage

m_s : masse anhydre de l'échantillon de produit

$L_v(T_h)$: chaleur latente de vaporisation du produit à la température humide de l'air de séchage.

Si $f(X^*) = aX^{*n} + bX^{*(n-1)} + \dots + cX^*$ alors elle doit vérifier les propriétés suivantes :

$$\begin{cases} X^* = 0 \text{ alors } f(X^*) = 0 \\ 0 < X^* < 1 \text{ alors } 0 < f(X^*) < 1 \\ X^* \geq 1 \text{ alors } f(X^*) = 1 \end{cases} \quad (4.13)$$

La détermination de la courbe de séchage revient donc à tracer la fonction $f(X^*)$ pour les différentes cinétiques expérimentales de séchage. Cette méthode est donc une approche semi-empirique basée sur une analyse simplifiée du procédé. Après avoir rappelé les généralités quant aux principes du séchage, nous allons décrire le dispositif de séchage conçu au laboratoire et utilisé pour sécher le gombo et la banane et l'étude de l'influence de différents paramètres sur la cinétique de séchage.

4.2 Description du séchoir solaire pliable et portatif

Il comprend deux parties essentielles : le capteur plan à air double vitrage et l'enceinte de séchage.

4.2.1 Capteur plan double vitrage

Il s'agit d'un caisson parallélépipède incliné d'un angle α égal à la latitude du lieu afin de recevoir le maximum du flux solaire.

4.2.1.1 Éléments constitutifs du capteur plan

Il est muni de deux vitres d'épaisseur 3 mm chacune et d'un absorbeur (tôle lisse peinte en noir).

4.2.2 Enceinte de séchage

L'enceinte de séchage a aussi une forme parallélépipède de base carrée et ayant une hauteur de 17 cm munie d'une cheminée afin d'évacuer l'air chaud et humide. Elle comporte trois claies séparées l'une de l'autre d'une distance de 5 cm.



Figure 4.2: Photo du séchoir solaire pliable et portable

4.3 Méthodologie et instruments de mesure

4.3.1 Méthodologie

Dans cette partie il s'agit de sécher quelques produits agro-alimentaires. Après avoir subi le prétraitement, à savoir le parage suivi de l'étape de lavage, ces produits sont étalés sur les claies. Lors du séchage ces produits sont retirés à intervalle de temps réguliers afin de mesurer la perte de masse. Afin de tracer la cinétique de séchage, les données sur la masse d'eau enlevée sont consignées dans un tableau. Le séchage

est arrêté lorsque le taux d'humidité finale est obtenu ou est proche de celui consigné dans la littérature [F. ROGIS, 1995] [82] aussi la consultation de la fiche produit est importante. Le séchage est réalisé en utilisant les deux modes de convection : la convection naturelle et la convection forcée. Cette dernière a pu être conduite en utilisant deux kits de panneaux solaires. Le premier kit a pour rôle d'alimenter les instruments de mesure plus précisément le multiplexeur et l'ordinateur que nous décrirons dans le paragraphe suivant. Le deuxième est destiné à alimenter les deux ventilateurs que nous avons adjoint au séchoir solaire pour la convection forcée. Les résultats de ces deux modes de convection (naturelle et forcée) seront étudiés par la méthode des plans d'expériences suivi d'une comparaison entre l'efficacité desdits modes de convection.

4.3.2 Instruments de mesure

L'activité de séchage est celle qui demande un certain nombre d'appareils de mesure afin de quantifier certains paramètres. Toutefois, le suivi de l'activité de séchage solaire n'est possible que lorsque des mesures précises sont effectuées, en particulier le flux solaire, ou à défaut, à partir des données météorologiques disponibles. Ainsi, dans notre travail, nous avons évalué les potentialités énergétiques solaires de deux sites en faisant des mesures sur le terrain dont les résultats ont été présentés au chapitre II (cf 2.4). Pour cela nous disposons :

1. d'une mini station météo pouvant mesurer plusieurs paramètres. Elle est dotée d'une console. La mini station et la console communiquent entre elles via les antennes.
2. d'un multiplexeur qui est relié à un ordinateur pour l'acquisition des données.
3. des thermocouples de type K pour la mesure des températures

4. d'un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent
5. d'un humidimètre pour mesurer le taux d'humidité finale après chaque opération de séchage.
6. d'une balance électronique de précision 0.01g



Figure 4.3: Photo de la mini station météo

4.4 Résultats du séchage de gombo et de banane

4.4.1 Optimisation du séchage de gombo et de banane en convection naturelle par la méthode des plans d'expériences

Dans cette partie, nous avons suivi et optimisé l'activité de séchage en mettant à profit la méthode des plans d'expériences. Cette technique ayant été largement décrite et présentée au chapitre précédent, nous allons présenter le plan d'expériences utilisé

et les résultats obtenus enfin, nous concluons sur cette étude de séchage en convection naturelle.

L'optimisation du rendement d'un capteur solaire par la méthode des plans d'expériences a permis de montrer que si nous utilisons le capteur double vitrage alors, la distance entre les vitres devait être maximale et que l'heure de mise en fonctionnement du séchoir devait être fixée à 9-10h. Par conséquent, toutes les expériences du séchage ont été conduites à partir de 9 heures. Il s'agit du temps nécessaire de mise en température afin d'être dans les conditions favorables déterminées par le plan d'expériences décrit au chapitre précédent. Les facteurs retenus pour cette étude de séchage en convection naturelle sont la quantité de produit à sécher, la nature du produit qui se différencie ici par le taux d'humidité initiale (gombo 87% et banane 70%), le nombre de claies utilisé pour le séchage et le nombre de vitres du capteur.

En effet, comme la distance entre les vitres devant être maximale, il était judicieux d'examiner si le nombre de vitre avait une importance lors de l'étape de séchage. Ainsi quatre facteurs ont été étudiés et le domaine de variation pour ces facteurs figure dans le tableau 4.1 :

Tableau 4.1: Variables naturelles et niveaux des facteurs pour le plan d'expériences

Variables	Facteurs	niveau -1	niveau +1
X1	Nature du produit	Gombo	Banane
X2	Masse du produit (g)	400	600
X3	Nombre de vitres	1	2
X4	Nombre de claies	2	3

Pré-traitement des produits à sécher

Au préalable le gombo après avoir été lavé puis découpé en rondelles a été disposé de façon régulière sur les différentes claies. De la même façon les bananes ont également été découpées en rondelles après le parage afin de pouvoir les répartir de façon régulière.

Le plan d'expériences utilisé est un plan factoriel complet 2^k avec $k = 4$ soit $2^4 = 16$ expériences à réaliser. Celui-ci figure dans le tableau 4.2 :

Table 4.2: Plan factoriel complet et résultats obtenus

Essai	Type produit	m (g)	Nombre de vitre	Nombre de claies	Hr(%)	Ts(h)
1	gombo	400	1	2	13,5	13
2	banane	400	1	2	14,3	11
3	gombo	600	1	2	13,6	16
4	banane	600	1	2	16,6	11
5	gombo	400	2	2	13,5	10
6	banane	400	2	2	14,3	8
7	gombo	600	2	2	13,4	13
8	banane	600	2	2	16,6	9
9	gombo	400	1	3	13,6	11
10	banane	400	1	3	15,7	7
11	gombo	600	1	3	13,7	9
12	banane	600	1	3	16,3	6
13	gombo	400	2	3	13,5	9
14	banane	400	2	3	15,7	5
15	gombo	600	2	3	13,4	7
16	banane	600	2	3	16,6	5

Les deux réponses étudiées par ce plan sont la durée de séchage $T_s(h)$ et le taux d'humidité finale moyen $H_r(\%)$ du produit.

En examinant les coefficients R^2 et Q^2 (figure 4.4) et les tableaux 4.3 et 4.4, on peut constater que le modèle est bon car ils sont tous deux supérieurs à 0.95 ce qui explique une bonne concordance entre le modèle mathématique et le modèle expérimental.



Figure 4.4: Représentation des coefficients de validité du modèle R^2 et Q^2 pour les réponses Y_1 et Y_2 pour le plan factoriel complet pour le séchage des produits

Les effets (ou coefficients) des différents facteurs ont été déterminés par la relation (3.3) exprimée au chapitre 3 et sont représentés sur les histogrammes figures 4.5 et 4.6 et les valeurs sont indiquées dans les tableaux 4.3 et 4.4 pour les deux réponses.

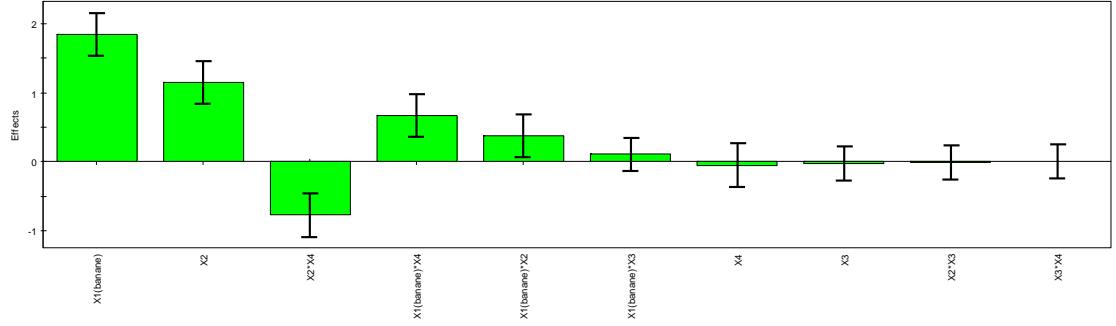


Figure 4.5: Histogramme des effets sur la réponse teneur en eau

Tableau 4.3: Valeurs des coefficients pour la réponse humidité finale du produit à sécher

Teneur en Au finale (%)	Coeff.	Err. Std.	P	Conf. int(±)
Constante	14,83	0,016	0	0,053
X1(Gombo)	-1,31	0,016	0	0,053
X1(banane)	1,31	0,016	0	0,053
X2	0,57	0,016	0	0,053
X3	-0,04	0,013	0,03	0,042
X4	0,36	0,016	0	0,053
X1(Gombo)*X2	-0,57	0,016	0	0,053
X1(banane)*X2	0,57	0,016	0	0,053
X1(Gombo)*X3	-0,02	0,013	0,12	0,042
X1(banane)*X3	0,02	0,013	0,12	0,042
X1(Gombo)*X4	-0,33	0,016	0	0,053
X1(banane)*X4	0,337	0,016	0	0,053
X2*X3	-0,03	0,013	0,080	0,042
X2*X4	0	0,016	1	0,053
X3*X4	-0,02	0,013	0,200	0,042

