



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES

N° d'ordre :
N° de série :

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Spécialité : Génie des procédés
Option : Energétique et procédés

Présenté par:

Samira Chouicha

Thème

**Etude des Possibilités de Stabilisations des Conditions Opératoires
dans les Séchoirs Solaires Convectifs**

Soutenu publiquement le : 12/06/2019

Devant le jury composé de :

M. Mourad KORICHI	Professeur	Université Kasdi Merbah Ouargla	Président
M. Boumediene TOUATI	Professeur	Université Tahri Mohamed Béchar	Examinateur
M. Djamel FAHLOUL	Professeur	Université Hadj Lakhdar Batna	Examinateur
M. Abdelghani BOUBEKRI	Professeur	Université Kasdi Merbah Ouargla	Encadreur

Année universitaire : 2018/2019

Dédicace

Dédicace

A la mémoire de ma mère

A la mémoire de ma grande- mère

*A la mémoire de mon grand-
père*

A mon père

A mes frères et sœurs

A tous mes amis

Je dédie les fruits de mon travail

samira

Remerciements

Remerciement

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier très vivement monsieur le professeur BOUBEKRI ABDELGHANI qui a eu l'aimable volonté de diriger ce travail tout le long de ces années.

Je tiens aussi à remercier monsieur le professeur KOURICHI MOURAD, pour avoir gentiment accepté de présider le jury de ma thèse.

Je remercie également monsieur le Pr. FAHLOUL DJAMEL et monsieur le Pr BOUMEDIENE TOUATI pour avoir accepté de juger ce travail.

Une attention particulière à mes collègues Mr BERBEH MED HAFED et Mr DJAMEL MENOUCHE et SAIFI NADIA pour leurs encouragements durant ces années sans oublier Monsieur HOUTI AHMED, le technicien du laboratoire de physique pour son aide dans l'installation des séchoirs solaires et l'acquisition des instruments de mesures.

Je remercie enfin, avant et toujours mon bon et grand dieu ALLAH pour tous ses dons que je ne puisse dénombrer et dont la réussite de ce travail n'en est qu'un petit !

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etat de l’art sur le séchage solaire	
I.1 Cadre du travail	6
1.2 Généralités sur le séchage solaire	11
1.3 Classification des systèmes de séchage à énergie solaire	12
I.4 Etude comparative des différents types des séchoirs solaires.....	14
I. 5 Quelques concepts et éléments de conception d’un séchoir solaire.	15
I.6 Evaluation des séchoirs solaires	18
I.7 Etude bibliographique sur les modèles de séchage des produits agroalimentaires.....	19
I.8 Evaluation technoeconomique d'un procédé de séchage solaire	24
Chapitre II : Matériels et méthodes	
II.1. Description des systèmes de séchage solaire	28
II.1.1 Séchoir solaire direct	28
II.1.2 Séchoir solaire indirect	29
II.1.3 Historique du développement du séchoir solaire indirect	30
II.2 Mesures expérimentales	34
II .3 Appareillages de mesures	34
II .3 .1 Mesure du rayonnement solaire	35
II .3 .2 Mesures des températures	35
II .3.3 Mesure de la vitesse de l’air asséchant	36
II .3 .4 Mesure de l’humidité de l’air asséchant	36
II .3 .5 Mesures externes	36
II .3 .6 Mesure de la perte de masse	37
II .3.7 Mesure de la teneur en eau initiale	38
II .4 Protocole et méthodologie expérimental.....	38
II.5 Présentation des produits d’étude	39
II.5.1 Caractérisation de la pomme de terre	39
II.5.2 Caractérisation des dattes Deglet-Nour	41
II.5.3 Caractérisation de la fève	43
II.6 Préparation des produits d’étude	45

Table des matières

II.7 Protocole expérimental	46
II.8 Série d'expériences	46

Chapitre III : Stabilisation des conditions opératoires

III.1 Essais de stabilisation par source électrique du réseau domestique	70
III .2 Essais de stabilisation par source électrique photovoltaïque.....	80
III .3 Essais de stabilisation par source géothermique via échangeur air/eau	96
III.4. Influence des différentes techniques de séchage sur la qualité des produits	76
III.4.1 Présentation de l'appareil de mesure	98
III.4.2 Procédure de travail	98
III.4.3 Résultats des états de qualité	100

Chapitre IV Développement des modèles mathématiques de séchage des produits agroalimentaires

IV.1 Détermination du modèle le plus approprié	110
IV.2 Détermination des diffusivités effectives.....	110
IV.3 Résultats de modélisation mathématique des dattes deglet nour.....	111
IV.4 Résultats de modélisation mathématique des pommes de terre tranchées.....	115
IV.5 Modélisation mathématique de séchage des grains de fève	118

Chapitre V: Analyse énergétique et Etude technico-économique des différents systèmes de séchage solaire

V.1 Efficacité énergétique des systèmes de séchage solaire utilisés	130
V.2 Analyse énergétique des systèmes de séchage utilisés.....	135
V.3 Calcul des performances énergétiques des séchoirs solaires utilisés.....	140
V.4 Modèles technico-économiques.....	143
V.5. Rappels de quelques notions d'économie.....	143
V.5.1 Facteur d'actualisation.....	144
V.5.2 Evaluation du coût annualisé.....	145
V.5.3 Retour sur investissement.....	145
V.6. Analyse économique des séchoirs solaires (direct , indirect , hybride avec appoint énergétique par échangeur thermique et par résistance électrique).....	145

Table des matières

V.6.1 Actualisation du coût initial.....	146
V.6.2 Données économiques.....	146
V.6.3 Calcul du temps de retour sur l'investissement.....	147
V.6.4 Etude de rentabilité des système du séchage solaire (hybride , direct et indirect) destiné pour le séchage des grains de fève	148.
V.6.5 Etude de rentabilité du système du séchage solaire hybride destiné pour la valorisation des Dattes deglet noir	152.
V.6.6 Etude de rentabilité du système du séchage solaire hybride destiné pour la conservation des pommes de terre tranchée.....	153
Conclusion générale.....	156
Références bibliographiques.....	159.

Liste des Figures

Liste des figures

N°	titres	page
Figure (I.1)	(a) Courbes d'évolution type au cours du temps de la teneur en eau du produit, (b) de la vitesse de séchage, (c) de la température du produit	8
Figure (I.2)	Séchoir solaire direct passif	13
Figure (I.3)	Séchoir solaire indirect passif	14
Figure (I.4)	Séchoir solaire mixte passif	14
Figure (I.5)	Séchoir solaire doté d'un dispositif de stockage d'énergie	16
Figure (I.6)	Séchoir à inclinaison variable	17
Figure (I.7)	Séchoir solaire direct amélioré	17
Figure (II.1)	Séchoir solaire direct et indirect	29
Figure (II.2)	les différentes phases de développement du fonctionnement du séchoir solaire indirect	30
Figure (II.3)	Radiateur avec ventilateur	33
Figure (II.4)	Système de chauffage électrique de l'eau	34
Figure (II.5)	Le montage de système de l'échangeur de chaleur	34
Figure (II.6)	Résistance électrique	34
Figure (II.7)	Solarimètre à affichage numérique	34
Figure (II.8)	Température mètre	35
Figure (II.9)	Anémomètre	36
Figure (II.10)	Hygromètre (A) Testo 645 (B) Testo 608-H1	36
Figure (II.11)	Appareil physique multi fonctionnelle	37
Figure (II.12)	balance de précision de 0.01g	37
Figure (II.13)	Analyseur de la teneur en eau	38
Figure (II.14)	composition chimique de pomme de terre	38
Figure (III.1)	Variation des humidités relatives de l'air en fonction du temps	49
Figure (III.2)	Variation des températures en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage	50
Figure (III.3)	Influence de la température de l'air sur la variation de la teneur en eau	51
Figure (III.4)	Profil des températures air/produit	53
Figure (III.5)	Variation de la teneur en eau pour différentes températures en fonction du temps	54
Figure (III.6)	Profile des températures air/produit pour six jours de séchage en discontinu	56
Figure (III.7)	Influence de la température de l'air sur la variation de la teneur en eau des dattes	57
Figure (III.8)	Relevé des températures de l'air dans la chambre de séchage avec et sans appoint lors du séchage à température variable	58
Figure (III.9) :	Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps dans le cas d'association d'un panneau, deux panneaux, trois panneaux, quatre panneaux en parallèles	60
Figure (III.10)	Variation des températures air/produit dans le cas d'association d'un seul panneau solaire	61
Figure (III.11)	Variation des températures air/produit dans le cas d'association de deux panneaux en parallèle	62
Figure (III.12)	Variation des températures air/produit dans le cas d'association de trois panneaux en parallèle	62

Liste des figures

Figure (III.13)	Variation des températures air/produit dans le cas d'association de quatre panneaux en parallèle	63
Figure (III.14)	Variation des teneurs en eau en fonction du temps dans le cas d'association d'un panneau, deux panneaux, trois panneaux, quatre panneaux en parallèles	66
Figure (III.15)	Variation des températures en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage	68
Figure (III.16)	Variation de la teneur en eau en fonction du temps	69
Figure (III.17)	Variation des températures en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage dans le cas d'association d'un panneau, deux panneaux en parallèles	69
Figure (III.18)	Variation de teneur en eau en fonction du temps dans le cas d'association d'un panneau, deux panneaux en parallèles	72
Figure(III.19) :	Variation des températures en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage	73
Figure (III.20)	Variation de la teneur en eau en fonction du temps	74
Figure (III.21)	Variation des températures en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage.	76
Figure (III.22)	Variation de teneur en eau en fonction du temps	77
Figure (III.23)	Colorimètre Minolta type CR-400	77
Figure (III.24)	Détermination des paramètres de couleur des graines de fève séchée sous différentes conditions opératoires	80
Figure (III.25)	Variation de l'indice de qualité pour différentes échantillons de fèves	81
Figure (III.26)	Détermination de couleur des tranches de pomme de terre durant le séchage solaire	83
Figure (III.27)	Variation de l'indice de qualité pour différentes tranches séchées	86
Figure (III.28)	Détermination de couleur des dattes durant le séchage solaire	87
Figure (III.29)	Détermination de couleur des dattes durant le séchage solaire	89
Figure (IV.1) :	Teneur en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de temps de séchage	84
Figure(IV. 2)	Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de Temps	96
Figure (IV.3)	Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de Temps	97
Figure (IV.4)	Variation du logarithme népérien de la teneur en eau réduite en fonction de temps de séchage à température 50, 55, 60 et 65°C.	99
Figure (IV.5)	Evaluation des erreurs standard à chaque température pour les deux modèles	105
Figure (IV.6)	Evaluation des coefficients de corrélations à chaque température pour les deux modèles	106
Figure (IV.7)	L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le modèle de page à T =50 °C	106
Figure (IV.8)	L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le modèle de page à T =55 °C	107
Figure (IV.9)	L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le modèle de page à T =60 °C	107
Figure (IV.10)	L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le modèle de page à T =65 °C	108

Liste des figures

Figure (IV.11) :	Evolution des paramètres K et n avec la température	108
Figure (V.1)	Efficacité journalière du collecteur en fonction du temps	113
Figure (V.2)	Efficacité journalière du séchoir solaire hybride par échangeur en fonction du temps	114
Figure (V.3)	Efficacité journalière du séchoir solaire hybride par résistance électrique en fonction du temps	115
Figure (V.4)	Variation de l'efficacité énergétique en fonction du temps pour le séchoir solaire direct et indirect	116
Figure (V.5)	Contribution de l'énergie fournie à partir du capteur solaire et de l'échangeur dans le séchoir indirect hybride	120
Figure (V.6)	Contribution de l'énergie électrique et solaire pour différentes températures de séchage ($T_1= 50^{\circ}\text{C}$ $T_2= 55^{\circ}\text{C}$ $T_3= 60^{\circ}\text{C}$ $T_4= 65^{\circ}\text{C}$)	120
Figure (V.7)	Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix de vente des Fèves séchées cas du séchoir hybride	130
Figure (V.8)	Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix d'achat des Fèves fraîches cas du séchoir hybride	131
Figure (V.9)	Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix de vente des Fèves fraîches cas du séchoir direct	131
Figure (V.10)	Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix d'achat des Fèves fraîches cas du séchoir direct	132
Figure (V.11)	Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix de vente de Fèves séchés cas du séchoir indirect	132
Figure (V.12)	Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix d'achat de Fèves fraîches cas du séchoir indirect	133
Figure (V.13)	Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix de vente des dattes deglet nour séchés	134
Figure (V.14)	Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix d'achat des dattes deglet nour séchées	134
Figure (V.15)	Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix de vente des pommes de terre tranchées cas du séchoir hybride	135
Figure (V.16)	Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix d'achat des pommes de terre tranchées cas du séchoir hybride	136

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

N°	titres	page
Tableau (I.1)	Modèles mathématiques développés par différents auteurs pour les courbes de séchage	22
Tableau (II.1)	Composition de la pulpe de la datte fraîche <i>Deglet-Nour</i>	43
Tableau (II.2)	Valeurs nutritionnelles de fèves fraîches	46
Tableau (III.1)	Valeurs minimales, maximales et tendances moyennes des températures au niveau de chambre de séchage cas des dattes deglet nour	86
Tableau (III.2)	Valeurs minimales, maximales et tendances moyennes des températures au niveau de chambre de séchage cas des pommes de terre tranchée	93
Tableau (III.3)	Valeurs minimales, maximales et tendances moyennes des températures au niveau de chambre de séchage cas d'appoint par échangeur	97
Tableau (III.4)	Etat visuelle de la qualité des fèves séchées aux différentes conditions opératoires	104
Tableau (III .5)	Etat visuelle de qualité de pomme de terre variété Désirée séchée	110
Tableau (III. 6)	Etat visuelle de la qualité des dattes Deglet Nour séchées	108
Tableau (IV. 1)	Les coefficients de la diffusion effective pour différentes conditions Aérothermiques séchage des dattes deglet nour	95
Tableau (IV. 2)	Les coefficients de la diffusion effective pour différentes températures des séchages séchage des pommes de terre tranchées	96
Tableau (IV. 3)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Newton	100
Tableau (IV. 4)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Page	100
Tableau (IV. 5)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Henderson et Pabis	100
Tableau (IV.6)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Newton	101
Tableau (IV.7)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Page	101
Tableau(IV .8)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Henderson et Pabis	102
Tableau(IV.9)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Logarithmique	102
Tableau (IV.10)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Deux termes	103
Tableau (IV.11)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Midilli et autres	103
Tableau (IV.12)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Wang et Singh	104
Tableau(IV.13)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Verma	104
Tableau (IV.14)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Henderson et Pabis modifié	105

Liste des tableaux

Tableau (IV.15)	Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Page modifié	106
Tableau (V.01)	Différents paramètres du séchage solaire des grains de fève	117
Tableau (V.02)	Résultats de calcul des performances énergétiques	119
Tableau (V.03)	paramètres pour les frais d'investissement pour le séchoir solaire sans et avec appoints énergétiques	123
Tableau (V.04)	prix de fonctionnement	123
Tableau (V.05)	prix d'achat et de vente des produits d'étude	124
Tableau (V.06)	Données divers	124

Nomenclature

Nomenclature

Nomenclature

Symboles	Désignations	Unites
A	paramètre d'échelle rouge/vert et	
A	Surface de la captation de rayonnement solaire	(m ²)
B	paramètre d'échelle jaune/bleu	
C _p	Capacité calorifique de l'eau	(J/kg. °K).
d	Diamètre de tube	(m).
D _s	Débit nécessaire en air chaud	(m ³ /h),
D _{eff}	Coefficient de diffusion effective	(m ² /s)
E	épaisseur de tube	(m).
ΔE	distance de couleur.	
F	Facteur de correction	
GAt:	Energie solaire entrant au capteur pendant le temps t.	(W)
G	Rayonnement solaire	(W /m ²)
h _{int}	coefficient intérieure de transfert de chaleur par convection	(W/m ² . °C).
h _{ext}	coefficient extérieur de transfert de chaleur par convection	(W/m ² . °C).
h _{c,p-c}	coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces Parallèles	(W/m ² . °C).
h _{r,p-c}	Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement.	(W/m ² . °C)
h _p	coefficient global de pertes du capteur l'équation	(W/m ² . °C)

Nomenclature

H_{amb} :	Humidité ambiant extérieure	(%)
H_{air}	Humidité de l'air intérieure	(%)
h_s :	Enthalpie de l'air sec	(kJ/kg),
h_a :	Enthalpie de l'air ambiant	(kJ/kg)
K	Coefficient global d'échange de chaleur	(W/m ² . °C)
L	Paramètre d'échelle Noir/blanc,	
L_v	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	(J /Kg .k)
m_e	la masse d'eau évaporée	(kg)
M_i	Poids initial du produit sec	(kg)
m_{ci}	Humidité initial	(kg eau/kg ms).
m_{cf}	Humidité final	(kg eau/kg ms).
P_{elec}	Puissance du simulateur de l'eau chaude	(w)
P_n	Puissance nécessaire	(kWh)
r	Coefficient de Corrélacion	
S	Erreur Standard	
T_{sm}	vitesse en masse fraîche	(kg/h),
T_{se}	Vitesse en eau extraite	(kg eau/h),
T_c	température moyenne de la couverture	(°C).
t	Temps de séchage	(h)
ΔTLM	Différence de la température logarithmique moyenne	(°C)

Nomenclature

χ^2	Fonction Chi-2 :	
Xm	Humidité absolue de l'air à la sortie du séchoir	(kgeau/kg air sec),
Xa :	Humidité absolue de l'air ambiant	(kgeau/kg air sec)

Nombres adimensionnels

Nombres	Désignation
Re	Nombre de Reynolds
Pr	Nombre de Prandlt
Nu	Nombre de Nusselt
Gr	Nombre de Grashoff

Lettres grecques

Lettres	Désignation	Unité
η	Rendement énergétique	%
μ_{eau}	viscosité dynamique d'eau	(Pa.s).
λ_{eau}	conductivité thermique de l'eau par conduction	(W/m. °C)
ρ_{eau}	masse volumique de l'eau	(kg/m ³).
μ_{air}	viscosité dynamique de l'air	(Pa.s).
λ_{air}	conductivité thermique de l'air par conduction	(W/m. °C).
λ_i	conductivité thermique de l'isolant	. (w/m. °C).
β	coefficient de dilatation thermique	(°C ⁻¹).
φ_u	Flux utile transmis au fluide caloporteur	(W).

Nomenclature

φ_p	Flux perdu par la paroi absorbante	(W).
φ_{sa}	Flux solaire absorbé	(W).
φ	quantité de chaleur	(W)

Indices

Ext	Extérieur
e-cap	Entré capteur
Int	Intérieur
Pro	Produit
s-cap	Sortie capture
ce	entrée chaud
cs	sortie chaud
ef	entré froid
sf	sortie froid
m	moy

Introduction Générale

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation de l'énergie a pris de l'ampleur, et l'exploitation de nouvelles formes d'énergie est devenue une nécessité pour assurer le niveau de vie actuel de l'humanité. Dans les pays en voie de développement, dont le degré d'ensoleillement est considéré très important tout au long de l'année, le séchage par le biais de l'énergie solaire est une alternative raisonnable. Cette énergie solaire est utilisée dans le passé et jusqu'à ce jour, cependant l'efficacité du séchage en plein air a montré sa faiblesse compte tenu de ses inconvénients (influence directe des conditions météorologiques, exposition des produits aux rayonnements UV, aux insectes et poussières, etc.).[1]

Les pays industrialisés ont mis des séchoirs artificiels selon les règles scientifiques qui donnent satisfaction au point, mais en contre partie utilisent d'autres sources d'énergies autres que l'énergie renouvelable telle que les gaz de combustion du fuel. Ce type de séchoirs résout certes certains problèmes liés au séchage à l'air libre, mais en alternative, génère un coût non négligeable et nuise à l'environnement. Le défi est de pouvoir remédier à ces alias et garantir une production de qualité avec un temps minime et à moindre coût. Les séchoirs solaires de type direct et indirect représentent une solution intermédiaire qui satisfait le rapport qualité prix. Ils se montrent plus économiques en énergie tout en préservant une bonne qualité du produit, aussi ils sont mis en œuvre par des techniques relativement simple. Ce type de système intéresse les pays industrialisés ainsi que les pays en voie de développement. [2]

Les fruits et légumes sont des produits très riches en vitamines diverses et sels minéraux et constituent une source importante de ces nutriments pour l'alimentation humaine. La plupart de ces produits sont récoltés avec une humidité très élevée. Ils sont périssables car ils sont sujets à des contaminations diverses (moisissures, microbes, etc.) et doivent donc être vendus/consommés frais dans un délai très court. A défaut de cela, ils se détériorent et deviennent impropres à la consommation. Par ailleurs, dans les campagnes, les producteurs de fruits et légumes qui vivent de leurs petites parcelles de terrain, sont sujets aux fluctuations du marché, notamment lors des saisons de production où les prix baissent jusqu'à rendre la production déficitaire. Sécher permet à ces entrepreneurs ruraux d'allonger la durabilité des produits, de diminuer les pertes (qui peuvent parfois dépasser 50% de la production) et d'ajouter de la valeur à leurs produits,[3]

Les pays industrialisés ont donc intérêt à tenir compte des sources d'énergies de remplacement. C'est pour cette raison que le séchage solaire présente un tel intérêt pour les

Introduction générale

pays en voie de développement. Le séchage solaire est un moyen de transformation, de conservation et de valorisation de certains produits alimentaires. Il est utilisé à la fois dans le monde rural, dans le monde industriel à travers l'industrie, l'agroalimentaire avec des outils et des matériaux localement disponibles, les séchoirs solaires de type direct et indirect sont faciles à construire, et peuvent fonctionner par convection naturelle ou forcée. [4]

L'Algérie de par sa situation géographique (située entre le 19ème et le 38ème parallèle nord), constitue sur le globe terrestre une zone particulièrement bien ensoleillée. Aussi les moyennes annuelles d'ensoleillement varient entre 2600 h/an dans le Nord à 3500 h/an dans le Sud ainsi que Le potentiel énergétique est très important. En moyenne annuelle, il dépasse les 5 kWh/m²/jour au nord pour atteindre les 7 kWh/m²/jour , tout le problème est de piéger cette énergie solaire direct au lieu de laisser se dissiper, et d'en piéger le maximum. à travers les séchoirs solaires direct et indirect [5]

La ville de Ouargla est situé dans le sud de l'Algérie et connue par sa situation géographique (31,57 latitude nord, 5,44 longitude et altitude 141 m) sur une moyenne de 2600 à 3400 h par an, a reçu d'environ 1700-2200 kWh / m² / an de rayonnement solaire sur la surface horizontale d'où la disponibilité de cette source gratuite de l'énergie L'utilisation de cette énergie pourrait être très intéressante et peut être utilisée pour de nombreuses applications notamment le séchage solaire

Deux prototypes des séchoirs solaires convectifs de type direct et indirect sont conçus et réalisés par le groupe de recherches au niveau de laboratoire des Energies nouvelles et renouvelables dans les Zones Aride (LENREZA) de l'Université d' Ouargla . Une bonne partie de travail de groupe a été consacrée à mener des campagnes de mesures durant les saisons de l'année. Ces campagnes de mesures vont permettre d'analyser le comportement thermique des séchoirs solaires (à vide et avec produit) pendant plusieurs jours et aux différents mois de l'année. Les résultats des études expérimentales montrent que les conditions opératoires sont instables avec une dégradation des distributions spatio-temporelles des températures des composants de séchoir indirect avec des pertes thermiques considérables

Le séchoir solaire indirect nous offre des basse températures de séchage, il nécessite une amélioration énergétique pour assurer des conditions opératoires favorables,. L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans de capteur à air qui le réchauffent en fonction du débit utilisé. Ce type de séchoir peut être réalisé à des échelles diverses, et il est

Introduction générale

surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire ou dont le niveau de température doit être contrôlé ou maintenir selon les conditions de séchage

Le séchoir solaire direct à haute température de séchage avec une cheminée ventilée peut être exploité dans notre travail comme une bonne solution pour avoir une courte durée de séchage solaire, le séchage direct présente les avantages de protection des produits contre les insectes, il est soumis à un effet de serre au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température du produit à sécher, ce qui permet de diminuer notablement le temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels. Les inconvénients de ce type de séchoir sont liées à la perte du produit mal séché par exposition directe au soleil (destructions des certaines vitamines) et présente le risque de dépassement de température maximale admise par le produit qui est souvent due à la mauvaise circulation de l'air fréquente dans ce type de séchoir solaire

Le choix d'un type de séchoir et de ses dimensions est encore empirique et trop rudimentaire pour traduire la complexité des phénomènes physiques mis en jeu, l'opération de séchage est simple dans son principe et très complexe dans la compréhension exacte du processus; cette complexité est due au fait que le processus physique est fortement non linéaire, les phénomènes dominants dépendent des conditions de séchage et changent au cours du séchage et les processus d'échange et d'interaction sont compliqués [6]

La présente étude porte sur l'amélioration énergétique de procédé de séchage solaire convectif afin de maintenir des conditions opératoires favorables dans les séchoirs solaires de type indirect et direct pour valoriser divers produits alimentaires à haute valeur nutritionnelle (Les dattes deglet nour, les pommes de terre tranchées et les grains de fève), ces produits sont consommés en grande quantité dans notre région, l'amélioration est faite par l'intégration des appoints énergétiques (une résistance électrique et un échangeur de chaleur air-eau) pour stabiliser les conditions opératoires et améliorer l'efficacité énergétique des séchoirs solaires convectifs,

les essais de stabilisation des conditions opératoires sont réalisés par la mise en place des appoints énergétiques par trois techniques pratiques, le régulateur de température en mode constant, les panneaux photovoltaïques en régime variable et l'échangeur de chaleur (air-eau) couplé avec un simulateur d'eau géothermique en mode continue; ces techniques sont proposées pour rechercher les conditions optimales de bon fonctionnement des séchoirs solaires convectifs de type indirect à cet effet on a recours à une approche expérimentale qui

Introduction générale

consiste à étudier l'impact des différentes sources énergétiques intégrées sur l'amélioration des performances thermiques du séchoir solaire indirect et sur la qualité des produits séchés. notre étude est complétée par une analyse énergétique et une étude de faisabilité technico-économique

Cette thèse est organisée en cinq chapitres: le premier chapitre est une mise en situation qui présente le contexte de l'étude et l'état de l'art sur le séchage solaire les cinétiques de séchage et les différents types de séchoir solaires actifs et passifs

Le deuxième chapitre porte sur l'approche expérimentale du séchage solaire (types des séchoirs, appareillage de mesure, caractérisation des produits d'étude et protocole expérimentale du séchage des produits alimentaires

Le troisième chapitre est composé de deux parties, la première partie expérimentale présente les résultats de l'étude de stabilisation des conditions opératoires dans le séchoir solaire indirect par différents appoints énergétiques le régulateur de température, les panneaux photovoltaïques et l'échangeur de chaleur (air-eau), en utilisant différents produits agroalimentaires (dattes deglet nour ; pomme de terre tranchée , grains de fève) dans la deuxième partie nous analysons les résultats de test de qualité par évaluation de la couleur des différents produits séchés sous différents conditions opératoires en discutant les cas optimales point de vue qualité produits séchés et durée de séchage

Le quatrième chapitre énonce les principaux résultats de la modélisation mathématique des différents produits d'étude par l'application de plusieurs modèle en couches minces choisis dans la littérature pour le séchage de notre produit d'étude , et pour ajuster les données de séchage dans les modèles les plus appropriés par des méthodes statistiques en utilisant le logiciel (curve expert 1.4) .

Le cinquième chapitre énonce une analyse énergétique des systèmes de séchage expérimentés en déterminant les efficacités énergétiques et les fractions d'énergies fournies pour chaque système analysé, cette partie est complétée par une étude, même sommaire, de faisabilité technico-économique en discutant l'influence du prix d'achat des divers produits d'étude à l'état frais et leurs prix de vente à l'état séchés, sur le temps de retour sur investissement.

En fin dans une conclusion générale nous avons souligné les résultats significatifs portant sur la stabilité des conditions opératoires et l'amélioration énergétique des séchoirs solaires convectifs, ainsi les avantages des appoints énergétiques expérimentés avec des commentaires relatifs à la qualité des produits séchés et à l'étude technico-économique

Chapitre I
Etat de l'Art sur le
Séchage Solaire

I.1 Cadre du travail

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'opération de séchage de denrées alimentaires. Par définition, le séchage est une opération de séparation thermique consistant à retirer tout ou une partie d'un liquide imprégnant un produit dit "humide" par évaporation de ce liquide, généralement de l'eau. Le produit final est un solide, qualifié de "sec" même s'il contient une humidité résiduelle [7].

I.1.1 Séchage industriel dans le monde

L'opération de séchage thermique est une opération unitaire abondante dans de nombreux secteurs industriels. De nombreux produits solides sont obtenus et/ou mis en forme en présence d'une ou de plusieurs phases liquides non chimiquement liées au solide. Dans beaucoup de cas, la présence du liquide est indésirable du fait de son influence sur les propriétés mécaniques, biologiques et physico-chimiques du solide [8].

Ces produits sont donc séchés, durant le séchage thermique d'un produit, trois phénomènes couplés interviennent :

Un apport d'énergie au produit, l'évaporation de l'eau contenue dans le produit et l'évacuation de la vapeur générée. L'énergie apportée à cette opération doit être suffisante pour évaporer l'eau contenue dans le produit à sécher [9].

Il existe deux types possibles d'apport d'énergie à un produit que l'on souhaite sécher l'apport direct et l'apport indirect. Un apport indirect implique que les produits à sécher sont exposés à un flux d'air chaud, contrairement à un apport direct pour lequel les produits sont soumis à une exposition directe au soleil ou à des radiations [10.11].

On parle de séchage convectif lorsque qu'une ventilation forcée est appliquée pendant le Séchage [12]. L'opération de séchage thermique est utilisée dans la production de dizaine de milliers de produits et représente entre 12 et 25 % des dépenses énergétiques de l'ensemble de l'industrie au niveau mondial [13].

L'intensification de cette opération est donc importante tant d'un point de vue économique qu'environnemental [14].

L'amélioration de l'opération de séchage ne se limite cependant pas à cet aspect. En effet, les conditions de séchage influencent la qualité du produit séché. Il est donc indispensable d'en tenir compte [15].

I.1.2 Séchage dans l'industrie alimentaire

Le séchage de denrées alimentaires est une opération ancestrale utilisée pour la conservation des aliments et est aujourd'hui l'une des opérations les plus utilisées dans l'industrie

Le séchage de denrées alimentaires peut avoir différents objectifs [16–17]

- accroître la durée de conservation des produits (viandes, fruits, graines..)
- stabiliser les produits agricoles (riz, lait..) et amortir le caractère saisonnier de certaines activités
- transformer les produits par des réactions biochimiques ou biologiques (touraillage du malt, produits de salaison, ...)

De plus, le volume du produit séché est généralement plus faible que son volume d'origine, ce qui permet de diminuer les coûts liés à l'emballage et au transport [18].

Lors d'une opération de séchage, l'élévation de la température et une exposition à des débits d'air importants peuvent entraîner diverses altérations biologiques, chimiques et mécaniques du produit mécanique ou thermique [19].

I.1.3 Différents modes de séchage.

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur [20 21]. Ainsi, on distingue:

- le séchage par conduction où l'échange de chaleur se fait par contact entre la surface du matériel chauffant et le produit. Il est très utilisé dans l'industrie du textile et de la papeterie.
- le séchage convectif où le produit est séché par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur appelé agent séchant. Il se produit un échange de chaleur et de matière entre le produit et son milieu environnant. Il représente plus de 85% des séchoirs [22] et est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire.
- le séchage par infrarouge qui permet un chauffage rapide des produits en couches minces ; la faible pénétration des IR dans le produit fait qualifier ce séchage de chauffage surfacique, la chaleur absorbée diffusant ensuite dans le produit par conduction. Il est très appliqué dans l'industrie des vernis, des peintures et des pellicules photographiques.
- le séchage par micro ondes où le transfert se fait grâce aux propriétés diélectriques des matériaux. L'eau est très réceptive à ce type de chauffage. Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Il est appliqué aux séchages d'encre, de peinture, des adhésifs et au séchage sous vide des produits pharmaceutiques.
- la lyophilisation où le séchage se produit en dessous du point triple de l'eau par sublimation (passage direct de la matière congelée de l'état solide à l'état vapeur). La vapeur est alors enlevée de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des

éjecteurs à jet de vapeur. Ce mode de séchage est plus utilisé pour les matériaux biotechnologiques, pharmaceutiques et les aliments dont on cherche à conserver

- le séchage solaire utilise l'énergie des rayonnements solaires pour chauffer le produit et l'air environnant. On peut utiliser des capteurs solaires pour capter et/ou concentrer le rayonnement solaire, assurant ainsi une augmentation de la température de l'air. Il est de plus en plus utilisé dans le domaine agro-alimentaire. Tous ces modes de séchage à l'exception du séchage solaire, engendrent un coût énergétique et des équipements pour la fourniture en énergie qui peuvent rendre leur application difficile, coûteuse et voire impossible dans certaines régions; surtout dans les Pays en développement (PED). Le séchage solaire est donc le mode le plus adapté pour les PED ce d'autant plus que la plupart de ces pays possèdent un potentiel énergétique solaire assez important [23]

I.1.4 Période de séchage

La vaporisation de l'eau s'effectue en surface du produit. Le transfert de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit conditionne fortement la vitesse de séchage et explique la forme des courbes d'évolution en fonction du temps. [24 25]. De fait, pour comprendre les phénomènes de migration de l'eau dans les produits humides, on doit considérer simultanément les transferts de masse et de chaleur dans toutes les phases (solides, vapeur et liquide), qui tiennent tour à tour un rôle prépondérant. Sur la figure (1.1), on peut distinguer plusieurs phases dans le phénomène de séchage. La courbe (a) présente l'évolution de la teneur en eau (rapport de la masse d'eau contenue dans le produit et de la masse sec) d'un produit soumis à un séchage convectif. On y distingue trois phases, également visibles sur la courbe (b) donnant la vitesse de séchage en fonction du temps et la courbe (c) illustrant l'évolution de la température du produit en fonction du temps.

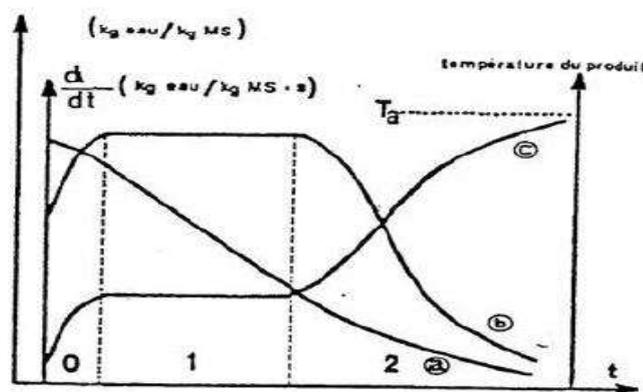


Figure (I.1) : (a) Courbes d'évolution type au cours du temps de la teneur en eau du produit, (b) de la vitesse de séchage, (c) de la température du produit

Phase 0 : Période de mise en température

Quand un produit à une température de surface T_s est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation.

Phase 1 : Période à allure constante.

Cette phase n'existe que si une pellicule d'eau libre existe en surface du produit. L'activité de l'eau à la surface du produit (a_{ws}) est alors égale à 1 et le séchage consiste en une évaporation isenthalpique de l'eau. La température de surface du produit correspond à la température humide T_h de l'air asséchant. C'est la température à laquelle le flux de chaleur amène par l'air est égal au flux thermique nécessaire à l'évaporation de l'eau. La vitesse de séchage dépend uniquement des conditions externes telles que l'humidité de l'air, sa température sèche et sa vitesse de circulation.

Phase 2 : Période de ralentissement

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage. Le ralentissement de la vitesse de séchage est dû aux contraintes de la migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface.

○ Disparition de l'eau libre en surface du produit

Ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectuent consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.

○ L'épaisseur du produit

Si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie le ralentissement de l'allure de séchage.

○ La diffusivité de l'eau dans le produit.

Elle varie avec la teneur du produit en eau. Plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

○ La résistance mécanique de parois cellulaires intactes.

Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

o Le croutage

Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (phase I) et sont déposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés rendent imperméables la surface du produit.

1.1.5 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage**➤ Influence de la température de l'air**

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air est élevée. Par conséquent, les conductivités de l'eau dans le produit deviennent importantes.

➤ Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible

➤ Influence de l'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits, il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente. [26].

1.1.6 Types de modifications de la qualité du produit séché**1.1.6.1 Modifications biochimiques dues à la température**

L'exposition pendant une certaine durée d'un produit biologique à une température de séchage élevée peut provoquer des modifications dans sa composition chimique. Ces modifications, généralement considérées comme indésirables, sont nombreuses. Mais les plus importantes sont les suivantes: [27]

- o Réactions de Maillard, c'est-à-dire brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides. Outre le brunissement, ces réactions entraînent une perte nutritionnelle.
- o Oxydations de matières grasses (rancissement).
- o Destruction de vitamines.
- o Dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant.

- Réactions enzymatiques : Si les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable ou par la température au cours du séchage, elles produisent leurs effets de brunissement des poly phénols ; hydrolyse des lipides, etc....

I.1.6.2 Pertes d'arôme

Le séchage est un procédé de séparation basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau contenue dans le produit à sécher ne sera pas éliminée toute seule, mais avec tout autre produit volatil existant également dans le produit. Dans la plupart des cas, il s'agit des arômes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation.

I.1.6.3 Modifications physiques et mécaniques des produits séchés

Le séchage provoque diverses altérations physiques et mécaniques du produit, se traduisant par

- des modifications de la taille et de la forme des produits : Les solides se recroquevillent et peuvent parfois se fissurer, sans que ces déformations ne soient généralement annulées lors de la réhydratation.
- Le séchage provoque des modifications physiques telles que des migrations de solutés vers la surface, des fusions et des migrations de matières grasses et des cristallisations

I.2 Généralité sur le Séchage solaire.

Le séchage solaire est la plus ancienne méthode utilisée par les hommes pour conserver les aliments. Dans les pays en développement où les pertes des produits agro-alimentaires sont importantes et où la disponibilité des énergies conventionnelles est faible, le séchage solaire constitue une solution adéquate et adaptée pour résoudre le problème de conservation et de transformation des produits. Le séchage solaire traditionnel (à l'air libre) est largement utilisé par les producteurs dans les Pays en Développement mais il présente quelques limites : temps de séchage long, grande surface de séchage, dépôt de poussières et particules sur les produits, exposition aux insectes et autres animaux, perturbations climatiques (pluie, vents etc...). Le séchage solaire traditionnel doit donc être amélioré pour réduire la durée du séchage et assurer la bonne qualité des produits. Ceci passe par la conception de séchoirs solaires adaptés au contexte local en prenant en compte l'environnement météorologique de ces pays. [28 , 29], évidemment, l'ensoleillement, l'humidité, le vent et la température affecteront les performances du séchoir. A nos jours, le séchage d'un ensemble de produits tels que le bois ou les produits agricoles comme les dattes, les tomates, les pommes de terre, les grains de fève, etc. de natures hygroscopiques, connaît une évolution importante. Un produit est dit hygroscopique lorsqu'il est susceptible de perdre ou de reprendre de l'humidité en fonction

des caractéristiques de l'air. Ce caractère hygroscopique génère trois contraintes principales.

-les attaques d'insectes ou de champignons

-les défauts (retraits, fentes, déformations comme c'est le cas du bois)

-des difficultés de transformation et de perdre de la qualité nutritive pour les produits agroalimentaires.

Le séchage permet de limiter ces phénomènes et confère aux produits une certaine durabilité et qualité. Au-delà de ces enjeux techniques, le séchage doit aussi répondre à des enjeux économiques (possibilité de se démarquer et de répondre aux besoins du marché) et des enjeux réglementaires. En effet, des contraintes techniques et réglementaires sont également mises en jeu, et permettent de répondre à des contraintes économiques, à savoir la possibilité de développer des produits plus élaborés et de très bonne qualité, de répondre aux attentes du consommateur et de valoriser des produits [30]

Le séchage des produits alimentaires a fait l'objet de plusieurs recherches, notamment: la pomme de terre [31 Diamante, et al. ,1993] [32Youcef-Ali, 2001] [33Hassini, et al. ,2007] [34Tripathy, et al. ,2009], la tomate [35Movagharnjad, et al. ,2007] [36Nadir, et al. ,2008], les haricots [37Nitz, et al. ,2004] [38 G. Hashemi et al, 2009], green peacs [39 D. B. Jadhav,2010] [40 Sunil ,et al 2013] , La spirulina (*Arthrospira platensis*) [41 Desmorieux, et al. ,2005] [42 Dissa, et al. ,2010], Dattes [43 Boubkrie et al 2009] , [44 S Chouicha et al 2014] [45 M.A. Basunia et al 2009] , le pistache [46Midilli, 2001] [47Zangiabadi, et al. ,2007], le abricot [48Togrul, et al. ,2002] [49Akpınar, et al. ,2004] [50 Bozkır, et al. ,2006], la pomme [51Chiang, et al. ,1987] [52 Menges, et al. ,2006] [53 Białobrzewski, 2006] et beaucoup d'autres produits

1.3Classification des séchoirs solaires

Les séchoirs solaires sont généralement classés en deux grandes catégories : Les séchoirs solaires passifs (convection naturelle) et les séchoirs solaires actifs (convection forcée). Dans chacune de ces catégories, trois familles de séchoirs solaires sont identifiées en fonction de la façon dont l'énergie de radiation arrive dans la chambre de séchage: les séchoirs solaires directs, les séchoirs solaires indirects et les séchoirs mixtes et hybrides (Kreider et al. [54] Dans les séchoirs directs (Fig. I.2), la chaleur est générée par absorption des radiations solaires sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage (Sharma et al, 2009) [55]. Pour ce type de séchoir, le capteur solaire est directement intégré dans la chambre de séchage. Les séchoirs solaires directs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher. La forme la plus courante

est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la localité et orienté généralement au Sud

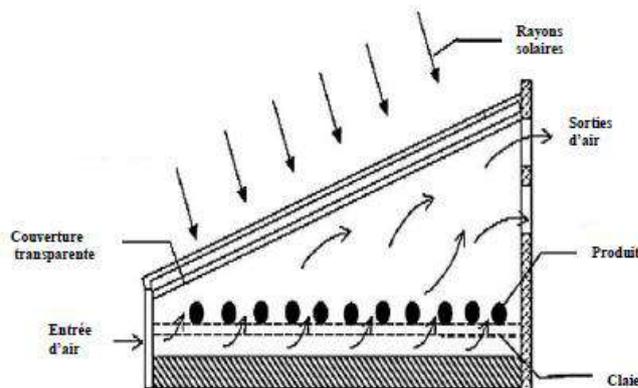


Fig. (1.2) Séchoir solaire direct passif (Sharma *et al.*, 2010).