$Q^2 = 0,992$ $R^2 = 1$ $R_{ajusté}^2 = 0,988$ $Int. \quad conf. = 0,95$

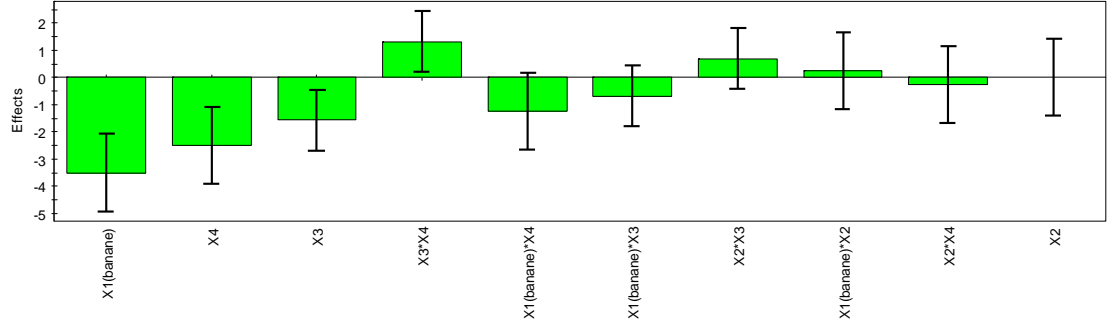


Figure 4.6: Histogramme des effets pour le temps de séchage

Tableau 4.4: Valeurs des coefficients pour la réponse temps de séchage

Temps de sechage (h)	Coeff.	Err. Std.	P	Conf. int(\pm)
Constante	8,87	0,088	0	0,281
X1(Gombo)	2,12	0,088	0	0,281
X1(banane)	-2,12	0,088	0	0,281
X2	-0,37	0,088	0,02	0,281
X3	-1,15	0,069	0	0,222
X4	-2,5	0,088	0	0,281
X1(Gombo)*X2	0,62	0,088	0	0,281
X1(banane)*X2	-0,62	0,088	0	0,281
X1(Gombo)*X3	-0,09	0,069	0,270	0,272
X1(banane)*X3	0,09	0,069	0,270	0,272
X1(Gombo)*X3	-0,09	0,069	0,270	0,222
X1(banane)*X3	0,09	0,069	0,270	0,222
X1(Gombo)*X4	0,50	0,088	0,01	0,281
X1(banane)*X4	-0,50	0,088	0,01	0,281
X2*X3	0,09	0,069	0,27	0,222
X2*X4	-1,25	0,088	0	0,281
X3*X4	0,21	0,069	0,050	0,222
$Q^2 = 0,961 \quad R^2 = 1 \quad ,R_{ajusté}^2 = 0,988 \quad Int. \quad conf. = 0,95$				

La figure 4.5 montre l'influence des différents facteurs sur la réponse étudiée qui est la teneur en eau finale. On note que les facteurs X_1 et X_2 qui représentent respectivement le type et la masse du produit à sécher sont les plus importants. Cela confirme bien les pratiques de séchage observées dans la littérature [82]. D'autre part

les deux produits n'ayant pas la même teneur en eau initiale et pour une même masse donnée, la réponse (teneur en eau finale) ne sera pas identique comme on peut le constater en examinant les surfaces de réponse figures 4.8 , 4.9 et 4.10. On note également une interaction non négligeable entre ces deux facteurs X_1 et X_2 (nature et masse du produit) avec une valeur de $b_{12} = 0.575$.

L'effet de la masse des produits à sécher étant positif ($b_2 = 0.575$) cela signifie que l'augmentation de la masse de produit à sécher provoque une augmentation de deux fois la valeur de l'effet de la teneur en eau du produit à sécher. En effet, plus la quantité de produit à sécher est importante plus l'air est chargé en humidité, provoquant ainsi une "sursaturation" de l'air en humidité et donc au bout d'un certain temps l'eau résiduelle des produits à sécher est plus difficile à évacuer. On peut également remarquer que le taux d'humidité finale de la banane peut parfois être supérieur à celui du gombo alors qu'à l'état initial c'est l'inverse. Ceci peut s'expliquer par la nature du produit en lui-même. Ainsi la banane est un produit riche en sucre et amylicé ; si au départ, l'eau libre du produit peut s'évaporer rapidement, vers la fin du séchage, l'eau faiblement liée est plus difficile à éliminer à cause des forces de Van Der Waals. Contrairement au gombo, celui-ci étant plus fibreux l'eau faiblement liée peut s'éliminer davantage.

En ce qui concerne l'importance des facteurs sur la réponse temps de séchage (figure 4.6) , on constate comme prédominant que le premier facteur est important (type de produit) mais aussi le quatrième facteur (nombre de claies) et le troisième facteur (nombre de vitres). Cela signifie que ces trois facteurs jouent un rôle très important sur le temps de séchage.

En effet, le taux d'humidité des produits étant différent à la base, l'impact sur le temps de séchage est donc important, on peut constater que pour la banane le temps de séchage peut être plus court que celui du gombo (de 5 à 13 heures pour le gombo

et de 5 à 11 heures pour la banane). D'autre part, on constate que l'augmentation du nombre de claies est favorable à la diminution du temps de séchage pour une même masse de produit à sécher.

Même si le deuxième facteur (masse du produit) n'est pas important ($b_2 = -0,375$), on peut noter une interaction non négligeable entre le nombre de claies (X_4) et la masse du produit à sécher (X_2) ($b_{24} = 0,625$). On remarque également que l'effet du facteur X_3 (nombre de vitres) est favorable à la réduction du temps de séchage.

A partir de l'expérience réalisée (modèle expérimental) on peut exprimer le modèle mathématique pour chacune des réponses à partir des coefficients des tableaux 4.3 et 4.4 selon la relation décrite au chapitre 3 (équation 3.2). Ainsi le modèle pour la teneur en eau est :

$$Y_1 = 14,837 - 1,312X_1 + 0,575X_2 - 0,046X_3 + 0,362X_4 - 0,575X_{12} - 0,028X_{13} - 0,337X_{14} - 0,034X_{23} - 1,172X_{24} - 0,021X_{34} \quad (4.14)$$

Le modèle mathématique pour le temps de séchage est :

$$Y_2 = 8,875 + 2,125X_1 - 0,375X_2 - 1,156X_3 - 2,500X_4 + 0,625X_{12} - 0,093X_{13} + 0,500X_{14} + 0,093X_{23} - 1,250X_{24} + 0,218X_{34} \quad (4.15)$$

A partir de ces modèles mathématiques les surfaces de réponses pour chacune des réponses étudiées sont obtenues et représentées sur les figures 4.7 à 4.10

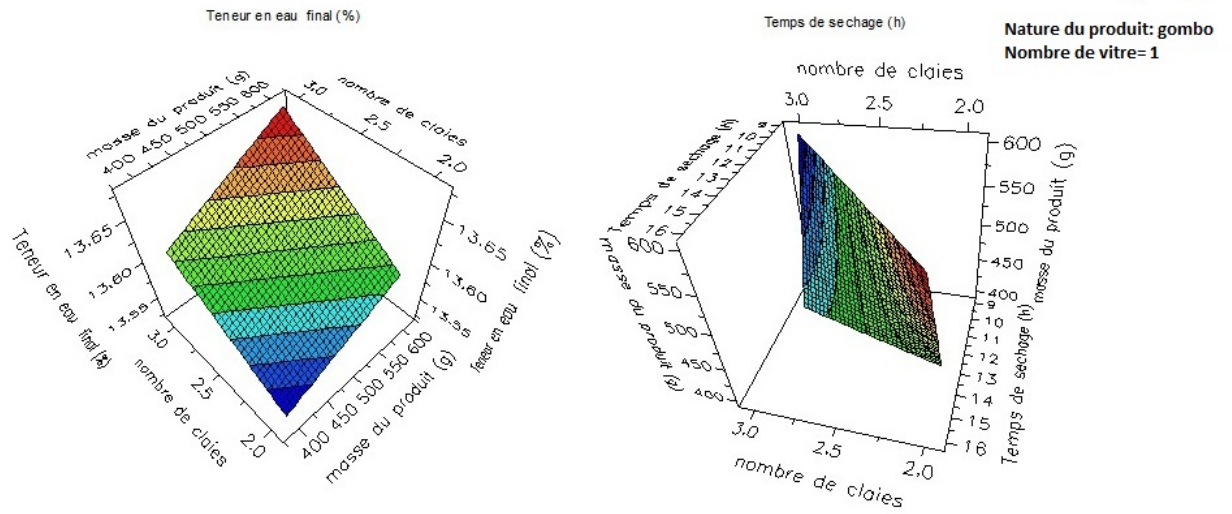


Figure 4.7: Surface de réponse pour le gombo avec une vitre

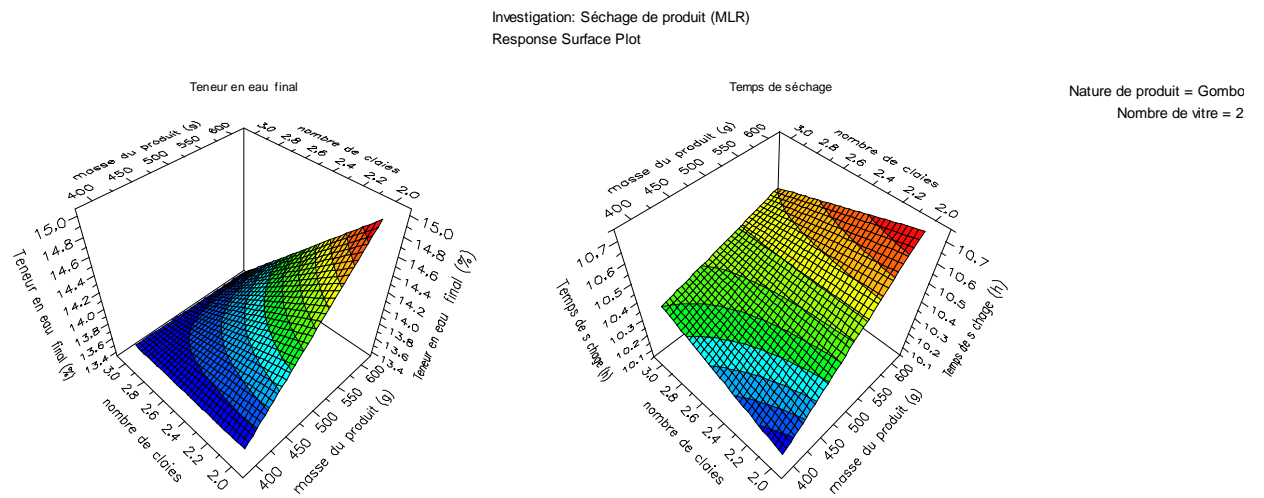


Figure 4.8: Surface de réponse pour le gombo avec deux vitres

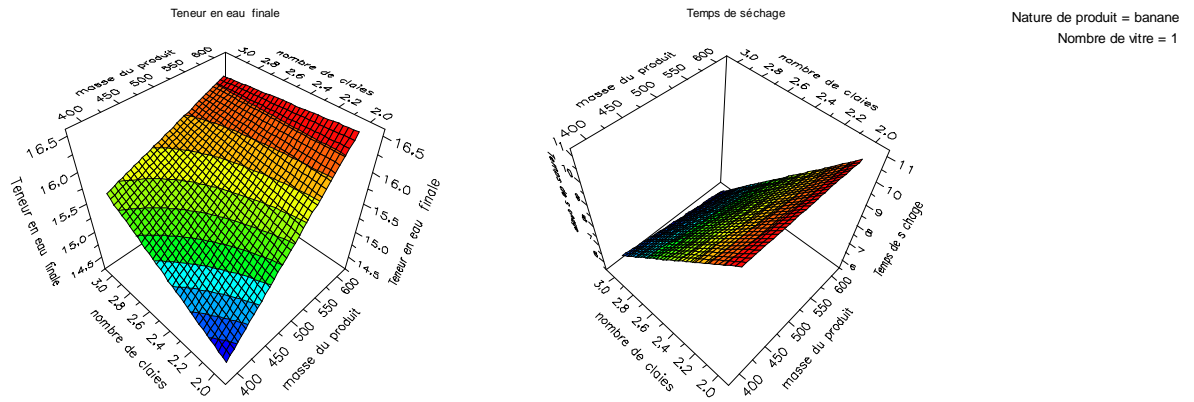


Figure 4.9: Surface de réponse pour la banane avec une vitre

A partir des surfaces de réponses pour la banane figures 4.9 et 4.10, on peut remarquer de façon générale que pour avoir un temps de séchage minimum, le nombre de claies doit être de 3 et que la masse du produit à sécher doit être importante. Pour le taux d'humidité si on souhaite qu'il soit le plus faible possible, le nombre de claies est moins important mais la masse doit plutôt être la plus faible possible.

En ce qui concerne le nombre de vitres pour le séchage de la banane, on remarque une importance moindre pour le taux d'humidité. Quant au temps de séchage de la banane, on constate une influence plus marquée du nombre de vitres. En effet avec une seule vitre le temps de séchage varie de 8 heures à 11 heures, alors qu'avec deux vitres cette variation se réduit de 4 heures à 8 heures. Ainsi l'augmentation du nombre de vitres est favorable à la diminution du temps de séchage. Ceci est plus visible lorsqu'on examine les surfaces réponses 4.7 et 4.8 pour le gombo. Avec une seule vitre le séchage du gombo varie entre 9,5 heures et 12,5 heures alors qu'avec deux vitres cette variation est ramenée de 9 heures à 10,7 heures soit 10h 42mn, l'impact est donc moins important. Toutefois, le meilleur temps de séchage et le taux d'humidité le plus faible sont obtenus dans un cas comme dans l'autre avec un

nombre de claies égal à 3 et une masse de produits pouvant être égale à 600 grammes.

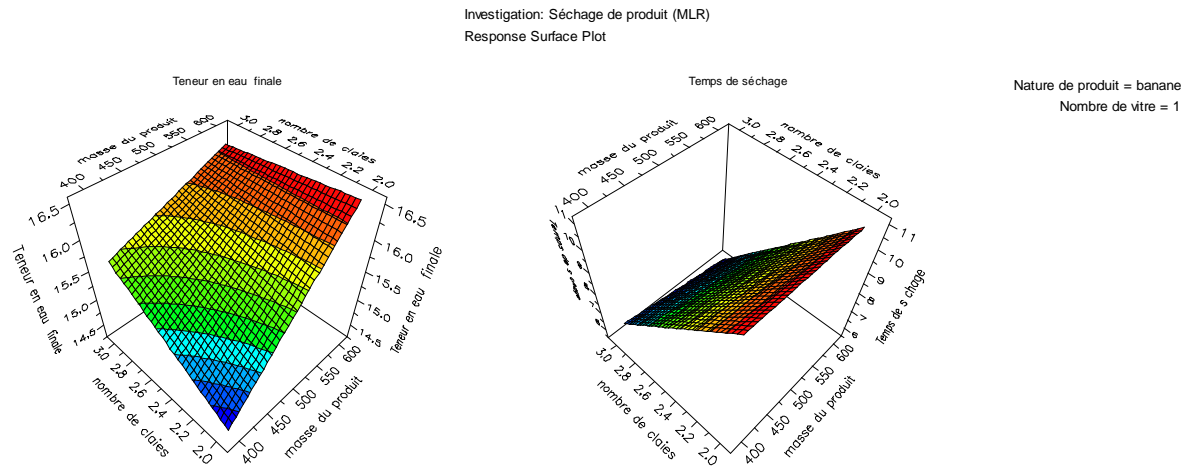


Figure 4.10: Surface de réponse pour la banane avec une vitre

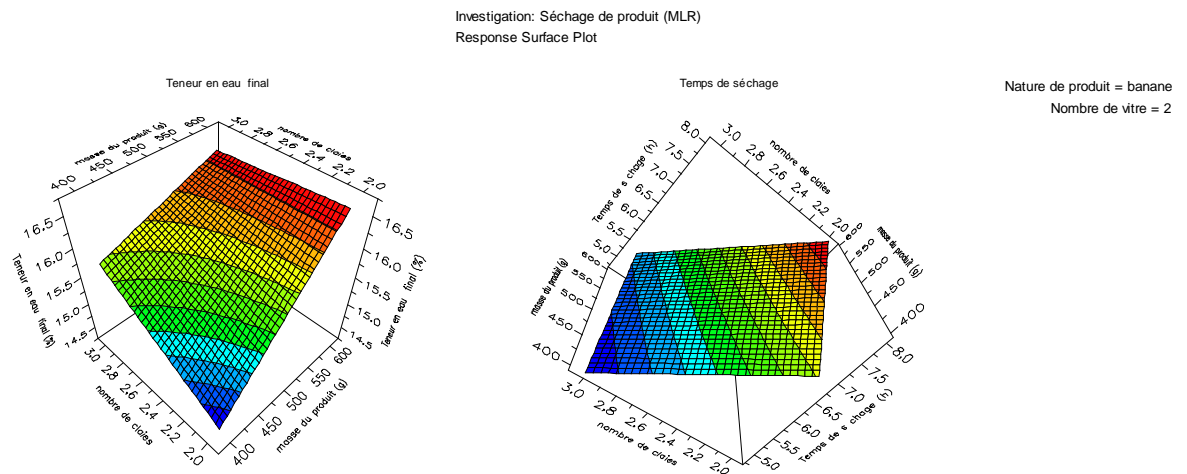


Figure 4.11: Surface de réponse pour la banane avec deux vitres

A partir du modèle mathématique on peut établir la relation entre les valeurs des réponses observées et celles prédites par le modèle voir figures 4.11 et 4.12.

On constate pour chacune de ces figures une bonne corrélation entre les réponses prédites et celles observées ce qui indique que le modèle mathématique explique bien la réalité expérimentale.

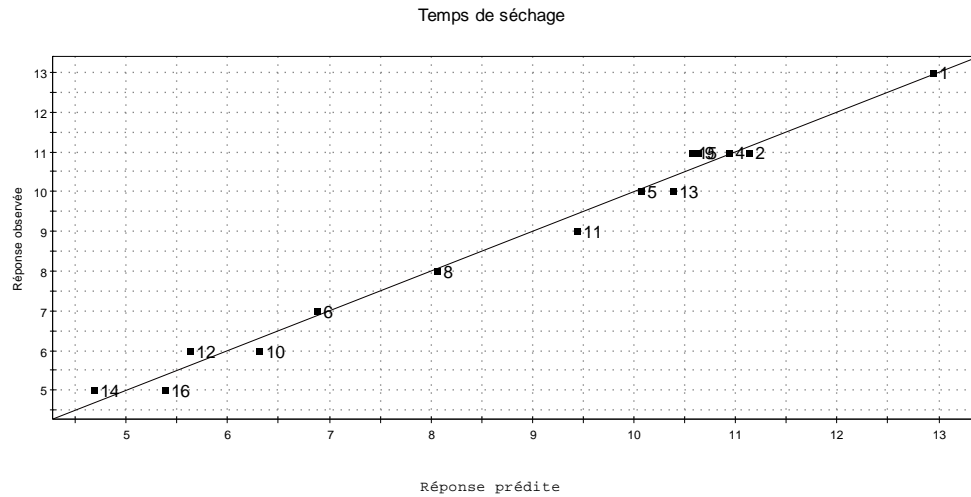


Figure 4.12: Courbe des réponses observées en fonction des réponses prédites pour la réponse temps de séchage

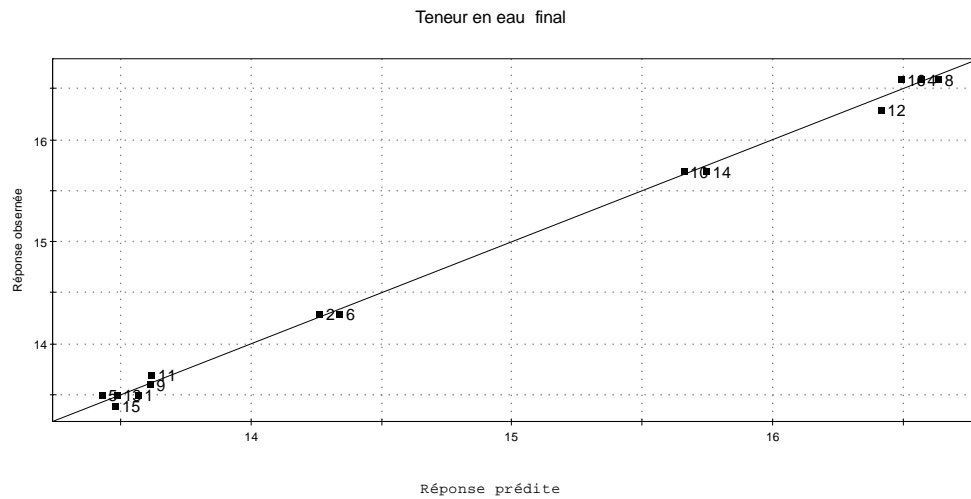


Figure 4.13: Courbe des réponses observées en fonction des réponses prédites pour la réponse teneur en eau finale

On constate pour chacune de ces figures une bonne corrélation entre les réponses prédites et celles observées ce qui indique que le modèle mathématique explique bien le modèle expérimental.

Tableau 4.5: Analyse ANOVA pour la réponse teneur en eau

Teneur en Au finale (%)	DF	SS	MS	F	P	SD
			(Variance)			
Total	14	3093,29	220,949			
Constante	1	3069,52	3069,52			
Total corrigé	13	23,7693	1,82841			1,35219
Régression	10	23,7124	2,37124	125,073	0,001	1,53988
Résidus	3	0,0568764	0,0189588			0,137691

Tableau 4.6: Analyse ANOVA pour la réponse temps de séchage

Temps de séchage (<i>h</i>)	DF	SS	MS	F	P	SD
			(Variance)			
Total	14	1169	83,5			
Constante	1	1080,64	1080,64			
Total corrigé	13	88,3572	6,79671			2,60705
Régression	10	87,1697	8,71697	22,0218	0,014	2,95245
Résidus	3	1,1875	0,395833			0,629153

DF : degré de liberté

SS : somme des carrés

MS : moyenne des carrés

F : coefficient de Fisher

P : probabilité

SD : racine de *MS*

4.4.2 Conclusion sur l'optimisation en convection naturelle

L'application de l'optimisation a permis de valider les résultats obtenus par la méthode des plans d'expériences sur le rendement théorique de capteur plan double vitrage. A savoir qu'il est préférable d'utiliser un capteur à deux vitres avec une distance maximum entre les vitres. Ces conditions permettent de minimiser la lame

d'air de séchage afin d'améliorer la température de sortie de ce capteur, augmentant ainsi son pouvoir évaporatoire dans le but de réduire le temps de séchage. D'autre part, cette technique des plans d'expériences, appliquée au séchage, a permis de montrer que la nature du produit était importante mais qu'en tout état de cause afin de réduire le taux d'humidité et le temps de séchage, il valait mieux utiliser 3 claies pour une masse comprise entre 400 et 600 grammes. Toutefois, l'augmentation de la masse du produit à sécher provoquerait le prolongement de la durée de séchage si on désire obtenir un taux d'humidité pouvant répondre aux normes de conservation des aliments.