Dans les séchoirs solaires indirects (Fig. 1.3), les radiations n'arrivent pas directement sur les produits à sécher. L'air est d'abord chauffé dans un collecteur solaire, constitué d'une surface vitrée située au dessus et d'une surface absorbante, généralement peinte en noir, puis conduit dans la chambre de séchage pour sécher le produit (57Rabl, 1985) [63]. Le capteur solaire est généralement un module à part qui se fixe sur la chambre de séchage pendant l'exposition au soleil et dont l'inclinaison a pour but de maximiser le captage de l'énergie solaire.

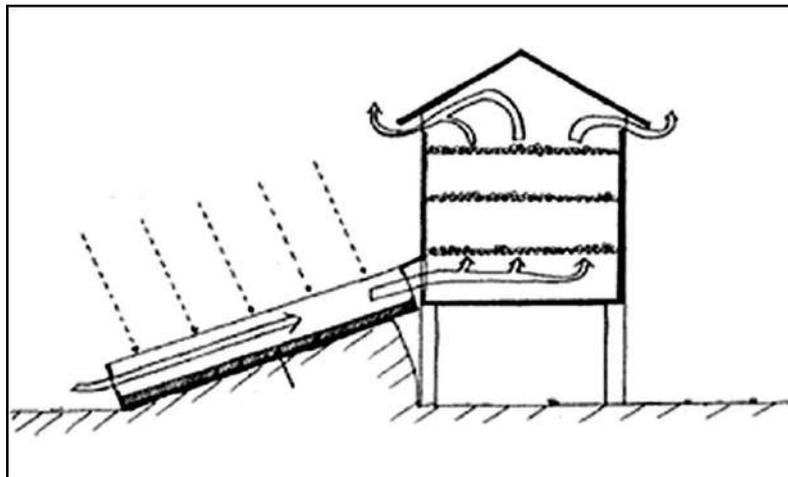


Figure (1.3) :Séchoir solaire indirect passif (Rabl, 1985).

Les séchoirs solaires mixtes (Fig. 1.4) associent les principes des séchoirs direct et indirect. Les produits subissent l'action combinée des radiations solaires et de l'air réchauffé dans un capteur placé en dessous de la chambre de séchage. Pour les séchoirs mixtes, les surfaces

supérieures de la chambre de séchage et du capteur sont couvertes par des vitres ou des films transparents.

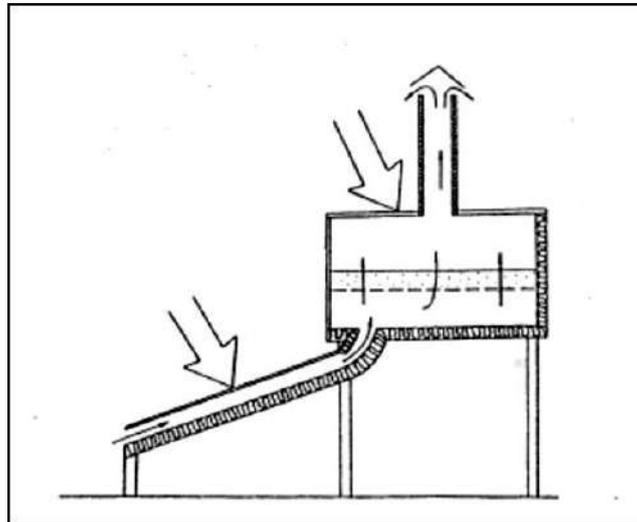


Figure. (1.4) Séchoir solaire mixte passif (Ekechukwu *et al.*, 1999) [58]

Il existe aussi des séchoirs hybrides qui utilisent, en plus de l'énergie solaire une autre source énergétique consommatrice de réserves fossiles ou de courant électrique pour suppléer au chauffage et/ou à la ventilation. Ces types de séchoirs sont souvent utilisés pour des produits qui ne tolèrent pas des températures en dessous d'un certain seuil ou une humidité de l'air trop importante. Le choix d'un type de séchoir solaire n'est pas chose aisée, car il dépend de plusieurs critères (produits, coût, maintenabilité...). Quelques études comparatives ont été menées pour aider l'utilisateur en lui donnant les avantages et les inconvénients de chaque type. (annexe 01)

1.4 Etude comparative des différents types de séchoirs solaires

Des études ont été menées par certains auteurs pour comparer les vitesses de séchage, les coûts de séchage, la maintenance et la manipulation des différents types de séchoirs solaires (59 Gikuru et Njoroge, 2006 ; 60 Simata, 2003). [65 66] Il ressort de ces études que les séchoirs solaires indirects sont plus efficaces que les séchoirs solaires directs mais présentent l'inconvénient d'être moins compacts, plus délicats à manipuler et à maintenir (Gikuru *et al.*, 2006). Selon Simata (Simata, 2003), qui a modélisé et comparé les coûts des séchoirs solaires mixtes et indirects, le coût d'exploitation annuel du séchoir solaire mixte est inférieur à celui du séchoir direct. L'application de son modèle pour le séchage de 90kg de maïs a permis d'obtenir pour la même largeur de capteur solaire, une longueur de 1,8m pour le mode mixte et de 3,3 m pour le mode indirect et un coût annuel de 12,76 US dollars pour le séchoir mixte contre 16,05 US dollars pour le séchoir indirect. En résumé, les séchoirs indirects sont plus

rentables sur le plan économique que les séchoirs directs mais le sont moins que les séchoirs mixtes. Pour améliorer les séchoirs solaires classiques d'autres modèles plus ou moins adaptés à l'environnement et aux besoins des utilisateurs ont été développés.

1.5 Quelques concepts et éléments de conception d'un séchoir solaire.

Le caractère particulier de l'énergie solaire (sa variabilité et son indisponibilité à certaines heures de la journée) est à l'origine de la conception de certains types de séchoirs. C'est ainsi que certains chercheurs ont conçu des séchoirs dont les capteurs ont plusieurs angles d'inclinaisons en vue de limiter l'impact de la variabilité de l'énergie solaire sur le séchage (61 Aboul-Enein *et al.*, 2000; 62 Jain, 2004). D'autres proposent des séchoirs dont l'inclinaison du capteur est variable (63 Gikuru *et al.*, 2006). Pour assurer la continuité du séchage pendant les heures de non ensoleillement, des séchoirs dotés des dispositifs de stockage d'énergie ont été conçus et expérimentés (65 Jain, 2005; 64 Shanmugam *et al.*, 2005).

La figure 1.5 présente un exemple de séchoir doté d'un dispositif de stockage d'énergie. Ce séchoir est doté de 2 capteurs: un premier capteur horizontal (capteur 1) placé sous la chambre de séchage et qui reçoit les rayons solaires issus d'un polygone réfléchissant, et un deuxième capteur incliné de 30° (capteur 2) placé au dessus de la chambre de séchage et qui reçoit directement les rayons solaires. Ce dernier transmet la chaleur captée à un accumulateur de chaleur (matériaux de stockage) pour assurer la continuité du séchage pendant les heures de non ensoleillement. Ce type de séchoir est plus adapté pour des produits dont le lit de séchage est transversal (l'air circule perpendiculairement aux surfaces des produits) et par conséquent son application pour des produits de faibles épaisseurs est inefficace. Par ailleurs, le dispositif de stockage et le calcul des angles du polygone compliquent sa maintenance en cas de défaillance. En plus, ce séchoir n'optimise pas le captage du rayonnement solaire direct car son deuxième capteur a un seul angle d'inclinaison. [67 68]

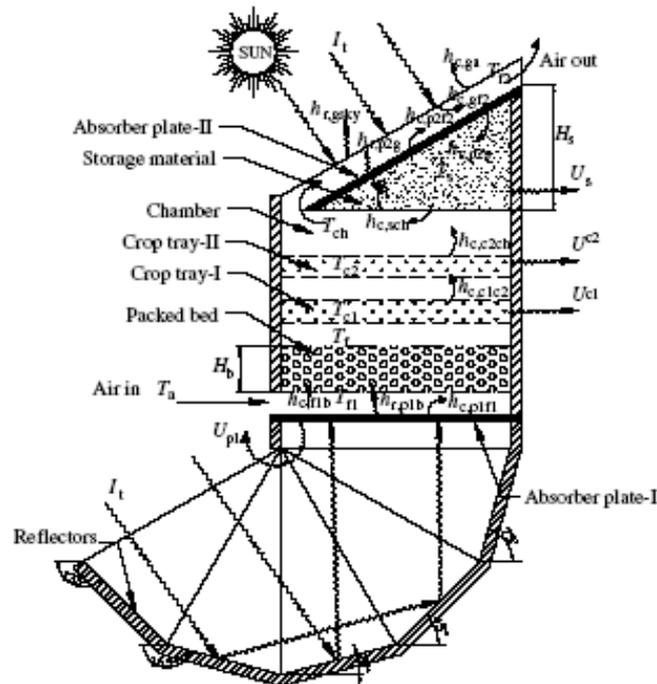


Fig. (1.5) :Séchoir solaire doté d'un dispositif de stockage d'énergie (Jain, 2005)

Gikuru *et al.*, (2006) ont conçu un séchoir solaire doté d'un dispositif qui permet d'ajuster manuellement l'angle d'inclinaison par incrément de 15° (Fig. 1.5). Ce séchoir a permis de réduire de façon considérable le temps le séchage du café qui était passé de 7 à 2 jours. La difficulté avec ce séchoir est qu'il nécessite la présence permanente d'un opérateur pour faire varier l'angle, et des claies spéciales pour retenir le produit à sécher pendant le mouvement de rotation.



Fig. (1.6) :Séchoir à inclinaison variable (Gikuru *et al.*,2005).

Des modèles de séchoirs solaires directs améliorés ont également été proposés pour optimiser le captage de rayonnement. Kherrou et al. (69 Kherrou *et al.*, 2008) ont réalisé et modélisé un séchoir solaire direct composé de 2 vitres latérales et trois vitres inclinées de 15° , 35° et

55° (Fig. 1.6). Ces angles ont été obtenus en déterminant l'inclinaison optimale des capteurs en fonction des numéros de jours de l'année. Trois journées réparties dans l'année ont été retenues pour déterminer ces 3 angles. La vitre inclinée de 55° est conçue pour maximiser le captage pendant la période froide, la vitre inclinée de 15° permet d'optimiser la transmission pendant la période estival et la vitre inclinée de 35° joue le rôle intermédiaire.



Figure. (1.7) : Séchoir solaire direct amélioré (Kherrou *et al.*, 2008).

Ce séchoir a permis d'avoir un captage d'énergie supérieur à celui des séchoirs solaires directs avec un seul angle d'inclinaison, mais ce gain est relativement faible, ce qui peut avoir pour conséquence de diminuer la performance globale du séchoir.

Les séchoirs présentés (Fig I.2. à 1.7) restent des prototypes de laboratoire parce que l'utilisateur, que l'on doit satisfaire, n'a pas été associé à la conception.

L'objectif visé par les concepteurs de ces modèles de séchoirs solaires est d'optimiser le séchage solaire des produits. Mais cet objectif ne peut être atteint que pour une famille très réduite de produits pour lesquels ces séchoirs ont été conçus.

1.6 Evaluation des séchoirs solaires

Tester un séchoir est nécessaire pour évaluer ses performances techniques et fournit une base de comparaison avec les autres séchoirs, et peut aider les industriels à améliorer leurs designs et ainsi permettre aux usagés de sélectionner le séchoir approprié. Les paramètres du produit comme: les propriétés physiques (dimension, densité,....etc.) humidité du produit et coefficient de transfert de masse et de chaleur entre le produit et l'air asséchant changent tout le long du processus de séchage. De plus ces paramètres sont influencés par les conditions

externes au produit comme la température, l'humidité et le flux de l'air asséchant de même que la composition chimique du produit [70]. Chaque produit tolère une température maximale qui dépend du type de produit (légumes, fruits, céréales....etc.), utilisation du produit séché, degré d'humidité et degré de maturité [71].

Les procédures de test standard des capteurs solaires à air et à eau existent dans la littérature [72 , 77]. Néanmoins, les tests standard d'évaluation des performances des séchoirs solaires font défauts [78]. Ceci est du aux différents designs de séchoir, matériaux utilisés, conditions opératoires, préférence du consommateur ou du client et la qualité du produit séché. (Grupp et al, 1995) [79] ont présenté une méthode d'évaluation et de comparaison de séchoir solaire. Le but de ces tests était d'évaluer les différents séchoirs d'après les perspectives des usagés. Ils ont testé six types de séchoir solaire (séchoir à box circulaire, séchoir à claies, séchoir cabinet, séchoir tunnel, deux types de séchoir à cheminée). Les paramètres d'évaluation utilisés sont: type et dimension du séchoir, surface du capteur, surface des claies, température et temps de séchage, humidité du produit, qualité du produit séché et la convenance de la manipulation. En général il n'existe pas de procédure particulière d'évaluation des séchoirs. Les séchoirs sont évalués en mesurant et en comparant certains paramètres sélectionnés (Reddy, 1985) [74] note que la fixation d'un test standard rigide pour les systèmes solaires afin d'améliorer leur design et leur performance demande beaucoup d'expériences qui consomment beaucoup de temps et de moyens. Donc, le test standard doit être assez souple et modulable afin de prendre compte des différents types de séchoir ainsi que les différents modes opératoires et ne devrait pas être trop élaboré car le test process devient très laborieux et très cher. Selon (Nonhebel, 1971) [76] la sélection d'un type de séchoir, représente un compromis entre le coût du séchoir, qualité du produit, temps de séchage et convenance de l'installation et de la manipulation. Les paramètres généralement reportés lors de l'évaluation d'un séchoir [70] se résument comme suit:

1.6.1 Caractéristiques physiques du séchoir:

- * Type, forme et dimension du séchoir
- * Capacité du séchage/ densité de charge
- * Surface de la claie et nombre de claie (applicable)
- * Convenance de la charge et décharge des produits

1.6.2 Performances thermiques

- * Temps de séchage et vitesse de séchage
- * Température et humidité de l'air asséchant
- * Flux de l'air asséchant

* Efficacité du séchoir

1.6.3 Qualité du produit séché

* Qualité organoleptique (couleur, saveur, goût, arôme, texture)

* Eléments nutritifs

* Capacité de réhydratation

1.6.4 Coût du séchoir et temps d'amortissement.

Pour enlever l'eau, il faut fournir une certaine quantité d'énergie. Une partie de celle-ci, l'électricité du ventilateur ou l'énergie utilisée par l'appoint est payante, de même la main d'œuvre pour la charge et décharge des produits et le suivi de l'opération de séchage est rémunérée, ajouté à cela le prix de revient des produits frais à sécher; l'ensemble constitue les coûts de fonctionnement du séchoir. Le coût d'investissement représente le prix du séchoir complet. L'ensemble des coûts de fonctionnement et d'investissement représente le coût du séchoir. Le temps d'amortissement représente le temps nécessaire pour que l'ensemble des bénéfices annuels réalisés par le séchoir soit égal à l'investissement initial (coût du séchoir).

I.7 Etude bibliographique sur les modèles de séchage des produits agroalimentaires

Les premiers travaux scientifiques sur le séchage datent des années 1920, avec tout d'abord Lewis (1921), puis Sherwood qui, en 1929, propose une équation de diffusion avec un coefficient de diffusion constant pour décrire le séchage.

Ce n'est qu'en 1937, dans les travaux de Ceaglske et Hougen, qu'apparaissent le rôle capital joué par le séchage et les limitations de l'écriture purement diffusive.

I.7.1 Définition de modélisation mathématique du séchage

La modélisation mathématique du séchage est une traduction des différents phénomènes physique conjugué à l'opération de séchage solaire soit transfert de masse, transfert de chaleur, et changement de l'humidité...etc. à des équations mathématique.

I.7.2 Le rôle de modèles mathématique du séchage

Le modèle de la cinétique de séchage s'appuie sur une formule empirique dit « modèle phénoménologique ». Ce modèle est généralement intéressant, pour estimer la valeur de la teneur en eau du produit à n'importe quel moment durant la processus du séchage, et ce après l'affectation de certains paramètres, comme la température de l'air chaud, l'humidité relative, et la vitesse de l'air. [77]

I.7.3 Classification des modèles de séchage

Les modèles de séchage sont classés en trois types :

I.7.3.1 Les modèles diffusifs

Ces modèles qui ont constitué le point de départ de la théorie de séchage, sont basés sur la loi de Fick. Cette dernière décrit l'origine des mouvements moléculaires par l'équation suivante :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (D \cdot \vec{\nabla} X) \dots \dots \dots (I.1)$$

D : est le coefficient de diffusion massique du produit qui est fonction de l'humidité,

X : humidité du produit,

t : temps.

Neumann et Sherwood ont été les premiers à avoir utilisé les modèles diffusifs dans le cas monodimensionnel. En supposant la diffusivité massique constante, ainsi l'équation (I.6) devient :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \dots \dots \dots (I.2)$$

I.7.3.2 Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse

Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse sont les modèles qui ont détaillé plus les différents phénomènes mis en jeu au cours du séchage. Ils ont permis de séparer les phénomènes de transport internes en utilisant tout un ensemble d'équations de conservation de masse et de chaleur. Les travaux de Luikov, Philip et De Varies, Krischer, Glaser et Whitaker [78] ont utilisé ce type de modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse.

I.7.3.3 Les modèles semi- empiriques et empiriques

Ces modèles sont basés essentiellement sur l'expérimentation pour la détermination des paramètres de séchage. Toutefois, l'utilisation de ces modèles est très limitée pour les raisons que chacun d'eux est spécifique à chaque type de produit ainsi aux conditions expérimentales du séchage, chose qui ne permet pas l'extrapolation au delà des limites de l'expérience. Le tableau ci-dessous résume les modèles mathématiques les plus couramment employés qui ont été développés par différents auteurs pour les courbes de séchage.

Tableau (I.1): Modèles mathématiques développés par différents auteurs pour les courbes de séchage [79,80].

N° de modèle	Equation	Appellation
01	$XR(t) = \exp. (-k t)$	Newton
02	$XR(t) = \exp. (-k t^n)$	Page
03	$XR(t) = \exp. (-k t)^n$	Page modifié
04	$XR(t) = A \exp. (-k t)$	Henderson et Pabis
05	$XR(t) = A \exp. (-k t) + B$	Logarithmique
06	$XR(t) = A_1 \exp. (-k_1 t) + A_2 \exp. (-k_2 t)$	Deux termes
07	$XR(t) = 1 + A_1 t + A_2 t^2$	Wang et Singh
08	$XR(t) = A \exp. (-k t) + (1 - A) \exp. (-kbt)$	Approche diffusion
09	$XR(t) = A \exp. (-k_1 t) + (1 - A) \exp. (-k_2 t)$	Verma
10	$XR(t) = A_1 \exp. (-k_1 t) + A_2 \exp. (-k_2 t) + A_3 \exp. (-k_3 t)$	Henderson et Pabis modifié
11	$XR(t) = A \exp. (-k t) + (1 - A) \exp. (-A k t)$	Deux termes exponentiels
12	$XR(t) = A_1 \exp (-kt^n) + A_2 t$	Midilli et autres

I.7.4 Développement des modèles de séchage des produits agroalimentaires

Des travaux de recherche importants ont été signalés dans la littérature sur la modélisation de séchage en couche mince de différents produits agricoles :

(T. L. Togrul, & D. Pehlivan, 2003[81]; A. Belghit, & al, 2000[82]; A. A. El-Sebaii, & al, 2002[83]; C. Ertekin, & O. Yaldiz, 2004[84]; P.C. Panchariya, & al, 2002[85]).

La plupart des études précédemment rapportées ont été basées sur le séchage en couche mince des produits tels que les fruits, et les légumes,

I.7.5 Procédure d'analyse des données

La procédure d'analyse des données qu'on a suivie consiste à calculer les valeurs des paramètres du modèle examiné, les valeurs des coefficients de corrélation et l'erreur standard appliquée aux différentes températures de l'air. Ensuite on tracera les figures représentant les points mesurés et l'estimation de chaque modèle à différentes températures.

Les calculs d'analyse et les représentations graphiques correspondantes (figures d'analyse des résidus, figures représentatives) ont été effectués à l'aide du logiciel CurveExpert 1.3 utilisant une technique de régression non linéaire.

La méthode utilisée est dite de Levenberg-Marquardt, pour plus d'informations. Cette même logique d'analyse a été utilisée par Lamharrar A. et al. (2005) [85].

I.7.5.1. Analyse de régression

I.7.5.1.1. Définition : L'analyse de régression est une méthode statistique qui repose sur l'étude de la corrélation entre variables et qui est souvent utilisée comme outil au service de la prédiction. Dans le cas le plus simple, on étudie la relation linéaire entre une variable indépendante (ou prédicteur) et une variable dépendante (critère) afin de déterminer si la connaissance des résultats relatifs à la première permet de prédire, avec un degré de précision satisfaisant, les résultats que l'on devrait observer à propos de la deuxième. Ce type de prédiction est réalisé à l'aide d'une équation (dite équation de régression), dont les paramètres sont définis en fonction des caractéristiques statistiques (moyennes, écarts-types et coefficient de corrélation) des deux variables considérées.

Pour les courbes appropriées de régression, l'erreur utilisée est déterminée par l'erreur standard et le coefficient de corrélation. Ces outils ne sont pas parfaits, mais ils donnent une évaluation utile de la performance de la forme de la courbe.

I.7.5.1.1.2. Erreur standard d'évaluation :

L'erreur standard sera strictement positive, avec une plus petite erreur standard qui représente la meilleure forme de la courbe. Elle est définie comme suit :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{point}} (y_i - f(x_i))^2}{n_{points} - n_{param}}} \quad (I-3)$$

Où $y=f(x_i)$ dénote la valeur calculée par le modèle de régression, y_i dénote les données mesurées, et le n_{param} est le nombre de paramètres dans le modèle particulier (afin que le dénominateur soit le nombre de degrés de liberté). L'erreur standard d'évaluation mesure

l'étendue des données mesurées autour de la courbe de la régression. Pour une meilleure qualité du modèle, l'erreur standard doit s'approcher de zéro.

I.7.5.1.1.3. Le coefficient de corrélation

Une autre mesure de la performance de la forme de la courbe est le coefficient de corrélation. Pour expliquer la signification de cette mesure, nous devons revenir aux données pointe et définir la déviation standard qui mesure l'étendue des données autour de la moyenne :

$$S_t = \sum_{i=1}^{n_{point}} (\bar{y} - y_i)^2 \tag{I-4}$$

Où la moyenne des données pointe \bar{y} (y bar) est donné simplement par :

$$\bar{y} = \frac{1}{n_{point}} \sum_{i=1}^{n_{point}} y_i \tag{I-5}$$

La quantité S_t considère l'étendue autour d'une ligne constante (la moyenne) par opposition à l'étendue autour du modèle de la régression. C'est l'incertitude de la variable dépendante avant régression. Nous définissons aussi la déviation de la courbe appropriée comme :

$$S_r = \sum_{i=1}^{n_{point}} (y_i - f(x_i))^2 \tag{I-6}$$

Notez la ressemblance de cette expression à l'erreur standard de l'évaluation donnée au-dessus; cette quantité mesure également l'étendue des points autour de la fonction appropriée. Donc, l'amélioration (ou réduction de l'erreur) à décrire les données par un modèle de régression peut être mesurée en soustrayant les deux quantités parce que la magnitude de la quantité est dépendante sur l'échelle des données, cette différence est normalisée pour céder :

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} \tag{I-7}$$

Où r est défini comme le coefficient de la corrélation. Comme le modèle de régression non linéaire décrit mieux les données, le coefficient de la corrélation approchera d'unité.

I.7.5.1.1.4. Fonction Chi-2 : Se prononce "Qui-deux".

Ce terme se rencontre partout en modélisation de données. Il recouvre plusieurs réalités, étroitement liées, mais différentes. Il est défini comme suit :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{point}} (y_i - f(x_i))^2}{n_{points} - n_{param}} \quad (I-8)$$

I.8 Evaluation technoeconomique d'un procédé de séchage solaire

Dans le monde réel, le facteur économique a une influence très importante dans le choix de toute conception technique.

Généralement, un projet doit être présenté en termes de coût d'investissement et de rentabilité, ce qui guide le développement du système. le coût est un facteur très volatil; Par conséquent, toute analyse technico-économique n'est pas absolue, mais soumise à des contraintes économiques régionales et temporelles. L'analyse technique-économique commune des systèmes thermiques est appelée analyse thermo-économique qui combine la méthode de l'analyse énergétique et l'analyse économique. Bien que la thermo-économie (analyse énergie / coût) donne une réponse précieuse pour la conception et la sélection des processus et des systèmes en ingénierie, cette méthode est très liée à la fluctuation de l'économie. [86]

I.8.1 Objectif de projet

La vitesse de corruption est la principale raison qui force l'agriculteur de vendre la récolte même si les prix sont faibles et peu rentable pour l'agriculteur, à cause de la teneur en eau élevée, ce qui rend ces récoltes vulnérable aux dommages mécaniques pendant les opérations de transport et de la circulation et de l'infection fongique en l'absence des réfrigérateurs out de post-récolte. alors les objectifs pour éviter ces problèmes sont :

- De compenser le manque d'usines de transformation des aliments ou des réfrigérateurs de légumes et de fruits pour éviter la vente de la récolte à bas prix aux grossistes dans les périodes de crise du marché, et de faciliter la fabrication et l'exportation avec des prix élevés pour maintenir l'équilibre du marché.
- Couvrir la demande pour les récoltés sèches en Europe et d'autres continents à cause de la facilité du processus et compte tenu de la difficulté d'exporter des récoltes fraîches.
- L'augmentation de la quantité et la valeur des exportations de fruits et de légumes fabriqués avec les pays développés.
- Renforcer les petits exploitants horticoles et les travailleurs dans les activités agricoles et les aidant à obtenir des prix plus élevés en offrant une nouvelle façon de marketing et d'ouvrir de nouveaux marchés. [87]

I.8.1 Intérêts technologiques de projet

Techniquement et technologiquement, c'est l'occasion de soulever certaines des compétences des agriculteurs et leur enseigner des façons d'économiser et de sécher leurs légumes, ces compétences sont nécessaires pour leur permettre d'accroître leur revenu.

I.8.1.2 Intérêts sociologiques du projet

Du point de vue social, cette méthode peut développer de divers aspects vital des travailleurs dans les secteurs de l'industrie, la production et l'exportation de produits agricoles à travers:

- L'optimisation des intérêts des petits entrepreneurs dans le domaine d'agriculture par des nouvelles méthodes qui empêche les monopolistique et les grossistes de contrôler les petits fermiers, rétablissant ainsi la rentabilité et répartition des intérêts justement entre les producteurs et les commerçants.
- La réduction de taux de risque dans l'agriculture à cause de la disponibilité de nouveaux outils de production. [87]

I.8.2 Etude de marché**I.8.2.1 Etude de marché et présentation de produit**

Ce projet devrait succès pour fournir les matières premières surtout dans les centres et les villages qui seront détenus par le projet, en particulier dans les lieux qui ont un manque d'usines d'emballages alimentaires et qui ont des agriculteurs en contact avec l'usine en raison du prix d'exportation élevé par rapport au prix habituel des ventes aux grossistes.

D'autre façon, ce succès est en croissance par le marketing des produits séché, et en particulier dans les marchés européens, et au futur il sa sera des contrats avec un certain nombre d'exportateurs pour vendre la récolte après séchage aux marchés externes.[88]

1.8.2.2 La commercialisation de projet

Ce qui augmente les chances de succès de ce projet est le manque de compétition dans l'exportation puisque la majorité des produit exportées soient frais, ainsi que la difficulté de vendre de produit séché directement auprès les petits agriculteurs aux exportateurs de à cause des coûts élevées du marketing direct et de la difficulté de paiement à long terme.

Même si tout cela est aux portées des agriculteurs, ils ne possèdent pas les relations propres comme les propriétaires d'usines et les exportateurs tout cela signifie que les chances de succès de ce projet seront élevées.

La commercialisation peut se décomposer en deux éléments distincts : l'aval et l'amont du séchage, autrement dit en amont les études de marchés qui doivent précéder la vente et en aval la promotion et la distribution du produit séché peut se faire avec quelques conditions :

1. assurer la préservation de qualité de produit pendant le transport .
2. discuter la qualité de produit séché destiné à l'exportation ou au marché local car les exigences de qualité seront très différentes.
3. pour le marché international, les règles et les exigences de qualité se différent ?
4. voir pour le marché local, le prix de vente accepté par le consommateur et la quantité et l'emballage de produit séché.
5. assurer l'existence, publication, le vente, de produit sur le marché.
6. établir un circuit de distribution pour le vendre, ce qui concerne la distribution, et la promotion de ces produits qui dépend du marché visé.

Au niveau des marchés internes, plusieurs études ont mis en évidence une demande des consommateurs pour l'amélioration des produits traditionnels. Cette amélioration de la qualité concerne l'hygiène, la communication et la publicité sont un élément déterminant pour la promotion des produits séchés. Mais leurs coûts sont généralement beaucoup trop élevés pour les petites entreprises qui visent le marché local. Le marketing de proximité est une solution intéressante qui consiste à aller directement vers les consommateurs, leur faire goûter gratuitement les produits et organiser des dégustations publiques.

L'augmentation de la consommation nationale demeure le prix des produits séchés, jugé trop élevé. En dehors des consommateurs urbains de catégorie moyenne et aisée pour lesquels le prix n'est pas le critère essentiel, les producteurs se tournent de plus en plus vers l'exportation

I.8.3 Etude Financial

Comme pour tous autres projets, pour mettre un projet de séchage performant et rentable, on doit fixer certain nombre de paramètres. Ces derniers sont liés à la gestion de la production et des finances. Une gestion financière déficiente est la cause de certains des problèmes les plus graves et les plus répandus chez de nombreux entrepreneurs au séchage agroalimentaire. Les causes d'échec incluent: [89 90]

- Des dépenses excessives.
- Une utilisation des bénéfices comme rémunération personnelle.
- Une estimation incorrecte des coûts des facteurs de production et/ou une fixation inappropriée des prix des produits.
- Une comptabilité mal tenue.

- Des dettes élevées ou des flux de trésorerie négatifs

Conclusion

Le séchage convectif fait appel à deux phénomènes importants : le transfert de chaleur de l'air vers le produit et le transfert de l'eau du sein du produit vers sa surface. La complexité du processus de séchage nécessite l'utilisation de modèles souvent empiriques basés sur la courbe de séchage obtenu expérimentalement. La modélisation du séchage peut être décrite par les modèles de séchage et la courbe caractéristique de séchage (CCS) qui exploite les résultats expérimentaux et permet d'étudier le comportement du produit dans un séchoir. La CCS est très utilisé pour la modélisation et la simulation du fonctionnement des séchoirs.

Chapitre II

Matériels

et Méthodes

II.1. Description des systèmes de séchage solaire

Les dispositifs expérimentaux mis en œuvre au cours de notre étude sont deux systèmes de séchage solaire fonctionnant en convection forcée ; séchoir solaire direct(A), et le séchoir indirect(b) figure (II-1) ces séchoirs sont conçus et réalisés par l'équipe de conversion d'énergie du laboratoire LENREZA.

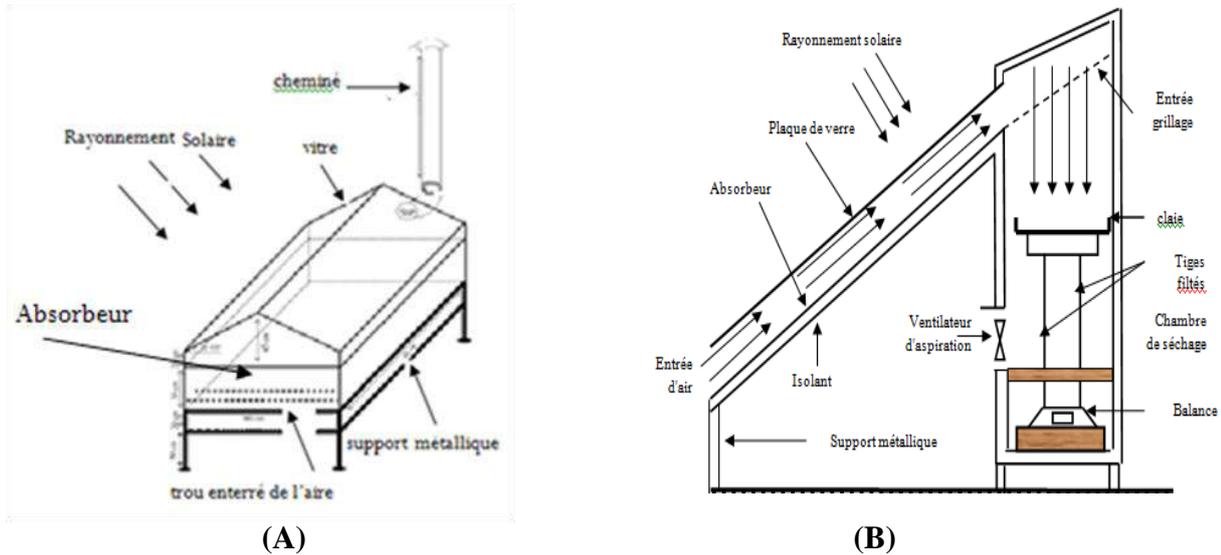


Figure (II.1) : Séchoir solaire direct (A) et indirect (B)

II.1.1 Séchoir solaire direct

II.1.1.1 Chambre de séchage

Elle est constituée de six plaques de verre d'épaisseur égale à 4mm, deux plaques sont inclinées d'un angle 31,57° deux sont positionnées dans l'avant et arrière du séchoir et deux dans les parties latérales du séchoir les quatre dernières plaques de verre sont reposées sur des plaques en tôle galvanisée (épaisseur=0,5) et qui sont isolées thermiquement avec le polystyrène la plaque située dans l'avant du séchoir représente la porte de la chambre elle est perforée par des rangées de trous dont le diamètre est de 1cm et la distance inter axiale égale à $d=5\text{cm}$. La base de la chambre est composée de deux plaques en tôle galvanisée séparées avec le polystyrène l'une des plaques est peinte en noir et est considérée comme absorbeur la chambre de séchage est posée sur un support métallique, le produit est disposé à l'intérieur de cette chambre sur une claie ce dernier est déposé sur une balance de type Denver de précision 0.01 g

II.1.1.2 Cheminée

La cheminée du séchoir présente un cylindre en tôle galvanisée de hauteur de 1m et de diamètre de 10cm, elle joue le rôle d'un aspirateur de l'air humide vers l'extérieur.

II.1.1.3. Fonctionnement du séchoir solaire direct

Le rayonnement solaire traverse la couverture transparente et frappe directement le produit. L'air frais arrive de l'extérieure et pénètre les trous, le contact air-absorbeur (noir) ainsi que les transferts convectifs augment la température de l'aire par l'effet de serre qui sert à séché le produit, le ventilateur placé aspire l'air de séchage et sert à son évacuation a travers la cheminée .

II.1.1.4 Amélioration du fonctionnement du séchoir solaire direct par intégration d'un appoint énergétique par échangeur air /eau :

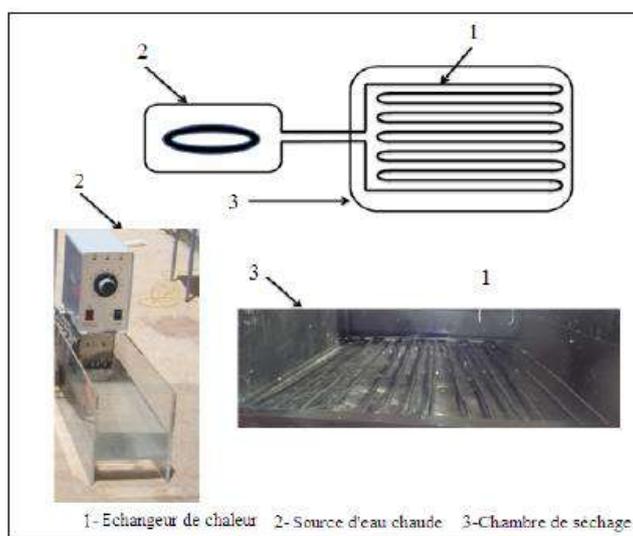


Figure (II.2) : L'installation de l'appoint énergétique.

II.1.1.4 .1Fonctionnement du système de séchage direct avec un échangeur de chaleur air /eau

Le fonctionnement de système de séchage est effectué lorsque le rayonnement solaire devient faible (vers 18 h). La circulation d'eau chaude dans ce système de séchage (Bac - échangeur) présente une boucle fermée, dont la température du fluide est d'environ 60°C . Au cours de l'écoulement de l'eau chaude dans l'échangeur, un transfert de chaleur se produit à travers les parois de ce dernier, on distingue deux types de transfert thermique :

- a- Transfert par conduction : entre l'échangeur et la claie de séchage.
- b- Transfert par convection : entre les tubes de l'échangeur et l'air frais

II.1.2 Séchoir solaire indirect

II.1.2.1. Chambre de séchage

La chambre de séchage est de forme parallélépipédique de hauteur 1.60m, de longueur 0.7 m et de largeur 0,6 m. Les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation

interne en polystyrène, à l'entrée de la chambre de séchage, on est placées une autre tôle galvanisée pour éviter les écarts de température entre la sortie de capteur et l'entrée de la chambre de séchage et on trouve aussi des résistances électriques de puissance $P= 1500 \text{ kW}$ pilotées par un thermostat. Ce dispositif de chauffage est placé à l'entrée de la chambre de séchage pour le réchauffer. Un ventilateur d'aspiration de marque (FA-30) (vitesse $V_{\text{vit}}=1400$ tours/min, débit volumique $= 25 \text{ m}^3 / \text{min}$) permet la circulation forcée de l'air avec un débit réglable.

Une claie de forme rectangulaire en grillage galvanisé sert de support pour le produit à sécher.