Afin de poursuivre ces travaux dans la recherche de l'efficacité maximale de ce séchoir solaire, nous avons décidé d'équiper celui-ci avec un système de ventilation alimenté au moyen de kits solaires comprenant panneaux et batteries pour passer en mode de convection forcée.

4.4.3 Cinétique de séchage de produits par convection naturelle : cas du gombo et de la banane

Après le parage, le gombo et la banane ont été découpés en lamelles puis étalés sur les différentes claies. Ces produits sont retirés puis pesés chaque heure. Pour tracer la courbe de la teneur en eau finale en fonction du temps nous avons utilisé la formule suivante :

$$X(\%) = \frac{m(t) - m_e}{m_0 - m_e} \times 100 \quad (4.16)$$

avec :

m_0 : la masse initiale du produit

m_e : masse du produit à l'équilibre

$m(t)$: masse du produit à l'instant t

4.4.3.1 Cinétique de séchage du gombo

Les courbes de la figure 4.13 montrent l'évolution de la teneur en eau finale de gombo lors du séchage en fonction du temps. Pour le séchage de gombo, en utilisant deux vitres, on peut remarquer une décroissance presque continue de la teneur en eau en fonction du temps. En présence d'une seule vitre, la perte en eau est un peu plus lente au départ toutefois la pente est plus forte (en valeur absolue) que celle que l'on peut observer en fin de séchage (entre 6 heures et 11 heures). D'autre part, le profil des courbes montre bien que le temps de séchage est plus court lorsqu'on est en présence de deux vitres comparativement à l'utilisation d'une seule vitre. Ceci s'explique par le fait que la température de sortie du capteur (à l'entrée de l'enceinte de séchage) est plus élevée avec deux vitres qu'avec une seule vitre car le pouvoir évaporatoire de l'air de séchage est plus important.

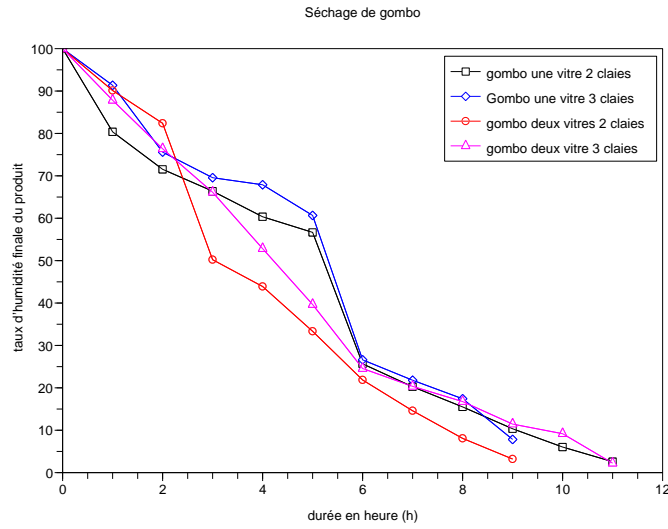


Figure 4.14: Cinétique de séchage de gombo en tenant compte des effets du nombre de claies et de vitres

4.4.3.2 Cinétique de séchage de la banane

De la même façon nous avons tracé la cinétique de séchage de la banane. On peut constater sur la figure 4.15 l'effet de l'utilisation d'un capteur simple vitrage et double vitrage. Comparativement aux résultats trouvés pour le gombo l'utilisation de deux vitres diminue la durée de séchage et favorise la perte en eau du produit et ceci dès le début du séchage.

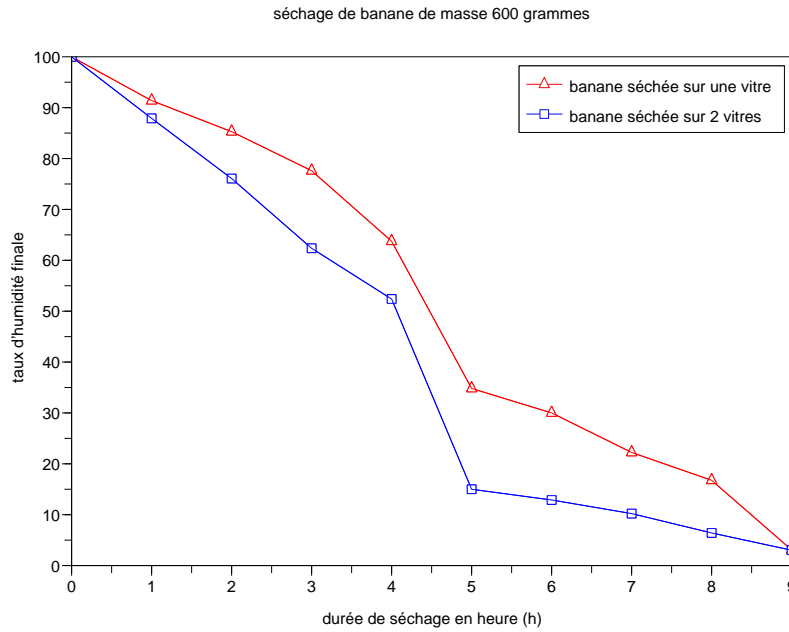


Figure 4.15: Cinétique de séchage de la banane en tenant compte des effets du nombre de vitres

4.4.4 Séchage de gombo et de banane en convection forcée par la méthode des plans d'expériences

Dans la littérature il a été montré que le séchoir solaire en mode de convection forcée pouvait être plus efficace. Nous avons donc installé deux ventilateurs, un à la sortie du capteur se trouvant à l'entrée de l'enceinte de séchage afin d'amener l'air chaud du capteur et un autre en haut de cette enceinte afin d'évacuer l'air chaud et humide. Tenant compte des paramètres précédemment optimisés, nous avons utilisé le capteur avec deux vitres d'épaisseur 3 *mm* chacune à une distance maximum de 7 *cm* puis nous avons fait sécher de la banane sur trois claies. Un nouveau plan d'expériences a été établi cette fois en faisant varier la vitesse de ventilation et la masse de produit à sécher.

4.4.4.1 Plan d'expériences en convection forcée

Les facteurs étudiés ainsi que les domaines de variation pour le plan d'expériences sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 4.7: Variables naturelles et niveaux des facteurs pour le plan d'expériences en convection forcée : cas de la banane

Facteurs	Niveau -1	Niveau $+1$
X_1 : vitesse ventilateur 1 (m/s)	1	2
X_2 : vitesse ventilateur 2 (m/s)	1	2
X_3 : masse (g)	300	500

Le plan d'expériences qui a été construit est un plan composite centré décrit au chapitre 3. Ayant 3 facteurs le nombre d'expériences réalisées est donc de 17 dont trois expériences situées au centre du domaine. Les réponses à ce plan sont le temps de séchage et le taux d'humidité mesurés sur les trois claies. En effet, dans la littérature il est parfois indiqué que selon la position de la claie dans l'enceinte de séchage, on pouvait avoir des différences de séchage qui peuvent se traduire cinétiquement ou par le taux d'humidité résiduelle. Nous avons voulu voir si de la même façon nous pouvions constater cet effet avec le type de séchoir pliable et portatif qui a été conçu dans le cadre de ces travaux de recherches.

Tableau 4.8: Plan composite centré réduit en variables naturelles et résultats obtenus

N° <i>Essai</i>	X_1	X_2	X_3	Ts	$Tx\ claie1$	$Tx\ claie2$	$Tx\ claie3$
1	1	1	300	5	11.8	12	11.9
2	2	1	300	4	11.6	11.9	11.1
3	1	2	300	4	11.3	12.3	11.5
4	2	2	300	4	13.2	13.5	13
5	1	1	500	6	13.3	13.7	13.5
6	2	1	500	6	14	14.7	14.2
7	1	2	500	5	14.4	15	14.8
8	2	2	500	5	13.6	14	13.8
9	0.659	1.5	400	5	12.6	13	12.9
10	2.341	1.5	400	6	13.5	13.9	13.7
11	1.5	0.659	400	7	14.2	14.8	14.5
12	1.5	2.341	400	6	13.7	14	13.9
13	1.5	1.5	231.8	4	13.5	13.9	13.4
14	1.5	1.5	568.2	7	14.3	15	14.7
15	1.5	1.5	400	7	12.7	13	12.8
16	1.5	1.5	400	7	12.8	13.1	12.9
17	1.5	1.5	400	7	12.6	12.9	12.5

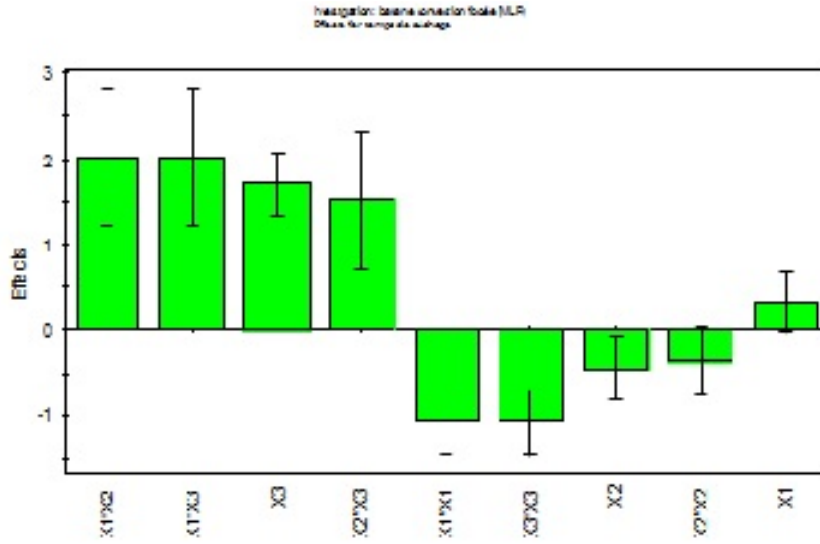


Figure 4.16: Histogramme des effets des différents facteurs pour la réponse temps de séchage

Tableau 4.9: Valeurs des coefficients pour la réponse temps de séchage en convection forcée

temps de séchage	Coeff.	Err. Std.	P	Conf. int (\pm)
Constante	7	0,13	0	0,34
X_1	0,16	0,07	0,06	0,18
X_2	-0,22	0,07	0,02	0,18
X_3	0,85	0,07	0	0,18
$X_1 * X_1$	-0,53	0,07	0	0,19
$X_2 * X_2$	-0,17	0,07	0,06	0,19
$X_3 * X_3$	-0,53	0,07	0	0,19
$X_1 * X_2$	1,01	0,15	0	0,39776
$X_1 * X_3$	1,01	0,15	0	0,39776
$X_2 * X_3$	0,76	0,15	0	0,39776