II.1.2.2. Unité de production d'air chaud :

Constituée d'un capteur solaire plan à air à simple vitrage avec des chicanes, de surface de 2 m^2 incliné de 31° (latitude de la ville d'Ouargla) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. L'absorbeur, en tôle galvanisée, est peint en noir. L'isolation thermique, d'épaisseur 50 mm , est faite en polystyrène et le vitrage est en verre ordinaire

II.1.3 Historique du développement du séchoir solaire indirect

Les étapes de développement du séchoir solaire indirect figure (II-3) ont été réalisées selon les objectifs fixés pour chaque travail proposé au niveau du séchoir solaire convectif

- Le premier travail réalisé concerne ce dispositif s'était le séchage hybride des produits agroalimentaires avec réglage de la température de consigne par utilisation d'une thermostat fonctionne en continue avec une source d'appoint représenté par une résistance électrique, le problème posé durant ces travaux est l'instabilité de pesées des produits séchés lors des ouvertures et fermetures successives de la chambre de séchage durant l'expérimentation , ces travaux présentent plusieurs inconvénients techniques ;
 - ♦ Problème d'instabilité de la température dans la chambre de séchage
 - ♦ Instabilité des pesées de produit séché par balance de précision 0.1g
- Une deuxième phase d'amélioration sur le séchoir solaire consiste à mettre une balance de précision 0.1g fonctionnant en parallèle avec le système dont le but est de :
 - ♦ Assurer la bonne précision pour la mesure de la perte de masse des fèves séchées.
 - ♦ Protéger la balance à l'intérieur de la chambre contre les effets extérieurs (vent, pluie)
- Éviter toutes les perturbations dues à la variation de la température à l'intérieur de la chambre de séchage lors de l'ouverture successive de celle-ci
- Relier les pesées systématiques par un logiciel d'acquisition des données par micro-ordinateur

- Un travail supplémentaire a été réalisé, consiste à améliorer les performances du capteur solaire par fixation des chicane horizontales pour augmenter la température à la sortie du capteur solaire [91], cette technique augmente la température de l'air asséchant dans la chambre de séchage et par la suite améliorer le séchage solaire des produits alimentaires par diminution du temps de séchage
- L'augmentation de l'écart de la température au niveau de la chambre entre l'entrée et avant la claie, nous oblige de faire d'autre amélioration du système par une isolation à l'intérieure de la chambre par un isolant (laine de verre) recouvert avec une tôle galvanisée
- D'autre amélioration sur le séchoir a été faite par l'intégration d'une source solaire avec appoint via échangeur de chaleur fonctionnant par eau géothermique

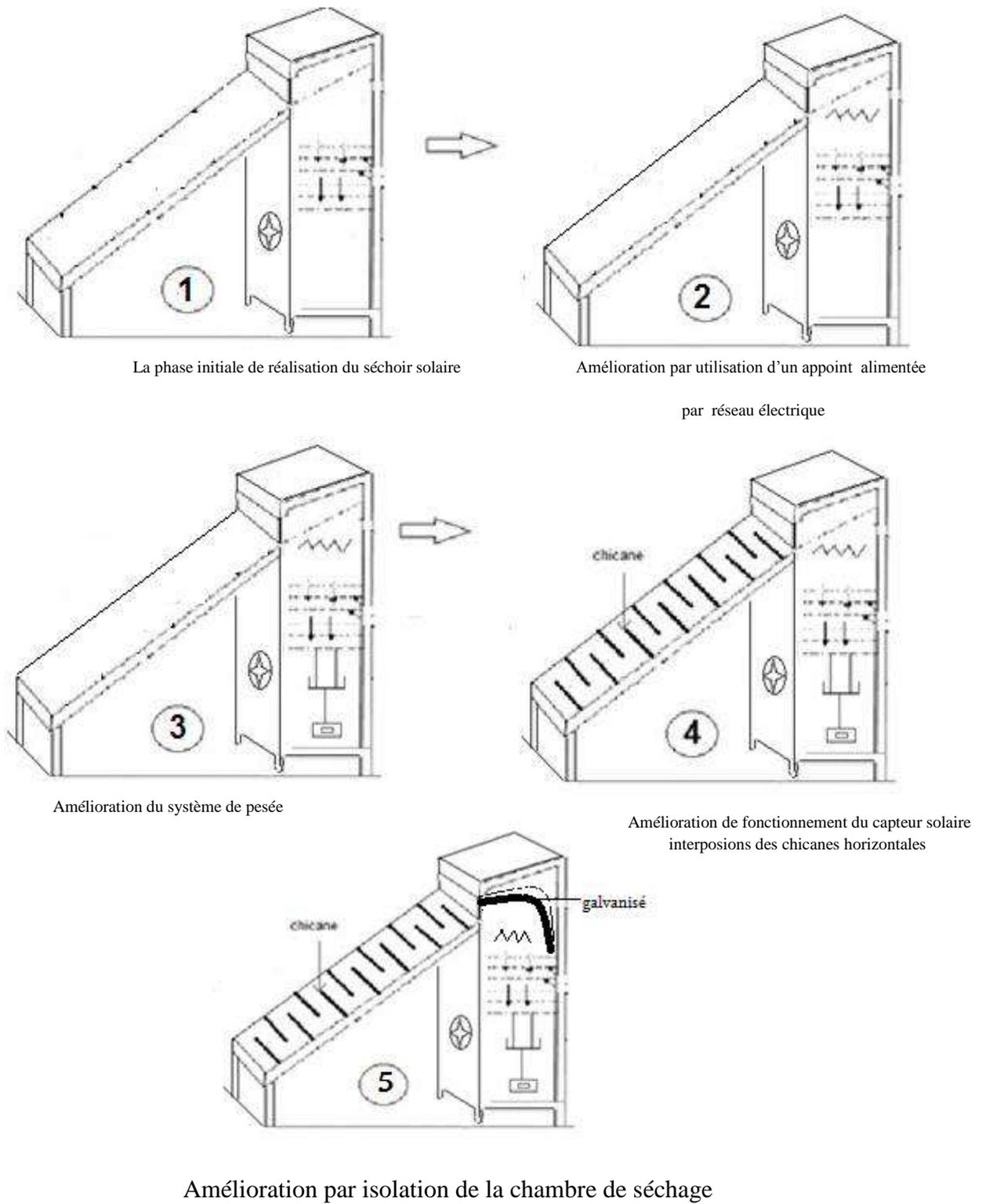


Figure (II.3): les différentes phases de développement du fonctionnement du séchoir solaire

Dans le cadre de notre étude nous avons apporté quelques améliorations dont particulièrement

- 1- la connexion du système avec un échangeur de chaleur sous forme d'un radiateur d'automobile (Marque DFM) connecté avec un système de chauffage d'eau qui simule l'apport en eau de source géothermique.



Figure (II.4) : Radiateur avec ventilateur



Figure (II.5): Système de chauffage électrique de l'eau



Figure (II.6) : Montage de système de l'échangeur de chaleur



Figure (II.7) : Échangeur de chaleur à l'intérieur de la chambre de séchage

2- l'emplacement d'une résistance thermique de 1500 kW pilotée par un thermostat



Figure (II.8) : Résistance électrique

II.1.2.4 .Fonctionnement du système solaire indirect

L'air frais provenant de l'extérieure est préalablement chauffé dans le capteur solaire ; le contact air absorbeur, le transfert convectif ainsi que les chicanes permet d'élever la température de l'air. Ce dernier arrive à l'entrée de la chambre de séchage et avant de traverser la claie, l'air est chauffé par une source d'appoint thermique qui fournit, en cas de besoin de l'énergie supplémentaire permettant d'assurer une température de séchage élevée. L'aspirateur aspire l'air de séchage qui traverse la claie et l'évacue vers l'extérieur.

II. 2 Mesures expérimentales

L'étude expérimentale, entreprise sur ces séchoirs de type direct et indirect consiste en la mesure systématique

- du rayonnement global reçu sur le plan du capteur à l'aide d'un solarimètre, dont les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique .
- des températures à l'aide des thermocouples de type K à l'entrée, à la sortie du capteur solaire, du milieu ambiant (extérieur), au niveau du produit à sécher et avant la claie portant le produit à sécher;
- de l'humidité relative à l'intérieur du séchoir solaire et du milieu extérieur à l'aide d'un hygromètre à affichage numérique connecté à un appareil de marque testo 645.
- des pesées systématiques des produits séchés à l'aide d'une balance de précision 0.1g.

II .3 Appareillages de mesures

II .3 .1 Mesure du rayonnement solaire

Le rayonnement global reçu sur le plan du capteur est mesuré en W/m^2 à l'aide d'un solarimètre figure (II-9) et ceci durant la journée de l'expérience. Les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique.



Figure (II.9) : Solarimètre à affichage numérique

II .3. 2 Mesure des températures

La mesure des températures s'effectue à l'aide des thermocouples de type K figure (II-10) dans plusieurs endroits du capteur solaire :

- Entrée et sortie du capteur solaire.
- Avant la claie portant le produit à sécher.
- Au niveau du produit a séché.

Les résultats de mesure des thermocouples sont affichés sur une température mètre figure (II-10)



Figure (II.10) : Température mètre

II .3.3 Mesure de la vitesse de l'air asséchant

La vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de séchage est mesurée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud connecté à un appareil d'acquisition de marque testo 425 figure (II-11)



Figure (II.11) : Anémomètre

II .3 .4 Mesure de l'humidité de l'air asséchant

La mesure des humidités s'effectue à l'aide d'un hygromètre dans plusieurs endroits :

- L'humidité relative de l'air asséchant à l'entrée de la claie est mesurée à l'aide d'un hygromètre à affichage numérique connecté à un appareil de marque testo 645.
- La mesure de l'humidité relative de l'air extérieur est effectuée par un hygromètre type Testo 608-H1



(A)



(B)

Figure (II.12): Hygromètre

(A) Testo 645 (B) Testo 608-H1

II .3 .5 Les mesures externes

Les mesures de la vitesse et de la température de l'air ambiant sont effectuées à l'aide d'un anémomètre à affichage numérique (type CA 1051).



Figure (II.13) : Appareil physique multi fonctionnelle

II .3.6 Mesure de la perte de masse :

La mesure de la perte de masse du produit en fonction du temps est effectuée sur l'ensemble produit –claire support à l'aide d'une balance de précision 0.01g pour la pesée systématique des produits séchés



Figure (II.14) : Balance électronique (Marque Denver)

II .3 .7 Mesure de la teneur en eau initiale

La mesure de teneur en eau est faite avec utilisation de l'analyseur de l'humidité de deux échantillons des produits alimentaires utilisés (grains de fève , pomme de terre tranchée , dattes deglet noir), Pour mesurer la teneur en eau initiale en utilise un échantillon frais des produits utilisés , pour mesurer la teneur en eau finale en utilise un échantillon des produits a l'état sèche (commerciale) [92]



Figure (II.15) : Analyseur de la teneur en eau

La détermination de la masse sèche du produit s'effectue à l'aide d'un analyseur d'humidité (Sartorius MA 45, Sartorius A.G., Gottingen, Germany: incertitude ± 0.1). Après la préparation des échantillons testés (45g) on l'introduit dans l'analyseur d'humidité. Cet appareil est réglé à une température de 70°C [92], elle s'arrête automatiquement dès que la masse devient constante. L'analyseur est équipé d'une balance à affichage numérique de précision 0,001g qui mesure la masse du produit durant le fonctionnement de l'appareil. L'expérience a été refaite trois fois pour chaque échantillon pour minimiser les erreurs.

II .4 Protocole et méthodologie expérimentale

La méthodologie d'expérience se compose par :

- Une préparation des séchoirs solaires et du produit
- Une installation des appareils de mesure
- Une expérimentation

II.4.1 Préparation du séchoir solaire

La préparation du séchoir solaire concerne l'assurance de bon fonctionnement du séchoir par :

- Le nettoyage de la couverture transparente et de la plaque noir du capteur solaire.
- Vérification de stabilité du système de peser à l'intérieur de la chambre par un poids témoin.
- Fonctionnement du séchoir à vide pendant 30min

II.5 Présentation des produits d'étude (pomme de terre, dattes deglet noir , grains de fève)

II.5.1 Caractérisation de la pomme de terre

La pomme de terre est une plante herbacée, de la famille des Solanacées Elle est cultivée essentiellement, pour ses tubercules souterrains, charnus, jaunes, roses, rouges, violets ou presque noirs de formes différentes : sphériques, longs, ovales, aplatis, en rognon Les tubercules sont très riche en amidon, principalement utilisés en alimentation humaine, mais aussi en alimentation animale [93]

II.5.1.1 composition chimique de la pomme de terre

L'importance de pomme de terre apparait clairement parce qu'elle est riche en carbohydrates, c'est donc une bonne source d'énergie. Elle est aussi riche en vitamine C, en potassium et en protéines qui répondent bien aux besoins de l'homme. Et aussi parce qu'elle est facile à cultiver, même dans des conditions difficiles. En peu de temps, elle permet d'obtenir une grosse quantité de matière nutritive sur une petite superficie. Et comme elle pousse sous terre, elle est moins facilement endommagée. Elles apportent pour 100gramme ; 76 kcal avec 17,7 g de glucides ; 2,1 g de protéines ; 400 mg de potassium [94]

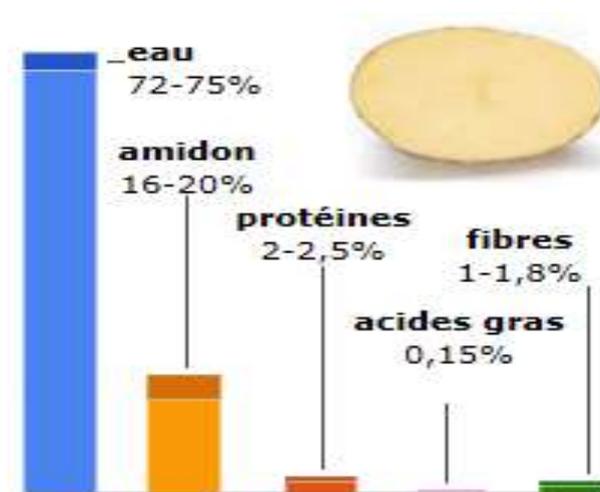


Figure (II.16) : composition chimique de pomme de terre

II.5.1.2 Etudes sur le séchage des pommes de terre :

Lemuel M. Diamante et al (2007) [95] ont étudié L'effet de la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la vitesse de l'air et l'épaisseur de l'échantillon sur le séchage en couche mince des pommes de terre tranchées ils ont adoptés aux plusieurs modèles mathématiques

dans diverses conditions de séchage. Ils ont trouvé que l'équation de Page modifiée décrivant le séchage des tranches des pommes de terre jusqu'à une teneur en eau de 10% de base sèche.

Fateh Singh et al (2014) [96] ont proposé un modèle mathématique pour étudier les caractéristiques de séchage de la pomme de terre. Le modèle est validé à l'aide de plusieurs données expérimentales extraites de la littérature. En outre, le modèle proposé est comparé à plusieurs modèles de séchage déjà développés pour différents produits alimentaires sur la base du RMSE, du chi – carré et du coefficient de corrélation. Les auteurs ont montré que le modèle proposé dans leurs travaux actuels est meilleur que celui des modèles existants. L'équation du modèle est $MR = \exp(-Kt) - a_{kt}$, il ont montrés que ce modèle peut être utile aux industries alimentaires pour analyser la cinétique de séchage des pommes de terre afin de maintenir la qualité de ces produits.

Naderinezhad s et al (2015) [97] ont étudié expérimentalement l'effet de la température et la vitesse de l'air et la forme des échantillons (cercle et carré avec la même section transversale) sur la cinétique du séchage des tranches de pomme de terre dans un séchoir tunnel, un modèle de séchage approprié a été développé. Les expériences de séchage des tranches de pomme de terre ont été menées à une température de l'air de 45–70 ° C avec une vitesse de l'air de 1,60 et 1,81 m s⁻¹. Les auteurs ont montré que la température de séchage était le paramètre le plus important. L'influence de la vitesse de l'air était plus profonde à basse température. Le temps de séchage des tranches carrées était inférieur à celui des tranches circulaires. De plus, ils ont ajustés les données de séchage à différents modèles empiriques. Parmi les modèles, Midilli – Kucuk était le mieux trouvé pour expliquer le séchage en une couche de tranches de pomme de terre. Les paramètres de ce modèle ont été déterminés en fonction de la vitesse de l'air et de la température par analyse de régression multiple pour des tranches de forme circulaire et carré.

ShivaRuhanian et al (2016) [98] ont étudié le séchage des pommes de terre avec un séchoir à convection par infrarouge. Les expériences ont été réalisées avec trois épaisseur ; 3, 5 et 7 mm et trois valeur de puissance par infrarouge; 500, 700 et 900 W. Les auteurs ont montré que l'augmentation de la puissance par infrarouge entraîne une diminution de la teneur en eau et du temps de séchage des échantillons, mais augmente la vitesse de séchage, et la diffusivité effective. Les résultats ont également indiqué que l'augmentation de l'épaisseur, conduit à l'augmentation de la diffusivité effective et le temps de séchage, tandis que la vitesse de séchage diminue. Les auteurs ont adoptés huit modèles de séchage en

couche mince, ces modèles ont été comparés en fonction de trois paramètres statistiques: le coefficient de corrélation (R^2), l'erreur standard (S) . Leurs résultats indiquent que le modèle de page pourrait décrire de manière satisfaisante la courbe de séchage des tranches de pomme de terre avec $R^2 = 0.9991-0.9997$, $S = 0.0050-0.0095$ et $\chi^2 = 1.3E-05$ à $9.6E-05$

II.5.2 Caractérisation des dattes Deglet nour

La datte est un aliment de grande valeur énergétique, particulièrement la variété Deglet-Nour à haute valeur commerciale et largement produite en Algérie La datte Deglet Nour est une datte demie molle et excellente a sa récolte, cette variété est souvent triée en plusieurs catégories dont la datte sèche dite « Frezza » présente un état de maturation incomplète avec dessèchement à l'arbre par effet de climat chaud. En proportion cette catégorie peut faire de 10% à 25% de la production de Deglet-Nour, voire plus, selon les conditions climatiques. On propose Le séchage solaire comme une étape de traitement thermique de cette datte pour la rendre commerciale [99]

II.5.2.1 Composition chimiques de la datte (Deglet Nour)

La connaissance de la composition chimique qualitative et quantitative de la datte est d'importance principale à l'utilisateur et l'emballer en particulier, processeur ou négociant, parce qu'il affecte les possibilités et les limitations de la matière première pour le fin usage projeté. L'intérêt des consommateurs se concentrera principalement sur les organoleptiques et les propriétés alimentaires du produit. Il y a beaucoup de renseignements qui peuvent être trouvés dans la littérature, principalement sur les variétés individuelles. Tous les travaux sur l'étude de la composition chimique de la datte, ont montrés que le sucre et l'eau sont les principaux constituants de la chair.[100]

II.5.2.2 L'eau :

D'une manière générale, les dattes présentent des humidités inférieures à 40%. Elles sont classées parmi les aliments à humidité intermédiaire dont la conservation est relativement aisée. Pour la datte Deglet Nour l'humidité est variée entre 20 à 31 %.

II.5.2.3 Les sucres :

Les dattes sont considérées comme des fruits riches en sucres. Ceux-ci existent sous deux formes: saccharose et sucres réducteurs. Les sucres réducteurs principaux sont le fructose et le glucose mais les dattes contiennent d'autres sucres tels que l'arabinose, le galactose et autres , le glucose et le fructose qui sont réducteurs proviennent probablement de l'inversion du saccharose (non réducteur)

- Les protéines, les acides aminés, les matières grasses

- Les fibres brutes (les solides non solubles celluloses, hémicellulose, protéines insolubles)
- Vitamines (A B1 B2) et Minéraux (fer, potassium, calcium, cuivre)
- Autres substances chimiques (poly phénol, les acides organiques)

La Composition de la pulpe de datte fraîche Deglet-Nour est donnée dans le tableau (II-1) [101]

Tableau (II.1) : Composition de la pulpe de datte fraiche DegletNour

Constituants	(%) du poids à l'état frais
Eau	21
Protéines	1.5
Sucres totaux	70.3
Saccharose	35.1
Glucose	16.4
Fructose	18.5
Cellulose	7.2

II.5.2.2 Etudes sur le séchage des dattes :

Kechaou et al. (1996) [102]: Ils ont étudié et modélisé empiriquement la cinétique de séchage des dattes Deglet-Nour tunisiennes. Ils ont déterminé la cinétique de séchage sous des vitesses d'air entre 1 et 3 m/s et des températures allant de 30°C à 70°C. Sur la base de ces expériences, les auteurs ont adapté une courbe de séchage caractéristique donnée par l'expression de l'équation de page.

Bakri H. Hassan et ALI I. Hobani. (2000) [103]: Ils ont déterminé expérimentalement des courbes de séchage pour deux catégories de dattes récoltées en Arabie Saoudite (Sukkari et Sakie) à trois températures différentes 70, 80, et 90 C. Parmi trois modèles de séchage qui ont été évalués (modèle exponentiel, équation de page, approximation du modèle de diffusion), les auteurs ont adopté un modèle mathématique selon l'équation de page pour décrire au mieux le séchage en couche mince des deux variétés de dattes étudiées.

Kechaou. N et Mâalej M (2000) [104]: Ils ont étudié les caractéristiques d'équation de séchage des dattes Deglet Nour Tunisiennes humides (ou humidifiées artificiellement). Le banc d'essais utilisé pour établir les courbes de séchage fonctionnait avec des températures dans la gamme de 30 à 70°C, des vitesses de courant d'air de 0,95 à 2,7 m/s et d'humidité

relative de 11 à 47% . La température de bulbe sèche et la teneur en eau initiale des échantillons avaient un effet majeur sur le comportement de séchage, cependant les vitesses d'air avaient un effet moins significatif. Seulement la décroissance du comportement de séchage a été observée. Le modèle de Guggenheim, Anderson et Poer est démontré être satisfaisant pour décrire les courbes obtenues à 30 ,40 ,50 et 60 °C. Selon les auteurs, les résultats de ce travail peuvent être utilisés pour développer une méthodologie de travail pour un séchoir opérant à des températures inférieures à 70 °C.

Boubekri A. et al. (2007) [105]: : Ils ont étudié le séchage solaire du fruit dattier simulé comme séchage convectif à des températures variables par pas constants. Cette étude du séchage solaire indirect du fruit dattier de variété Deglet-Nour a été faite partant de l'hypothèse de variation de température de l'air par paliers constants. Considérant neuf heures de séchage par jour, une cinétique globale a été simulée numériquement en utilisant des équations modèles, et est construite par tranches relativement au palier de température correspondant. Les résultats obtenus, par confrontation à la littérature disponible, reflètent le comportement au séchage sous conditions variables avec discontinuité de l'opération par la nuit. Il a été mis en évidence que l'humidité normalisée pour le commerce du produit (26% b.h) était atteinte en moins d'une journée de séchage et que le cycle de température journalière prédominé par le palier 60°C mènerait à un produit final dans un état de qualité optimal.

II.5.3 Caractérisation de la fève

Les légumineuses alimentaires sont considérées comme les plantes à graines les plus cultivées par l'homme et de puis longtemps occupent une place importante, dans l'alimentation humaine. Elles jouent un rôle important dans le développement de l'économie nationale, des pays du Maghreb. Vu leurs adaptations faciles aux différents milieux, nous pouvons rencontrer dans la plupart des régions du monde.

La fève (*Vicia faba L.*) est une plante herbacée de la famille des *Fabacées* originaire d'Asie ou du Moyen-Orient et du bassin méditerranéen. Sa culture est très ancienne et pratiquée dans le monde entier. [106]

La fève et fèverole (*Vicia faba L.*) sont les légumineuses à graines, les plus cultivées pour l'alimentation humaine au Maghreb. En Algérie, elles représentent, en milieu rural et au niveau des ménages à revenus limités, une grande part de la ration alimentaire.

En Algérie, la fève seule est la plus importante parmi les légumineuses alimentaires, avec 58000 hectares soit 44.3% de la superficie totale réservée à cette catégorie de culture.

Ses teneurs élevées en protéines (25%) et en glucides (53%), lui confèrent une valeur nutritive très élevée. De ce fait, elle présente un bon potentiel nutritionnel, pour remplacer certaines sources protéiques conventionnelles. [107]

II.5.3.1 Intérêt alimentaire

La fève est l'une des légumineuses alimentaires à grains les plus communes, utilisée pour la consommation humaine et animale. Elle est constituée un aliment nutritif très important sur tout les populations à faible revenus, qui ne peuvent pas toujours s'approvisionner en protéine d'origine animale.

Cette légumineuse a une teneur en protéine élevée et est une excellente source de fibres solubles et insoluble, de glucides complexes de vitamines (B9 et C) et des minéraux (en particulier le potassium, le phosphore, le calcium, le magnésium, le cuivre, le fer et le zinc)

II.5.3.2 La composition chimique de fève

La fève fraîche est relativement riche en matière sèche (18 % à l'état cru, contre 6 à 12 % dans la plupart des légumes frais), et notamment en glucides, en protides, et en fibres, ce qui lui confère des propriétés nutritionnelles très intéressantes.

- Les glucides de la fève fraîche atteignent 10 g aux 100 g. Il s'agit pour l'essentiel - environ 85 % du total glucidique- de glucides complexes (en particulier d'amidon), et pour 15 % du total glucidique, de sucres plus simples (glucose, saccharose, fructose...).
- Les protéines de la fève sont très riches en lysine, mais légèrement déficitaires en acides aminés soufrés -méthionine et cystine. Les protéines de la fève peuvent également être équilibrées par une petite quantité de protéines d'origine animale.
- Les lipides sont très peu abondants dans la fève fraîche (0,3 à 0,6 g aux 100 g)
- Les fibres sont présentes à un taux important dans la fève, puisqu'elles atteignent 6,5 g aux 100 g.
- La fève fournit des quantités non négligeables de minéraux. Et notamment du potassium (210 mg aux 100 g cuits), du calcium (24 mg aux 100 g cuits) et du magnésium (18 mg).
- Elle est enfin une source appréciable de vitamines : non seulement de vitamine C (son taux s'élève à 28 mg aux 100 g dans la fève crue [108])

Tableau (II.2) : Valeurs nutritionnelles de fèves fraîches [108]

Composition	Valeur pour 100g
Calories	58 Kcal
Protéines	5,8 g
Glucides	7,2 g
Lipides	0,6 g
Fibres	6,4
Sodium	4 mg
Potassium	210 mg
Phosphore	105 mg
Vitamine B5	2,3 mg
Vitamine C	12 mg
Vitamine PP	2 mg
Vitamine B9	57 μ g

II.5.3.3 Apport énergétique

L'apport énergétique de la fève fraîche est de l'ordre de 60 kcal (250 kj) aux 100 g. Elle se situe ainsi entre les légumes frais (20 à 40 kcal en général), et les pommes de terre ou les petits pois (80 à 85 kcal)[108]

II.5.3.4 Etudes sur le séchage des grains de fève

Dans la littérature les études sur le séchage des fèves sont rares (Aucune information n'est disponible sur le comportement au séchage des fèves dans la littérature). La plupart des recherches expérimentales traitent les analyses de la composition chimique et l'amélioration de la production [109, 112]

II.6 Préparation du produit (Matériel végétal)

Les échantillons des produits agroalimentaires utilisés (dattes, pommes de terre, fèves) pour les essais expérimentales sont à l'état sèche. Le choix de ces produits alimentaires se justifie par son abondance au niveau du marché national et ses intérêts alimentaires et nutritionnelles après séchage solaire. Notre travail est orienté vers le traitement thermique (dattes), la conservation pour une longue durée (la pomme de terre), la valorisation des grains (fèves). La préparation des échantillons avant les essais de séchage comprend deux étapes:

- (a) Un triage pour éliminer manuellement tous les produits écrasés ou noircis, ce qui permet d'homogénéiser le lot définissant au mieux l'état initial du produit.
- (b) Stockage du produit dans un endroit sec au froid +4°C afin d'éviter toute réhydratation des produits d'étude

II.7 Protocole expérimental:

Le suivi de la perte de masse des produits alimentaires utilisés (dattes , pomme de terre, fèves) au cours du séchage est assuré par des mesures des masses effectuées à intervalles de temps réguliers de 60 minutes en utilisant une balance de précision à 0.01g. La durée de séchage étant le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale souhaitée, à une température inférieure ou égale à la température maximale tolérée par celui-ci.

-Pour la variété de dattes étudiée la teneur en eau finale est de 0,35kg eau/kg de matière sèche qui représente l'humidité standard de stockage et commercialisation de la dattes Deglet Nour

-Pour la pomme de terre et les grains de fève la teneur en eau final est 0.13 kg eau/kg de matière sèche qui présente la teneur en eau de conservation des ses deux produits alimentaires

Les mesures de température, du rayonnement, et de la vitesse de l'air sont effectuées régulièrement chaque 1 heure. Le protocole expérimental consiste à réaliser quotidiennement le séchage du produit entre 9h et 17h soient huit heures de traitement en continu. A la fin de chaque journée le produit est emballé sous film plastique et stocké dans un endroit sec au froid de +4°C afin de prévenir toute réhydratation. La manipulation est arrêtée lorsque la teneur en eau souhaitée est atteinte. [113]

II.8 Série d'expériences :

Pour résoudre le problème d'instabilité des conditions opératoires dans le séchoir solaire indirect et pour améliorer le fonctionnement énergétique des séchoirs solaires direct et indirect en proposant des solutions pratiques choisis afin de maintenir des conditions opératoires favorables dans ces deux types des séchoirs solaires, dans ce travail le démarche expérimentale est subdivisée en trois chapitre :

- ❖ Le troisième chapitre est consacré à l'étude de stabilisation des conditions opératoires dans le séchoir solaire indirect par différents techniques pratiques proposés le régulateur de température, les panneaux photovoltaïques et l'échangeur de chaleur (air-eau), en utilisant différents produits agroalimentaires (dattes deglet nour ; pomme de terre tranchée , grains de fève) période de travail [2011-2015]

Les techniques pratiques proposées pour résoudre le problème d'instabilité dans le séchoir solaire indirect sont

- ♦ Stabilisation des conditions opératoires par résistances électriques, (1500W) les produits alimentaires séchés sont (dattes deglet nour, pomme de terre tranchée, grains de fève)
- ♦ Stabilisation des conditions opératoires par des panneaux photovoltaïques (La puissance maximale 75W , tension à puissance max 17V, courant à puissance max 4.4A), les produits alimentaires séchés sont (dattes, pomme de terre,)
- ♦ Stabilisation des conditions opératoires par échangeur de chaleur air /eau ce système fonctionne avec un simulateur de l'eau géothermique proposé pour les applications de séchage solaire
- ❖ Le troisième chapitre de travail consiste en l'étude de modélisation mathématique de séchage solaire des différents produits d'étude en utilisant le logiciel (curve expert 1.4
- ❖ Le cinquième chapitre présente l'étude du séchoir solaire indirect après son amélioration énergétique en mode discontinue avec une résistance électrique et avec un échangeur de chaleur air /eau , en déterminant les apports énergétiques par le calcul des efficacités énergétiques et les fractions d'énergie fournies par les appoints énergétiques expérimentés sous différents conditions opératoires , en suite l'étude technico-économique et l'évaluation des séchoirs solaires de types direct et indirect et hybride sont détaillés dans la cinquième chapitre de cette thèse

Conclusion

Le séchoir solaire en mode indirect est le plus répandu parce qu'il permet le contrôle du séchage et l'obtention d'un produit séché de bonne qualité. Le séchoir direct, de par sa simplicité de conception, de réalisation et de sa capacité de sécher de grande quantité de divers produits agro-alimentaires s'avère bien adapté au séchage solaire.

Un système de séchage solaire hybride muni d'appoint énergétique (résistance électrique, échangeur de chaleur) contribue à réduire l'impact des fluctuations du flux solaire sur la température de l'air asséchant et par la suite sur la durée de séchage.

Chapitre III

Stabilisation des Conditions Opératoires et Modélisation Mathématique de Séchage des Produits d'Etude

Introduction

Ce chapitre est consacré dans un premier temps à l'étude de stabilisation des conditions opératoires dans le séchoir solaire indirect par différents appoints énergétiques le régulateur de température, les panneaux photovoltaïques et l'échangeur de chaleur (air-eau), en utilisant différents produits agroalimentaires (dattes deglet nour ; pomme de terre tranchée , grains de fève) , dans un deuxième temps, nous analysons les résultats de test de qualité par évaluation de couleur des différents produits séchés sous différentes conditions opératoires pour discuter les cas optimales point de vue qualité et durée de séchage

III.1 Essais de stabilisation par source électrique du réseau domestique

Les expériences de séchage solaire indirect ont été réalisées en régime constante avec une résistance alimentée par le réseau électrique aux différentes températures de séchage (50°C ,60°C, 65°C,), le système d'appoint permet l'utilisation du séchage durant les conditions climatiques défavorables

-On place à l'intérieur de la chambre de séchage un dispositif de chauffage composé par une résistance électrique de puissance 1500 kW pilotée par un thermostat.

-Pour assurer la bonne stabilisation des conditions opératoire à l'intérieur de la chambre on a vérifié le réglage de la température à l'intérieur de la chambre pour chaque essai de séchage

III.1.1 séchage solaire indirect avec un système d'appoint à effet Joule (cas des grains de fève)

III.1.1.1 Variation des humidités relatives de l'air en fonction du temps

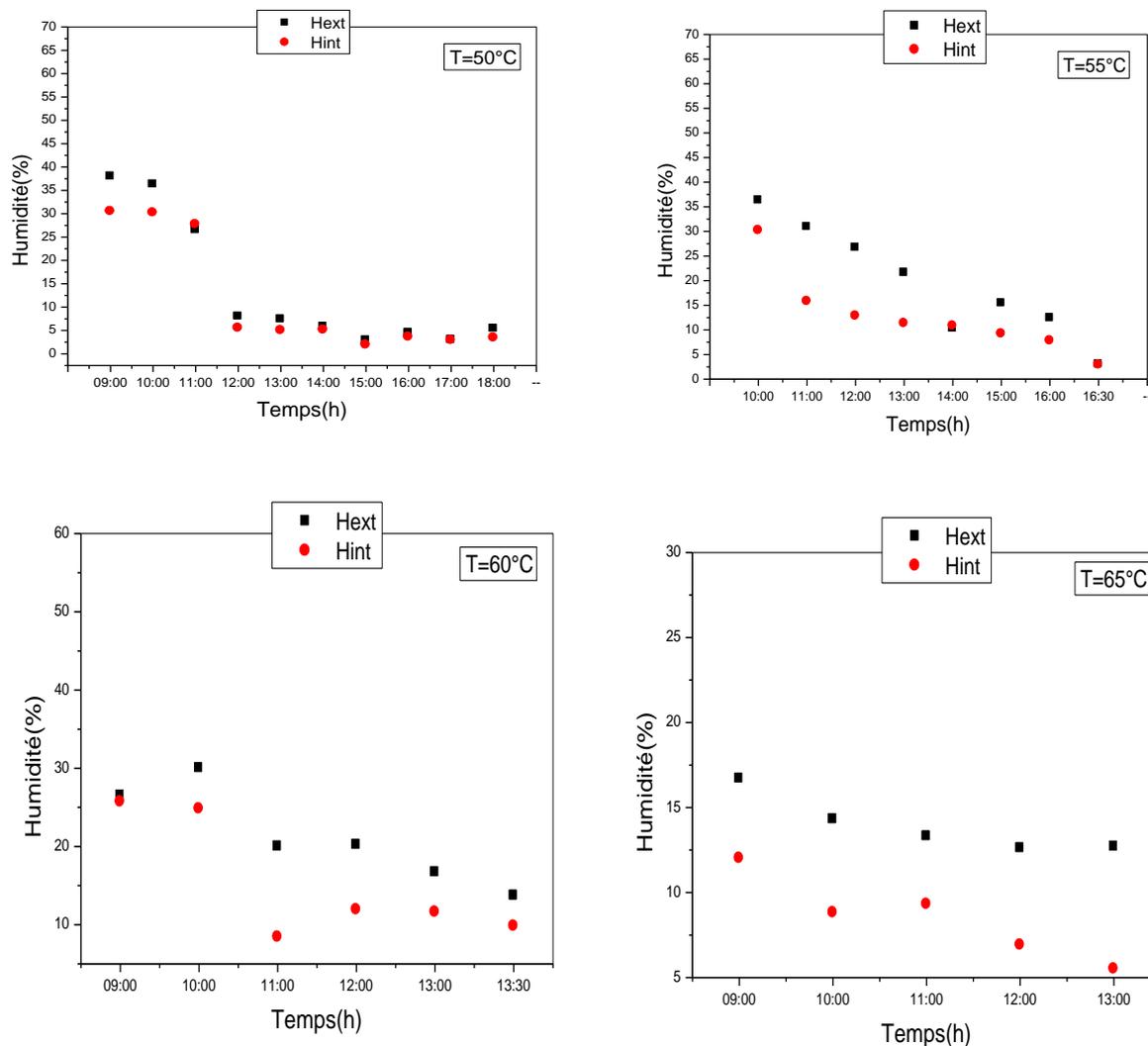


figure (III.1) : Variation des humidités relatives de l'air en fonction du temps

La figure (III.1) présente la variation de l'humidité relative de l'air ($H_{r_{ext}}$, $H_{r_{int}}$) pour les différents jours de séchage sous température constante. On remarque sur cette figure que l'humidité relative du milieu extérieur ($H_{r_{ext}}$) varie entre 35 % à 9.2 % elle diminue dans l'intervalle de temps compris entre 13 h et 15h où la température de l'air asséchant atteint sa plus grande valeur qui correspond à un flux solaire maximum.

l'humidité relative du milieu intérieur varie entre 32% à 5% durant la période de séchage, l'avancement de l'air vers la claie provoque une diminution de son humidité ($H_{r_{int}}$) et atteint

des valeurs minimales de l'ordre de 5 % pour une température de $T=65^{\circ}\text{C}$, cette diminution peut être expliquée par l'augmentation de la température de l'air sous l'effet de joule. L'évaporation de l'eau au niveau de la surface du produit et son transfert dans la phase gazeuse (air de séchage) crée une légère augmentation d'humidité relative au dessus du produits séché par rapport à (Hr_{int}) , elle est de l'ordre de 8 % (valeur maximale) pendant la période de séchage.

III.1.1.2 Profil des températures air /produits

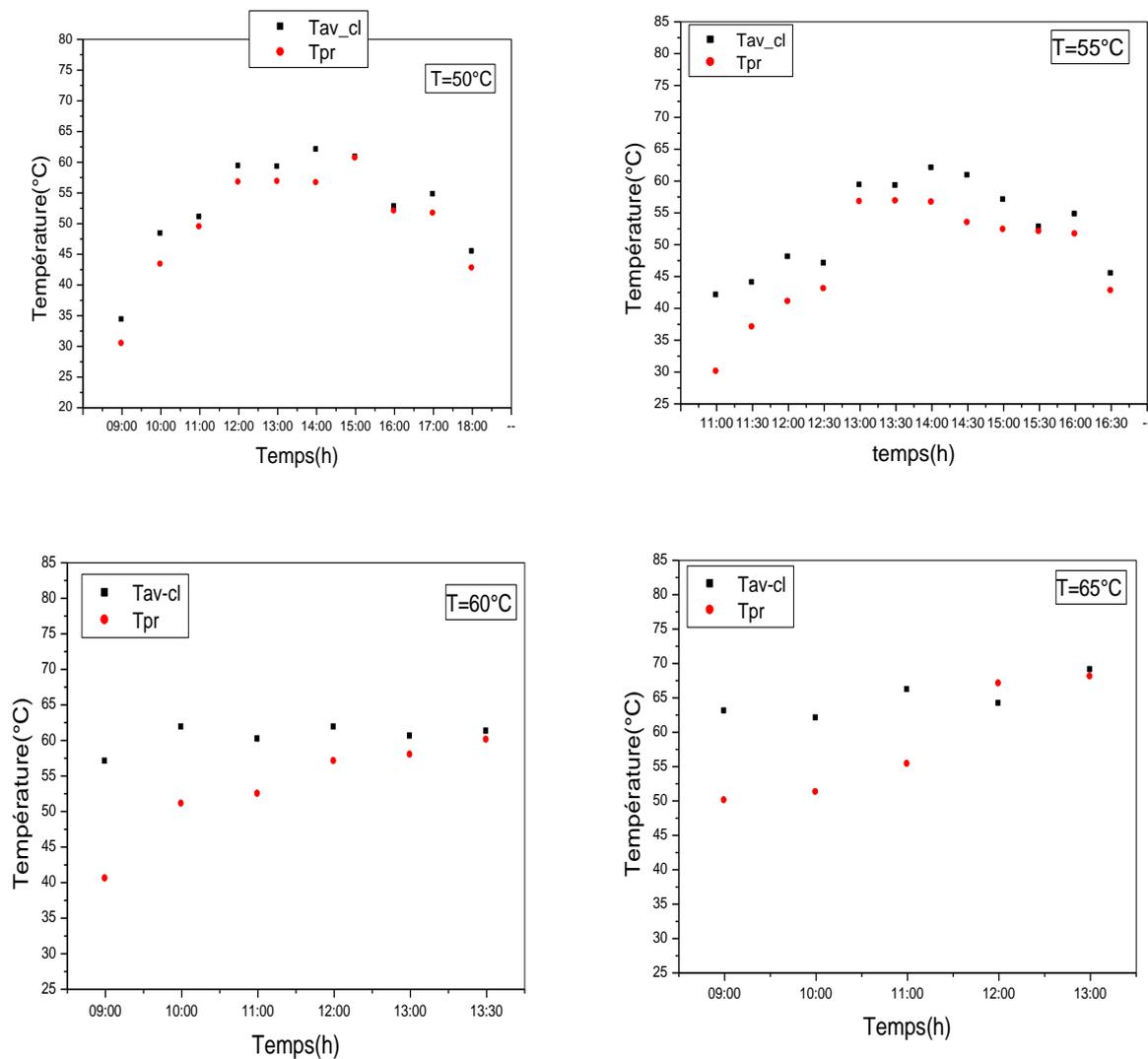


Figure (III.2): Variation des températures en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage

L'évolution des températures de l'air asséchant, avant la claie et la température intérieure d'un échantillon de fève, en fonction du temps de séchage, pour les différentes expériences, est représentée sur la figure (III.2), la variation de la température de séchage moyenne

(T_{av-cl}) est de l'ordre de 40°C à 60°C durant la période de séchage. Lorsque l'air traverse la claie de séchage, la température du produit varie de 35.3 jusqu'à 55. °C. Il est clair sur les courbes que la différence de température air/produit commence assez élevée (11-13°C), mais cette différence diminue ensuite pour se stabiliser à environ 5°C. Cette évolution serait due au taux d'évaporation important au début du séchage, le produit étant encore riche en humidité et à l'augmentation de flux de chaleur convectif qui sert à l'évaporation d'une grande quantité d'eau à partir de produit.

III.1.1.3 Influence de stabilisation de température en régime constant sur la durée de séchage

La figure(III.3) représente la variation de la teneur en eau en fonction du temps pour les températures allant de 50° à 65°C. L'influence de la température paraît logique dans les courbes plus de température est élevé plus le temps de séchage est réduit.