$Q^2 = 0,794$; $R^2 = 0,987$ $R_{Adj}^2 = 0,964$ $Int.Conf = 0,95$

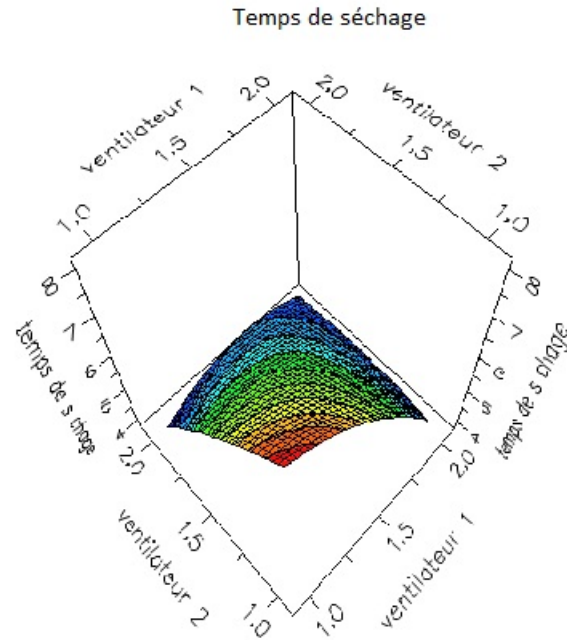


Figure 4.17: Surface de réponse pour le temps de séchage en fonction des vitesses de ventilation pour une masse de banane de 300 g

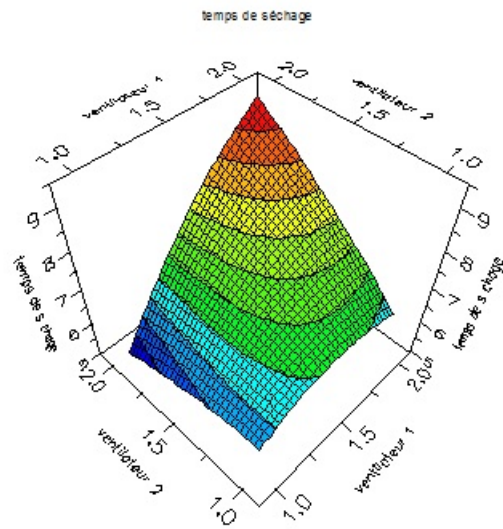


Figure 4.18: Surface de réponse pour le temps de séchage en fonction des vitesses de ventilation pour une masse de banane de 500 g

En ce qui concerne le temps de séchage on constate (figure 4.15 et tableau 4.9) que le facteur masse (X_3) est important et que l'effet étant positif ($b_3 = 0.85$) cela signifie que plus la masse à sécher sera importante plus le temps de séchage augmentera. Les surfaces de réponses figures 4.16 et 4.17 montrent également cet effet puisqu'on peut remarquer que pour sécher 300g de banane on peut atteindre 4h alors que celui-ci est plus long pour une masse de 500g (5h minimum). Les effets des deux ventilateurs (X_1 et X_2) sont peu importants pris séparément toutefois on note une interaction (b_{12}) entre ces deux facteurs sur la figure 4.15 et tableau 4.9. Pour une masse de 300 g de produits à sécher (figure 4.16) si on désire avoir le temps de séchage minimum, si le ventilateur 1 est au minimum alors il faut que le ventilateur 2 soit au maximum et vice versa alors que si tous deux sont au maximum le temps de séchage sera au minimum. Pour une masse de 500g on constate que pour avoir un temps de séchage minimum le ventilateur 2 doit être au minimum ; dans ce cas de figure le ventilateur 2 n'a que peu d'importance.

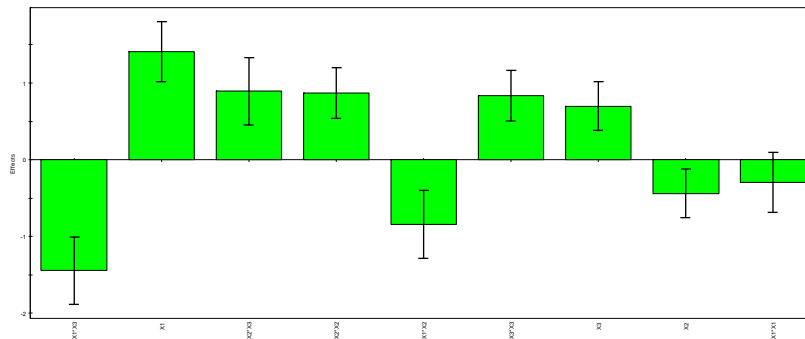


Figure 4.19: Histogramme des effets des différents facteurs pour la réponse taux d'humidité pour la claie 1

Tableau 4.10: Valeurs des coefficients pour la réponse taux d'humidité pour la claie 1

Taux d'humidité claie 1	Coeff.	Err. Std.	P	Conf. int (\pm)
Constante	12,70	0,11	0	0,300
X_1	0,70	0,07	0	0,190
X_2	-0,22	0,06	0,01	0,150
X_3	0,34	0,06	0	0,150
$X_1 * X_1$	-0,14	0,07	0,11	0,190
$X_2 * X_2$	0,43	0,06	0	0,160
$X_3 * X_3$	0,41	0,06	0	0,160
$X_1 * X_2$	-0,42	0,08	0	0,220
$X_1 * X_3$	-0,72	0,08	0	0,220
$X_2 * X_3$	0,44	0,08	0	0,220
$Q^2 = 0,7$ $R^2 = 0,981$ $R_{ajusté}^2 = 0,947$ <i>Int. conf.</i> = 0,95				

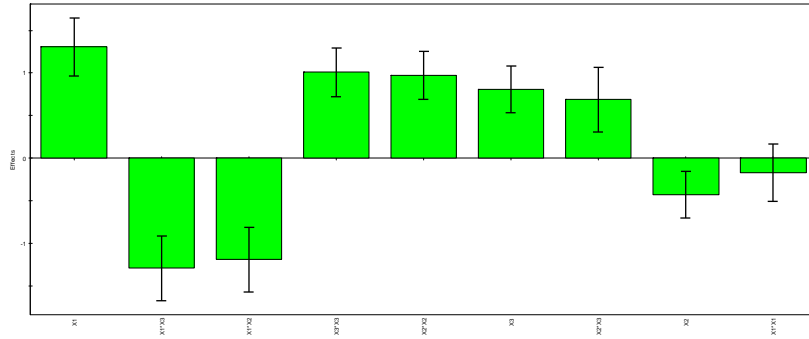


Figure 4.20: Histogramme des effets des différents facteurs pour la réponse taux d'humidité pour la claie 2

Tableau 4.11: Valeurs des coefficients pour la réponse taux d'humidité pour la claie 2

Taux d'humidité claie 2	Coeff.	Err. Std.	P	Conf. int (\pm)
Constante	13,00	0,10	0	0,26
X_1	0,65	0,06	0	0,16
X_2	-0,21	0,05	0,01	0,13
X_3	0,40	0,05	0	0,13
$X_1 * X_1$	-0,08	0,06	0,25	0,16
$X_2 * X_2$	0,48	0,05	0	0,14
$X_3 * X_3$	0,50	0,05	0	0,140
$X_1 * X_2$	-0,590	0,070	0	0,19
$X_1 * X_3$	-0,64	0,07	0	0,19
$X_2 * X_3$	0,34	0,07	0	0,19
$Q^2 = 0,799$, $R^2 = 0,987$, $R^2_{ajusté} = 0,964$ <i>Int. conf.</i> = 0,95				

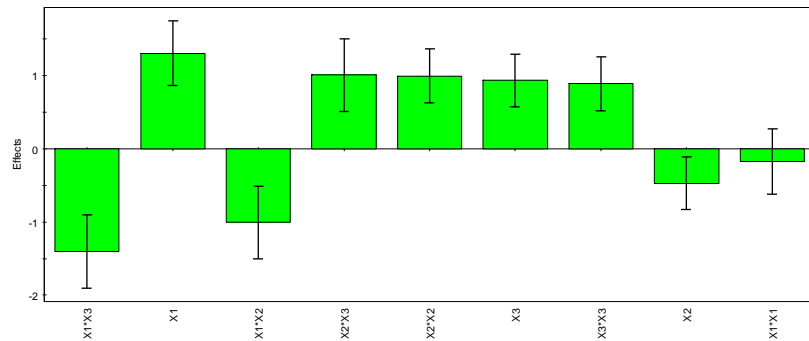


Figure 4.21: Histogramme des effets des différents facteurs pour la réponse taux d'humidité pour la claie 3

Tableau 4.12: Valeurs des coefficients pour la réponse taux d'humidité pour la claie 3

Taux d'humidité claie 3	Coeff.	Err. Std.	P	Conf. int (\pm)
Constante	12,73	0,13	0	0,34
X_1	0,65	0,08	0	0,22
X_2	-0,23	0,06	0,01	0,17
X_3	0,46	0,06	0	0,17
$X_1 * X_1$	-0,08	0,08	0,35	0,22
$X_2 * X_2$	0,49	0,07	0	0,18
$X_3 * X_3$	0,44	0,07	0	0,18
$X_1 * X_2$	-0,50	0,09	0	0,24
$X_1 * X_3$	-0,70	0,09	0	0,24
$X_2 * X_3$	0,50	0,09	0	0,24
$Q^2 = 0,724$ $R^2 = 0,98$ $R^2_{ajusté} = 0,944$ $Int. \text{ conf.} = 0,95$				

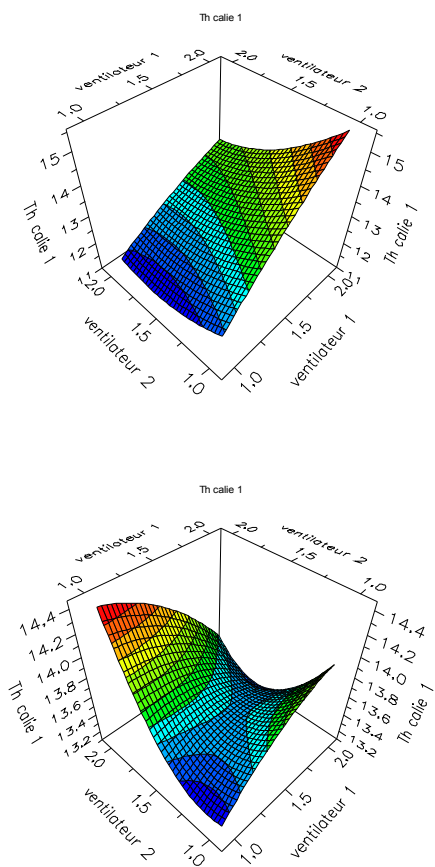


Figure 4.22: Surface de réponse pour le taux d'humidité en fonction des vitesses de ventilation pour une masse de produit à sécher faible et forte pour la claie 1

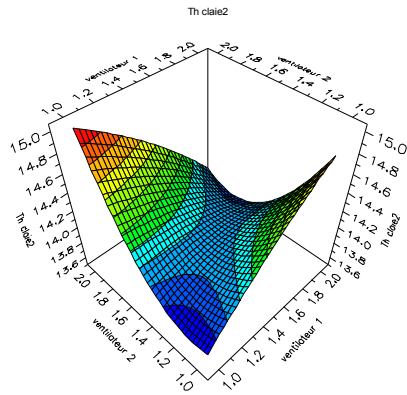
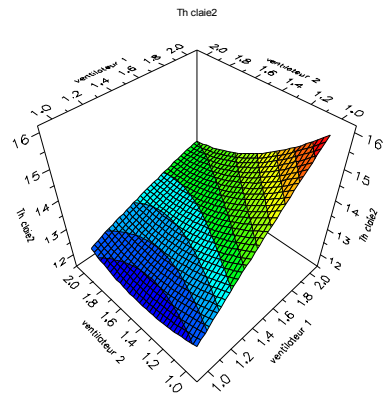


Figure 4.23: Surface de réponse pour le taux d'humidité en fonction des vitesses de ventilation pour une masse de produit à sécher faible et forte pour la claie 2

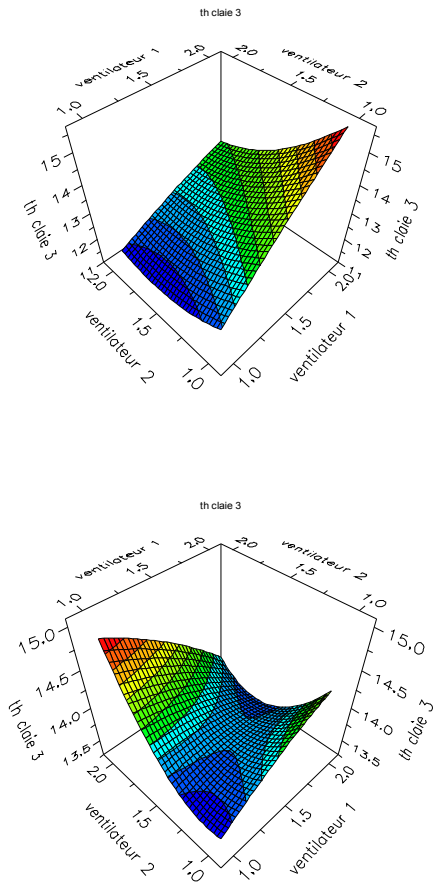


Figure 4.24: Surface de réponse pour le taux d'humidité en fonction des vitesses de ventilation pour une masse de produit à sécher faible et forte pour la claie 3

Pour la réponse taux d'humidité on remarque que quelque soient les claies le facteur X_1 est le plus important c'est-à-dire la masse (figures 4.21, 4.22 et 4.23) et que cet effet étant positif là encore plus la quantité de produit à sécher sera importante plus le taux d'humidité sera élevé et ce pour les trois claies. On remarque également une interaction entre les facteurs X_1 et X_3 puis entre X_1 et X_2 . Aussi nous avons reporté les surfaces de réponses en fonction de X_1 et X_2 sur les figures

4.21 à 4.23. On constate que quelque soient les claies, les surfaces de réponses sont pratiquement identiques en particulier pour sécher 300g de produit. Si on désire avoir le taux d'humidité minimum, le ventilateur 1 doit avoir une vitesse comprise entre 1 et $1.5m/s$ mais la vitesse du ventilateur 2 est de moindre importance alors que pour sécher 500g de produit la vitesse du ventilateur 1 doit être égale à la vitesse du ventilateur 2.

De manière générale, on remarque également que plus la masse de produit à sécher augmentera, plus le taux d'humidité des produits sera augmenté mais dans une proportion acceptable dans la mesure où le taux d'humidité final doit être compris dans une fourchette qui garantit au mieux la conservation du produit une fois qu'il est séché.

Tableau 4.13: Analyse ANOVA pour la réponse taux d'humidité pour les différentes claies

Th claie 1	DF	SS	MS	F	P	SD
			Variance			
Total	15	2648,59	176,573			
Constante	1	2637,41	2637,41			
Total corrigé	14	11,176	0,798288			0,89346
Régression	9	10,9647	1,2183	28,8273	0,001	1,1037
Résidus	5	0,211311	0,0422621			0,20557
Lack of Fit	3	0,191311	0,0637702	6,37701	0,139	0,25252
Erreur sur le modèle						
Erreur pure	2	0,200001	0,01			0,1

Tableau 4.14: Analyse ANOVA pour la réponse temps de séchage

Temps de séchage	DF	SS	MS	F	P	SD
Variance						
Total	15	503	33,5333			
Constante	1	481,667				
Total corrigé	14	21,3334	1,52381			1,23443
Regression	9	21,0604	2,34005	42,8686	0	1,52972
Résidus	5	0,272933	0,0545866			0,233638
Lack of Fit	3	0,272933	0,0909776			0,301625
Erreur sur le modèle						
Erreur pure	2	3,38E-14	1,69E-14			1,30E-07

DF : degré de liberté

SS : somme des carrés

MS : moyenne des carrés

F : coefficient de Fisher

P : probabilité

SD : racine de *MS*

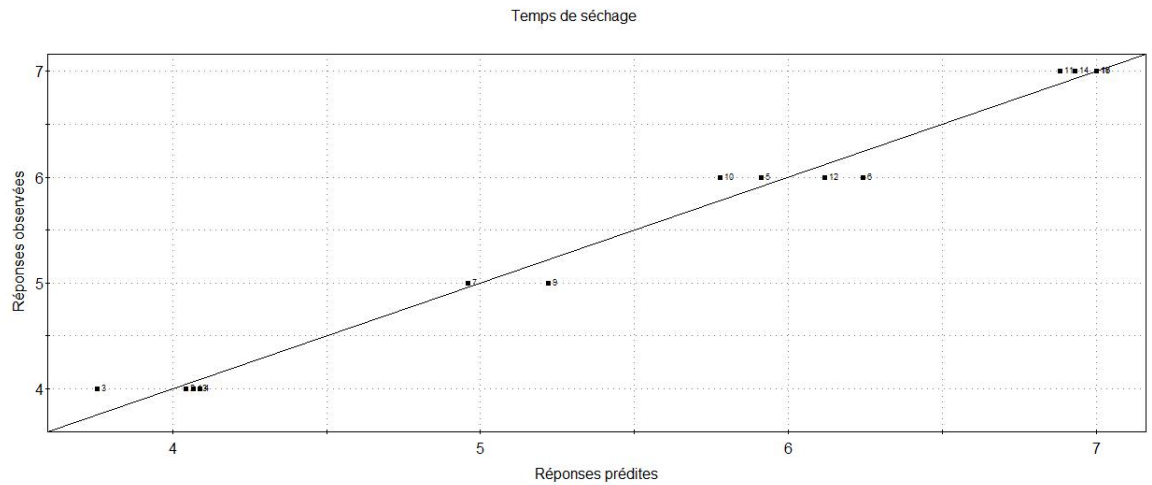


Figure 4.25: Réponses observées en fonction des réponses prédites pour la réponse temps de séchage

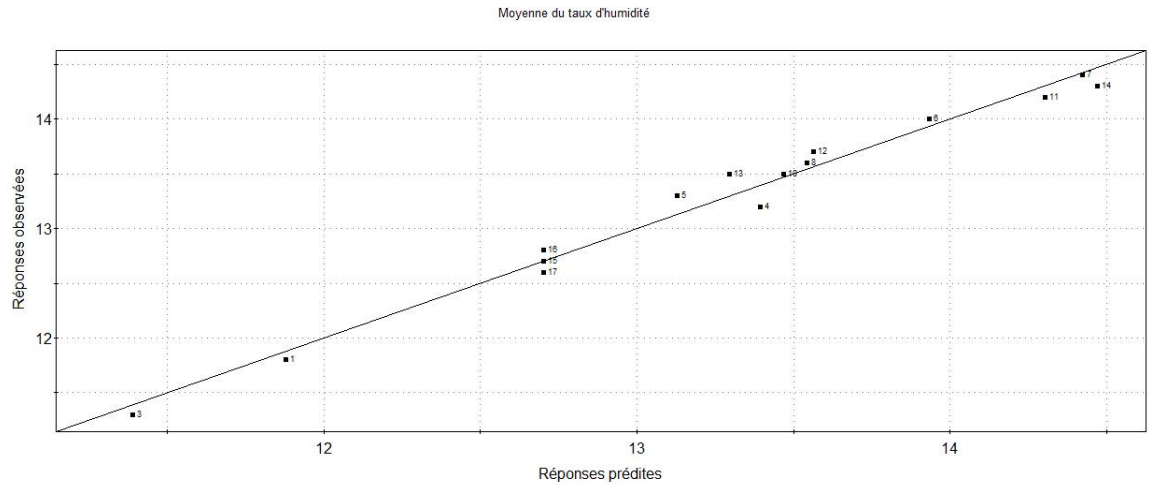


Figure 4.26: Réponses observées en fonction des réponses prédites pour le taux d'humidité sur les différentes claies

L'analyse Anova que l'on peut voir dans Les tableaux 4.13 et 4.14 montre que le modèle mathématique relatif à cette étude est satisfaisant. En effet, les valeurs de F (coefficient de Fischer) sont élevées avec une probabilité quasi nulle. D'autre part les réponses observées en fonction des réponses prédites visualisées sur les figures 4.24 et 4.25 montrent une bonne corrélation entre elles.

4.4.4.2 Conclusion sur la qualité du modèle et l'analyse des résultats de l'optimisation

Les tableaux 4.13 et 4.14 et les figures 4.24 et 4.25 montrent que l'analyse Anova sur l'ensemble des réponses ainsi que les graphes réponses prédites en fonction des réponses observées sont satisfaisants et que le modèle expérimental et le modèle mathématique sont donc bien corrélés.

En conclusion sur le mode de convection forcée nous pouvons dire que la masse de produit à sécher est un facteur déterminant à la fois sur la durée de séchage et sur le taux d'humidité final des produits et que plus cette masse sera importante

plus elle contribuera à l'augmentation du temps de séchage et du taux d'humidité final. Quant à la vitesse de ventilation on remarque que sur l'ensemble des réponses le ventilateur 1 doit être à une vitesse de 1m/s et que dans ce cas le ventilateur 2 est de moindre importance et peut donc être fixé également à 1m/s si on sèche une masse de produit importante ou à une vitesse de 2m/s si on sèche une faible quantité de produits.

4.4.5 Cinétique de séchage en convection forcée

Comme pour la cinétique de séchage en convection naturelle, nous avons tracé la cinétique de séchage de banane en convection forcée pour différentes masses de produits à sécher. Selon la figure 4.27, nous constatons que plus la masse à sécher est faible, plus les produits sèchent rapidement ce qui est logique par rapport aux principes généraux du mode de séchage.