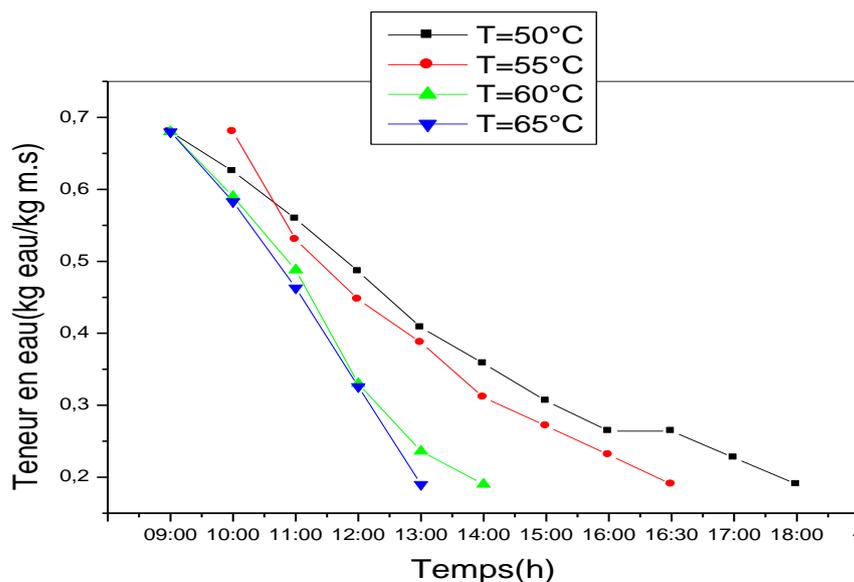


Figure (III.3): Influence de la température de l'air sur la variation de la teneur en eau

La figure(III.3) montre que le temps de séchage pour atteindre une teneur finale $X_f = 0,13$ kg eau/kg ms est plus court quand la température de l'air est plus élevée et par conséquent, plus la température augmente plus la cinétique de séchage croît et plus le temps de séchage est réduit. La durée de séchage observée pour les différentes températures expérimentées ($T_1=65^\circ\text{C}$, $T_2=60^\circ\text{C}$, $T_3=55^\circ\text{C}$, $T_4=50^\circ\text{C}$), varie respectivement entre 4 h et 10 h soit une seule journée de travail en continu. L'intérêt de ce résultat (cas d'un séchage solaire avec appoint) est que la durée de séchage reste inférieure ou égale à une journée de séchage ce qui permet

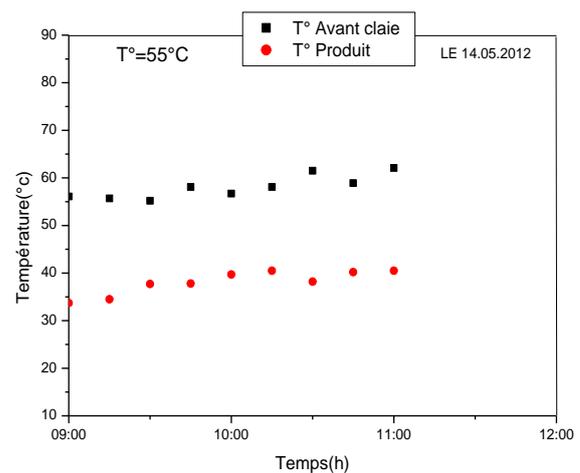
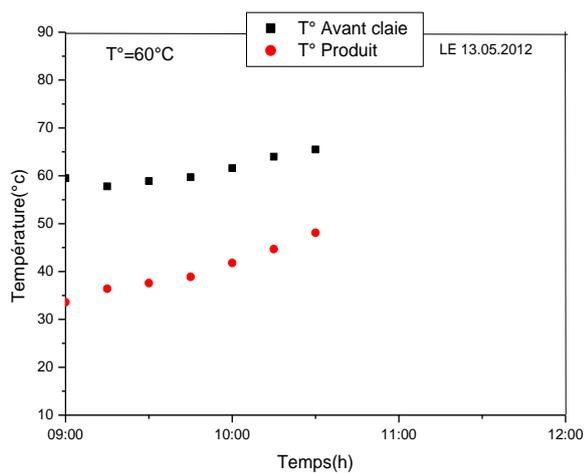
Chapitre III Etude de possibilité de stabilisation des conditions opératoires dans Le séchoir solaire convectif

d'éviter le stockage par la nuit pouvant induire des risques de réhumidification et éventuelle contamination du produit séché.

III.1.2 séchage solaire convectif indirect avec un système d'appoint à effet Joule (cas des pommes de terre tranchées)

Les essais de séchage solaire ont été effectués en régime constant avec un apport supplémentaire d'énergie par utilisation d'un système d'appoint ; résistance alimentée par le réseau électrique aux différentes températures de séchage (60°C ,55°C, 50°C,) avec une vitesse de circulation $V= 0.5 \text{ m/s}$ la stabilisation des conditions opératoires dans le séchoir solaire indirect est testée par la mise en place d'un régulateur de température à l'intérieur de la chambre de séchage en a essayé de stabiliser les conditions opératoires dans le cas de séchage solaire d'un produit plus riche en eau

III.1.2.1 Profile des températures air/produit



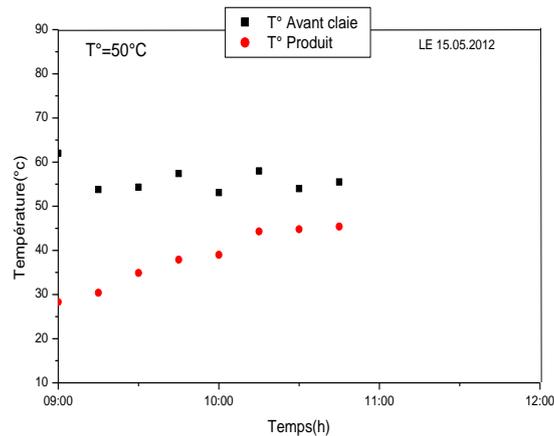


Figure (III.4) : Profil des températures air/produit

L'évolution des températures de l'air asséchant, avant la claie et la température intérieure d'un échantillon de pomme de terre en fonction du temps de séchage pour les différentes expériences, est représentée sur la figure (III.4), la variation de la température de séchage moyenne (T_{av-cl}) est de l'ordre de 50°C à 60°C durant la période de séchage. Lorsque l'air traverse la claie de séchage, la température du produit varie de 30.3 jusqu'à 45°C. Il est clair sur ces résultats que la différence de température air/produit commence assez élevée (27°C) durant la première heure de séchage mais cette différence diminue ensuite pour se stabiliser à environs (12°C). Cette évolution est due au taux d'évaporation important au début du séchage, le produit étant encore riche en humidité.

III.1.2.2 Influence de stabilisation de température en régime constant sur la durée de séchage.

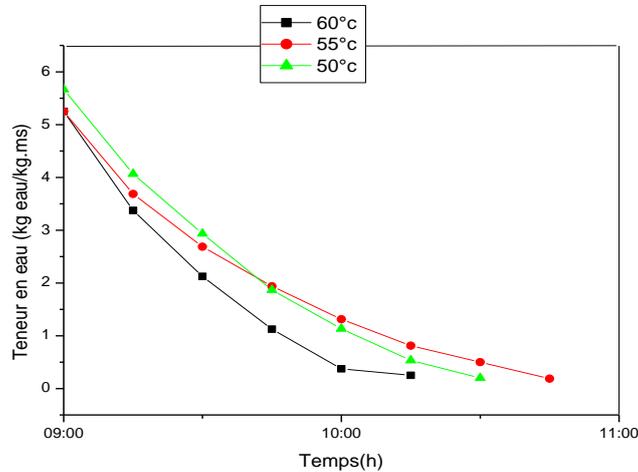
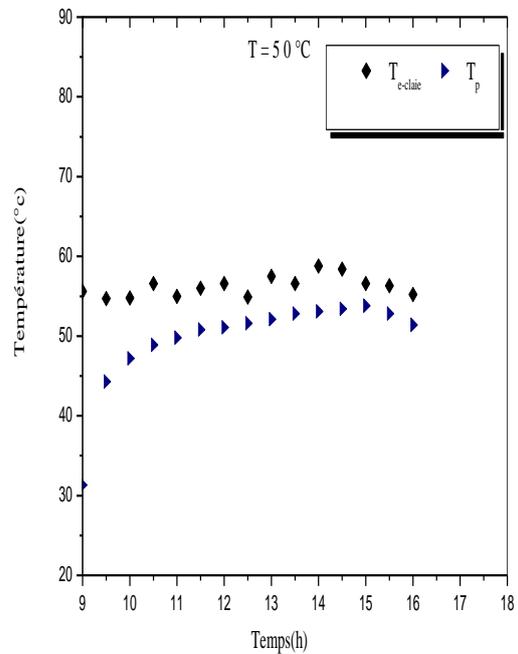
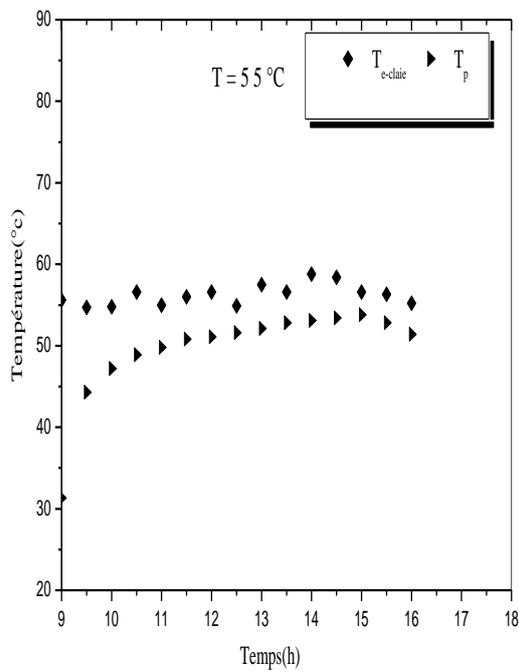
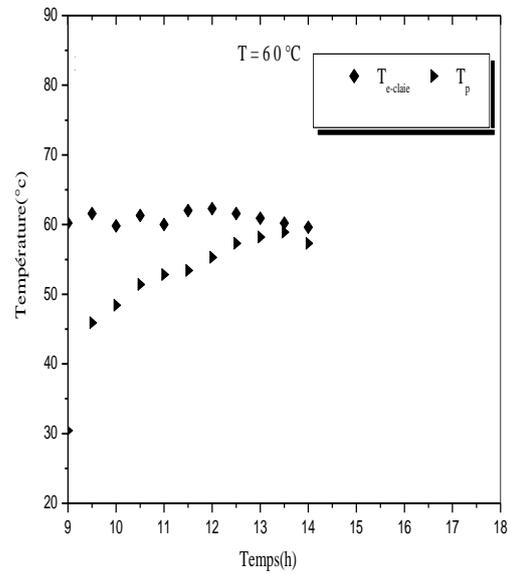
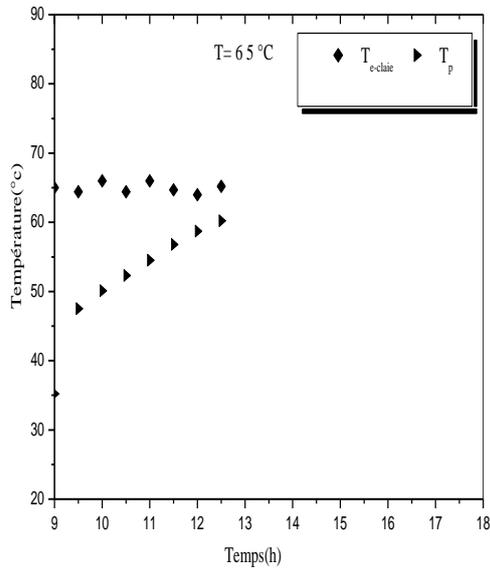


Figure (III.5) : Variation de la teneur en eau pour différentes températures en fonction du temps

La figure (III.5) montre que le temps de séchage pour atteindre une teneur finale $X_f = 0,13 \text{ kg eau / kg m s}$ est plus court quand la température croît. et par conséquent, plus la température augmente plus la cinétique de séchage croît. La durée de séchage observée pour les différentes températures expérimentées varie entre 1.5 h et 2h, ceci résulte d'une part de l'augmentation de flux de chaleur apporté par l'air au produit et d'autre part de l'accélération de la migration interne de l'eau, Le choix d'une température de séchage convenable en cas de procédé industriel reste lié aux observations relatives aux paramètres de qualité du produit fini. L'attention doit être portée sur la prévention des phénomènes de brunissement de la couleur

III.1. 3 séchages solaires convectifs indirects avec un système d'appoint à effet Joule (cas des dattes deglet noir)

III.1.3.1 Profile des températures air/produit



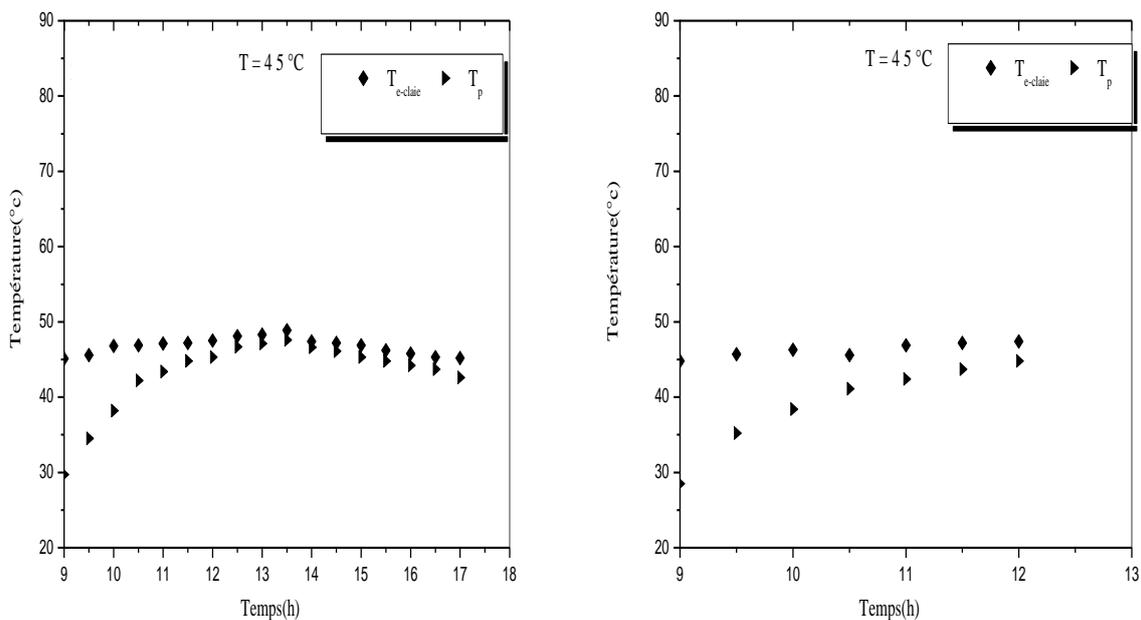


Figure (III.6) : Profils des températures air/produit pour six jours de séchage en discontinu

L'évolution des températures de l'air asséchant, avant la claie et la température intérieure d'un échantillon de datte, en fonction du temps de séchage, pour les différentes expériences, est représentée sur la figure (III-6). La tendance des valeurs moyennes quotidiennes des températures de l'air à l'entrée de la claie varie de 45.2°C à 65°C, la température du produit est entre 39.2°C à 52°C, il est clair sur ces résultats que la différence de température air/produit commence assez élevée (11-13°C) durant les deux premières journées de séchage mais cette différence diminue ensuite pour se stabiliser à environ 5°C. Cette évolution serait due au taux d'évaporation important au début du séchage, le produit étant encore riche en humidité.

III.1.3.2 Influence de stabilisation des températures sur la durée de séchage

La figure(III-7) montre l'évolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps pour les températures de séchage allant de 45°C à 65°C. L'influence de la température de l'air paraît très logique dans les courbes. Plus la température est élevée plus le temps de séchage est réduit.

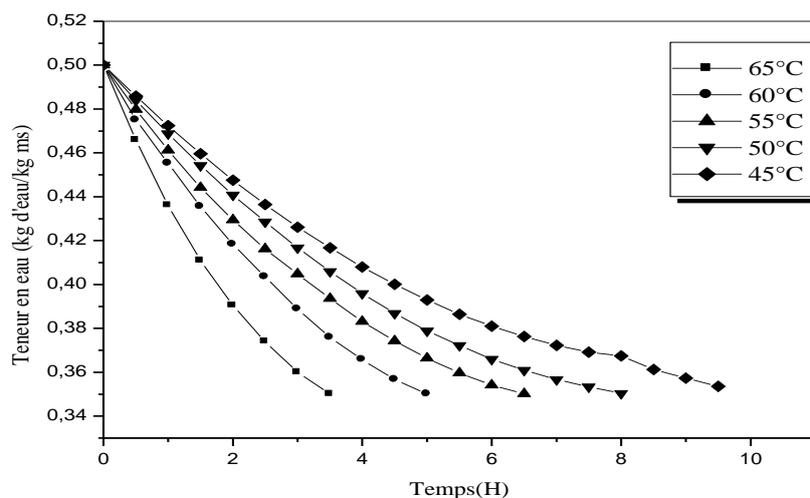


Figure (III.7) : Influence de la température de l'air sur la variation de la teneur en eau des dattes

La figure (III-7) montre que le temps de séchage pour atteindre une teneur finale $X_f = 0,35$ kg eau/kg ms est plus court quand la température de l'air est plus élevée. Et par conséquent, plus la température augmente plus la cinétique de séchage croît et plus le temps de traitement est réduit. Ceci résulte d'une part de l'augmentation de flux de chaleur apporté par l'air au produit et d'autre part de l'accélération de la migration interne de l'eau. Les durées de séchage varie entre 3.5 à 8h, ces résultats montrent aussi qu'il est possible de ramener le produit à la teneur en eau commerciale dans moins d'une journée de traitement et ce pour des températures stables de l'air au-delà de 50°C. Le choix d'une température de séchage convenable en cas de procédé industriel reste lié aux observations relatives aux paramètres de qualité du produit fini. L'attention doit être portée sur la prévention des phénomènes de brunissement de la couleur.

III.2 Essais de stabilisation par source électrique photovoltaïque

III.2.1 Etude de comportement thermique du séchoir solaire convectif indirect à vide (séchage solaire sans et avec appoint énergétique à condition variable) :

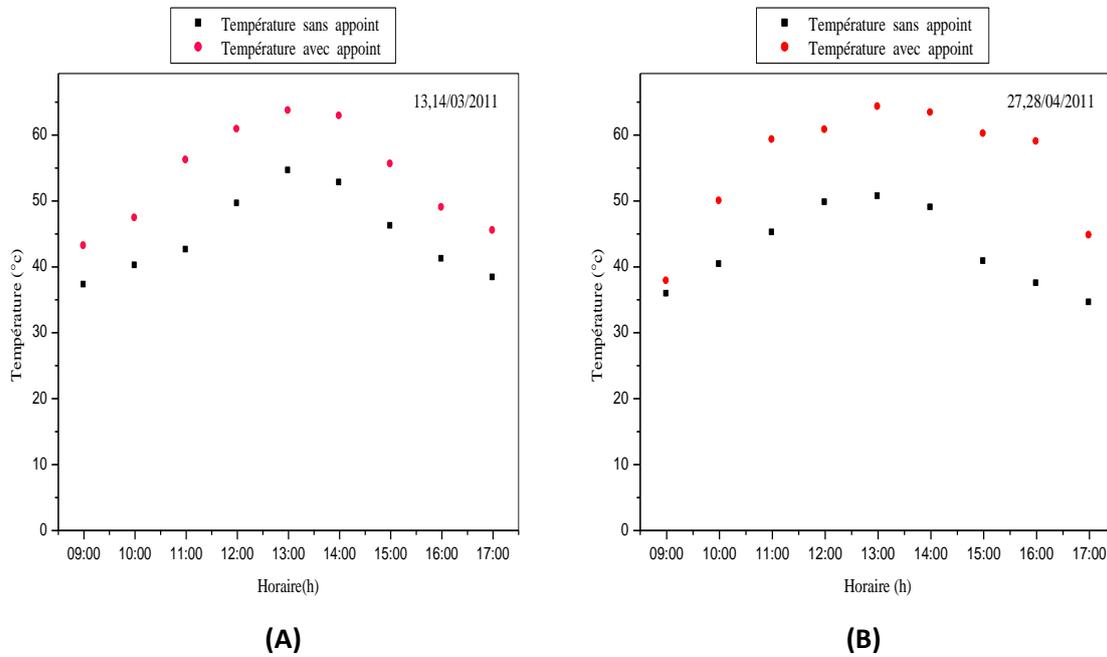


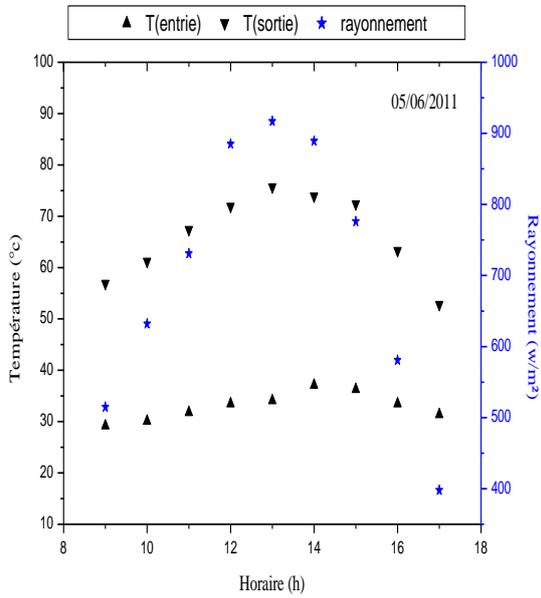
Figure (III.8): Relevé des températures de l'air dans la chambre de séchage avec et sans appoint lors du séchage à température variable 0

Les relevés des températures de l'air dans la chambre de séchage avec et sans appoint pour différentes journées sont présentés sur les figures (III.8) (A, B) , On peut alors clairement remarquer la différence entre la température de l'air asséchant avec et sans appoint .Pour le fonctionnement du séchoir solaire sans appoint la température de l'air varie entre ($T_{\min}=35,5^{\circ}\text{C}$ et $T_{\max}=45.5^{\circ}\text{C}$) l'élévation de la température est due à l'apport de chaleur provient du capteur solaire notamment au milieu des journées où le rayonnement solaire atteint son maximum, pour le fonctionnement du séchoir solaire avec l'utilisation d'un appoint alimentée par les panneaux solaires ; l'augmentation de la température de l'air est varie de ($T_{\min}= 40.3^{\circ}\text{C}$ à $T_{\max}= 60 ,2 ^{\circ}\text{C}$) ce qui augmente le flux thermique convectif de l'air par effet de joule à l'intérieur de la chambre de séchage de séchage

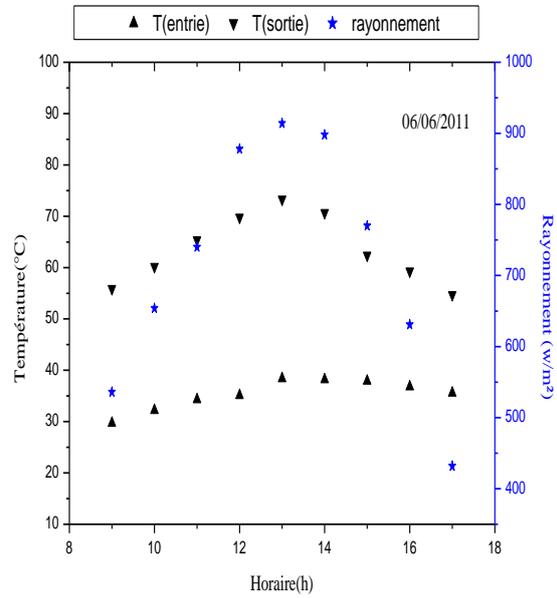
Chapitre III Etude de possibilité de stabilisation des conditions opératoires dans Le séchoir solaire convectif

III.2.2 séchage solaire hybride en régime variable (cas des dattes deglet noir)

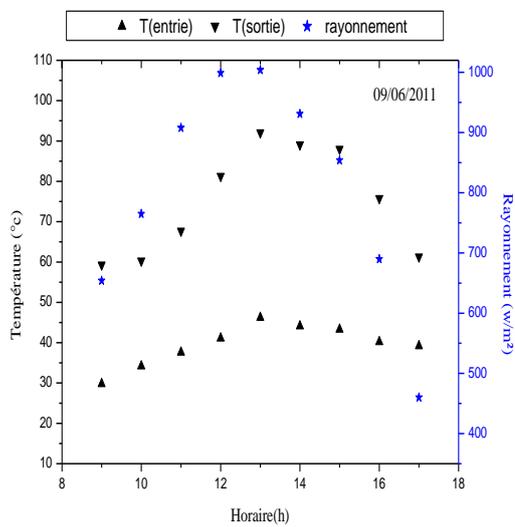
III.2.2.1 L'effet du rayonnement sur la température



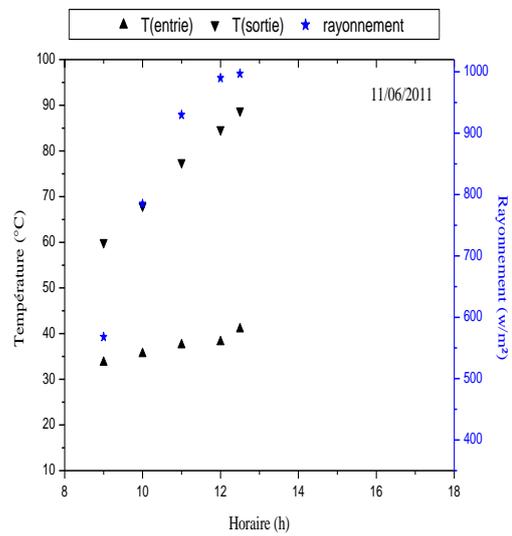
(A)



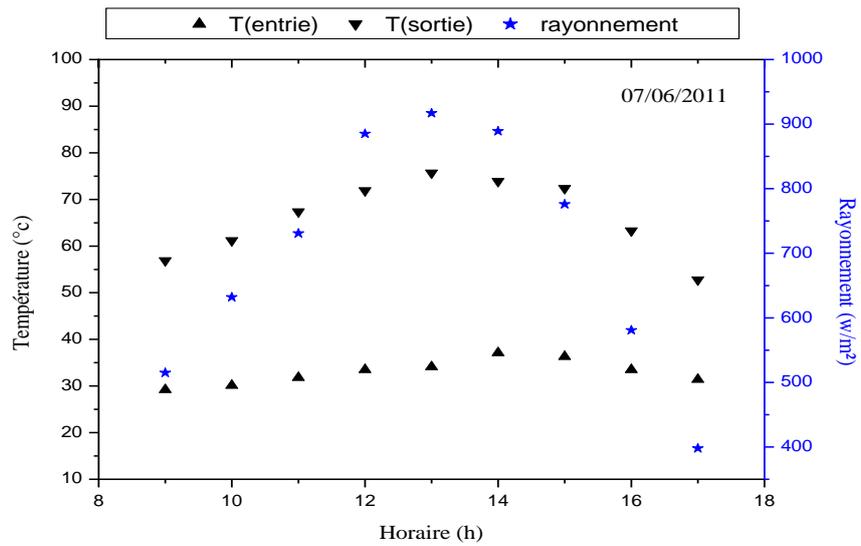
(B)



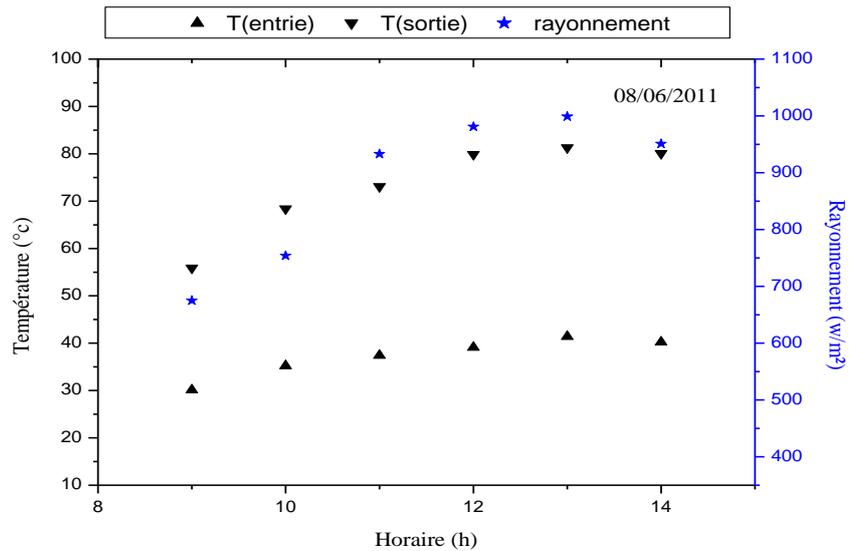
(C)



(D)



(E)



(F)

Figure (III.9) (A, B, C, D, E, F) : Variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps dans le cas d'association d'un panneau, deux panneaux, trois panneaux, quatre panneaux en parallèles

La figure (III.9) présente la variation du rayonnement solaire et la distribution de la température en fonction du temps où la température de l'air asséchant est mesurée dans deux positions, l'entrée, la sortie du capteur solaire, la courbe de distribution de la température au

Chapitre III Etude de possibilité de stabilisation des conditions opératoires dans Le séchoir solaire convectif

niveau du capteur solaire présente une similitude dans l'allure avec la courbe de l'éclairement global (avec un léger décalage dans le temps). L'expérimentation s'est déroulée durant des jours ensoleillés. On remarque sur les courbes l'écart important de la température entre l'entrée et la sortie du capteur solaire. L'écart est dû à l'influence du rayonnement solaire sur l'absorbeur qui joue un rôle important dans l'échauffement de l'air circulant à l'intérieur du capteur solaire et l'influence des chicane sur l'augmentation de la température

-Avec l'utilisation d'un seul panneau solaire l'écart est important au début de l'opération de séchage, il est de l'ordre de $36,8^{\circ}\text{C}$, il diminue pendant le séchage des dattes humides jusqu'à atteindre $19,1^{\circ}\text{C}$ puisque le rayonnement global diminue et atteint sa valeur minimale ($432\text{W}/\text{m}^2$) à 17h à la fin de l'opération de séchage. Le même comportement est observé pour les autres essais avec l'utilisation de 2 panneaux, 3 panneaux, 4 panneaux.

III.2.2.2. Influence du nombre des panneaux associés sur la température de l'air asséchant

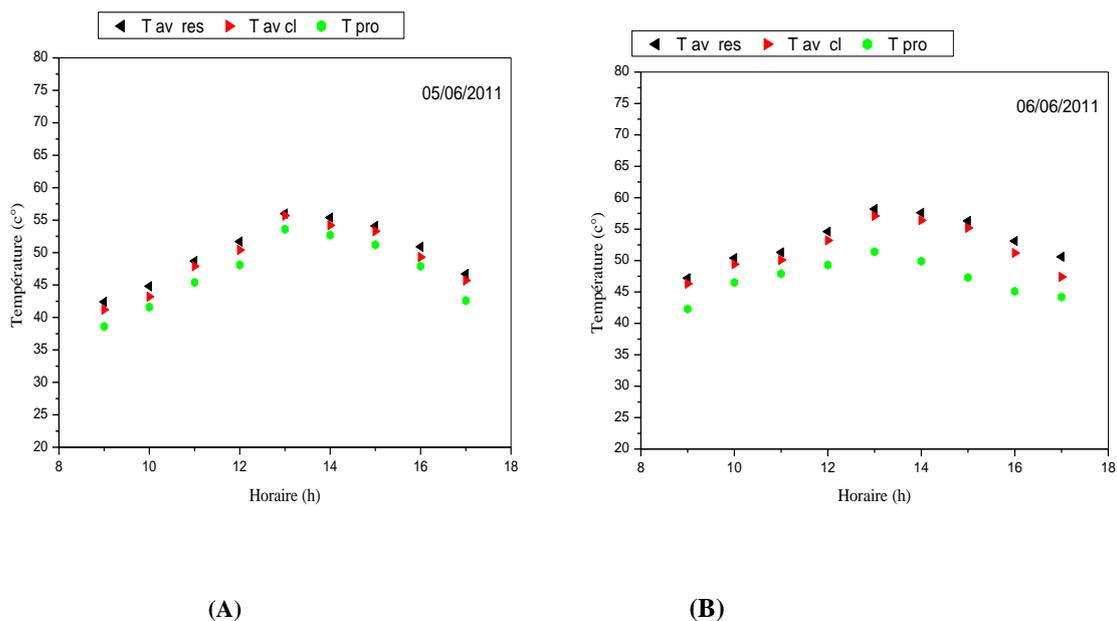
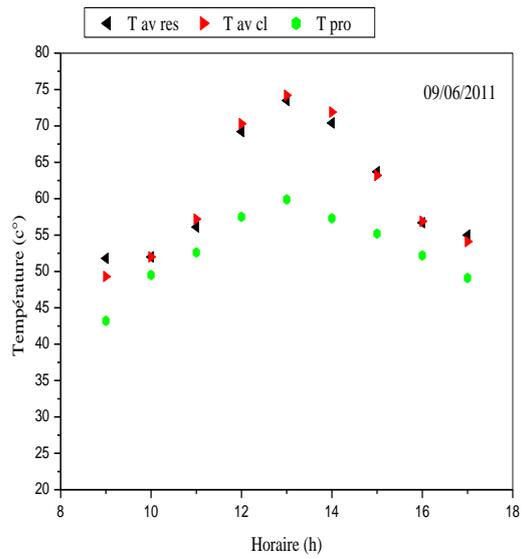
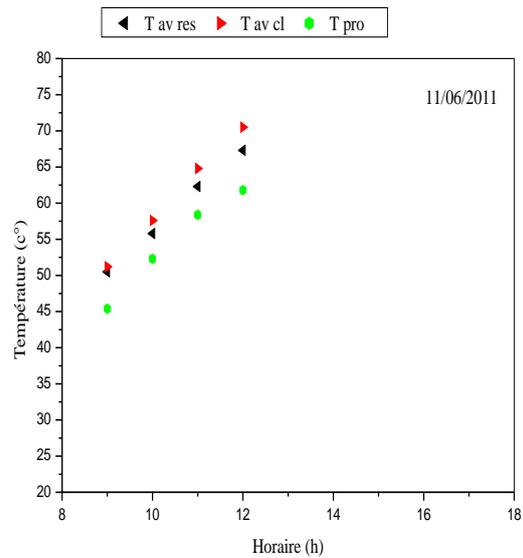


Figure (III.10) : Variation des températures air/produit dans le cas d'association d'un seul panneau solaire



(C)



(D)

Figure (III.11) : Variation des températures air/produit dans le cas d'association de deux panneaux en parallèle

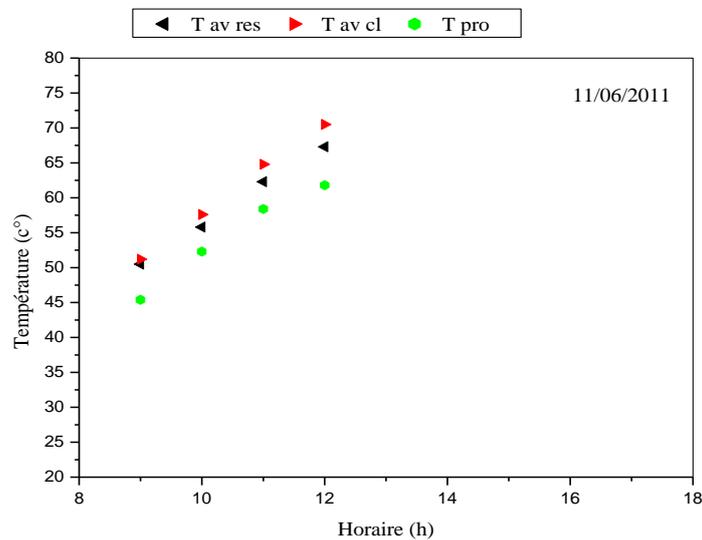


Figure (III.12E) : Variation des températures air/produit dans le cas d'association de trois panneaux en parallèle

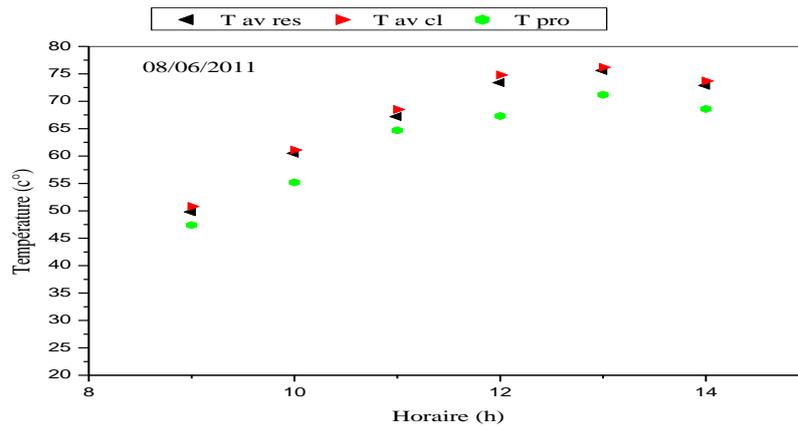


Figure (III.13F) : Variation des températures air/produit dans le cas d'association de quatre panneaux en parallèle

L'évolution des températures de l'air asséchant avant la claie et la température intérieure d'un échantillon de datte, en fonction du temps de séchage, pour les différentes expériences réalisées en fonction du nombre des panneaux solaires utilisés est représentée sur la figure (III-10 , 11, 12 ,13).

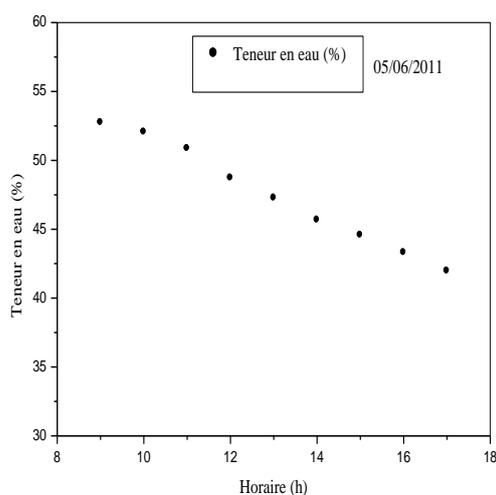
Tableau (III.1) : Valeurs minimales, maximales et tendances moyennes des températures au niveau de chambre de séchage :

	1 panneau	2 panneaux	3panneaux	4 panneaux
T_{res}^{av} min	42.2	50.5	52.3	53.8
T_{res}^{av} max	58.2	70.4	70.4	75.6
T_{res}^{av} moy	50.2	59.4	60.8	62.7
T_{cl}^{av} min	41.2	44.8	47.4	50.8
T_{cl}^{av} max	57.1	66.2	71.5	76.2
T_{cl}^{av} moy	49.1	63.5	65.4	67.5
T_{pro} min	38.6	43.2	47.5	48.4
T_{pro} max	53.6	62.2	67.4	71.2
T_{pro} moy	46.9	54.0	59.9	62.4

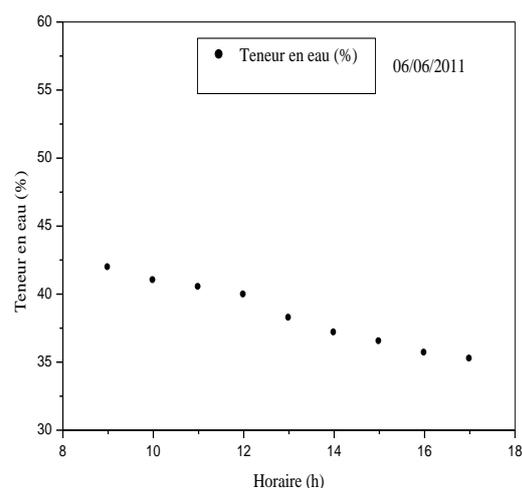
Chapitre III Etude de possibilité de stabilisation des conditions opératoires dans Le séchoir solaire convectif

On peut voir qu'après une augmentation rapide et continue de la température de l'air asséchant ; la température du produit croît rapidement, l'élévation de la température peut être expliquée par l'augmentation de l'énergie thermique fournie par l'air de séchage en présence de l'appoint électrique qui sert à réchauffer la chambre de séchage .D'après les courbes, on constate qu'il existe un gradient de température, ce gradient devient de plus en plus faible au cours du temps jusqu'à la fin de l'opération du séchage .La tendance des valeurs moyennes quotidiennes des températures près de la résistance, de l'air à l'entrée de la claie et celle du produit est montrée sur tableau (III.1). Il est clair sur ces résultats que la température près de la résistance alimentée par les panneaux solaire croît avec l'augmentation du nombre des panneaux associe en parallèles, ce qui augmente l'intensité de courant électrique et par la suite l'augmentation de la température dans la chambre de séchage en fonction de l'effet de joule produit. Cette augmentation influe sur la température de l'air asséchant avant la claie qui porte le produits à séchée et par la suite sur l'élévation de la température du produit Avec l'utilisation d'un seul panneau solaire, La différence de température air/produit commence assez élevée (5-7°C) durant les deux premières journées de séchage mais cette différence diminue ensuite pour se stabiliser à environs 3°C. Cette évolution serait due au taux d'évaporation important au début du séchage, le produit étant encore riche en humidité.

III.2.2.3 Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage pour différentes conditions opératoires

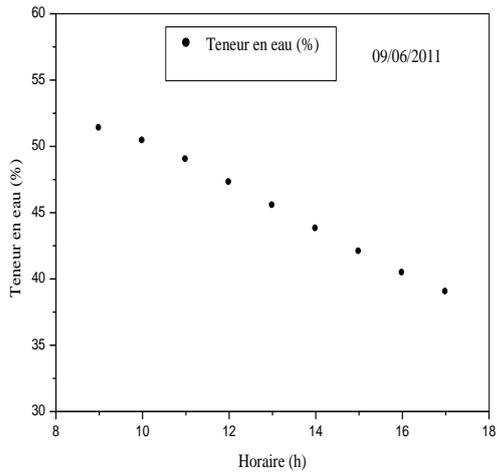


(A)

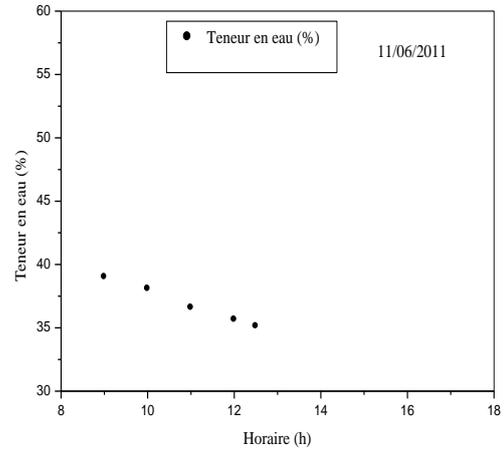


(B)

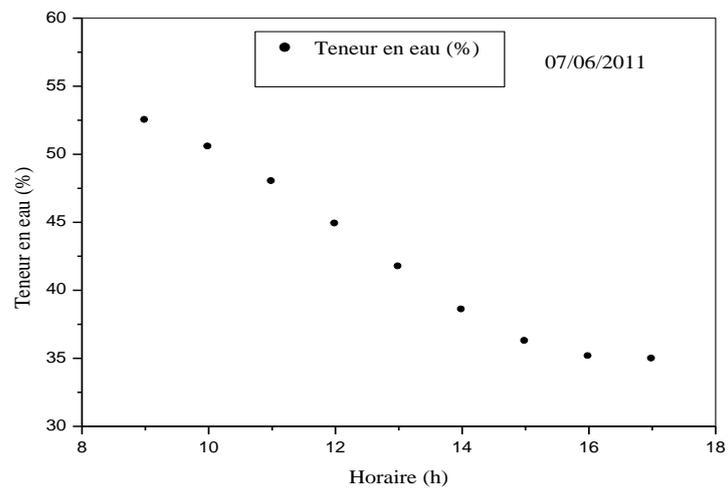
Chapitre III Etude de possibilité de stabilisation des conditions opératoires dans Le séchoir solaire convectif



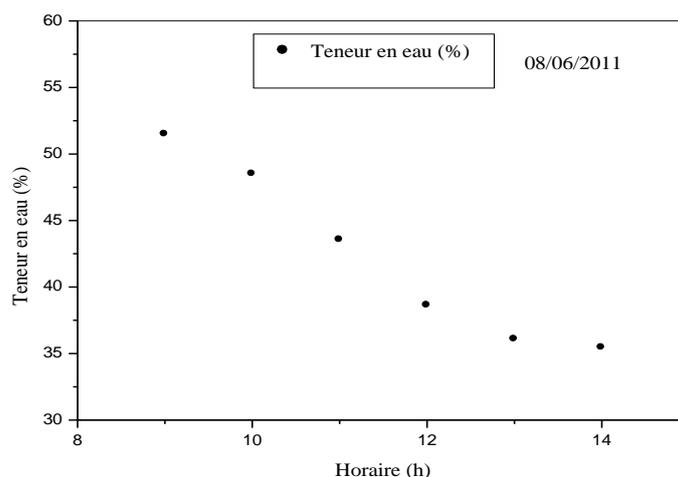
(C)



(D)



(E)



(F)

Figure (III.14) (A, B, C, D, E, F) : Variation des teneurs en eau en fonction du temps dans le cas d'association d'un panneau, deux panneau, trois panneau, quatre panneaux en parallèles

La figure (III.14) montre la variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage, la durée de séchage pour avoir une teneur en eau finale $X_f = 0,35$ kg d'eau /kg m.s qui est définie comme la teneur en eau commerciale pour les dattes Deglet Nour varie en fonction des conditions opératoires variables dans la chambre de séchage

-Avec l'utilisation d'un seul panneau solaire, le temps de séchage pour avoir une teneur en eau finale $X_f = 0,35$ kg d'eau /kg m.s est $t_1 = 16H$. L'opération de séchage pour le premier et la deuxième jour présente une diminution importante de la teneur en eau de (0.520 kg eau / kg m.s à 0.419 kg eau / kg m.s) et de (0.419 kg eau / kg m.s à 0.352 kg eau / kg m.s); ce qui explique l'évaporation d'une grande quantité d'eau à partir des dattes. Pendant deux jours successifs de séchage hybride

-Avec l'utilisation de deux panneaux solaires, le temps de séchage des dattes humides est réduit vers $t_2 = 12H$. Le temps de séchage ($t_3 = 8H$, $t_4 = 5.5H$) devient très court avec l'augmentation du nombre des panneaux connectés en parallèle pour l'alimentation de la résistance électrique, dans le cas du fonctionnement en continue de séchoir avec 3 et 4 panneaux solaires en déduit que l'évolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps pour les conditions de séchage variable dépend du nombre du panneau associé. L'influence de la température de l'air paraît très logique dans les courbes. Cela peut être

expliqué par l'augmentation de l'effet de joule dans la chambre qui sert à évaporer une quantité très importante de l'eau à partir de dattes séchées d'une part et de l'accélération de la migration interne de l'eau d'autre part donc. Plus la température est élevée en fonction du nombre du panneau connectée en parallèles plus le temps de séchage est réduit.

III.2.2.4 Choix du nombre de panneaux associés en parallèles pour stabilisation des températures de l'air en régime variable mode discontinu

III.2.2.4.1 Optimisation de la température de l'air asséchant en fonction du nombre de panneaux solaires utilisés

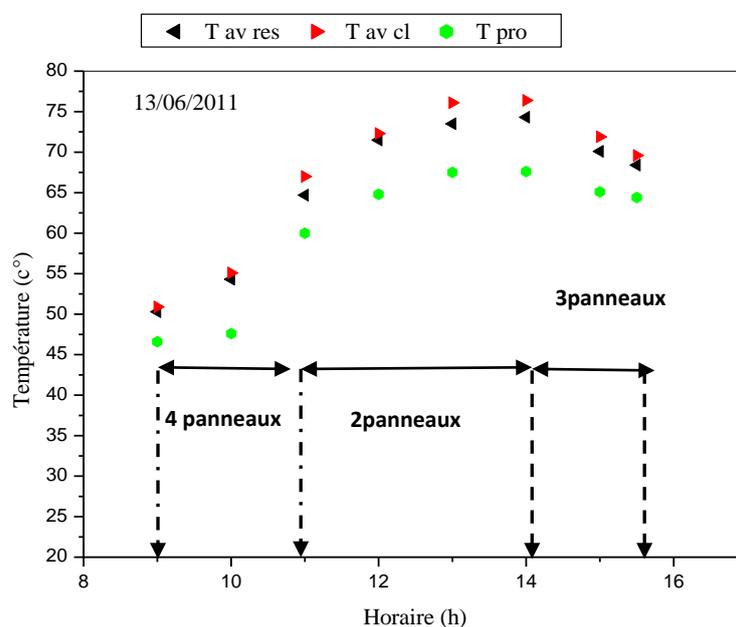


Figure (III.15) : Variation des températures en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage

La figure (III.15) représente la variation de la température en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage pour un essai d'optimisation de la température par utilisation d'un nombre des panneaux variables suivant le paramètre température de l'air asséchant et la durée de séchage des dattes selon l'alimentation en discontinue, le nombre des panneaux solaires choisis nous a permis de choisir une température de séchage pour l'importe quelle intervalle de temps pendant la journée de l'expérience

- Pour avoir une température de l'ordre de 50 °C à 67°C, on utilise pratiquement 4 panneaux pendant deux heures de séchage (9 H à 11 H).

- Pour avoir une température de l'ordre de 60 °C à 65°C, on utilise pratiquement 2 panneaux pendant deux heures de séchage (11 H a 14 H).
- Pour avoir une température de l'ordre de 69°C à 75°C, on utilise pratiquement 3 panneaux pendant deux heures de séchage (14 H a 15.5H)

III.2.2.4.2 Optimisation du nombre de panneaux solaires en parallèle pour stabiliser le séchage des dattes deglet noir humide

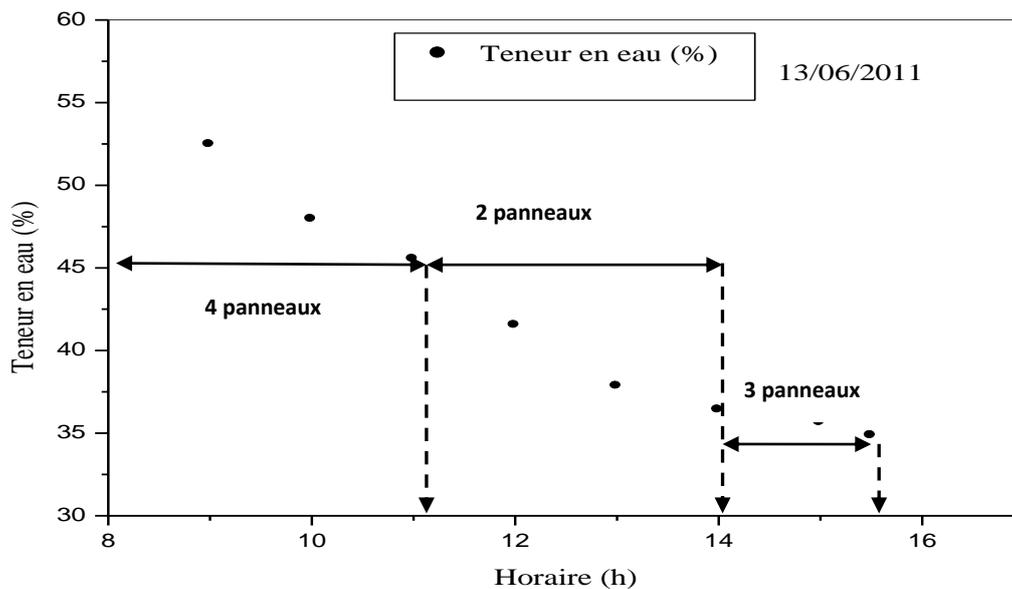


Figure (III.16) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps

La figure (III.16) montre la variation de la teneur en eau en fonction du temps par une opération d'optimisation de l'opération de séchage. L'utilisation d'un nombre des panneaux solaires différents influe sur la durée de séchage des dattes humide en fonction du temps. Le temps de séchage pour ramener le produit à la teneur en eau commerciale de 35% est de 6.5H, Cette durée est limitée par le nombre des panneaux utilisées.

-Avec l'utilisation de 4 panneaux solaires la variation de la teneur en eau est de (52.46% à 45.53 %) ; ce qui représente un taux d'évaporation de 6.93% pendant 2h

-Avec l'utilisation de 2 panneaux solaires la variation de la teneur en eau est de (45.53 % à 36.4%) ; ce qui représente un taux d'évaporation de 8.95% pendant 3h

-Avec l'utilisation de 3 panneaux solaires la variation de la teneur en eau est de (36.4% à 34.85 %) ; ce qui représente un taux d'évaporation de 1.55% pendant 1.5h

III .2. 3 stabilisations des conditions opératoires par les panneaux solaires (cas des pommes de terre tranchées)

III.2.3.1. Influence du nombre des panneaux associés sur la stabilité des températures de l'air asséchant au niveau de la chambre de séchage

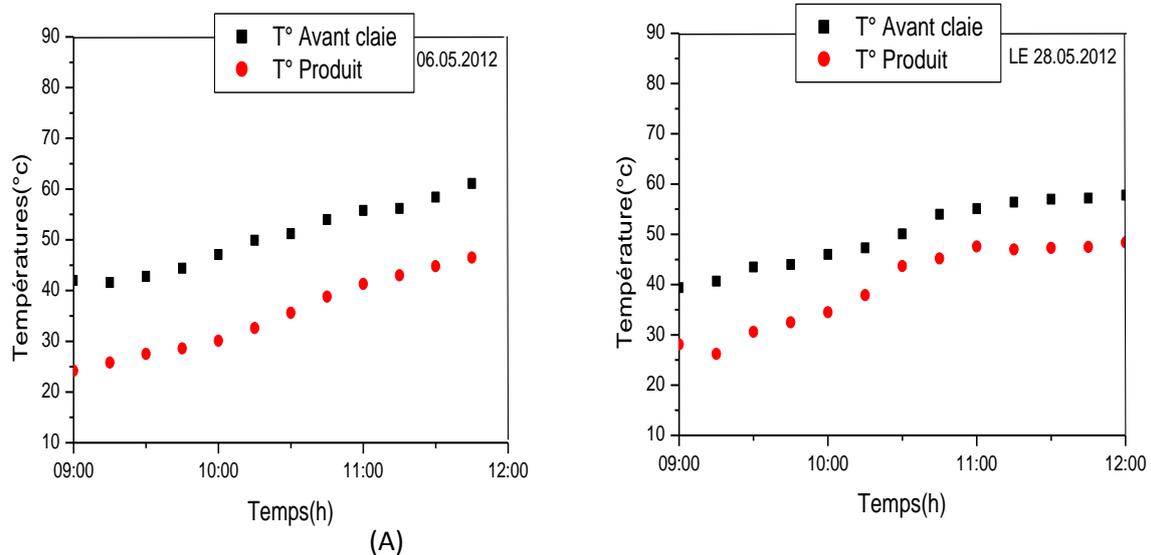


Figure (III.17) (A, B): Variation des températures en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage dans le cas d'association d'un panneau, deux panneaux en parallèles

L'évolution des températures de l'air asséchant, avant la claie et la température d'une tranche de pomme de terre, en fonction du temps, pour les différentes expériences réalisées en fonction du nombre des panneaux solaires utilisés est représentée sur la figure (III.17). La tendance des valeurs moyennes quotidiennes des températures de l'air à l'entrée de la claie et celle du produit est montrée sur tableau (III-2).

Tableau (III.2) : Valeurs minimales, maximales et tendances moyennes des températures au niveau de chambre de séchage

	1 panneau	2 panneaux
T_{cl}^{av} max	57.8	61.1
T_{cl}^{av} min	39.4	41.6
T_{cl}^{av} moy	50.1	51.2
T_{pro} max	46.4	48.5
T_{pro} min	24.1	28.2
T_{pro} moy	35.6	43.7

On peut voir qu'après une augmentation rapide et continue de la température de l'air asséchant ; la température du produit croit rapidement, l'élévation de la température peut être expliquée par l'augmentation de l'énergie thermique fournie par l'air de séchage en présence de l'appoint électrique qui sert à réchauffer la chambre de séchage .Les courbes montrent qu'il y un gradient de température croissance au début de l'opération jusqu'à la fin de séchage Les résultats précédents montrent que l'alimentation de la résistance par utilisation des panneaux solaires contribue à l'augmentation de la température avant la claie, cette élévation croit proportionnellement avec le nombre des panneaux associés en parallèle, ce qui augmente l'intensité de courant électrique et par la suite l'augmentation de la température dans la chambre en fonction de l'effet de joule produit, cette augmentation influe sur le produits séchée .Avec l'utilisation d'un seul panneau, la différence de température (air/produit) au début du séchage commence assez élevée (7-10°C), cet écart diminue avec le temps et reste constant jusqu'à la fin de séchage (5-6°C), Cette diminution est due a l'évaporation d'une quantité importante d'eau au début du séchage, le produit étant encore riche en humidité

III.2.3.2 Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage pour différentes conditions opératoires

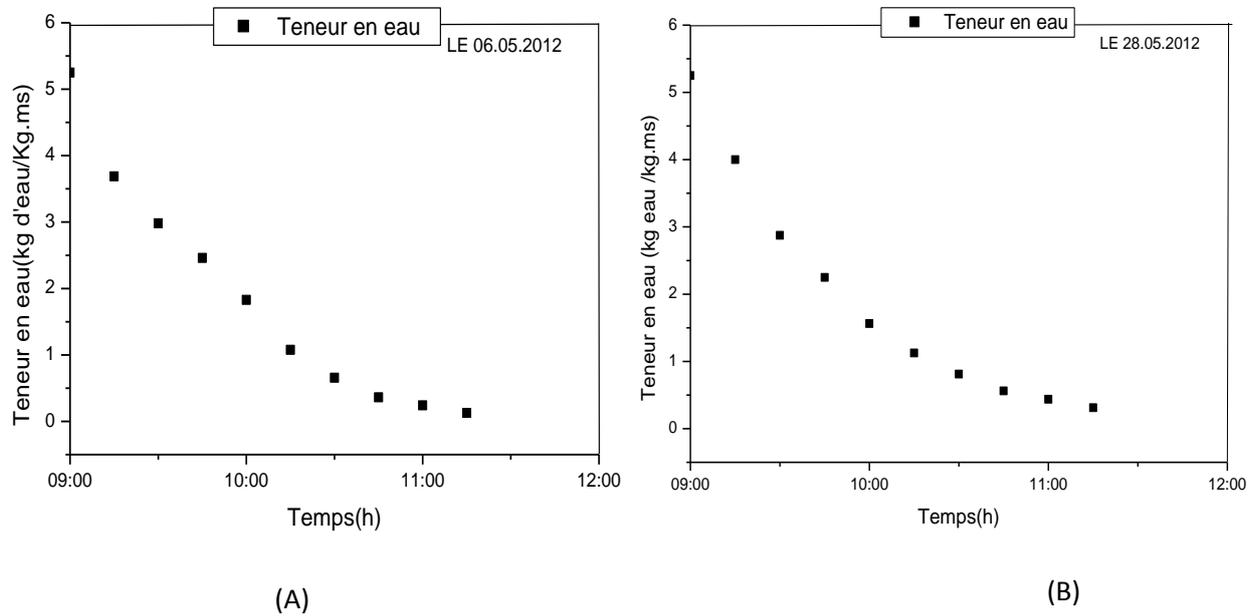


Figure (III.18) (A, B) : Variation de teneur en eau en fonction du temps dans le cas d'association d'un panneau, deux panneaux en parallèles

La figure (III.18) montre la variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage ,la durée de séchage pour avoir une teneur en eau finale $X_f = 0,13$ kg d'eau /kg m.s varie en fonction des conditions opératoires variables dans la chambre de séchage Avec l'utilisation d'un seul panneau solaire, le temps de séchage pour avoir une teneur en eau finale $X_f = 0,13$ kg d'eau /kg m.s est $t_1= 3$ heures avec une vitesse d'air asséchant égal à 0.5 m/s L'opération de séchage pour la première heure présente une diminution importante de la teneur en eau de (5.22 kg eau / kg m.s à 1.56 kg eau / kg m.s) et de (1.56 kg eau / kg m.s à 0.13 kg eau / kg m.s) pendant les deux heures restées; ce qui explique l'évaporation d'une grande quantité d'eau à partir des tranches de pomme de terre pendant une courte durée de séchage hybride .Avec l'utilisation de deux panneaux solaires, le temps de séchage des Pomme de terre diminue avec un quart heure, et égal à $t_2= 2H45min$.En déduit que l'évolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps pour les conditions de séchage variable dépend du nombre du panneau associe. L'influence de la température de l'air parait logique dans les courbes. Cela peut être expliqué par l'augmentation de l'effet de joule dans

la chambre qui sert à évaporer une quantité très importante de l'eau à partir de pomme de terre séchées. Plus la température est élevée en fonction du nombre du panneau connecté en parallèle plus le temps de séchage est réduit.

III.2.3.3 Choix du nombre de panneaux associés en parallèles pour La stabilité de température lors séchage solaire hybride des tranches de pomme de terre

III.2. 3. 3.1 Optimisation de la température de l'air asséchant en fonction du nombre de panneaux solaires utilisés

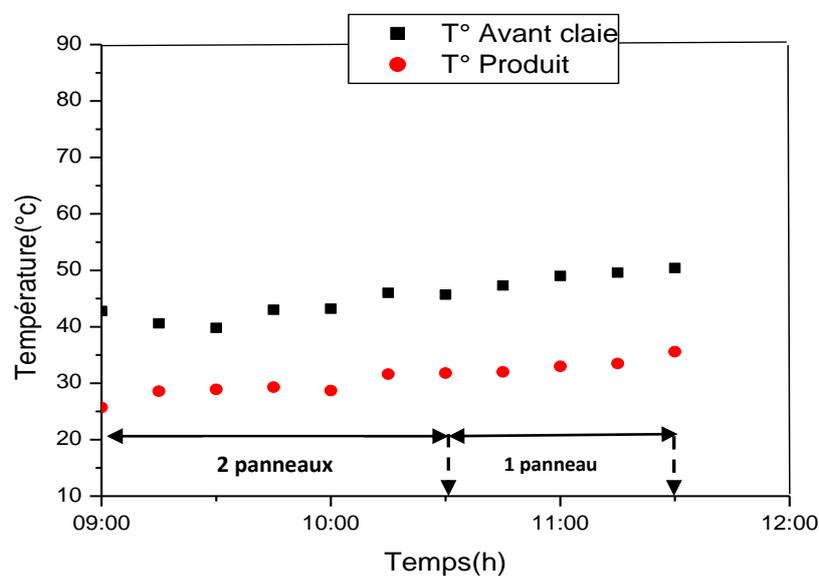


Figure (III.19) : Variation des températures en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage

La figure (III.19) représente la variation de la température en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage pour un essai d'optimisation de la température par utilisation d'un nombre des panneaux variables en suivant l'influence de nombres des panneaux associés sur l'augmentation de la température de l'air asséchant et sur la durée de séchage des pommes de terre tranchées, le nombre des panneaux solaires choisis nous a permis de contrôler la température selon le produit séché, en limitant le temps de séchage solaire pendant la journée de l'expérience

-Pour avoir une température de l'ordre de 42.8 °C à 46°C, on utilise pratiquement deux panneaux pendant une heure et demi de séchage (9 H à 10H30 min)

-Pour avoir une température de l'ordre de 45.7°C à 50.4°C, on utilise pratiquement un panneau pendant une heure de séchage (10H30 à 11H30)

III.2.3.3.2 Optimisation du nombre de panneaux solaires en parallèle pour le séchage hybride des tranches de pomme de terre

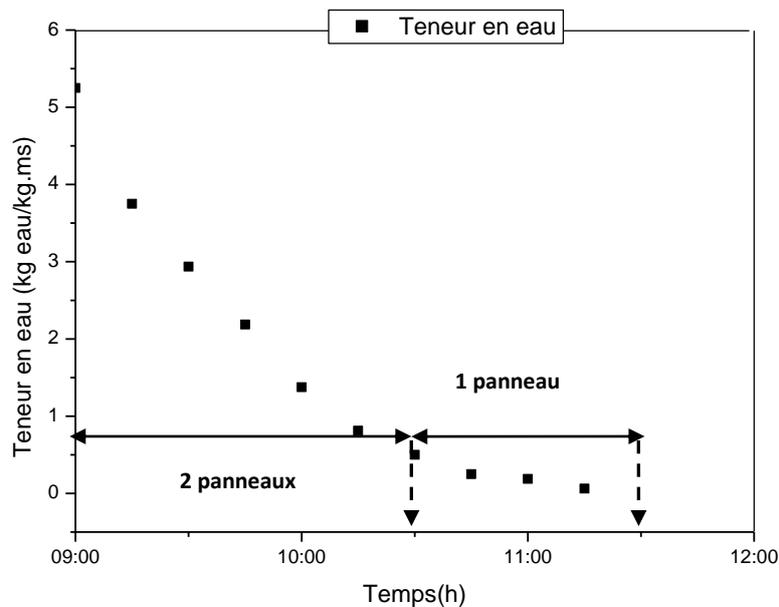


Figure (III.20) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps

La figure (III.20) montre la variation de la teneur en eau en fonction du temps par une opération d'optimisation de l'opération de séchage. L'utilisation d'un nombre des panneaux solaires différents influe sur la durée de séchage des pommes de terre en fonction du temps. Le temps de séchage pour ramener le produit à la teneur en eau finale de 0.13 kg eau/kg.ms est de 2H30min, Cette durée est limitée par le nombre des panneaux utilisés.

-Avec l'utilisation de 2 panneaux solaires la variation de la teneur en eau est de (5.25 à 0.5 kg d'eau/kg.ms) ; pendant 1h30 min

-Avec l'utilisation d'un seul panneau solaire la variation de la teneur en eau est de (0.5 kg d'eau/kg.ms à 0.13 kg d'eau/kg.ms) ; pendant 1h

III.3 Essais de stabilisation par source géothermique via échangeur air /eau

III.3.1. Influence d'utilisation de l'appoint énergétique par échangeur assisté par source géothermique sur La stabilité des températures en régime variable mode en continue

L'évolution des températures de l'air asséchant, avant la claie et la température centrale d'un échantillon de fève, en fonction du temps, pour cette expérience réalisée en fonction d'un échangeur de chaleur utilisée est représentée sur la figure (III.21).

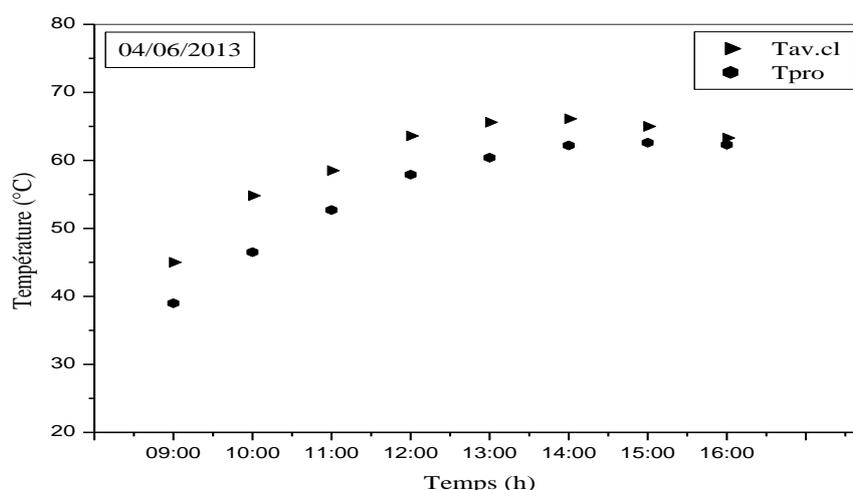


Figure (III.21) : Variation des températures en fonction du temps au niveau de la chambre de séchage.

La tendance des valeurs moyennes quotidiennes des températures de l'air avant la claie et celle du produit est montrée sur tableau (III. 3).

Tableau (III. 3) : Valeurs minimales, maximales et tendances moyennes des températures au niveau de chambre de séchage

	Séchage en continue avec utilisation d'un échangeur de chaleur)
T_{av.cl} min (°C)	45
T_{av.cl} max (°C)	66.1
T_{av.cl} moy (°C)	60.2
T_p min (°C)	49
T_p max (°C)	62.6
T_p moy (°C)	55.4

L'utilisation de l'échangeur de chaleur comme source supplémentaire de chaleur sert à augmenter la température de l'air préchauffée par le capteur solaire et par la suite augmenter la quantité de chaleur fournie par l'air de séchage vers le produit à séché. La température maximale de l'air égale à 66.1°C , avec $T_{\text{air.moy}}=60.2^{\circ}\text{C}$. On constate il existe un gradient de température entre la température de l'air et la température du produit, ce gradient commence assez élevée $\Delta T_{\text{max}}=8.3^{\circ}\text{C}$. Ce gradient décroît en fonction du temps jusqu'à la fin de l'opération de séchage $\Delta T_{\text{min}}=1^{\circ}\text{C}$. On peut voir qu'après une augmentation rapide et continue de la température de l'air asséchant jusqu'à atteint une valeur maximale $T_{\text{air}}=62.3^{\circ}\text{C}$; la température du produit croît rapidement à une valeur maximale égale à $T_{\text{pro}}=61.2^{\circ}\text{C}$, l'élévation de la température peut être expliquée par l'augmentation de l'énergie thermique fournie par l'air de séchage en présence de l'échangeur de chaleur qui sert à réchauffer la chambre de séchage. Le courbe montre qu'il y un gradient de température commence avec un écart important, il diminue en fonction du temps jusqu'à la fin de séchage. Cette augmentation influe sur le produits séchée qui permet de l'évaporation d'une quantité importante d'eau jusqu'à la fin de l'opération de séchage ou atteint la teneur en eau finale.

III.3.2. Variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage en mode continue

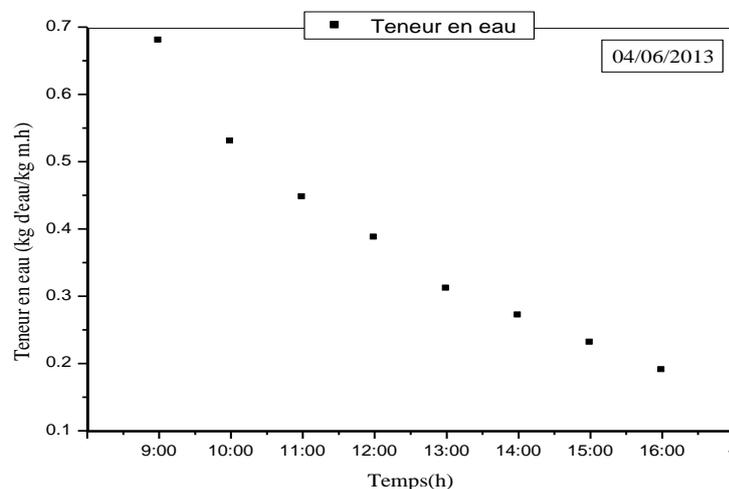


Figure (III.22) : Variation de teneur en eau en fonction du temps

La figure (III.22) montre la variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage, la durée de séchage pour avoir une teneur en eau finale $X_f = 0,13\text{kg d'eau /kg ms}$ varie en fonction des conditions opératoires variables dans la chambre de séchage. Avec l'utilisation l'échangeur de chaleur, le temps de séchage pour avoir une teneur en eau finale $X_f = 0,13\text{ kg}$

d'eau /kg m.s avec une durée de séchage égale à 7 heures en continue. En déduit que l'évolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps pour les conditions de séchage variable dépend la température de l'air asséchant ou atteint dans ces conditions jusqu'à 66.6°C.

III.4. Influence de différentes techniques de séchage solaire sur la qualité des produits

III.4.1 Présentation de l'appareil de mesure

Le colorimètre CR-400, convient à la mesure de la couleur réfléchié et de la différence de couleur dans de nombreux secteurs industriels. Il répond aux besoins de nombreuses applications : tous types d'ingrédients, d'aliments, de matières brutes et de produits finis, applications pharmaceutiques et dermatologiques. Les principales améliorations concernent l'utilisation et les fonctions sont la nouvelle conception du calculateur(DP400), grand écran retro-éclairé pour l'affichage de données numériques ou graphiques et imprimante thermique rapide intégrée. La mémoire peut conserver jusqu'à 100 couleurs de cibles et 2 000 mesures. Plusieurs nouveaux espaces colorimétriques et des formules de type « Accepté/refusé » ainsi que des indices de blanc et de jaune améliorent l'utilisation dans de nombreuses applications diversifiées.[118]



Figure (III.23) : Colorimètre Minolta type CR-400

III.4.2 Procédure de travail

La quantification des changement de couleur des échantillons traités a été déterminée en utilisant un colorimètre Minolta CR-400 permettant l'acquisition automatisée des Paramètres L , a , b , dans le système Hunter-L a b où L représente le paramètre d'échelle Noir/blanc, a le paramètre d'échelle rouge/vert et b le paramètre d'échelle jaune/bleu. Pour chaque prélèvement d'échantillon des produits séchés (grains de fève , pomme de terre tranchée et des dattes deglet noir séchés), les paramètres de couleur de la surface de trois échantillons de la fève , des pommes de terre tranchées et des dattes deglet noir ont été

mesurés puis ramenés à une moyenne. Le changement de couleur global est alors exprimé par la quantité ΔE dite distance de couleur. C'est une valeur simple qui tient compte des différences de L, de a et de b entre un échantillon et un autre échantillon de référence. ΔE est calculée en utilisant l'équation 1, où L_0 , a_0 et b_0 se rapportent aux valeurs de couleur mesurées pour un échantillon de la fève sèche commerciale et par rapport aux valeurs de couleur mesurées pour un échantillon de la pomme de terre tranchée fraie et par rapport à un échantillon commerciale de dattes deglet noir

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (\text{III.1})$$

III.4.3 Les différents états des produits alimentaires séchés (grains de fève , pomme de terre tranchées les dattes deglet noir séchés)

- Des grains de fèves sèches commerciales (échantillon de référence)
- Des grains de fève séchés dans un séchoir hybride sous conditions de séchage solaire constante à des températures de l'ordre de (50°C, 60°C, 65°C)
- Des grains de fève séchés dans un séchoir hybride (sans appoint en régime variable)
- Des grains de fève séchés dans un séchoir hybride (source solaire/ échangeur de chaleur)
- Une tranche de pomme de terre de variété *Désirée* fraîche (échantillon de référence)
- Une tranche de pomme de terre séchée dans un séchoir solaire hybride dans le cas ou la température de séchage optimisée
- Une tranche de pomme de terre séchée dans un séchoir solaire hybride (1 panneau solaire)
- Une tranche de pomme de terre séchée dans un séchoir solaire hybride (2 panneaux solaire)
- Une tranche de pomme de terre séchée dans un séchoir solaire hybride (2,1 panneau solaire)
- Les dattes Deglet Nour fraîche (échantillon de référence)
- Les dattes Deglet Nour séchées dans un séchoir solaire hybride aux différentes conditions opératoires constantes
- Les dattes séchées dans un séchoir hybride (solaire-1panneau solaire)
- Les dattes séchées dans un séchoir hybride (solaire-2panneaux solaires)
- Les dattes séchées dans un séchoir hybride (solaire-3panneaux solaires)
- Les dattes séchées dans un séchoir hybride (solaire-4panneaux solaires)
- Les dattes séchées dans un séchoir hybride (solaire-4-2-3 panneaux solaires)

III.4.4 Résultats expérimentaux

Afin d'évaluer l'effet du séchage sur l'évaluation de couleur des grains de fèves, des dattes deglet noir et des pomme de terre tranchée nous avons choisi d'utiliser la distance de couleur ΔE comme paramètre de distinction entre les différents états. A cet effet nous avons utilisé les mesures faites sur l'échantillon de fève commerciale et un échantillon frais de la pomme de terre tranchée comme des références et un échantillon des dattes deglet noir commerciale permettant de calculer la grandeur ΔE à partir de la relation (III .1) donnée ci-dessus. Les mesures de référence étant les suivants :

-Pour les grains de féve $L_0= 103.12$ $a_0= -4.27$ $b_0= 34.26$

-Pour les tranches de pomme de terre $L_0= 75,24$ $a_0= 1,325$ $b_0= 13,32$

-Pour les dattes deglet noir : $L_0=27,62$ $a_0=8.89,$ $b_0=9.36$

III.4.4 .1 Détermination de la couleur des fèves séchées aux différentes conditions opératoires (solaire, échangeur de chaleur et réseau électrique)

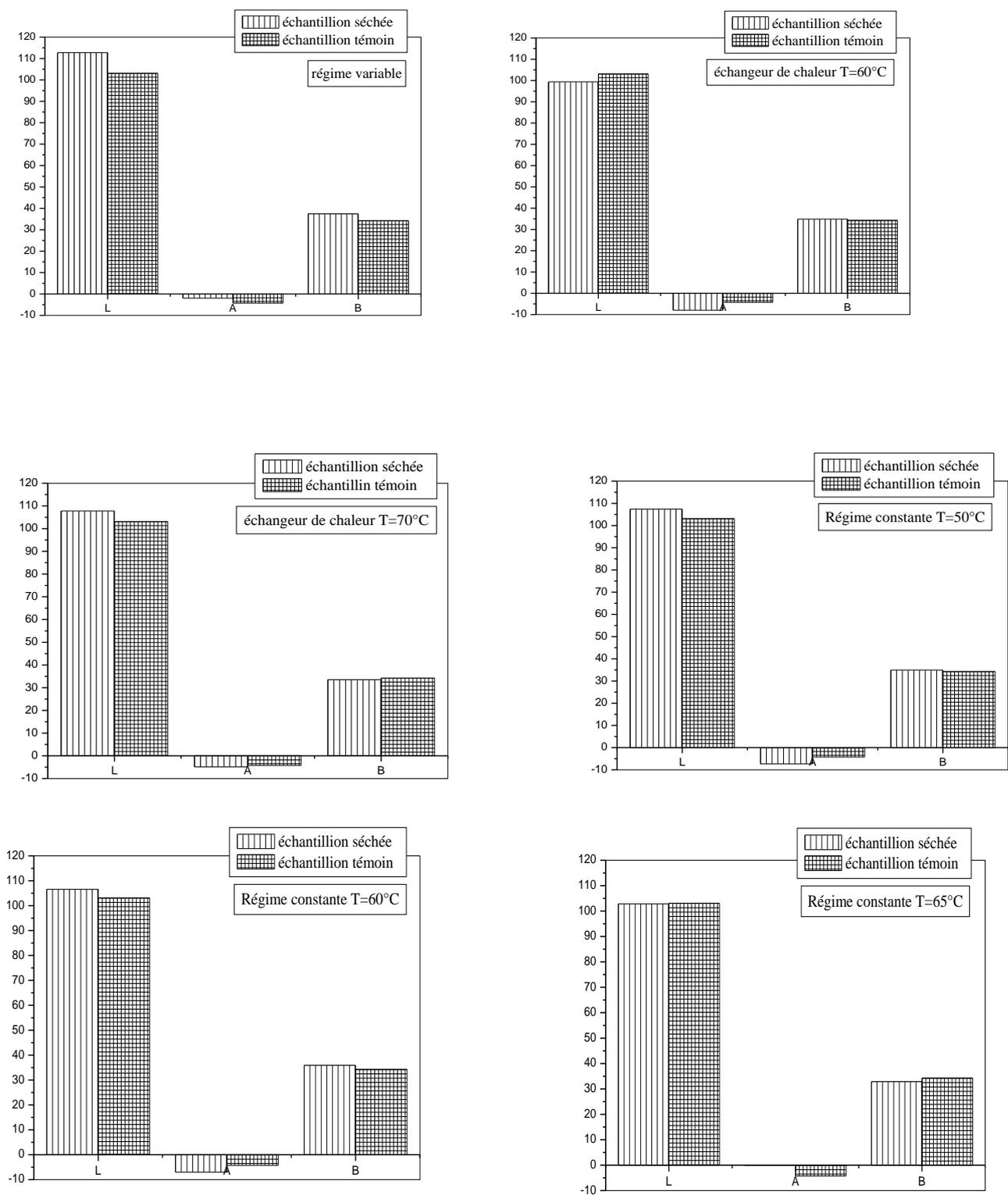


Figure (III.24) : Détermination des paramètres de couleur des graines de fève séchée sous différentes conditions opératoires

Sur la figure (III.24) nous avons présenté les résultats des mesures de couleur L, a, b effectuées sur des échantillons séchés à 0.13 (kg eau/kg produit) correspondants aux différents essais de séchage présentés dans notre étude, selon les conditions opératoires utilisés dans chaque expérience telles que montrées ci-dessous :Le calcul de la distance de couleur ΔE a été fait sur la base des valeurs moyennes calculées par 6 mesures faites pour chaque échantillon.