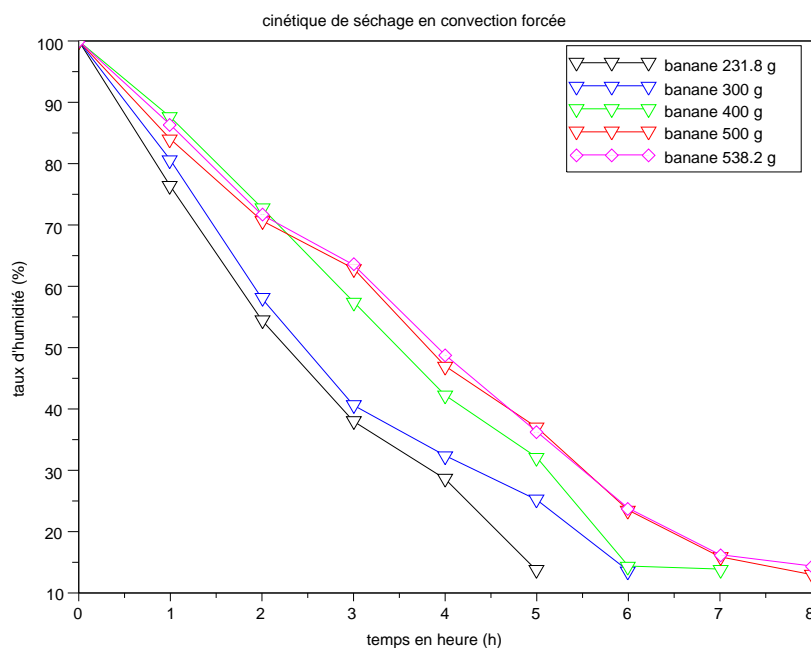


Figure 4.27: Effet de la masse du produit à sécher sur la cinétique de séchage de banane

4.4.6 Comparaison entre les deux modes de convection

4.4.6.1 Comparaison avec les résultats obtenus par optimisation

Lors de l'étude sur l'optimisation du séchage du gombo et de la banane nous avons pu valider que le capteur plan double vitrage était essentiel parce qu'il donne une température de sortie plus élevée. On a aussi remarqué qu'entre ces deux modes de convection le facteur masse du produit est important. Quelque soit le type de séchage, plus la masse est faible, plus le séchage est rapide.

4.4.6.2 Comparaison des cinétiques de séchage

Dans cette partie, la comparaison a été faite en fixant le nombre de vitres à deux et le nombre de claies à trois et ceci par rapport aux résultats obtenus pour ces deux modes de séchage. Cette comparaison montre bien qu'on pourrait modéliser la

cinétique de séchage de la banane par une fonction affine. En examinant le graphe obtenu, nous constatons que pour une masse de produit faible, il vaut mieux sécher en mode de convection naturelle que forcée. Cela a un avantage sur le coût économique à savoir qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser les panneaux solaires pour faire tourner les ventilateurs équipant le séchoir.

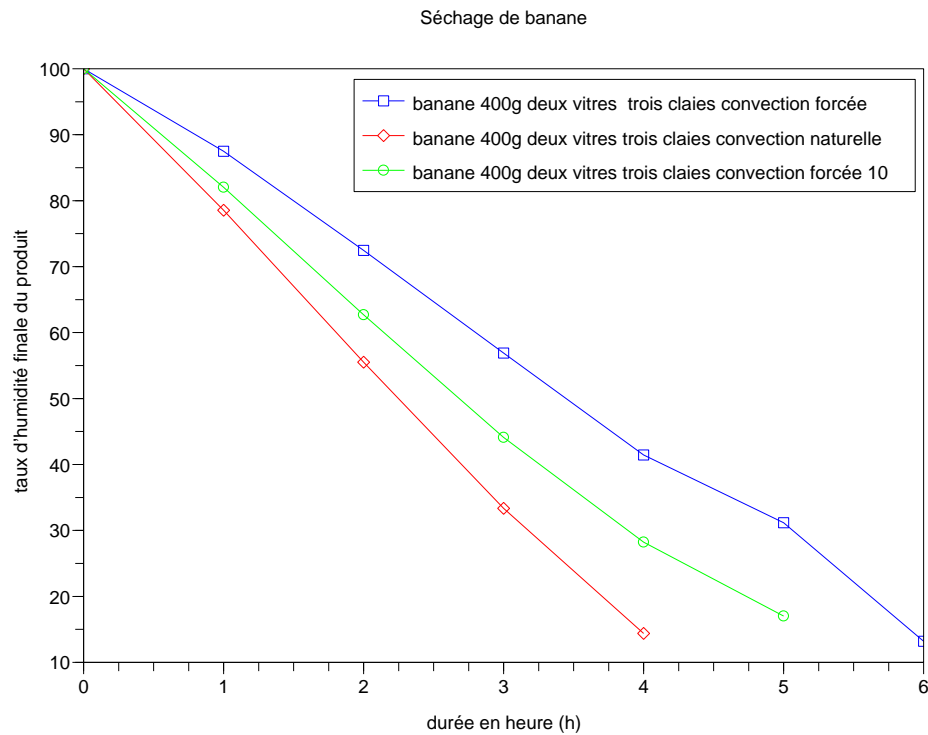


Figure 4.28: Cinétique de séchage de la banane en convection naturelle et forcée

4.4.7 Conclusion sur le séchage utilisant le séchoir solaire pliable et portatif (SSPP)

Nous avons dressé un bilan des résultats de séchage en convection naturelle et forcée sur deux types de produits à savoir le gombo et la banane qui est rassemblé dans le tableau 4.15. Celui-ci montre une nette amélioration sur le temps de séchage quelque soit la nature du produit grâce aux études d'optimisation basées sur la

méthode des plans d'expériences depuis le capteur plan jusqu'au séchage des produits et selon les différents modes de convection.

Tableau 4.15: Résultats sur la comparaison de deux modes de séchage en convection naturelle et forcée

Séchoir et mode de convection	Ts de séchage de gombo	Ts de séchage de banane
SSPP non optimisé convection naturelle	17 heures	-
SSPP optimisé convection naturelle	7-13 heures	5-11 heures
SSPP optimisé convection forcée	-	4-7 heures

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail nous avons dans un premier temps modélisé le flux solaire en vue de différentes applications possibles. En appliquant les résultats de modélisation du flux solaire au capteur plan double vitrage, nous avons pu optimiser ledit capteur équipant un séchoir solaire pliable et portatif (SSPP). Les résultats de l'optimisation nous ont permis de valider l'utilisation du capteur plan double vitrage. En effet, nous avons ainsi obtenu une température de sortie du capteur plan élevée qui représente également la température à l'entrée de l'enceinte de séchage. Cette température de sortie permet donc de sécher plus facilement les produits agro-alimentaires. Des tests utilisant la méthode des plans d'expériences sur le séchage ont été réalisés sur deux produits les plus consommés en République Centrafricaine, à savoir le gombo et la banane qui, faute de séchage dans un délai imparti peuvent se dégrader au point de devenir impropre à la consommation. Le but de ces tests a été de réduire le temps de séchage tout en enlevant au maximum l'eau libre du produit qui est en partie responsable de la dégradation des produits frais après la récolte. Cette réduction du taux d'humidité permet donc de conserver les produits séchés le plus longtemps possible afin de répondre aux problèmes de conservation des produits alimentaires et de leur disponibilité en toute saison. Les premières études réalisées en mode de séchage par convection naturelle ont montré que la nature du produit est importante en raison du taux d'humidité initiale de ce produit. Ces études ont démontré qu'il faut sécher sur trois claies préférentiellement et que plus la masse du produit à sécher est importante plus le temps de séchage sera long quelque soit la nature de ce produit. Par la suite nous avons ajouté un système de ventilation alimenté par les panneaux solaires afin de sécher les produits en utilisant la convection forcée. Les résultats obtenus à partir des plans d'expériences sur ce mode de convection ont indiqué que les conclusions de cette étude étaient identiques à celles de la convection naturelle

en ce sens que l'ajout des ventilateurs ne semble pas apporter une amélioration supplémentaire.

Des courbes de cinétiques de séchage en convection naturelle et forcée ont été tracées. L'étude comparative entre ces deux modes de convection a été faite. Elle montre une bonne corrélation entre les profils cinétiques et les conclusions précédemment citées. Toutefois, l'effet des ventilateurs ne semble pas important en regard de ces profils cinétiques. Ceci peut s'expliquer par le fait que le séchoir solaire pliable et portatif (SSPP) a été bien dimensionné et que son optimisation par la méthode des plans d'expériences l'a encore rendu très efficace. En effet, nous sommes passés d'une durée de séchage de 27 heures en séchage à l'air libre à 17 heures par l'utilisation du séchoir puis à une durée minimum de 5 heures pour le gombo après optimisation.

Si l'importance de la ventilation ne s'est pas avérée pour les études réalisées dans le cadre de ce travail, il serait souhaitable d'envisager la poursuite des travaux sur un séchoir de plus grande taille, voire de taille industrielle et/ou de réaliser une étude comparative entre deux séchoirs fonctionnant respectivement l'un par convection naturelle et l'autre par convection forcée dans les mêmes conditions climatiques favorables et défavorables.

Bibliographie

- [1] S.A.Reardon et al., 1998, Friction, heat and mass transfer for paper drying, Int.J.Heat Mass Transfer 41, pp.1313-1325
- [2] A.Hachimi et al., 1998, Theorical and experimental study of solar dryer, Renewable Energy 13, pp.439-451
- [3] M.N.A.Hawlder et al.,Drying Characteristics of Tomatoes, J.Food.Eng.14, pp.259-268
- [2] M.A.Du Peuty-Charbonnier, 1995, Etude des transferts de chaleur et de masse en milieu granulaire : Application au séchage du Riz Paddy, thèse de doctorat, Université de Poitiers
- [5] A.Youcef-Ali, 2001, Etude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à convection forcée : Application à la pomme de terre
- [6] A.Ahmed-Zaid, 1999, Optimisation des capteurs solaires plans à air, application au séchage de produits agricoles et de la pêche, thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
- [7] B.Ben Fathallah, B.M.Chokri et J.Mongi, 1986, Etude et realization d'un séchoir solaire. Mémoire technique. Ecole Normale Supérieur de l'enseignement technique à Tunis. Université de Tunis
- [8] A.Saleh, I.Badran, 2009, Modeling and experimental studies on a domestic solar dryer, Renewable Energy 34, pp.2239-2245
- [9] M.Daguenet, 1985, Le séchage solaire théorie et pratique, UNESCO, Paris
- [10] S.Öztekin, A.Baçetinçelik, Y.Soydal, 1999, Crop drying programme in Turkey. Renewable Energy 16, pp.778-794
- [11] C.Ratti et A.S.Mujumdar, 1997, Solar drying of foods :Modeling and numerical simulation, Solar Energy 60, N°3-4, pp.151-157
- [12] M.Duran, 1983, Séchage solaire et développement rural au Pérou, Journées internationales de Bordeaux 18-20 mai 1983