Les valeurs calculées de ΔE sont données par la figure (III.25) suivant :

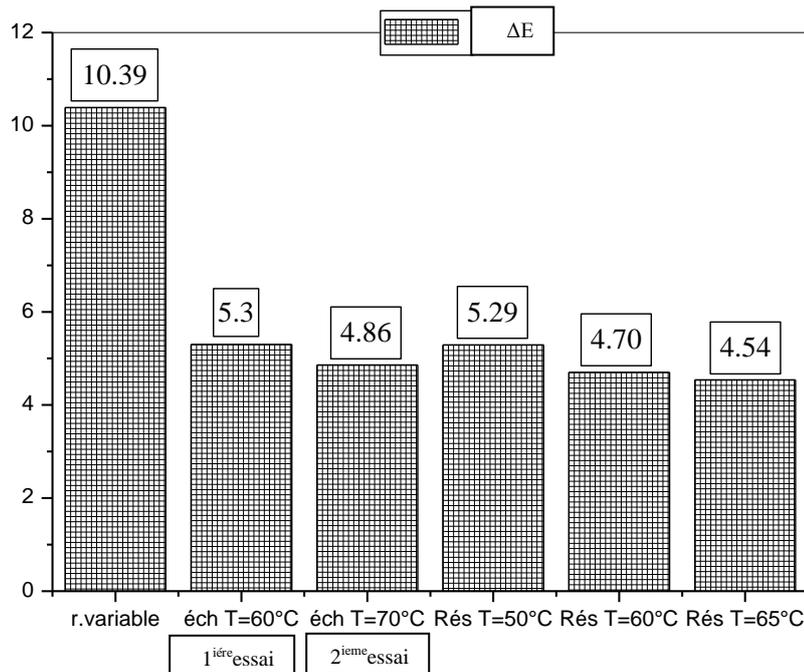
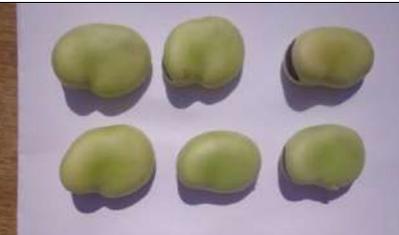
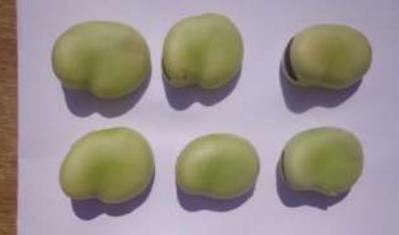
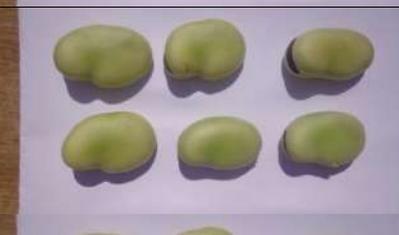
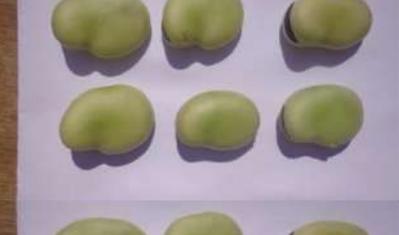
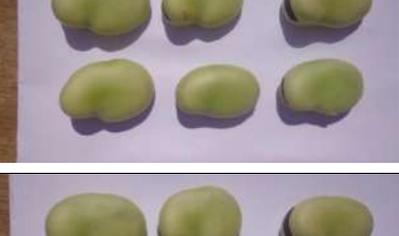


Figure (III.25) : Variation de l'indice de qualité pour différents échantillons de fèves

On remarque que la variation de différence de couleur ΔE dépend de plusieurs paramètres, tel que le mode d'appoint utilisé qui maintient des différentes températures aux quels les échantillons sont directement exposés et la durée de séchage. En effet la différence de couleur la plus grande $\Delta E = 10.39$ était trouvé dans le cas de régime variable (sans appoint). Par ailleurs la plus petite valeur de distance de couleur $\Delta E = 4.54$ a été trouvée avec l'échantillon séché dans le cas de régime constant de $T = 65^\circ\text{C}$. La différence de couleur dans le cas de $T = 50^\circ\text{C}$ et $T = 60^\circ\text{C}$ sont respectivement $\Delta E = 5.29$ et $\Delta E = 4.70$. Dans le cas de utilisation de (l'échangeur de chaleur/source géothermique) comme appoint supplémentaire d'énergie, la différence de la couleur pour deux essais de séchage en continue égale respectivement $\Delta E = 5.3$ et $\Delta E = 4.86$. D'après les résultats retrouvés, on peut choisir les échantillons des fèves séchés dans des conditions constantes à $T = 60^\circ\text{C}$ et sous séchage par énergie géothermique avec $\Delta E = 4.54$ et $\Delta E = 4.86$ comme les échantillons de meilleur qualité des fèves séchés destinées pour la conservation avec une couleur acceptable similaire a la couleur de la fève commerciale

Chapitre III Etude de possibilité de stabilisation des conditions opératoires dans Le séchoir solaire convectif

Tableau (III.05) : Etat visuelle de la qualité des fèves séchées aux différentes conditions opératoires

	L'état initial des Grains des fèves	L'état final des Grains	ΔE
Régime variable (Sans appoint)			10.39
Première essai avec l'utilisation de l'échangeur			5.3
Deuxième essai avec l'utilisation de l'échangeur			4.86
Resistance à T=50°C			5.29
Resistance à T=60°C			4.70
Resistance à T=65°C			4.54

III.4.4 2 Détermination de la couleur des Pommes de terre séchées sous différentes conditions opératoires (solaire, panneaux photovoltaïque)

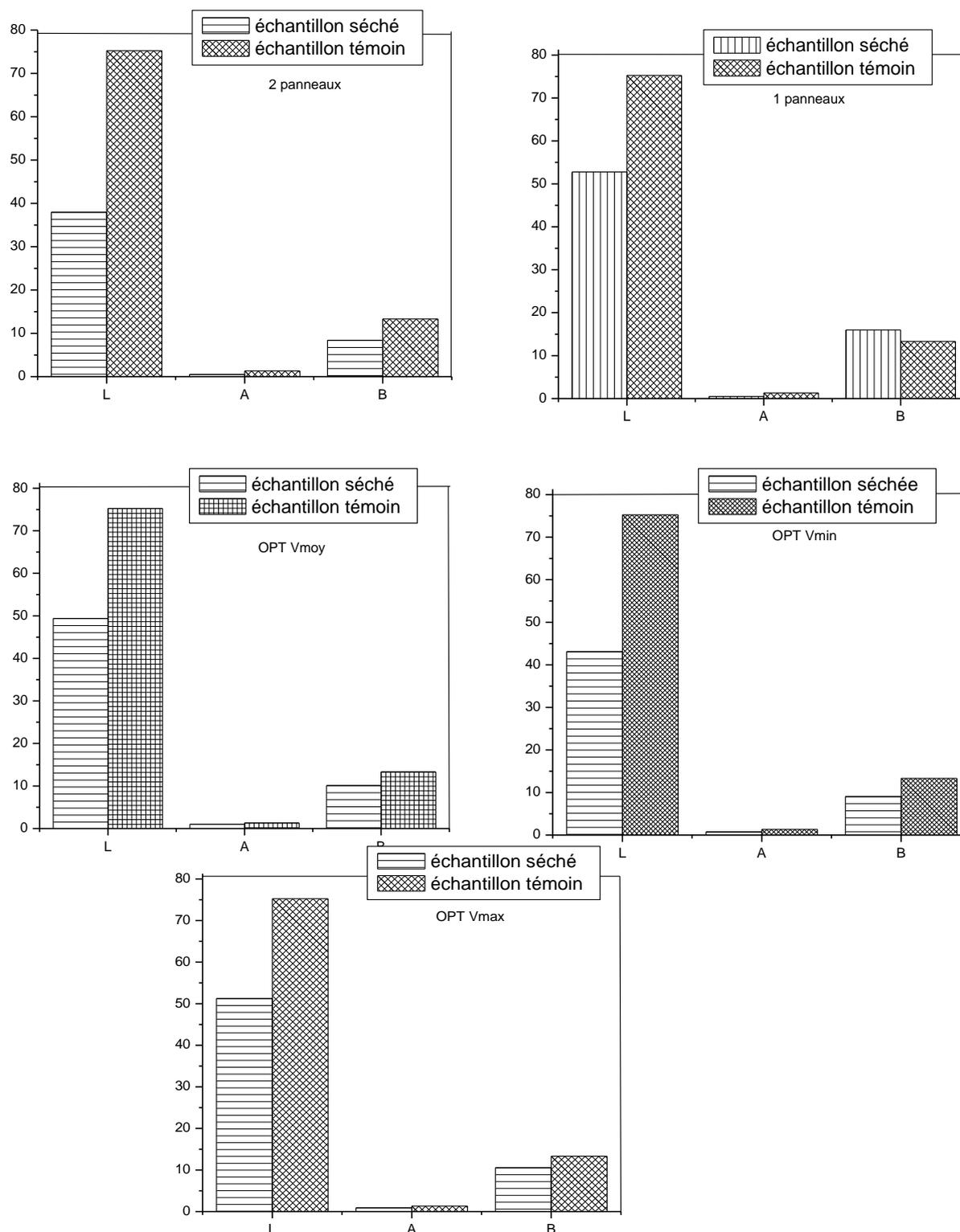


Figure (III.26) : Détermination de couleur des tranches de pomme de terre durant le séchage solaire

Sur la figure (III-26) nous avons présenté les résultats des mesures de couleur L, a, b effectuées sur des échantillons séchés à 0.13 (kg eau/kg de matière sèche) correspondants aux différents essais de séchage présentés dans notre étude, selon le nombre des panneaux solaire utilisés dans chaque expérience telles que montrées ci-dessous : Afin d'évaluer l'effet du séchage sur l'évaluation de couleur des tranches de pomme de terre, nous avons choisi d'utiliser la distance de couleur ΔE comme paramètre de distinction entre les différents états. A cet effet nous avons utilisé les mesures faites sur l'échantillon initial avant séchage comme référence permettant de calculer la grandeur ΔE à partir de la relation (IV-1) donnée ci-dessus. Les mesures de référence étant les suivants $L_0= 75,24$, $a_0= 1,325$, $b_0= 13,32$ Le calcul de la distance de couleur ΔE a été fait sur la base des valeurs moyennes calculées par 5 mesures faites pour chaque échantillon. Les valeurs ainsi calculée de ΔE sont données par la figure (III-27) suivant :

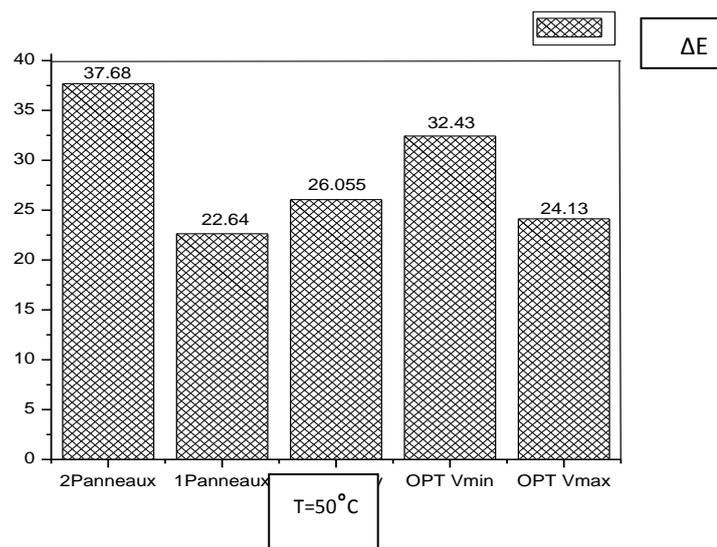


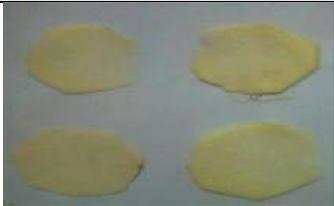
Figure (III.27) : Variation de l'indice de qualité pour différentes tranches séchées

On remarque que cette variation de différence de couleur ΔE dépend de plusieurs paramètres notamment climatiques tels que les températures aux quels les échantillons sont directement exposés, la température de l'air de séchage et la durée de l'opération. En effet la différence de couleur la plus grande $\Delta E = 37.68$ était trouvé dans le cas de 2 Panneaux. Par ailleurs la plus petite valeur de différence $\Delta E = 22.64$ a été trouvée avec l'échantillon séché avec l'utilisation d'un seul panneau avec temps de séchage égale 3h. Pour $\Delta E = 24.13$, le temps de séchage égale 2H45mn

Chapitre III Etude de possibilité de stabilisation des conditions opératoires dans Le séchoir solaire convectif

De ce fait on peut conclure que le séchage solaire hybride des tranches de pomme de terre avec changement des panneaux suivant de temps pourrait être défini comme état optimal qualité/durée de séchage.

Tableau (III.06) : Etat visuelle de la qualité de pomme de terre variété *Désirée* séchées

Nombre des panneaux	L'état initial des Tranches	L'état final des Tranches
1 Panneau		
2 Panneaux		
essai de stabilisation 1 V = 0.4 m/s		
Essai de stabilisation2 V = 0.3 m/s		
Essai de stabilisation3 V = 0.5 m/s		

III.4.4.3 Détermination de la couleur des dattes Deglet Nour séchées aux différentes conditions opératoires

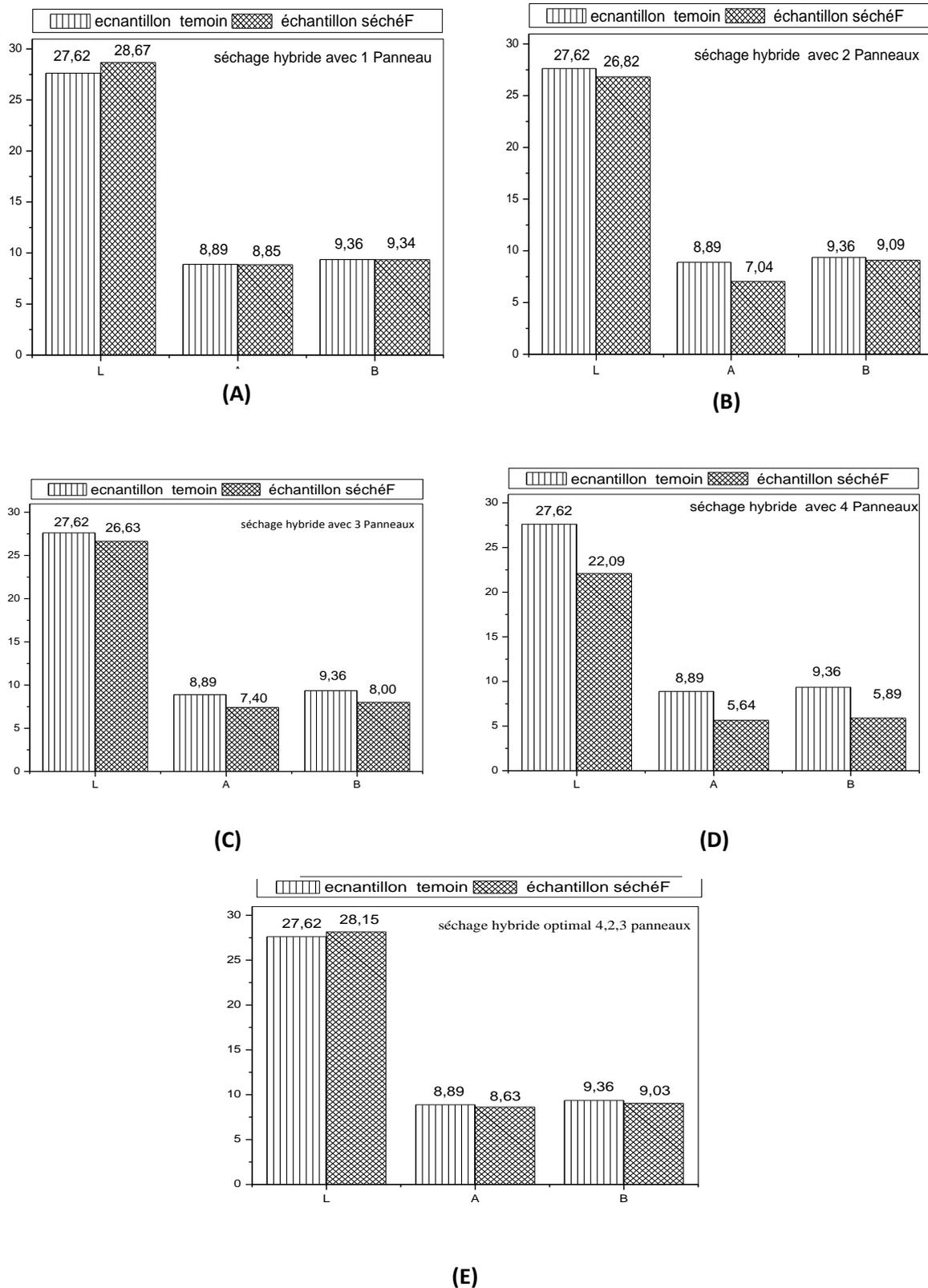


Figure (III.28) : Détermination de couleur des dattes durant le séchage solaire

Sur la figure (III-28) nous avons présenté les résultats des mesures de couleur L, a, b effectuées sur des échantillons séchés à 0.35 kg eau/kg de matière sèche correspondants aux différents essais de séchage menés dans notre étude, à savoir le nombre des panneaux solaire utiliser dans chaque expérience telles que montrées ci-dessous :

Afin d'évaluer l'effet du séchage sur l'évaluation de couleur des dattes nous avons choisi d'utiliser la distance de couleur ΔE comme paramètre de distinction entre les différents états. A cet effet nous avons utilisé les mesures faites sur l'échantillon initial avant séchage comme référence permettant de calculer la grandeur ΔE à partir de la relation (5-1) donnée ci-dessus. Les mesures de référence étant les suivants : $L_0=27,62$ $a_0=8.89$, $b_0=9.36$

Le calcul de la distance de couleur ΔE a été fait sur la base des valeurs moyennes calculées par 10 mesures faites pour chaque échantillon. Les valeurs ainsi calculée de ΔE sont données par la figure (III-29) suivant :

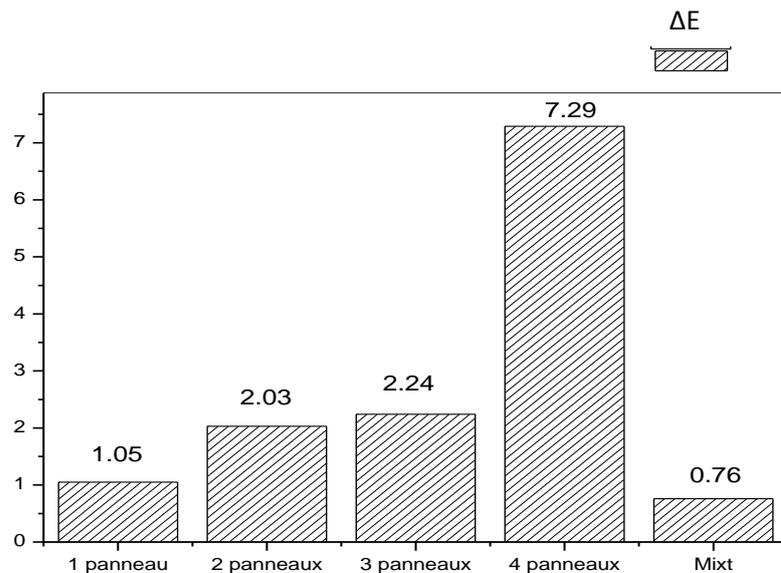


Figure (III.29) : Variation de l'indice de qualité pour différentes dattes séchées

On remarque que cette variation de différence de couleur ΔE dépend de plusieurs paramètres notamment climatiques tels que les températures aux quels les échantillons sont directement exposés, la température de l'air de séchage et la durée de l'opération. En effet la différence de couleur la plus grande $\Delta E = 7.29$ était trouvé dans le cas de 4 Panneaux. Par ailleurs la plus petite valeur de différence $\Delta E = 0.76$ a été trouvée avec l'échantillon séché dans l'essai de changement des panneaux avec temps de séchage égale 6.5h. Et on trouve que la différence de couleur dans les cas de 2 panneaux et 3 panneaux égale respectivement

Chapitre III Etude de possibilité de stabilisation des conditions opératoires dans Le séchoir solaire convectif

$\Delta E=2.03$ et $\Delta E=2.24$ avec temps de séchage moyen (1 jours) pour $\Delta E=0.76$ De ce fait on peut conclure que le séchage solaire hybride des dattes avec changement des panneaux suivant de temps pourrait être défini comme état optimal qualité/durée de séchage.

Tableau (III.07) : Etat visuelle de la qualité des dattes Deglet Nour séchées

Nombre des panneaux	L'état initiale des dattes	L'état finale des dattes
Avec 1 Panneau		
2 Panneaux		
3 Panneaux		
4 Panneaux		
Mixte (4 ,2,3) Panneaux		

Conclusion

A partir des résultats obtenus dans ce chapitre on peut conclure que :

- L'étude de possibilité de stabilisation des conditions opératoires dans le séchoir solaire convectif indirect a été faite avec différents produits alimentaires (grains de fèves , les pommes de terre tranchées et dattes deglet noir)
- L'étude de stabilité des températures en régime constant a été réalisée par un régulateur de température en mode discontinue en utilisant l'énergie électrique, les températures de l'air de séchage sont maintenues, les conditions opératoires sont favorables pour réaliser des essais avec une courte durée
- Pour stabiliser les conditions opératoires nous utilisons l'énergie photovoltaïque, les résultats expérimentaux montrent des intervalles de stabilité des températures en régime variable en fonction du nombre des panneaux solaires connectés en parallèles
- La stabilité en utilisant l'énergie géothermique par échangeur de chaleur air/eau en régime variable mode continue nous donne des températures de séchage très élevées
- Les résultats de test de qualité par couleur est satisfaisante pour définir des cas optimales de séchage qualité /durée /essai de stabilité

Chapitre IV
Développement des
modèles de séchage des
produits d'étude

Introduction

la modélisation mathématique des différents produits d'étude a été réalisée par l'application de plusieurs modèles en couches minces choisis dans la littérature pour le séchage de notre produit d'étude (dattes, Deglet nour, pomme de terre tranchées et grains de fève) et pour ajuster les données de séchage dans les modèles les plus appropriés par des méthodes statistiques en utilisant le logiciel (curve expert 1.4) .

IV.1 Développement des modèles de séchage des produits agroalimentaires.

La plupart des études de modélisation dans la littérature ont été basées sur le séchage en couche mince des produits tels que(les dattes [102,105] , les pommes de terre [95, 98]) . Par contre, les études sur le séchage des grains de fève sont indisponibles. Des travaux de recherche ont été réalisés par l'équipe de recherche de laboratoire LENREZA sur la modélisation de séchage en couche mince de notre produits d'étude (dattes deglet nour , pommes de terre tranchées , grains de fève), nous rappelons que les principaux résultats issus de la littérature concernant les dattes et les pommes de terre sont présentés dans le chapitre II, dans cette partie en citant les résultats obtenus par notre groupe de recherche concernant les dattes deglet nour et les pommes de terres tranchées séchés dans le séchoir solaire convectif ensuite nous présentons notre travail de modélisation des grains de fève

IV.2 Détermination du modèle le plus approprié

dans notre présente étude, le choix d'un modèle approprié à la description de l'allure de séchage des produits alimentaires séchés (les dattes Deglet nour , les pommes de terre et les grains de fève) est basé sur la confrontation des courbes estimées par chacun des modèles à celles expérimentales avec une analyse des résidus en appliquant aux différentes températures. On a procédé d'autre part à l'analyse statistique utilisant les critères suivants : [119 , 120]

- Une erreur standard de l'évaluation (S) minimale.
- Un coefficient de corrélation (r) élevé. - Une fonction Chi-2 minimale.

IV.3 Détermination des diffusivités effectives

L'eau migre de l'intérieur vers la surface du produit sous l'action de divers mécanismes qui peuvent se combiner. Il est généralement admis que le transport capillaire est l'un des mécanismes fondamentaux dans les produits poreux riches en eau. Dans les produits alimentaires, on préfère souvent attribuer le transport d'eau à une diffusion d'eau liquide sous l'effet du gradient de concentration. L'évolution de la

teneur en eau s'exprime en fonction du gradient de teneur en eau et d'une diffusivité globale qui regroupe les différents phénomènes de transport, dans une loi analogue à la seconde loi de Fick : La deuxième loi de Fick de diffusion, a été largement utilisée pour décrire le processus de séchage pour la plupart des produits biologiques [121,122]. En supposant l'uniformité de la distribution de l'humidité initiale, les résistances externes négligeables et un processus isotherme, la solution de la deuxième loi de Fick proposée par Crank est:

$$\frac{\partial X^*}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X^* \quad (\text{IV-1})$$

avec D_{eff} , diffusivité effective (en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) qui, le plus souvent, varie avec la température et la teneur en eau du produit et est affectée par la rétraction de la matrice solide. La solution analytique de la deuxième loi de Fick, développée par Crank Dans le cas d'une plaque infinie, en assumant la distribution initiale uniforme d'humidité, avec la simplification du mouvement d'humidité par diffusion, rétrécissement négligeable, coefficients de diffusion constants et la température peut être exprimée par:

$$X^* = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,2,3,\dots} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} (2n+1)^2\right) \quad (\text{IV-2})$$

D_{eff} : Coefficient de diffusion effectif (m^2/s)

L : La demi-épaisseur du produit (m)

$n=1, 2, 3, \dots$ Le nombre de limites prises en compte

Lorsque le temps est suffisamment grand, tous les termes de la série sont négligeables devant le premier et on obtient:

$$X^* = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (\text{IV-3})$$

L'équation (IV. 3) peut s'écrire :

$$\ln(XR) \cong \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (\text{IV-4})$$

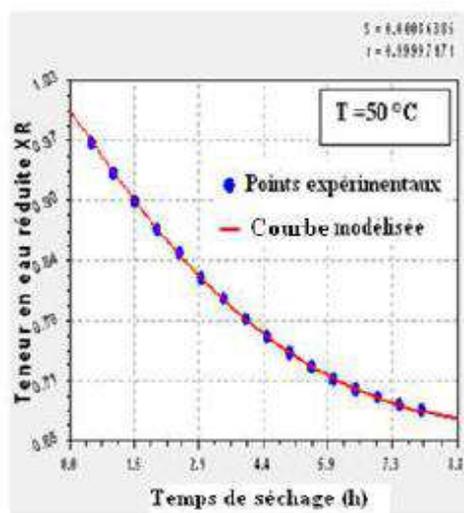
Le coefficient de diffusion pour chaque température de séchage a été calculé en substituant les données expérimentales dans l'équation précédente. Le coefficient de diffusion est déterminé en traçant les données expérimentales de séchage en termes de $\ln(XR)$ en fonction du temps de séchage,

Le tracé de L'équation (IV-4) donne une ligne droite avec une Pente $\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right)$ ce qui permet de calculer le coefficient de diffusion effectif pour différentes conditions aérothermiques

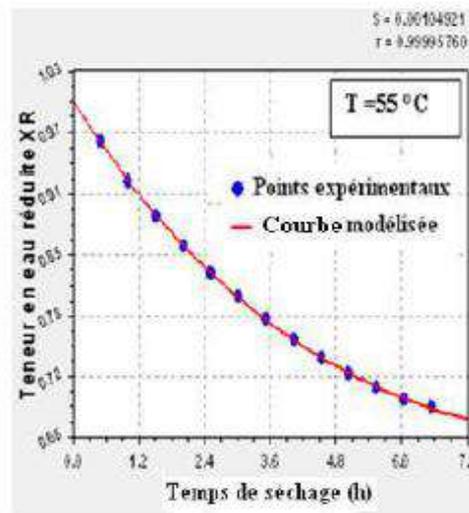
IV.4 Résultats des modélisations mathématiques des différents produits d'étude

IV.4.1 Résultats de modélisation des dattes deglet noir :

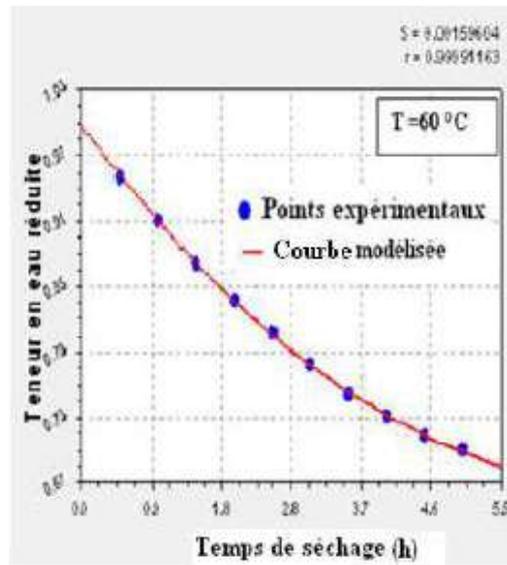
Les représentations graphiques correspondantes ont été effectuées à l'aide du logiciel (Curve Expert 1.4) en utilisant une technique de régression par utilisation d'options «Define a user model». Les différents modèles sont comparés en s'appuyant sur leurs coefficients de corrélation (r) et l'erreur standard (S). Les figures (IV.1- a,b,c,d,) montrent qu'il existe un excellent accord entre les teneurs en eau réduites expérimentales et celles prédites par le modèle de Midilli et Kucuk. d'après la comparaison entre les paramètres statistiques (S) et (r) de chaque modèle dont La valeur la plus élevée de coefficient de corrélation se trouve dans le modèle de Midilli et Kucuk pour T= 65°C : (r = 0.99999307), et la valeur minimale de l'erreur standard de l'évaluation se trouve dans le modèle parabolique pour T= 50°, (S = 0.00043707).



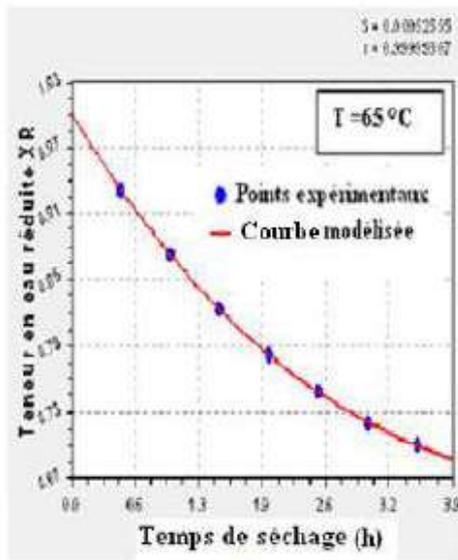
(a)



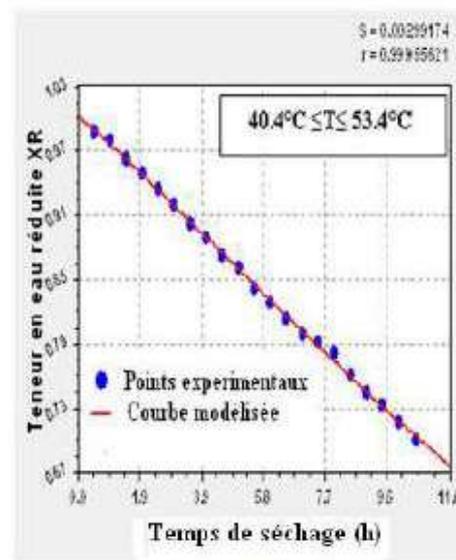
(b)



(c)



(d)



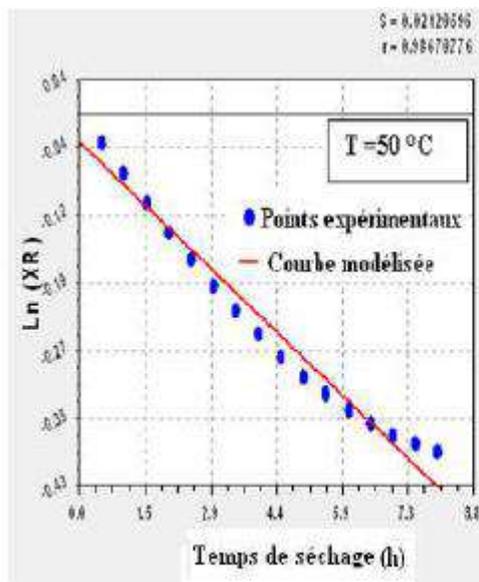
(e)

Figure (IV-1a,b,c,d,e) : Teneur en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de temps de séchage.

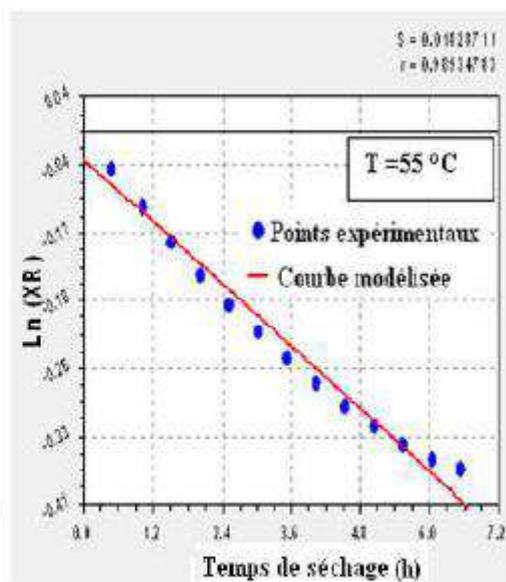
Tableau (IV.1) : Les coefficients de la diffusion effective pour différentes conditions Aérothermiques

Essai N°	T(°C)	Temps de séchage	Coefficient de diffusion effectif D_{eff} (m ² /h)	Coefficient de corrélation
1	50	8	$2,5426.10^{-6}$	0.98670776
2	55	6.5	$2,93471.10^{-6}$	0.98934783
3	60	5	$3,6744.10^{-6}$	0.99321021
4	65	3.5	$5,41963.10^{-6}$	0.99017236
5	40.4°C ≤T≤ 53.4°C	10.5	$1,66618.10^{-6}$	0.99849190

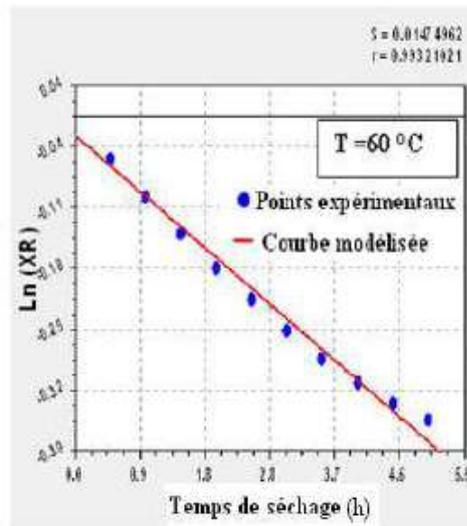
Dans les essais 1,2,3,4 (sous conditions constantes), la valeur du coefficient de diffusion effectif augmente en fonction de l'augmentation de températures ,elle donne la valeur maximale dans l'essai N°4, dont $D_{eff} = 5,41963.10^{-6}$. m²/h, pour T = 65°C, dans l'essai N°5(à conditions variables), présente la plus petit valeur $D_{eff} = 1.66618.10^{-6}$. m²/h [112]



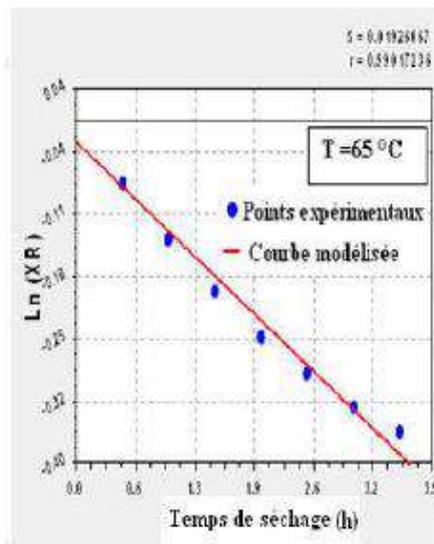
(a)



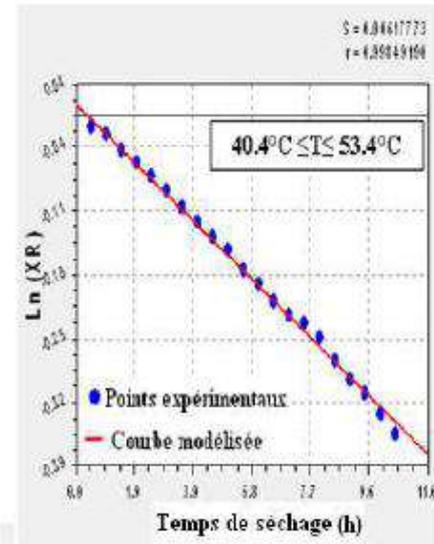
(b)



(c)



(d)



(e)

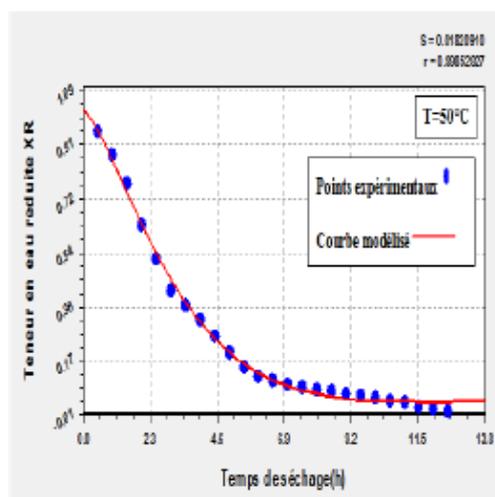
Figure (IV.2-a,b,c,d,e): Variation du logarithme népérien de la teneur en eau réduite en fonction de temps de séchage.

IV.5.4 Résultats de modélisation des pommes de terre tranchés:

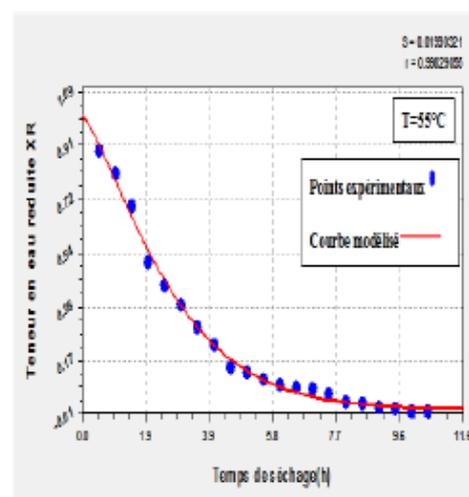
Les figures (IV.3.-a,b,c,d,) montrent qu'il existe un excellent accord entre les teneurs en eau réduites expérimentales et celles prédites par le modèle de Midilli et Kucuk, d'après la comparaison entre les paramètres statistiques (S) et (r) [123]:

-La valeur la plus élevée de coefficient de corrélation se trouve dans le modèle de Midilli et Kucuk pour $T= 50^{\circ}\text{C}$: ($r=0.99852827$).

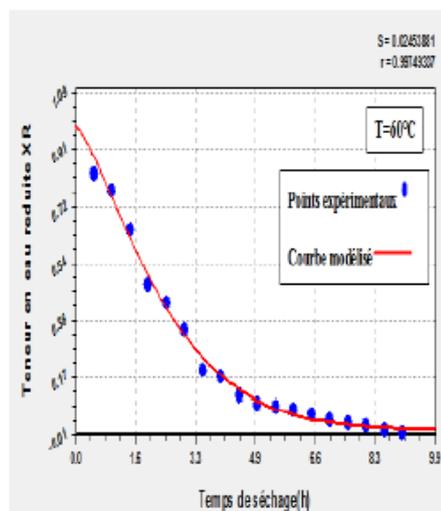
-La valeur minimale de l'erreur standard de l'évaluation se trouve dans le modèle de Logarithmique pour $T= 65^{\circ}\text{C}$: ($S=0.01781110$).



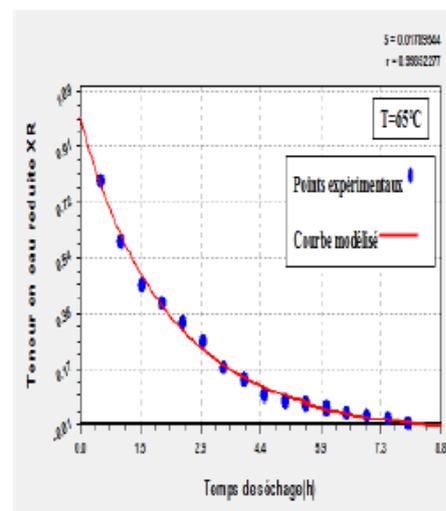
(a)



(b)



(c)



(d)

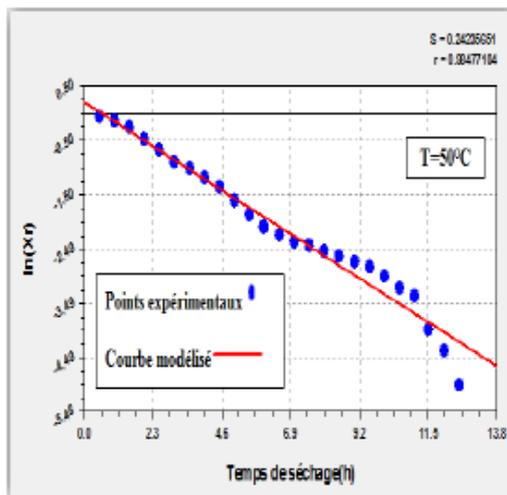
v

Figure (IV. 3-a, b, c, d) : Teneur en eau réduite prédite par le modèle de Midilli et Kucuk en fonction de Temps

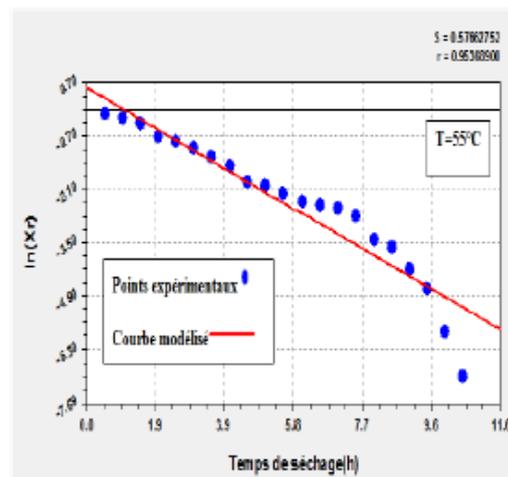
Tableau (IV. 2): Coefficients de la diffusion effective pour différentes températures de séchage.

Essai N°	T(°C)	Coefficient de diffusion effectif D_{eff} (m ² /h)	Coefficient de corrélation
1	50	$4.63212.10^{-07}$	0.98477104
2	55	$7.91383.10^{-07}$	0.95368900
3	60	$9.24285.10^{-07}$	0.88538945
4	65	$11.5998.10^{-07}$	0.93775264

Le tableau(IV.2) présente la variation de coefficient de diffusion effectif pour différente température de séchage. la valeur du coefficient de diffusion effectif augmente en fonction de l'augmentation des températures. Dans notre cas le coefficient de diffusion varie de $4.63212.10^{-07}$ à $11.5998.10^{-07}$. Il donne la valeur maximale dans l'essai N°4, dont $(D_{eff})_{max}=11.5998.10^{-07}$ m²/h, pour T =65°C .D'près la littérature la majorité des produits agricoles (92%) ont une diffusivité dans la gamme 10^{-12} à 10^{-8} m²/s



(a)



(b)

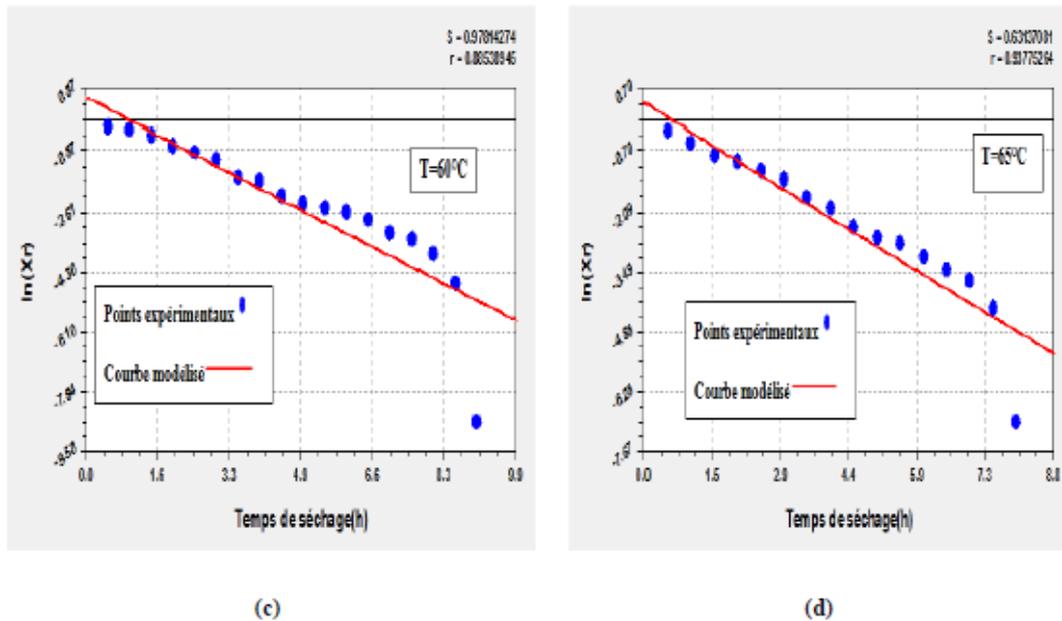


Figure (IV. 4 a, b, c ,d): Variation du logarithme népérien de la teneur en eau réduite en fonction de temps de séchage à température 50, 55, 60 et 65°C.

IV.4.2 Modélisation mathématique de séchage des grains de fève

on s'intéresse à exploiter les résultats expérimentaux des courbes de séchage $X(t)$ de la fève obtenues sur des séchoirs convectifs à air chaud à vitesse d'air constante de 1.5 m/s à quatre températures différentes 50, 55, 60, et 65 °C C'est sur la base de ces données qu'on essaiera de rechercher un modèle mathématique approprié pouvant décrire le comportement physique lors du séchage de la fève et ce parmi les modèles de séchage issus de l'étude bibliographique du chapitre I (cf. **tableau I.1**).

IV.4.2.1 Détermination du modèle le plus approprié

Le choix d'un modèle approprié à la description de l'allure de séchage de la fève, dans notre présente étude, est basé sur la confrontation des courbes estimées par chacun des modèles à celles expérimentales avec analyse des résidus en appliquant aux différentes températures. On a procédé d'autre part à l'analyse statistique utilisant les critères suivants : [119 ,120]

- Une erreur standard de l'évaluation (S) minimale.
- Un coefficient de corrélation (r) élevé.
- Une fonction Chi-2 minimale.

IV.4.2.2 Paramètres de modèle et critères statistiques

La modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage de la fève est présentée numériquement (valeurs des paramètres, critères statistiques pour chaque modèle) dans les tableaux suivants :

Tableau (IV.3) : Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Newton

Essai N°	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	k= 0.0677834	0.0701884	0.0881035	0.857442
02	55°C	K=0.07308985	0.0727763	0.10196377	0.78797670
02	60 °C	k= 0.0768137	0.101441	0.1403764	0.699795
04	65 °C	k= 0.0741212	0.08346	0.14322852	0.678027

Tableau (IV.4) : Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Page

Essai N°	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	K = 0.00343870 n = 2.1502674	0.01000819	0.0008013	0.99848023
02	55°C	K=0.00109948 n=2.62389	0.00492689	0.02865567	0.98708448
03	60 °C	K = 0.0018906 n = 2.5280309	0.07014715	0.0213545	0.94766144
04	65 °C	K=0.001915558 n = 2.5274764	0.07840835	0.0205266	0.93731776

Tableau (IV.5): Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Henderson et Pabis

Essai N°	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	A= 2.441933 k= -0.13769492	0.00256265	0.01568280	0.99626410
02	55°C	A=4.3148681 K=0.18715012	0.00139216	0.01523240	0.99636752
03	60 °C	A= 6.8566208 K = 0.25082509	0.0115549	0.04415841	0.97959362
04	65 °C	A= 7.596265 K = -0.26310913	0.0115898	0.04869119	0.97630440

Tableau (IV.6): Paramètres et critères statistiques selon le modèle de
Logarithmique

Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	A= 2.0449397 k= 0.08513597 B= -0.25717783	0.000772335	0.01050398	0.99853523
02	55°C	A=5.4170037 k=0.21740646 B=0.053266	0.00127027	0.01593903	0.99668610
03	60 °C	A= 4.2410363 K= 0.044661309 B= -2.1352261	0.00193126	0.02490253	0.99517071
04	65 °C	A= 4.1915062 K= 0.05114338 B= -1.9461955	0.00161486	0.02545216	0.99572557

Tableau (IV.7): Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Deux
termes

Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	A1=0.022625634 K1= -0.0817929 A2= 1.9426321 K2 =0.10694189	3.0609	0.01189360	0.99839019
02	55°C	A1=0.066225014 K1= -0.0585799 A2=6.6428922 K2 =0.22806796	0.00120912	0.01048507	0.99686671
03	60 °C	A1= 5.2772419 K1 = 0.25174888 A2 = 1.5886458 K2 = 0.24835823	0.759702	0.06245101	0.97959257
04	65 °C	A1=0.028105782 K1 = 0.22098411 A2= 1.583809 K2=0.064343596	3.21702e-5	0.00567188	0.99989409

Tableau (IV.8) : Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Midilli et autres

Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	A1= 1.5225974 k= 0.045435417 n= 1.2668686 A2=0.0041080107	0.00085276	0.01082261	0.99866724
02	55°C	A1= 10.017468 k= 0.4775801 n= 0.75504244 A2=0.000570514	0.00122151	0.01747506	0.99681349
03	60 °C	A1= 1.743998 K =0.0037658542 n= 0.82674236 A2= -0.1118486	0.00119025	0.02439522	0.99691301
04	65 °C	A1= 2.0338018 K = 0.065577935 n= 0.60629953 A2= 0.099092541	0.0161621	0.02662526	0.99766350

Tableau (IV.9) : Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Wang et Singh

Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	A1= -0.032025 A2=-0.000831	0.006732	0.0290008	0.98715903
02	55°C	A1= -0.02273598 A2= -0.00170605	0.0108191	0.04246381	0.97141310
03	60 °C	A1= 0.0181568 A2= -0.0059481	0.000653989	0.0127866	0.9983050
04	65 °C	A1= 0.0250424 A2= -0.0067274	1.2694 e ⁻⁰⁰⁵	0.00205706	0.9999582

Tableau(IV.10): Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Approche diffusion

Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50°C	A= 1.829915 k=0.0978543 b= -0.0889672	0.0007967	0.010668	0.9984888
02	55°C	A= 1.236806 k=0.0095175474 b= -8.4310279	0.0176629	0.04914994	0.96803021
03	60 °C	A= 1.7550473 k=0.014214654 b= -8.7682203	0.00121219	0.02010129	0.996856004
04	65 °C	A=1.8219479 k= 0.014683629 b= -8.3020789	0.000621105	0.011762250	0.99795318

Tableau (IV.11) : Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Verma

Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	A= 5.397618e ⁻⁰⁰⁵ K ₁ =0.12048502 K ₂ =0.12036267	0.489147	0.26434463	0.92413261
02	55°C	A=0.37545524 K ₁ =0.07316323 K ₂ =0.073057504	0.0727763	0.12064518	0.78797662
03	60 °C	A= 0.8917204 K ₁ =0.077119289 K ₂ =0.076305522	0.100359	0.18290150	0.69298648
04	65 °C	A= 2.318366e ⁻⁰⁰⁵ K ₁ =0.12154064 K ₂ =0.12147827	0.247761	0.35196639	0.79453906

Tableau (IV.12) : Paramètres et critères statistiques selon le modèle de
Henderson et Pabis modifié

Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	A ₁ = -0.0239637 K ₁ = -0.07987125 A ₂ =0.83882184 K ₂ =0.010426548 A ₃ =1.0987437 K ₃ =0.10803603	0.000846416	0.0145662	0.9939462
02	55°C	A ₁ = 0.17301564 K ₁ = 0.2012852 A ₂ =1.9498545 K ₂ =0.14251031 A ₃ =10.024084 K ₃ =0.40123843	0.00116098	0.02409341	0.99697162
03	60 °C	A ₁ = -0.10254374 K ₁ = -0.1465904 A ₂ =0.82172497 K ₂ =0.037033407 A ₃ =0.66919808 K ₃ = 0.037036844	0.000683689	0.0183255	0.98799353
04	65 °C	A ₁ = -0.076034164 K ₁ = -0.15671235 A ₂ =0.91489715 K ₂ =0.054363528 A ₃ = 0.84583227 K ₃ =0.074695103	0.000332472	0.0124789	0.99890488

Tableau (IV.13): Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Page
modifié

Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	k= 0.081640514 n=0.83025822	0.0698601	0.093447494	0.85744261
02	55°C	k= 0.084777102 n=0.8621676	0.07277663	0.11013346	0.78797670
03	60 °C	k= 0.0898395 n= 0.857607	0.100358	0.15839701	0.69298805
04	65 °C	k= 0.0914968 n= 0.810098	0.082057	0.16538605	0.67802701

Tableau (IV.14): Paramètres et critères statistiques selon le modèle de Deux termes exponentiels

Essai N °	T [°C]	Paramètres de modèle	Chi carrée	Erreur Standard (S)	coeff. de Corrélation (r)
01	50 °C	A= 1.1071165 K=0.068031344	0.0698587	0.09344701	0.85744570
02	55°C	A=7.3257886 K=0.0066773117	0.03186	0.07286969	0.91325847
03	60 °C	A=1.0033059 K=0.076636468	0.100378	0.15841227	0.69291581
04	65 °C	A= 7.5956268 K= 0.26310032	0.00711249	0.04869117	0.97630442

D'après la lecture globale des tableaux (IV.3- IV.14) du point de vue comparatif, on a remarqué que les valeurs des trois critères statistiques (Erreur Standard (S), coeff. de Corrélation (r), et Chi Carrée) utilisés paraissent très proches, ce qui rend difficile de bien distinguer entre les deux modèles. Pour cela et afin de permettre une comparaison plus claire on a choisi la représentation graphique sous forme d'histogrammes comparatifs des valeurs de chacun des critères statistiques pour les quatre températures utilisées (50°C 55°C 60°C 65°C) en application aux deux modèles examinés.

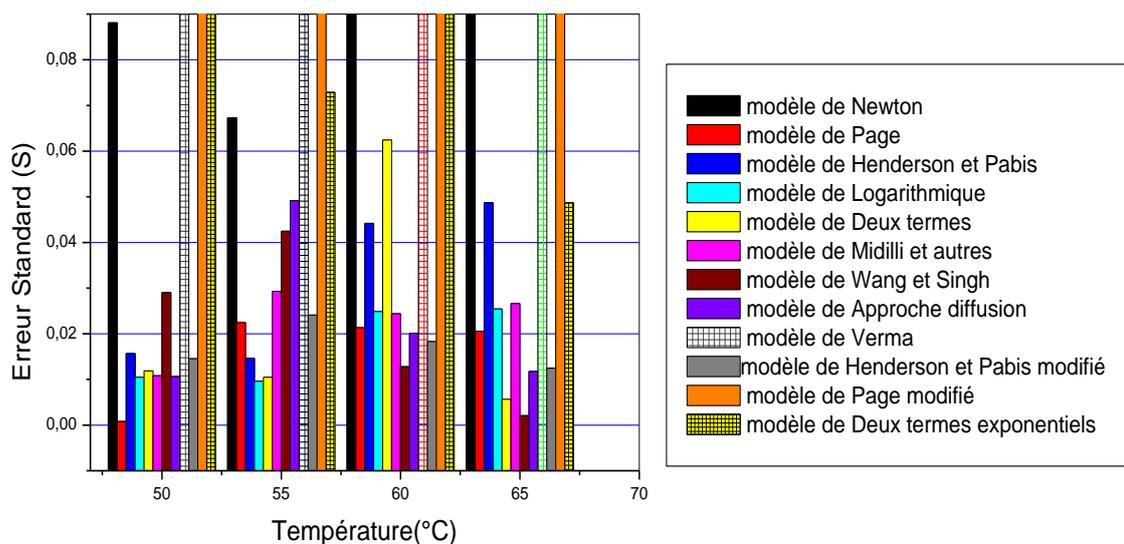


Figure (IV.5) : Evaluation des erreurs standard à chaque température pour les deux modèles

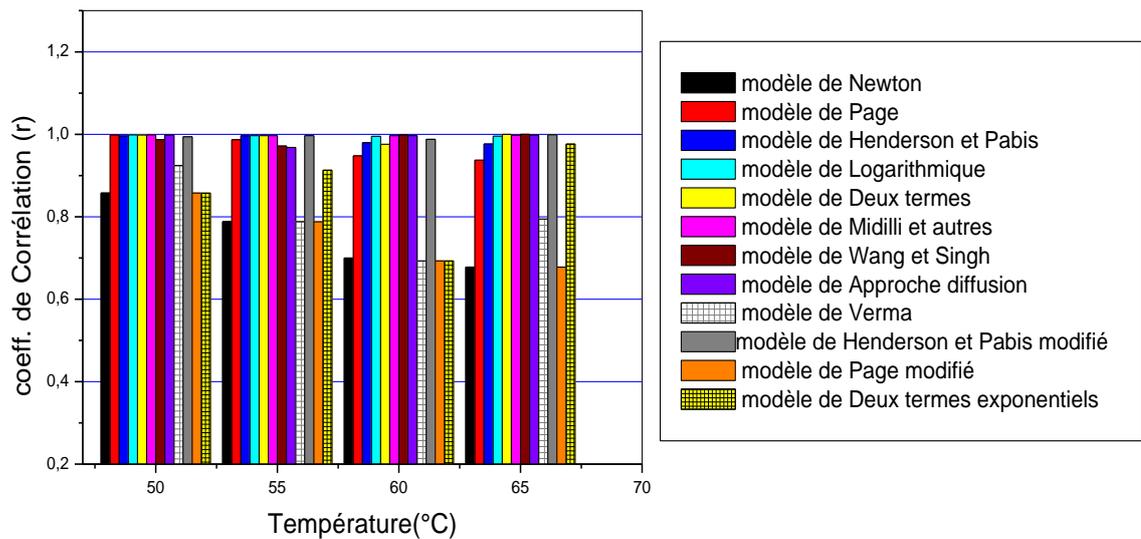


Figure (IV.6): Evaluation des coefficients de corrélations à chaque température pour les deuze modèles

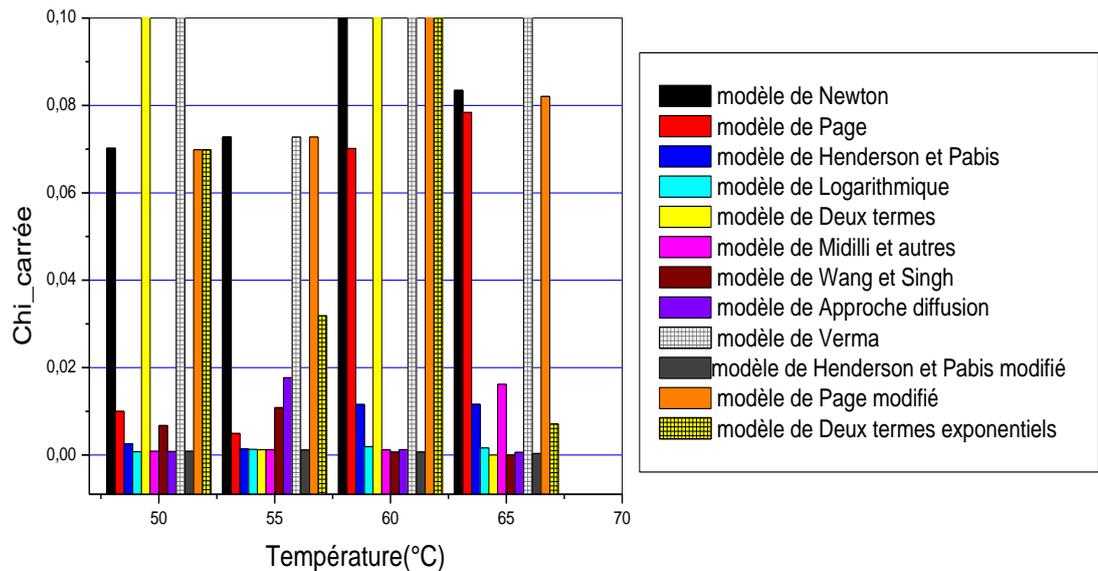


Figure (IV.7): Evaluation des Chi carrée à chaque température pour les quatre modèles

D'après les résultats de calcul on constate que pour le modèle de page, La valeur minimale de l'erreur standard $r = 0.000819$, le coefficient de corrélation S correspond à une grande valeur $S = 0.999848023$, avec une valeur minimale de $\text{Chi carrée} = 0.01000819$ donc le modèle empirique de page décrit le séchage solaire de grain de fève ces résultats sont d'accord avec le séchage Des produits alimentaires lugimineuses produit. [124 ,128]

IV4. 2.3 Figures représentatives et interprétation :

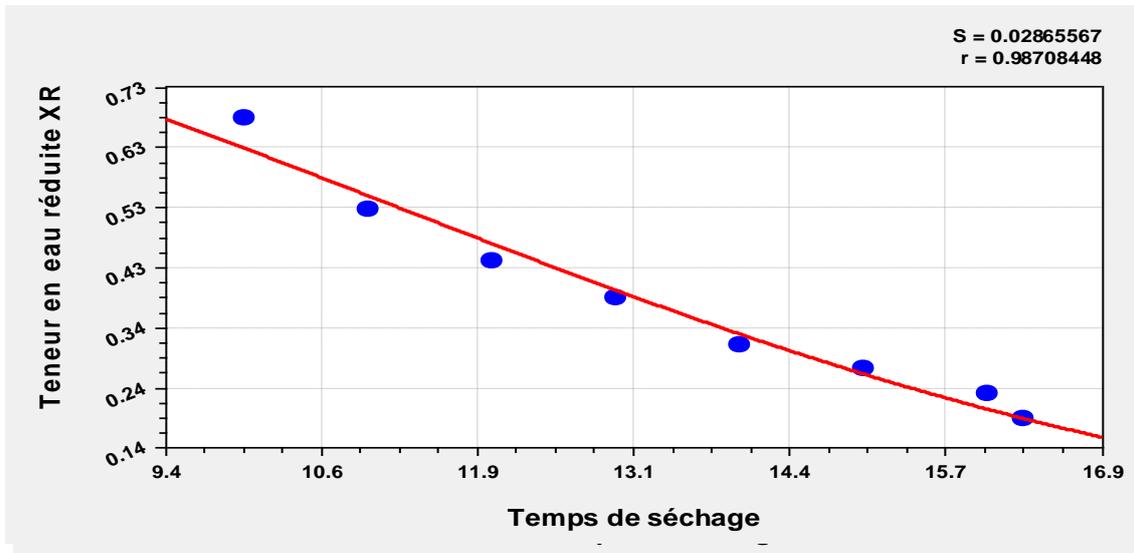


Figure (IV.8) : L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le modèle de page à $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

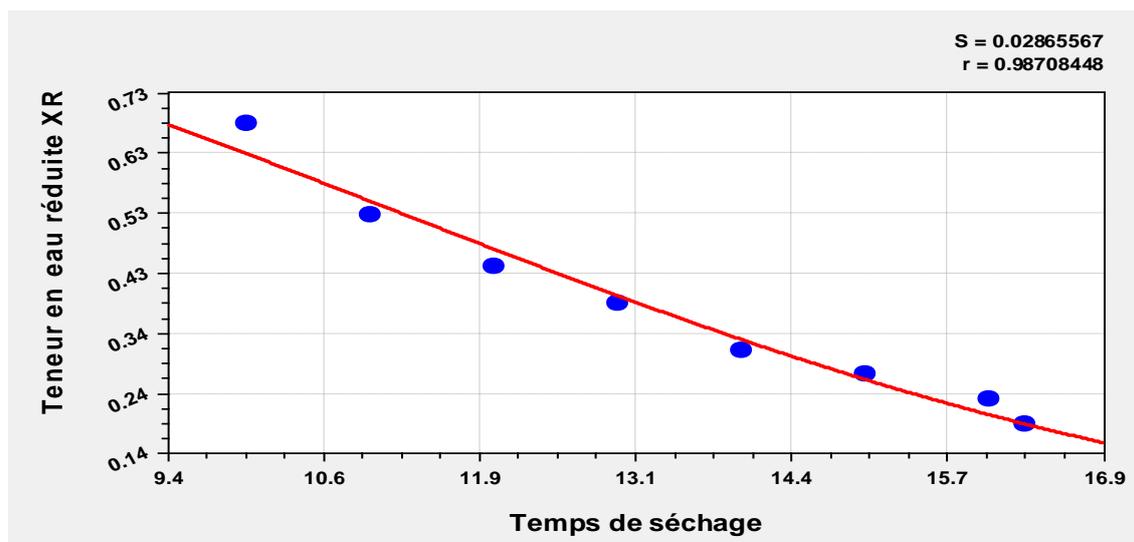


Figure (IV.9) : L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le modèle de page à $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$

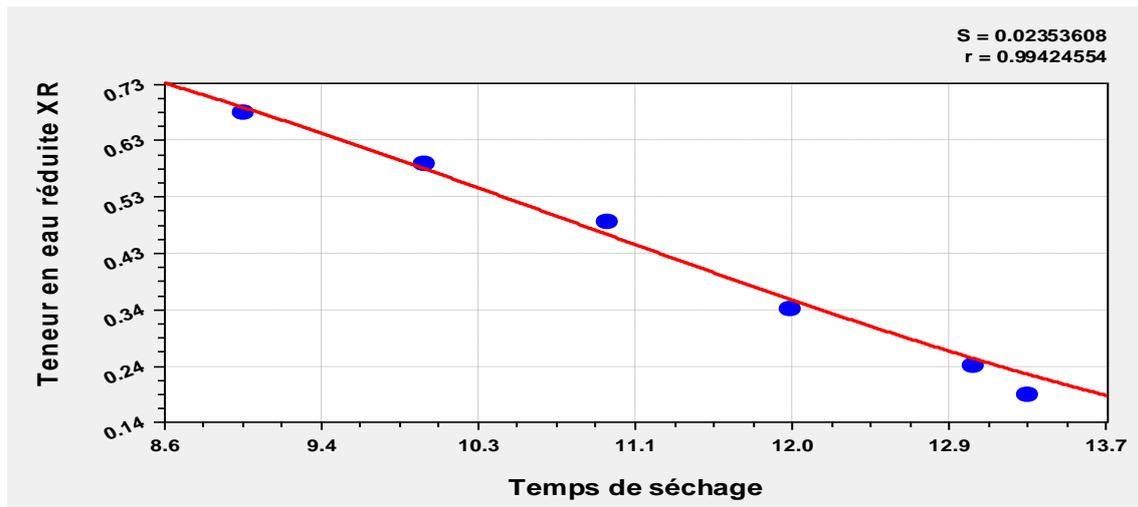


Figure (IV.10) : L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le de modèle de page à T =60 °C

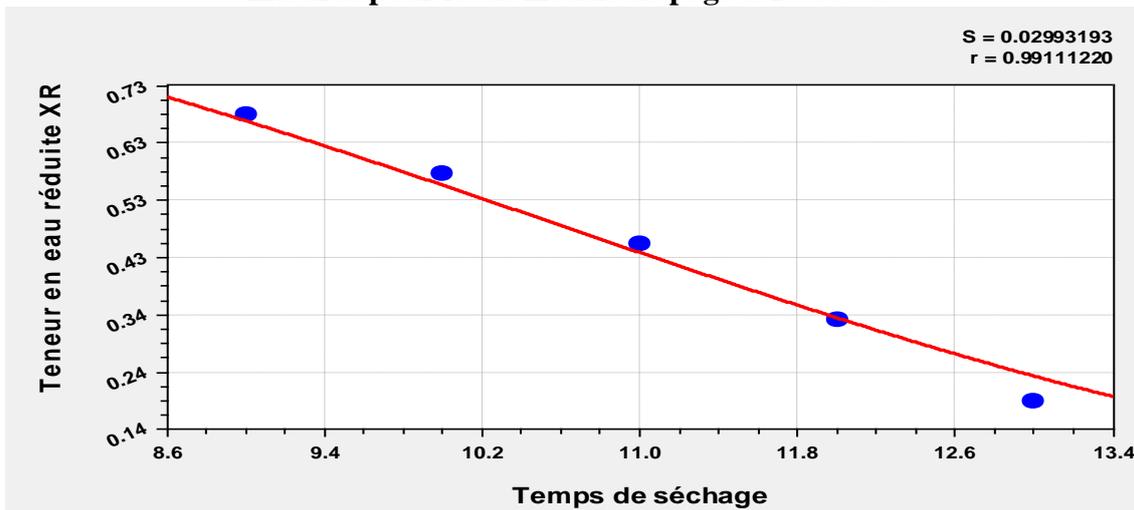


Figure (IV.11) : L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le de modèle de page à T =65 °C

L'interprétation

Les figures (IV.8-11) représentant l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps (pour les quatre températures appliquées). En examinant cas par cas dans cette figure il est possible de noter :

Les courbes prédites par le modèle de page. Sont presque totalement confondues avec les courbes expérimentales à la température T=50°C et à T=65°C

Enfin l'expression de l'équation du modèle approprié pour décrire le séchage de la fève est le modèle de page et donnée par : $XR(t) = \exp. (-k t^n)$

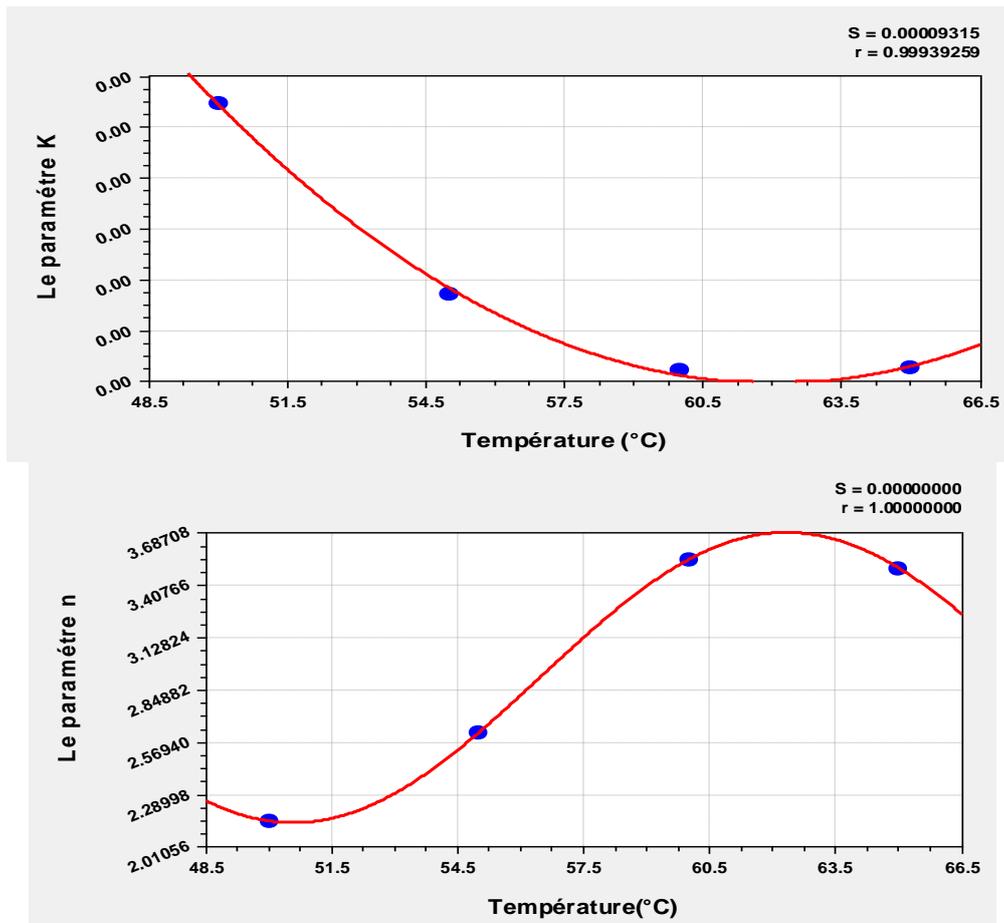
Les valeurs des paramètres de cette équation pour chacune des températures de séchage appliquées sont :

Tableau (IV.15) : Valeur des paramètres pour chacune des températures

Température	K	N
50°C	0.00343870	2.1502674
55°C	0.001099848	2.62389
60°C	0.000154128	3.547369
65°C	0.0001849688	3.4989434

I V.4.2.4.Expression des paramètres du modèle en fonction de la température

Les résultats suivants sont obtenus par un lissage de courbe à l'aide du logiciel curve-Expert1.4 pour chacun des paramètres. Les relations empiriques ainsi retrouvées entre les paramètres de l'équation de page et la température sont développées et sont représentées graphiquement dans les Figures (IV.8) puis récapitulées dans le tableau (IV.23) accompagné des coefficients et critères statistiques (Erreur Standard, coefficient de corrélation et Chi-carrée) de chaque équation.



Figures (IV.12) : Evolution des paramètres K et n avec la température

Tableau (IV.16) : Expressions des paramètres du modèle en fonction de T avec leurs critères d'analyse statistique

Paramétrer	L'équation appropriée	Valeur de coefficients	Erreur standard (s)	Coeff-de corrélation (r)
K	$y=a+b*x+c*x^2$	a =0.091139738 b =0.0029392827 c =2.3696908e-005	0.00009315	0.99939252
n	$y=a+b*\cos (c*x+d)$	a =2.916086 b =0.7750233 c =0.26769959 d =-4.1144753	0.00000000	1.000000

IV.4.2.5 Expressions de l'équation générale et des paramètres du modèle :

Enfin pour récapituler, on donne ci-dessous les expressions finales adoptées pour l'équation générale selon le modèle à page avec les expressions des différents paramètres en fonction du temps et de la température de l'air de séchage.

$$\mathbf{XR(t) = \exp. (-k t^n)}$$

$$n(T) = 2.916086 + 0.7750233 * \cos (0.26769959T - 4.1144753)$$

$$K(T) = 0.091139738 + 0.0029392827T + 2.3696908e-005T^2$$

Conclusion

A partir des résultats obtenus dans ce chapitre on peut conclure que :

- Le modèle de Midilli et Kucuk décrit le séchage des dattes deglet noir et les pommes de terre tranchées,
- le séchage des grains de fève est décrit par le modèle de page

Chapitre V

Analyse Energétique

Et Etude Technico-

économique des Systèmes

de Séchage Solaires

Des Différents Systèmes

de Séchage solaire

Introduction

Pour améliorer l'efficacité énergétique du séchoir solaire convectif indirect et assurer des conditions opératoires favorables nous avons intégré des appoints énergétiques (résistance électrique et échangeur de chaleur air /eau), la résistance électrique nous assure des conditions opératoires constantes, l'échangeur de chaleur installé est considéré comme une solution pratique pour avoir une opération de séchage en continue (dans la nuit ou pour les jours nuageux)

Pour étudier l'impact des sources supplémentaires d'énergie par résistance et échangeur air /eau sur le processus du séchage, nous avons réalisés des essais de séchage hybride , en analysant le système par le calcul des efficacités énergétique et des fractions d'énergies fournies pour chaque système analysé

Pour assurer le développement des séchoirs solaires utilisés (indirect, direct, hybride) ,il est nécessaire de compléter l'analyse énergétique par une étude, même sommaire, de faisabilité technico-économique. Nous procédons dans un premier temps, à quelques rappels sur les modèles technico-économiques appliqués au séchage solaire, ensuite nous analysons l'influence du prix d'achat des produits d'étude (grains de fève , dattes deglet nour et pommes de terre tranchées) à l'état frais et leurs prix de vente à l'état séchés, sur le temps de retour sur investissement.

V.1 Efficacité énergétique des systèmes de séchage solaire utilisés (indirect direct et hybride)

V.1.1 Efficacité énergétique du capteur solaire (séchage indirect ,mode discontinu)

L'étude de l'efficacité d'un capteur solaire nous permet d'évaluer la façon dans laquelle est alimentée en énergie la chambre de séchage sous certaines conditions. Le rendement ou l'efficacité énergétique du capteur est défini comme étant le rapport de l'énergie sortant du capteur sur l'énergie entrant [129,130].

$$\eta = \frac{mC_p(T_{sc} - T_{ec})}{GA} \quad (V.1)$$

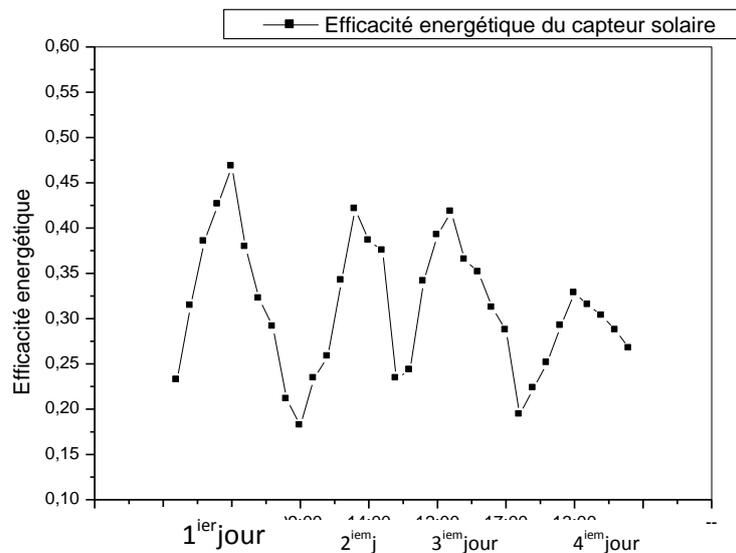


Figure (V.1) : Efficacité journalière du collecteur en fonction du temps

D'après la figure (V.1) l'efficacité journalière du capteur solaire utilisé comme source de chaleur pour le séchage de la fève pendant quatre jours en discontinu varie entre 0.182 et 0.418. L'efficacité du capteur dépend des paramètres climatiques de l'air ambiant et du rayonnement solaire qui ne sont pas constants au cours de l'année, donc l'efficacité énergétique du capteur solaire n'est pas uniforme et c'est dans cette application, on a besoin d'ajouter des sources auxiliaires d'apport d'énergie (résistances électriques, échangeur de chaleur)

V.1.2 Efficacité énergétique du séchoir solaire hybride avec échangeur de chaleur (mode continu)

L'efficacité énergétique d'un séchoir, représente le rapport entre l'énergie de vaporisation d'une masse m d'eau du produit à sécher sur l'énergie alimentant le séchoir [solaire+énergie auxiliaire (dans le cas d'un système hybride)]. Elle est définie comme suit [131 132]

$$\eta = \frac{mLv}{GAt + Pelec t} \quad (V.2)$$

GAt Energie solaire entrant au capteur pendant le temps t .

$Pelec t_c$: Puissance du simulateur de l'eau chaude ($P=1600W$) pendant le temps t

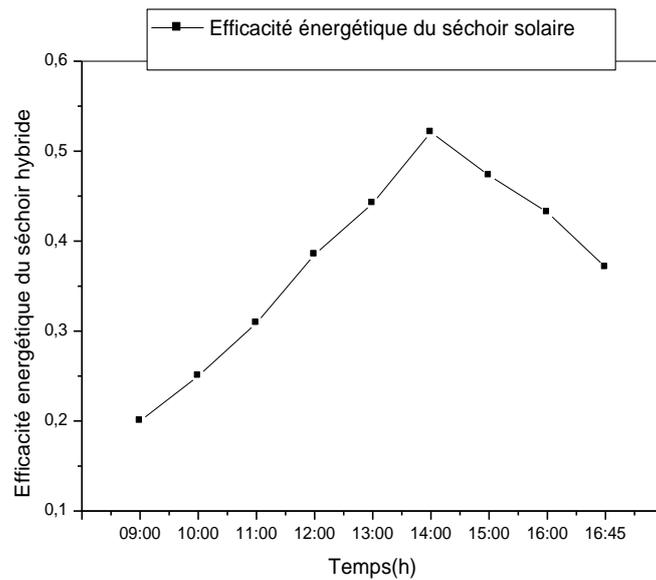


Figure (V.2) : Efficacité journalière du séchoir solaire hybride par échangeur en fonction du temps

Il paraît clairement sur la figure (V.2) l'augmentation de l'efficacité énergétique à 52% du séchoir solaire hybride pour les premières heures de séchage en continu, cette augmentation est due à l'augmentation de flux thermique convectif provenant du capteur et de l'échangeur qui fonctionne par chauffage de l'air à travers un simulateur électrique ($P=1600W$) de l'eau chaude à une température de $60^{\circ}C$, le système d'appoint utilisé contribue à l'extraction d'une quantité importante de l'eau chaude à partir de la fève fraîche

V.1.3 Efficacité énergétique du séchoir hybride aux différentes températures de séchage

L'efficacité énergétique ou rendement d'un séchoir, représente le rapport énergétique entre l'énergie de vaporisation d'une masse m_e d'eau du produit à sécher sur l'énergie alimentant le séchoir [solaire+énergie auxiliaire (résistance électrique)], elle est défini comme suit: [133].

$$\eta = \frac{m_e L_v}{G A t + E_{re} + E_v} \quad (V.3)$$

Avec :

η : Rendement du séchoir

m_e : Masse d'eau évaporée du produit à l'instant t.

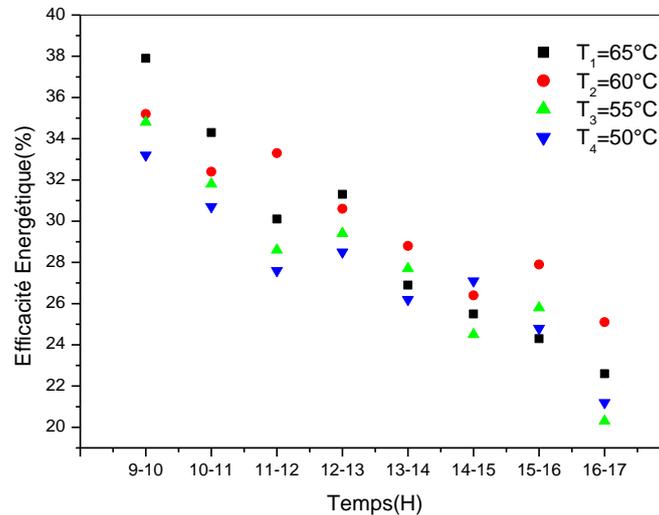
L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'humidité (kJ/kg)

GAt: Energie solaire entrant au capteur (kJ) pendant le temps t.

ERE : Energie des résistances électriques

Ev : Energie du ventilateur (kJ)

A : Surface du capteur (m²)



Figure(V.3) : Efficacité journalière du séchoir solaire hybride par résistance électrique en fonction du temps

Dans la figure (V.3) on remarque une nette décroissance de l'efficacité énergétique en fonction du temps de séchage. L'efficacité totale du système de séchage se situe généralement entre 20-40% pour le séchage à convection forcée (Purohit et al. 2006) [134]. L'efficacité moyenne du système varie entre 22.6 à 37.9% pour $T_1=65^\circ\text{C}$, 25.1% à 35% pour $T_2=60^\circ\text{C}$, 20.3% à 34.8% pour $T_3=55^\circ\text{C}$ et 21.2% à 33.2% pour $T_4=50^\circ\text{C}$ les essais de séchage sont réalisés avec une vitesse $v=1\text{ m/s}$. D'après cette figure il apparaît clairement que l'efficacité du système pour $T_1=65^\circ\text{C}$ est meilleure par rapport aux autres températures et notamment dans la première demi journée. L'efficacité du système est très élevée dans les premières heures de séchage; cela est du probablement à la présence de l'humidité près ou à la surface du produit, ensuite elle décroît d'une façon continue jusqu'à la fin du séchage parce que l'humidité du produit diminue. Donc il faut plus d'énergie pour extraire la même quantité d'humidité du produit, notant que Le paramètre vitesse est moins influençable pour le séchage que le paramètre température, en plus l'influence de la vitesse décroît au fur et à mesure que le séchage avance dans le temps. L'augmentation de la température de l'air asséchant donne à ce dernier un pouvoir évaporateur plus important; ce qui engendre un temps de séchage très

écourté. Cela nous amène à choisir une température admissible élevée et un débit plus ou moins faible du moment où les paramètres climatiques de l'air ambiant et du rayonnement solaire ne sont pas constants au cours de l'année, l'efficacité énergétique du séchoir n'est pas uniforme elle dépend aussi du type de séchoir, produit à sécher et humidité finale d'équilibre

V .1.4 Efficacité énergétique des séchoirs solaires directs et indirects

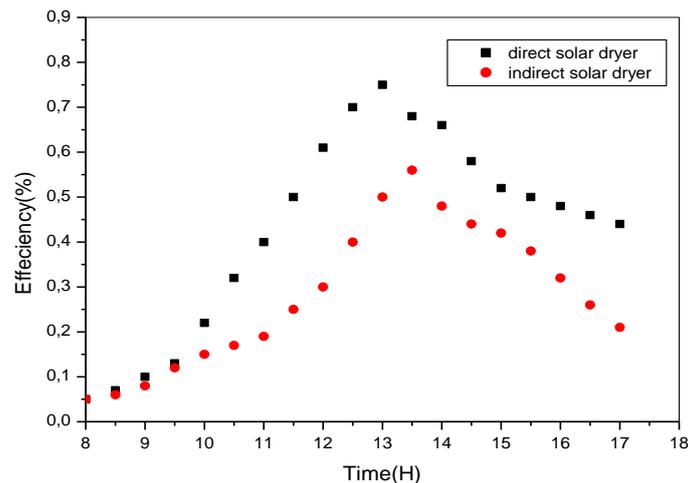


Figure (V.4) : Variation de l'efficacité énergétique en fonction du temps pour le séchoir solaire direct et indirect

L'efficacité du séchoir est un paramètre utilisé dans l'analyse du séchage, la variation de l'efficacité énergétique du séchoir solaire direct augmente rapidement jusqu'à atteindre 70% puis diminue à 45% dans le cas du séchoir indirect le rendement est varié entre 20% à 49% pour le séchoir indirect, puis diminue à 45%, il est clair dès le départ que plus le rendement est élevé, plus le taux de séchage est élevé et le temps de séchage court. Dans les premières heures de séchage l'apport de chaleur par l'air asséchant et le flux solaire sont suffisants pour que la vitesse de séchage augmente de façon monotone au cours du temps ceci augmente le rendement des deux séchoirs notamment le séchoir direct. La décroissance du rendement observée au cours des dernières heures de séchage est due à l'inertie thermique des composants du séchoir direct qui n'est pas entièrement compensée par l'apport du flux solaire pour engendrer une vitesse de séchage élevée.