- [13] D.R. Pangavhne, R. L. Sawhney, P. N. Sarsavadia, 2002, Design development and performance testing of a new natural convection, *Energy* 27, pp. 579-590
- [14] L. Bennamoun et A.Belhamri, 2003, Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. *Journal of Food Engineering* 59, pp.259-266
- [15] A.H.Bahnasawy, M.E.Shenana, 2003, A mathematical model of direct sun and solar drying of some fermented dairy products (Kihk), *Journal of Food Engineering*
- [16] Wijesundera, L.L. Ah, L. E. Tjioe, 1982 thermal performance of two pass solar air heaters, *Solar energy* 28, pp. 363-370
- [17] C.Choudhury, P.M.Chauhan, H.P.Garg, 1995, Performance and cost analysis of two-pass solar air heater, *Heat Recovery Systems et CHP* 15, pp.141-159
- [18] A.SKalogirou, 2004, Solar thermal collectors and applications, *Progress in energy and combustion science* 30, pp.231-295
- [19] R.K.Goyal, G.N.Tiwari, 1997, Parametric study of a reverse flat plate absorber cabinet dryer : a new concept, *Solar Energy* 60, pp.41-48
- [20] M.Özdemir et Y.O.Desvres, 1999, The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting, *Journal of Food Engineering* 42, pp.225-233
- [21] O.Yaldiz et C.Ertekin, 2001, Thin layer solar drying some different vegetables, *Drying Technology* 19, pp.583-596
- [22] A.Fudholi et K.sopian, M.H. Ruslan, M.A. Alghoul, M.Y. Sulaiman, 2010, Review of solar dryers for agricultural and marine products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1-30
- [23] A.benkhelifa, 1998, Optimisation d'un capteur solaire plan, *Rev.Energ.Ren*, pp.13-18 H.C.Hottel et B.B.Woertz, 1942, Performance of flat-plate solar heat collectors, *Am.Soc.Mech.Eng.* 64, pp.91-104
- [24] H. C. Hotel et B.B. WOERTz,1942, Performance of flat-plate solar heat collectors, *Am,Soc, Mech.Eng.* 64, pp 91-104
- [25] S.A.Klein, 1975, Calculation of flat plate collector loss coefficients, *Solar Energy* 17, pp.79-80
- [26] V.K.Argawal et D.C.Larsen, 1981, Calculation of the top loss coefficient of a flat plate collector, *Solar Energy* 27, pp.69-71

- [27] A .Malhotra, H.P.Garg et A.Palit, 1981, Heat loss calculation of flat plate solar collector, J.Thermal Eng. 2, pp.59-62
- [28] J. P Nadeau, J. R. Puiggali, 1995, Séchage des processus physiques aux procédés industriels, Technique et documentation, Lavoisier.
- [29] Y. B. ASSOA, 2008, Performances des capteurs solaires PV/T hybrides bi-fluides intégrables à l'enveloppe des bâtiments, Etude expérimentale et modélisation adaptée,Thèse de doctorat
- [30] M. DOUANI, N. D. BOUZIMA, F. Z. RAHMA, T. DOUMA, 2007, Simulation du procédé de dessalement de l'eau de mer par pompe à chaleur avec capteur solaire intégré, 13^{ème} Journées Internationales de Thermique, Albi, France.
- [31] Mokhtari, M.Haddadi, A.Malek, W.Bendaikha-Touafek, 2009, Etude thermique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique (PVT) à air recouvert destiné au chauffage d'habitation, SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria).
- [32] A. ABENE, V. Dubois, A. Ouaged, M. SI-Youcef, M. Leray, 2005, Etude expérimentale des capteurs solaires à air, le séchage du figue, Technologies avancées
- [33] K.S. Ong, 1995, Thermal Performance of Solar Air Heaters: Mathematical Model and Solution Procedure, Solar Energy, 55, pp. 93 - 109.
- [34] N. B. Mihoubi, D. Mihoubi, N. Kechaou, 2007, Modélisation unidirectionnelle de séchage solaire convectif de certaines plantes aromatiques et médicinales, 13^{ème} Journées Internationales de Thermique, Albi France.
- [35] A. Khouya, J. Benabdelouhab, A. Draoui, 2007 Simulation numérique des transfert thermiques dans un système de séchage solaire du bois, 13^{ème} Journées Internationales de Thermique, Albi France .
- [36] A. Zerrouki, 2002, Modélisations des pertes thermiques dans un capteur solaire plan à air a deux passes, Rev. Energ. Ren. 5, pp. 49-58.
- [37] F.Mokhtari, 2003, Etude de la variation de la température de la plaque absorbante pour différents capteurs solaire à air, Rev. Energ. Rev, 11 émes Journée Internationale de Thermique, pp. 47-51.
- [38] S. Oudjedi, A. Boubghal1, W. Braham Chaouch, T. Chergui1 et A. Belhamri, 2008, Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie: 2). Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger, pp. 255 – 266

- [39] A. Labed, N. Moumami, K. Aouès, M. Zellouf et A. Moumami, 2009, Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, *Revue des Energies Renouvelables* 12, pp. 551 – 561
- [40] P. Gbaha, 1989, Etude et Optimisation des Echanges Thermiques et des Performances des Capteurs Plans à Deux Veines d'Air, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes
- [41] A. Hachemi, 1992, Contribution à l'Optimisation des Performances Thermiques des Insolateurs Plan à Air à Lit Garni de Rangées d'Obstacles aux Pas Serrées, Amélioration du Rendement par Interaction entre le Rayonnement et la Convection, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes.
- [42] C. Choudhury and H.P. Gary, 1993, Performance of Air Heating Collectors with Packed Air Flow Passage, *Solar Energy* 50, pp. 205 – 221
- [43] C. Perrin de Brichambaut et C. Vauge, 1982, Le Gisement Solaire – Evaluation de la Ressource Energétique, Edition Lavoisier, Tec & Doc, Paris.
- [44] J. PADET, 1994, échangeurs thermique, édition Masson
- [45] L. Mei, 2003, Thermal Modelling of a Building with an Integrated Ventilated PV Facade, *Energy and buildings* 35, pp. 605 – 617.
- [46] M. Koussa, M. Haddadi et A. Malek, 2007, Reconstitution des irradiances globale et diffuse en fonction de quelques paramètres météorologiques pour un ciel quelconque, *Revue des Energies Renouvelables* 10, pp. 75 – 92
- [47] A.A.M. Sayigh, 1977, *Solar Energy Engineering*, Academic Press, INC (London) LTD.
- [48] H.P. Garg and S.N. Garg, 1983, Prediction of Global Solar Radiation from Bright Sunshine Hours and Other Meteorological Data', *Energy Conversion and Management* 23, pp. 113 – 118.
- [49] J.A. Sabbagh, A.A.A.M. Sayigh and E.M.A. El Salam, 1976, Estimation of Total Solar Radiation from Meteorological Data, *Solar Energy* 19, pp. 307 – 311.
- [50] M. Hussain, 1984, Estimation of Global and Diffuse Irradiation Form Sunshine Duration and Atmospheric Water, Vapor Content 33, pp. 217 – 220.
- [51] A.S. Sambo, 1986, Empirical Models for the Correlation of Global Solar Radiation with Meteorological Data for the Northern Nigeria, *Solar Energy* 3, pp. 89 – 93.

- [52] W.E. Alnaser, 1993, New Model to Estimate the Solar Global Irradiation using Astronomical and Meteorological Parameters, Renewable Energy 3, pp. 175 – 177.
- [53] C.C.Y. Ma and M. Iqbal, 1984, Statistical Comparison of Solar Radiation Correlations, Monthly Average Global and Diffuse Radiation on Horizontal Surfaces, Solar Energy 33, pp. 143 – 148.
- [54] B.Y.H. Liu and R.C. Jordan, 1960, The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, Solar Energy 4.
- [55] C.P. Jacovides, L. Hadjoannou, S. Pashirdis and L. Stefannou, 1996, On the Diffuse Fraction of Daily and Monthly Global Radiation for the Island of Cyprus, Solar Energy 56, pp. 565 – 572.
- [56] M. Collares-Pereira and A. Rabl, 1978, The Average Distribution of Solar Radiation Correlations between Diffuse and Hemispherical Ans between Daily and Hourly Insolation Values, Solar Energy 22, pp. 155 – 164.
- [57] D.G. Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie, 1982, Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation, Solar Energy 28, pp. 293 – 302.
- [58] M. Iqbal, Prediction of Hourly Diffuse Solar Radiation from Measured Hourly Radiation on Horizontal Surface, Solar Energy 24, pp. 491 – 503.
- [59] [www. CIMA Technologie.org](http://www.CIMA-Technologie.org)
- [60] www.scilab.org
- [61] Plackett, R.L., Burman, J.P., 1946. The design of optimal factorial experiments. Biometrika 35, 305-320.
- [62] Hedayat, A., Wallis, W.D., 1978. Hadamard matrices and their applications. Ann. Statist. 6, 1184-1238.
- [63] Goupy J., 1988, La méthode des plans d'expériences, , Dunod, Paris
- [64] GEP Box, KB. Wilson, 1951, J.Roy.Stat, Ser B13 :1
- [65] GEP Box, WG. Hunter, JS. Hunter, 1978, Statistics for experimenters. John Wiley and Sons, New York
- [66] Modde 5.0. Umetri AB, Box 7960, S-90719 UMEA Sweden
- [67] G.Lewis et M.Randall, 1923, Thermodynamics, New-York, Addition-Wesley Publishing Compagny

- [68] W.Scott, 1957, Water relations of foods spoilage microorganisms, Advances in Food Research, 7, pp.83-127
- [69] M.Loncin, 1961, Les operations unitaires du genie chimique, Edition Dunod, Paris, France
- [70] A.Belghit et al., 1999, Experimental study of drying kinetics of sage in a drying tunnel working in forced convection, Rev.Energ.Ren. 2, pp.17-26
- [71] M.Kouhila et al., 1999, Approche expérimentale des courbes de sorption de la menthe en vue d'un séchage par énergie solaire, Rev.Energ.Ren. 2, pp.61-68
- [72] J.J Bimbenet , 1978 le séchage dans Les industries agricoles et alimentaires, 4^{ème} cahier du Génie Industriel, Alimentaire, SEPIAC, Paris.
- [73] O.Kricher et K.Kroll, 1963, Technique de séchage, 2e édition de « Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer Verlag (1956) » traduite par CETIAT, Orsay
- [74] W.K.Lewis, 1921, The rate of drying of solid, Ind.Eng.Chem.13, 5, pp.427-432
- [75] T.K.Sherwood, 1929, The drying of solid, Ind.Eng.Chem.21, 1, pp.12-16
- [76] A.V.Liuka, 1964, Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Advance in Heat Transfer 1, New York 1966, Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Pergamon Press, Oxford
- [77] A.Hamed, 1985, Séchage d'un material Pyrex humid par convection force d'air Chad : couple entre Les equations de transfert dans le material et Celle's de la couche limite « Application au séchage solaire du bois » Thèse de doctorat, Université de Perpignan
- [78] J.Khmer et al., 1993, Modélisation des transferts couples en milieu Pyrex : Application au séchage en vapor d'Au surcharge d'un lit granulaire, KITH pp.152-160
- [79] A.Durham, 1990, Etude de séchage d'un cylindre annulaire Pyrex humid sous l'action d'un courant d'air force dans le conduit central : couple entre Les equations de Liuka et Celle's de la couche limite, Thèse de doctorat, Université de Perpignan
- [80] S.Shaikh . Séchage d'un milieu deformable non satire: modélisation du couple hygrometre. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux 1 31 Janifer 2008. 134p

- [81] D.A.De Vries, 1987, The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited, J.Heat and Mass transfer 30, 7 pp.1343-1350
- [82] J. F. Rog is, 1995, Searcher Les produits aggro-alimentair es, Technique et documentation.