V.2 Analyse énergétique des systèmes utilisés

V.2.1 Calcul des apports énergétiques du système de séchage avec appoint par échangeur de chaleur air /eau

Nous avons effectuées des essais avec un échangeur de chaleur alimentée par un simulateur de chaleur , on choisit la température d'entrée de l'eau chaude dans l'échangeur égale à 60 °C , ce choix est similaire à la température de l'eau géothermique des régions chauds à T=60 °C [114]

V.2.1.1 Calcul énergétique de l'échangeur de chaleur [135 ,137]

$$\varphi = K . S . \Delta TLM . F \quad (V. 4)$$

φ : Quantité de chaleur (W)

K: Coefficient de conductivité thermique de transfert de chaleur

S: Surface de chambre (m^2)

ΔTLM : Différence de la température logarithmique moyenne (°C)

F: Facteur de correction

IV.2.1.2 Calcul du coefficient global d'échange de chaleur K

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{D_{ext}}{d_m} \times \frac{e}{\lambda_{Al}} + \frac{D_{ext}}{d_{int}} \times \frac{1}{h_{int}} \quad (V. 5)$$

e: épaisseur de tube (m).

$C_{p_{air}}$: capacité calorifique de l'air (J/kg. °C).

D_{ext} : diamètre extérieur de tube (m.)

d_m : Diamètre moyenne de tube (m).

h_{ext} : Le coefficient extérieur de transfert de chaleur par convection ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

K : coefficient global d'échange de chaleur ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

μ_{air} : la viscosité dynamique de l'air (Pa.s).

λ_{air} : la conductivité thermique de l'air par conduction ($W/m \cdot ^\circ C$).

λ_{Al} : la conductivité thermique solide de l'Aluminium (W/m. °C).

V.2.1.3 Détermination de la différence de la température logarithmique moyenne

$$\Delta TLM = \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln\left(\frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}}\right)} \quad (V.6)$$

Où :

T_{ce} : Température entrée chaud (°C).

T_{cs} : Température sortie froid (°C).

T_{fe} : Température entrée froid (°C).

T_{fs} : Température sortie chaud (°C).

V.2.2 Calcul énergétique du capteur solaire : (l'énergie fournie par le capteur solaire)

V.2.2.1. Bilan d'énergie [138]

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit :

$$\varphi_{sa} = \varphi_{p \rightarrow} + \varphi_u + \varphi_{st} \quad (V.7)$$

V. 2.2.1.1 Flux utile

$$\varphi_u = \dot{m}_{air} \cdot C_p \cdot S \cdot (T_{fs} - T_{fe}) \quad (V.8)$$

Pour négligeable φ_{st} parce que il n'est ya pas le stockage dans la plaque absorbeur

$\varphi_{p \rightarrow}$: Flux perdu par la paroi absorbante (W).

φ_u : Flux utile transmis au fluide caloporteur (W).

φ_{sa} : Flux solaire absorbé (W).

V.2.2.1.2. Flux perdu calculée par la forme [114]

$$\varphi_{p \rightarrow} = h_p \cdot S \cdot (T_{pm} - T_{air}) \quad (V.9)$$

Détermination de coefficient global de perte du capteur

$$h_p = \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{vent}}} + (h_{c,p-c} + h_{r,p-c}) \cdot \frac{T_p - T_c}{T_p - T_a} \quad (V.10)$$

Détermination de coefficient de convection par la vitesse moyenne du vent

$$h_{vent} = 5,7 + 3,8 U_{vent} \quad (V.11)$$

Détermination de coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces parallèles

$$h_{c,p-c} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air}}{L} \quad (V.12)$$

$$Nu = 0,27(Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (V.13)$$

Détermination le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement

$$h_{r,p-c} = \delta \frac{(T_p^2 - T_c^2) \cdot (T_p - T_c)}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1} \quad (V.14)$$

Dans le cas d'un capteur plan, la température moyenne T_{pm} peut en première approximation

$$\text{être calculée par. } T_{pm} = \frac{3T_{fs} - T_{fe}}{4} + \Delta T \quad (V.15)$$

T_p, T_c : Température moyenne de l'absorbeur et la couverture ($^{\circ}\text{C}$).

e_i, λ_i : Epaisseur et conductivité thermique de l'isolant. (m) et (w/m. $^{\circ}\text{C}$).

h_p : Coefficient global de perte du capteur ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$).

$h_{c,p-c}$: Coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces Parallèles ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$).

h_{vent} : Coefficient de convection calculée par la vitesse moyenne du vent ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$).

$h_{r,p-c}$: Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$).

S : Surface de la paroi absorbante (m^2).

T_{fe}, T_{fs} : Température entrée et la sortie de l'aire dans le capteur solaire plan($^{\circ}\text{C}$).

β : Coefficient de dilatation thermique ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

δ : Constante de Stefan– Boltzmann ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^{-4}$).

Gr : Nombre de Grashof.

V.2.3 Contribution de l'énergie solaire et l'énergie électrique dans le séchoir indirect hybride fonctionnant par un échangeur air /eau et par une résistance électrique

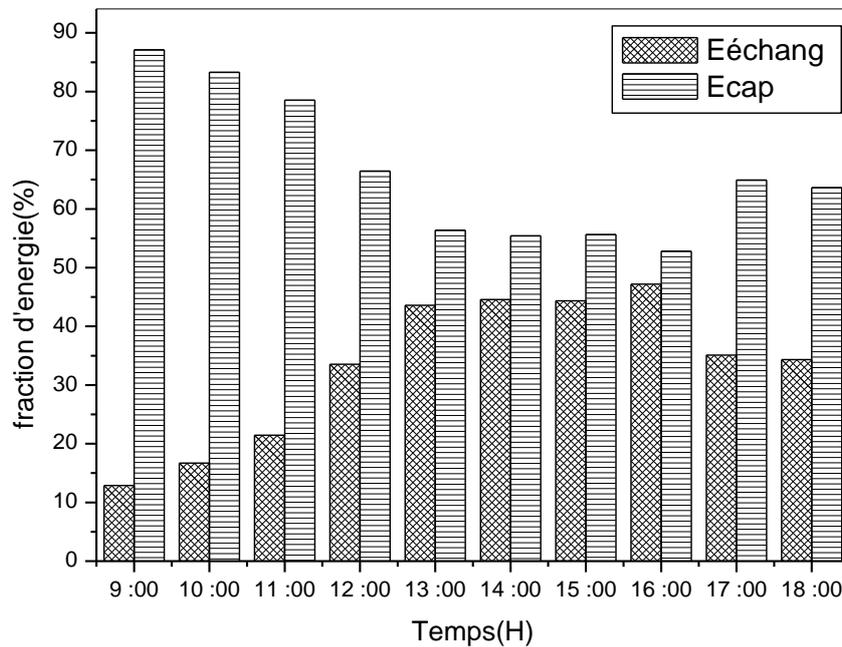


Figure (V.5) : Contribution de l'énergie fournie à partir du capteur solaire et de l'échangeur dans le séchoir indirect hybride

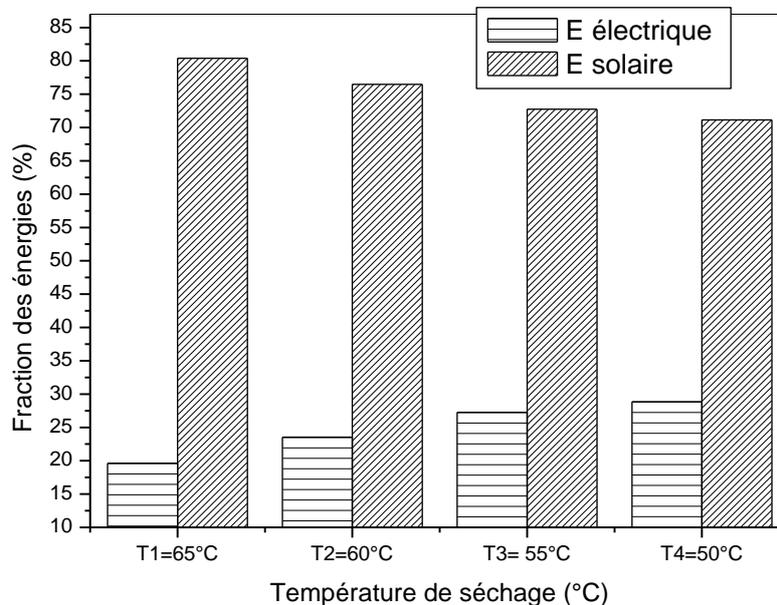


Figure (V.6) : Contribution de l'énergie électrique et solaire pour différentes températures de séchage (T₁= 50°C T₂= 55°C T₃= 60°C T₄= 65 °C)

La figure (V.5) ci-dessus montre le quote-part de l'énergie solaire et celui de l'énergie électrique dans une opération de séchage, avec ce type de séchoir hybride fonctionne par un appoint énergétique par échangeur de chaleur, il apparaît clairement que le pourcentage de contribution de l'énergie solaire pour chauffer l'air caloporteur décroît de 47.2% à 12.88%, pour le cas de fonctionnement par échangeur par contre celui de l'énergie électrique augmente de 52.8% à 87.11%. Dans le cas de séchage avec résistance électrique figure(V.6) la quantification de l'énergie solaire varie entre 19.62% à 28.55%, l'énergie électrique consommée est variée entre 19.62% à 86.78%. Cette augmentation du pourcentage de contribution de l'énergie électrique est due à la température de sortie du collecteur reste basse ce qui fait que l'échangeur ou les résistances électriques doivent fonctionner pour chauffer l'air caloporteur et l'amener à la température de consigne. Il est préférable du point de vue économie de l'énergie, d'utiliser dans une opération de séchage un appoint énergétique renouvelable (les panneaux photovoltaïques ou la source géothermique) ou de diminuer les vitesses de l'air caloporteur qui ont une contribution de l'énergie solaire importante.

V.3 Calcul des performances énergétiques des séchoirs solaires utilisés (types direct , indirect et hybride [139 , 141]

Tableau (V.1) Différents paramètres du séchage solaire des grains de fève

Paramètres	Séchage solaire direct	Séchage hybride	Séchage solaire indirect	
			1	2
Teneur en eau (kg eau/kg ms)	2.2	2.2	2.2	
Teneur en eau final (kg eau/kg ms)	0.13	0.13	0.13	
Temps de séchage(h)	9	8.5	16	
T moyenne (air) inter (c°)	49.5	58	43.1	43.3
T moyenne (air) ambiant (c°)	36.6	36.6	35.5	31
Humidité ambiant extérieur (%)	14.3	14.13	25.5	22.93
Humidité de l'air intérieur (%)	4.8	2.74	17.4	13.14

V.3.1 Calcul de la vitesse en masse fraîche

$$T_{sm} = \frac{M_i}{T_s} \quad (\text{V.16})$$

V.3.2 Calcul de vitesse en eau extraite

$$T_{se} = T_{sm} \frac{M_{ci} - M_{cf}}{100 - M_{cf}} \quad (\text{V.17})$$

V.3.3 Calcul de débit nécessaire en air chaud

$$D_s = \frac{m_v}{\rho_{\text{air}} (X_m - X_a)} \quad (\text{V.18})$$

V.3.4 Calcul de la puissance nécessaire

$$P_n = D_s (h_s - h_a) \rho_{\text{air}} \quad (\text{V.19})$$

Avec :

T_{sm} : Vitesse en masse fraîche (kg/h),

M_i : Poids initial du produit sec (kg),

T_s : Temps de séchage (h)

T_{se} : Vitesse en eau extraite (kg eau/h),

m_{ci} et m_{cf} : Humidité initiale et finale des fèves (kg eau/kg ms)

D_s : Débit nécessaire en air chaud (m³/h),

X_m : Humidité absolue de l'air à la sortie du séchoir (kg eau/kg air sec),

X_a : Humidité absolue de l'air ambiant (kg eau/kg air sec)

P_n : Puissance nécessaire (kWh);

h_s : Enthalpie de l'air sec (kJ/kg), h_a : Enthalpie de l'air ambiant (kJ/kg)

Tableau (V.2) : Résultats de calcul.

Types des séchoirs solaires	Direct	Hybride	Indirect	
T_{sm} (kg/h)	1.27	1.27	0.71	
T_{se} (kg eau /h)	0.79	0.3	0.41	
X_m (kgeau /kg air _{sort} sec)	2.5	3.2	11	8.5
X_m (kgeau /kg air _{amb} sec)	2	2	9.5	6.5
D_s (m ³ /h)	1.3	0.47	0.22	0.16
h_s (kJ /kg)	53	66	69.5	62.5
H_a (kJ /kg)	39	39	58	47
P (kwh)	17.88	22.33	3.1	3.04

V.3.5 Résultats de calcul des performances énergétiques

En moyenne la vitesse en masse fraîche est de 1.27 kg de fève frais par heure pour le séchoir type direct et 1.35 pour le séchoir hybride, et de 0.71 kg de fève frais par heure pour le séchoir solaire indirect à convection forcée. La différence de vitesse enregistrée est expliquée par la capacité des séchoirs en termes de quantité surtout dans le cas de séchoir direct et par la présence de l'appoint énergétique pour le séchoir hybride . donc la vitesse en masse fraîche est presque poches pour les deux séchoirs direct et indirect et plus importante en valeur comparativement au séchoir indirect.

La quantité en eau extraite de fève dans les séchoirs est calculée d'après la vitesse en masse fraîche et les taux d'humidité de fève avant et après séchage, Le séchoir solaire type direct permet d'éliminer, à partir des 11 kg de fèves frais, 0.79 kg d'eau par heure. En revanche, la vitesse en eau extraite par le séchoir hybride est 0.79 kg d'eau par heure est plus importante comparativement au séchoir indirect Cette différence est expliquée pour la vitesse en masse fraîche, par la variation des fractions de l'énergie thermique de l'air asséchant selon le type des séchoirs solaires utilisés

La quantité d'air chauffé nécessaire pour abaisser l'humidité des fèves frais de 2.2 kg eau/kg ms à 0.13 kg eau/kg ms dans les séchoirs solaire est calculée d'après la quantité globale d'eau à vaporiser et les humidités initiales et finales de l'air de séchage. Un débit de 0.54 m³/h d'air à 60 °C est suffisant pour sécher les 11kg des grains de fève frais par

le séchoir type hybride , sans faire appel à l'énergie complémentaire le débit nécessaire pour le séchoir direct est $1.3 \text{ m}^3/\text{h}$ et $0.16 \text{ à } 0.22 \text{ m}^3/\text{h}$ pour le séchoir indirect ,cette différence peut être expliquée par le taux de brassage entre l'air chaud et les grains exposés qui est influencé par les différentes géométries et mode de séchage entre les séchoirs.

Les débits d'air chaud calculés pour chacun des séchoirs solaires nécessitent une puissance en énergie solaire pouvant être calculée selon le débit en air chaud pour chaque séchoir, l'enthalpie de l'air ambiant, et celle de l'air chaud. Le chauffage de la quantité d'air utilisée pour abaisser la teneur en eau des grains de fève frais à $0.13 \text{ kg eau/kg ms}$, par le séchoir hybride nécessite une puissance de 22.33 kWh en énergie électrique de résistance et de l'énergie thermique Le séchage des 11 kg des fèves par le séchoir indirect à convection forcée jusqu'au même taux d'humidité nécessite 3.1 kWh de l'énergie thermique provient de rayonnement solaire . Cette différence en terme de puissance nécessaire est expliquée essentiellement par les débits d'air chaud nécessaires pour chacune des opérations de séchage.

V.4 Modèles technico-économiques

Les modèles de faisabilité technico-économique appliqué au séchage solaire permettent de déterminer principalement le temps de retour sur investissement et le bénéfice [* [142] Newnan, 2004 ; [143]*Sodha et al., 1991 ; [144] *Audsley et Wheeler, 1978]. Le choix du modèle est lié au système de séchage (direct ou indirect), le modèle le plus utilisé est basé sur le calcul du facteur d'actualisation à partir des données économiques des composants du système de séchage [145 *Denton, 1976 ; 142 *Newnan, 2004]. L'analyse du coût annuel est plus adapté aux séchoirs direct, indirect et hybride [146 *Govind et Tiwari, 1984 ; 147 *Dang et Bansal, 1985 ; 143*Sodha et al., 1991 ; 148 *Singh et al., 2006 ; 149 *Banout et al., 2011 ; 150 *Elkhadraoui et al., 2015 ; 151* Fudholi et al., 2016]. En général, l'analyse du cycle de vie et le retour sur investissement sont privilégiés aux facteurs d'actualisation et à l'analyse du coût. L'analyse du cycle de vie est basée sur la méthode d'actualisation des coût d'investissement avec l'application d'un taux d'actualisation des différents coûts. Le retour sur investissement d'un séchoir solaire est souvent déterminé en utilisant la méthode d'actualisation qui tient compte de l'influence du taux de récupération, du capital du taux d'intérêt et d'inflation [149 Singh et al., 2006 ; 150 Banout et al., 2011 ; 151 Elkhadraoui et al., 2015].

Le retour sur investissement, adapté au séchoir solaire , a été développé en tenant compte des prix de vente des produits séchés et d'achat des produits frais. Il a fait l'objet de plusieurs

études économiques [152 *Smitabhindu et al., 2008 ; 153* Janjai et al., 2011 ; 154 *Boonyasri et al., 2011 ; 155 *Nabnean et al., 2016].

V.5. Rappels de quelques notions d'économie

V.5.1 Facteur d'actualisation

Le facteur d'actualisation PwF peut être défini comme suit [*Duffie et Beckman, 2013]:

$$PwF(N, if, d) = \sum_{j=1}^N \left[\frac{(1+if)^{N-1}}{(1+d)^N} \right] \quad (V-20)$$

$$\text{pour } d \neq if \quad PwF(N, if, d) = \frac{1}{d-if} \left[1 - \left(\frac{1+if}{1+d} \right)^N \right] \quad (V-21)$$

$$\text{pour } d = if \quad PwF(N, if, d) = \frac{N}{1+if} \quad (V-22)$$

avec

if : taux d'inflation (%)

d : taux d'actualisation (%)

N : durée de l'emprunt ou nombre d'année de vie du système (années)

V.5.2 Evaluation du coût annualisé

❖ Coût total annualisé

Le coût total annualisé (CT) d'un séchoir serre, équipé d'un système de stockage de chaleur, est généralement égale à la somme du coût des matériaux (C_m) et de celui de la main d'œuvre pour la construction du système de séchage (C_I).

$$C_T = C_m + C_I \quad (VI-4)$$

❖ Coût annualisé de fonctionnement

Le coût annualisé de fonctionnement (C_{annuel}) est, d'après la méthode d'Audsley et Wheeler (Audsley et Wheeler, 1987), égal à la somme des coûts totaux, de maintenance et de fonctionnement :

$$C_{annuel} = \left[C_T + \sum_{j=1}^N w^j (C_{main,j} + C_{op,j}) \right] \left[\frac{W-1}{W(W^N-1)} \right] \quad (V-23)$$

Avec

$C_{mai,j}$: coût de maintenance pour l'année j . Il est supposé égal à 1% du coût total pour chaque année de fonctionnement,

$C_{op,j}$: coût de fonctionnement pour l'année j .

$$w = \frac{(100+d)}{(100+if)} \quad (V-24)$$

avec

iin : taux d'actualisation (%)

if : taux d'inflation (%)

Le coût de fonctionnement pour la première année se compose de:

$$C_{op,0} = C_{FP}^0 + C_{MO}^0 \quad (IV - 7)$$

C_{FP0} , C_{MO0} désignent respectivement les coûts d'acquisition des produits frais et de la main d'œuvre pour l'année (0).

• Achat de produits frais : $C_{PF}^0 = M_{PF} \times C_{APF}^0 \quad (V - 25)$

• Coût de la main d'oeuvre : $C_{MO}^0 = n_f D_c C_{UMO} \quad (V - 26)$

Avec

M_{PF} : poids de produits frais (kg)

C_{APF}^0 : coût d'achat de produits frais (DA)

n_j : nombre de jour de fonctionnement (jour)

D_c : Durée de cycle de séchage (heure)

C_{UMO} : coût de main d'oeuvre par jour (DA)

Le coût annualisé d'un système de séchage par unité de produit séché Z (DA/kg), peut être calculé par l'expression suivante

$$Z = \frac{C_{annuel}}{m_{sèche}} \quad (V - 27)$$

$m_{sèche}$: poids annuel de produits séchés par an (kg).

V.5.3 Retour sur investissement

Le retour sur investissement est déterminé à partir du coût total (CT), des prix de vente (Pd) des produits séchés et d'achat des produits frais (Pf). Il vérifie l'expression suivante [151]

$$Retour\ d'\ investissement = \frac{C_{Total}}{m_{sèche} P_d n_j - C_{annuel} - m_f P_f n_j} \quad (V - 28)$$

avec

$m_{sèche}$: quantité annuelle de produit séché du séchoir (kg),

m_f : quantité annuelle de produit frais séché (kg),

P_d et P_f en (DA/kg),

V.6. Analyse économique des séchoirs solaires (direct , indirect , hybride avec appoint énergétique par échangeur thermique et par résistance thermique)

Posons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- le coût initial de l'installation est financé par un emprunt,
- le système n'est pas assuré,
- les coûts et les gains sont réglés à la fin de l'année.

V.6.1 Actualisation du coût initial

L'évaluation du coût initial est obtenue à partir de celui de l'unité de séchage et des appoints

V.6.2 Données économiques

Tableau (V.3) : paramètres pour les frais d'investissement pour le séchoir solaire sans et avec appoints énergétiques

	Prix de séchoir (DA)	Prix de résistance électrique (DA)	Prix de simulateur (DA)	Prix de l'échangeur (DA)	Capacité (Kg)	Prix de Electricité (DA)
Séchoir solaire direct	30000	/	/	/	11	/
Séchoir avec appoint électrique	70750	750	/	/	11	80
Séchoir solaire indirect	70000	/	/	/	11	/
Séchage avec appoint par échangeur	80200	/	4000	8000	11	80

Tableau (V.4) prix de fonctionnement

Composants	Prix (DA)
Coût de main d'œuvre (1 personne)(DA /jours)	500x300
Heure de début des cycles de séchage	8 :00
Durée d'un cycle de séchage (heures)	10
Nombre de jours de fonctionnement sur une année	300

Tableau (V.5) prix d'achat et de vente des produits d'étude

Nature de produit	Durée de campagne (mois)	Période de Campagne (mois)	Prix d'achat du produit frais (DA)	Prix de vente du produit sec (DA)
Grains de feve	3	(Jan -Mars)	(60_90)	(240_280)
pomme de terre tranchée	12	(Jan-Dec)	(50-80)	(100-140)
dattes Deglet Nour	3	(Sep-Nov)	(80-130)	(160-320)

Tableau (V.6) : Données divers [156]

Composants	
Durée de vie du séchoir(ans)	15
Frais du maintenance	1%du cout total pour la première année
Taux d'intérêt	8%
Taux d'inflation	3.5%

V.6.3 Calcul de temps de retour sur l'investissement

Suite aux conditions climatiques du Sahara qui nous permettront d'utiliser les prototype de séchage presque toute l'année (300 jours) et suite aux principaux paramètres économiques basés sur la situation économique de l'Algérie; les courbes (V.7-16) ci-dessous a été établi contenant les différents coûts d'investissement des séchoirs solaires expérimentés. En utilisant les données des tableaux (V. 3-6) on peut déduire le temps de retour de l'investissement. Le retour de l'investissement c'est le temps nécessaire pour que la somme des bénéfices nets annuels réalisés soit égale au montant de l'investissement initial.

V.6.4 Etude de rentabilité des système de séchage solaire(hybride , direct et indirect) destiné pour le séchage des grains de féve

V.6.4 .1 Séchage solaire hybride (appoint par échangeur)

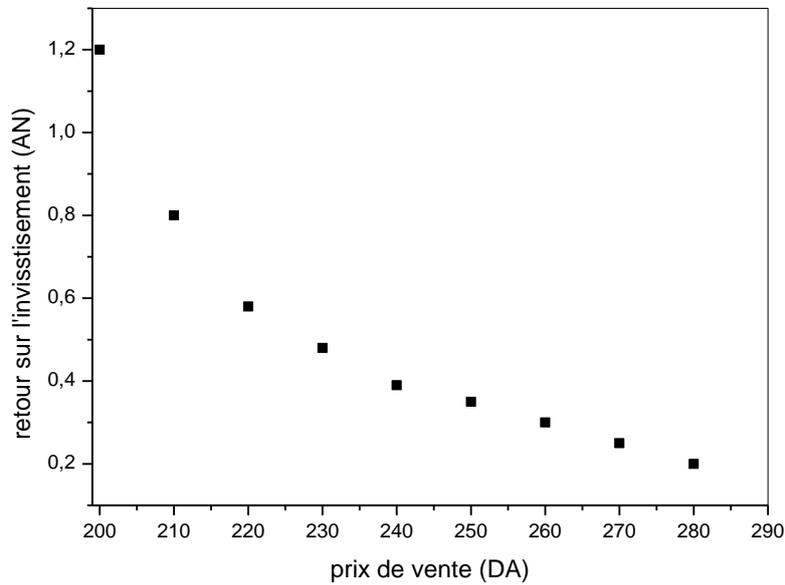


Figure (V.7) : Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix de vente des Fèves séchées

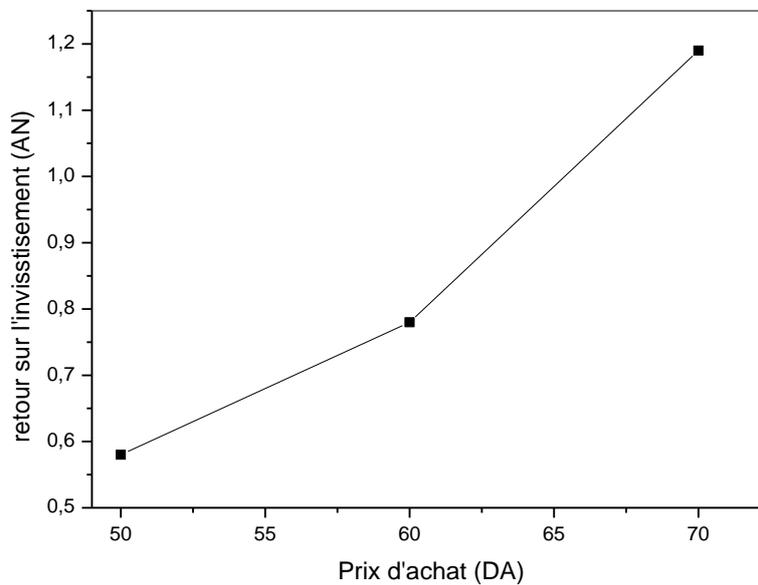


Figure (V.8) : Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix d'achat des fèves fraîches

V.6.4 .2 Séchage solaire direct

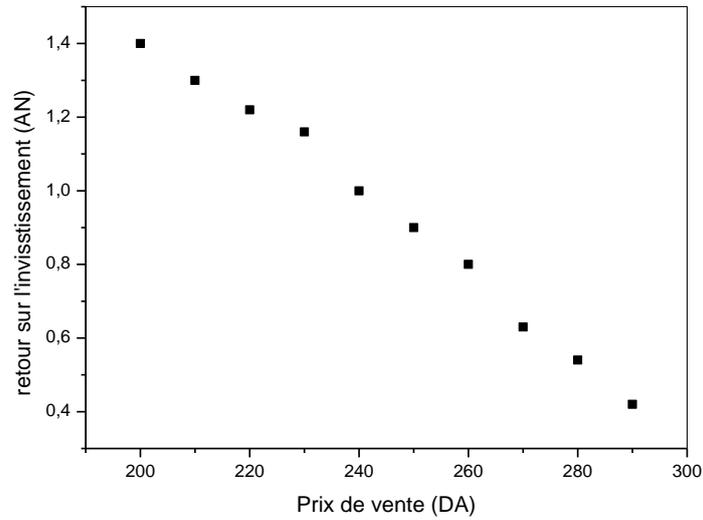


Figure (V.9) : Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix de vente des Fèves fraîches

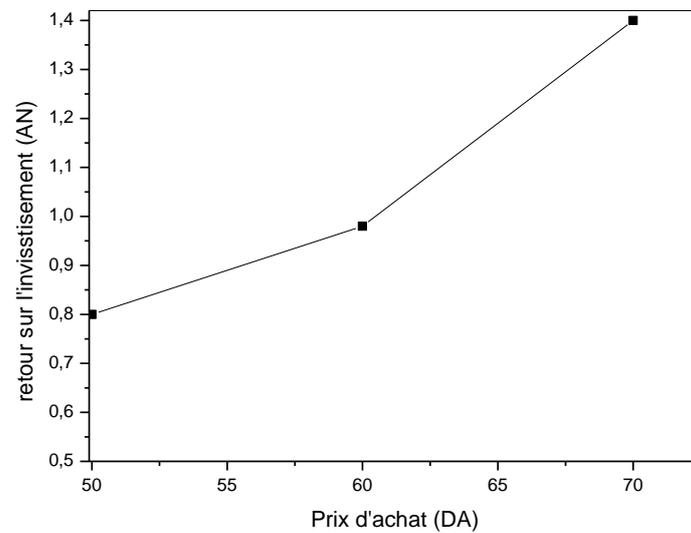


Figure (V.10) : Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix d'achat des Fèves fraîches

V.6.4 .3 Système de séchage solaire indirect

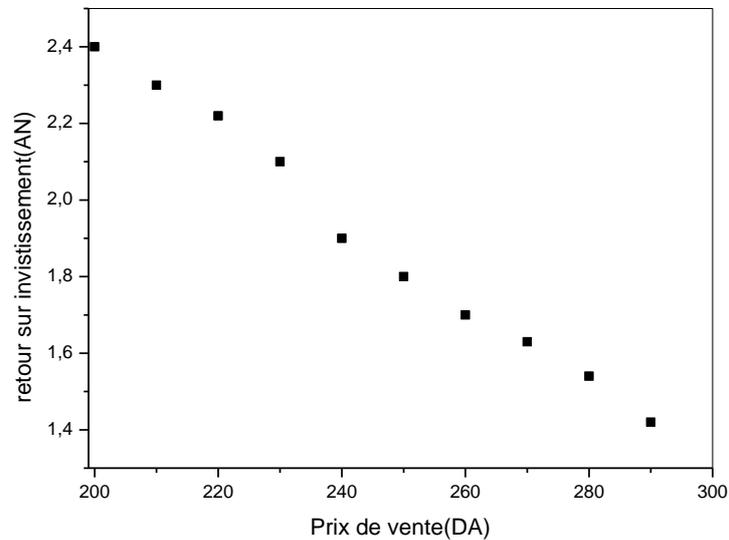


Figure (V.11) : Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix de vente des Fèves séchées

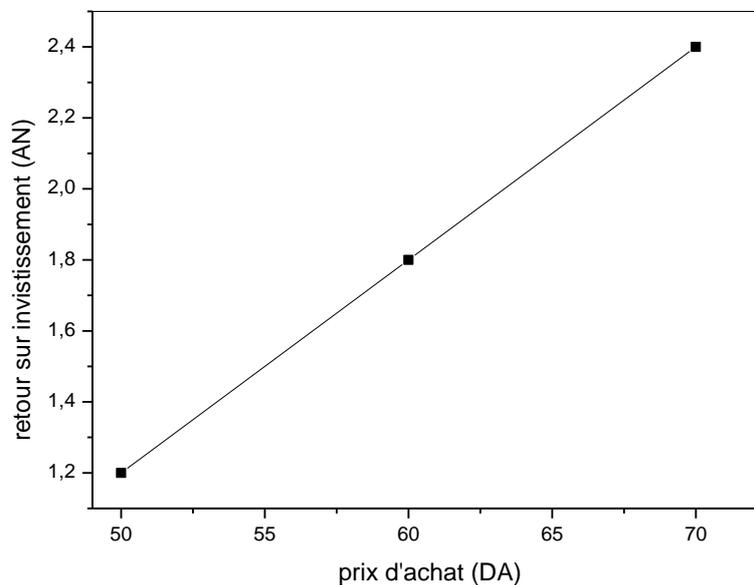


Figure (V.12) : Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix d'achat des Fèves fraîches

On constate sur ces figures que pour les différents systèmes de séchage utilisés (hybride , direct et indirect) le temps de retour sur investissement varie avec le prix d'achat des grains

de fève à l'état frais et le prix de vente des fèves séchées. Il est d'autant plus élevé que le prix d'achat des produits sont importants (figures V- 8, 10 ,12). Il diminue avec l'accroissement du prix de ventes de fèves séchées (figure V- 7 ,9,11),

le séchoir solaire indirect hybride est un système rentable qui peut être utilisé par les agriculteurs pour valoriser les grains de fève et préserver leurs qualité il nous assure une opération de séchage en une journée avec une courte durée de séchage surtout lorsque on exploite la source géothermique pour des prix fixe d'achat et de vente du produit varie entre [50DA-200DA] , le retour sur l'investissement égale 1.2 AN

Le séchoir direct présente un système rentable avec un bénéfice considère pour une opération de séchage pendant les mois de récolte et pour les journée ensoleillés il est facile à entretenir et à manipuler le retour sur l'investissement égale 1.4 AN

Le séchoir indirect fonctionne par énergie solaire reste valable pour la valorisation des grains de fève mais il présente l'inconvénient de faible énergie thermique et un cout élevé, le retour d'investissement égale à 2.4 AN

V.6.5 Etude de rentabilité du système de séchage solaire hybride destiné pour la valorisation des Dattes deglet noir (appoint par résistance électrique à $T=50^{\circ}\text{C}$)

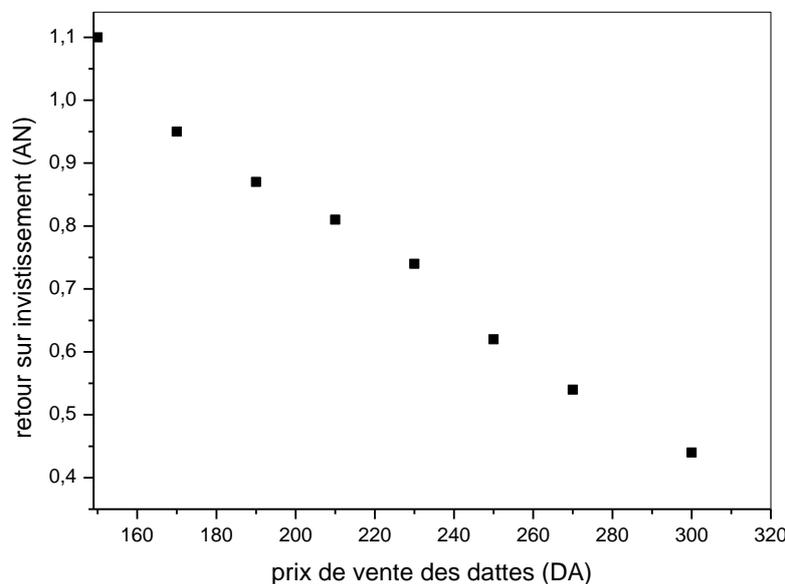


Figure (V.13) : Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix de vente des dattes deglet noir séchés

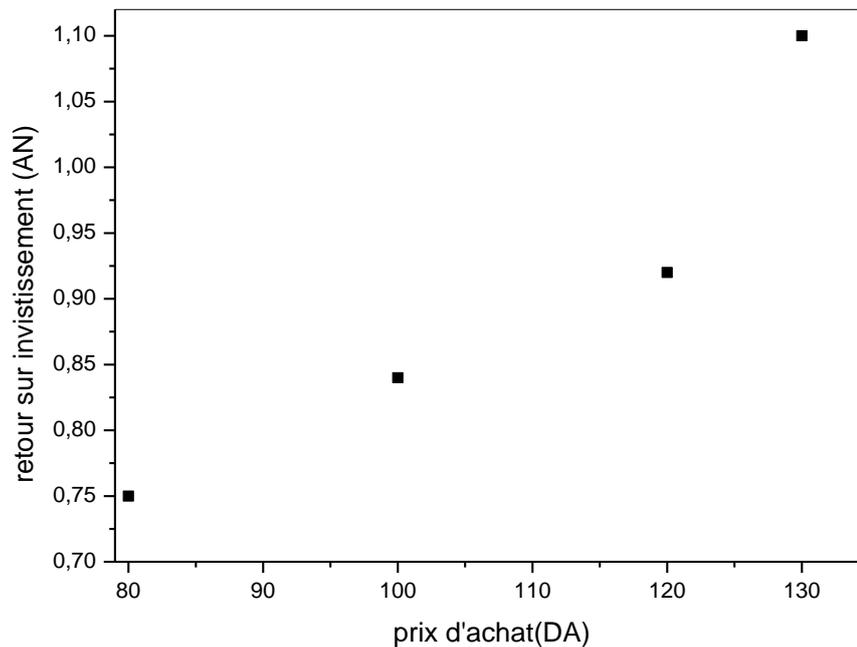


Figure (V.14) : Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix d'achat des dattes deglet noir sèches

Les figures (V ,13,14) montrent que le temps de retour sur investissement varie avec le prix d'achat des dattes deglet noir à l'état sèches et le prix de vente des dattes deglet noir séchées en état améliorés , il est d'autant plus élevé que le prix d'achat des produits sont importants , il diminue avec l'accroissement du prix de ventes de s dattes deglet noir séchées Dans ce type de séchoir hybride, le temps de retour de l'investissement (1,1an) est très court comparativement à la durée de vie du séchoir estimé approximativement à 15ans; d'où l'intérêt d'utilisation de ce genre de séchoir à température constante $T=50^{\circ}\text{C}$ pour valoriser les dattes Deglet noir sèches et le rendre commerciale.

L'intérêt des résultats obtenus est que la durée de séchage reste inférieure ou égale à une journée, ce qui permet d'éviter le stockage et les risques de réhumidification pendant la nuit. donc notre système de séchage est rentable point de vue durée de séchage et préservation du qualité finale

V.6.6 Etude de rentabilité du système de séchage solaire hybride destiné pour la conservation des pommes de terre tranchée (source d'énergie électrique panneaux solaires)

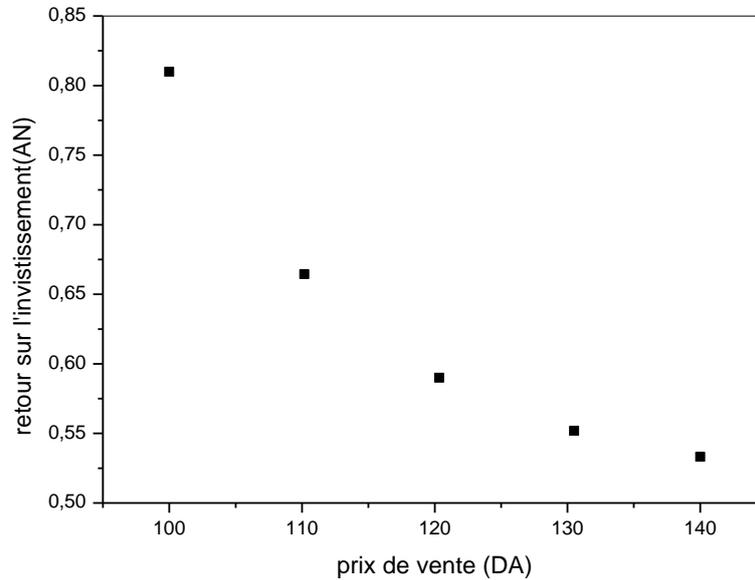


Figure (V.15) : Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix de vente des pommes de terre tranchées

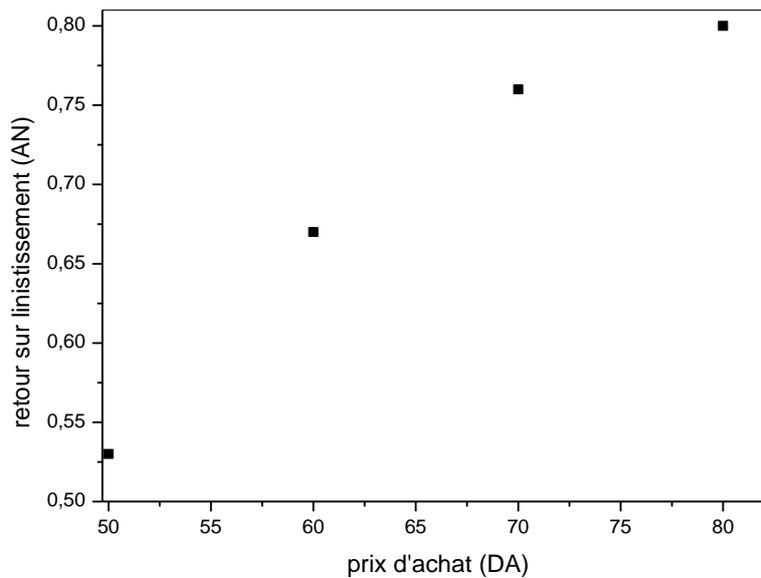


Figure (V.16) : Evolution du temps de retour sur investissement en fonction du prix d'achat des pommes de terre tranchées

Les figures (V,15,16) montrent que le temps de retour sur investissement varie avec le prix d'achat des pommes de terre tranchées à l'état fraîche et leurs prix de vente à l'état séchées, il est d'autant plus élevé que le prix d'achat des produits sont importants, il diminue avec l'accroissement du prix de vente des pommes de terre séchées Le séchage par énergie solaire photovoltaïque. Du point de vue rentabilité économique, l'investissement ne dépend non seulement des prix d'achat et de vente des produits mais également d'un certain nombre de paramètres spécifiques au site, qui doivent être pris en considération. Ces paramètres incluent:

- le rendement du système,
- L'irradiation du site,
- le taux d'actualisation,
- la durée de vie des divers constituants du système, (panneaux photovoltaïques connectés, séchoirs solaires)
- le taux d'utilisation du système,

Conclusion

A partir des résultats obtenus dans ce chapitre on peut conclure que :

- Les appoints énergétiques (résistance électrique, échangeur air/eau) expérimentés dans le chapitre IV sont des solutions pratiques pour résoudre le problème d'instabilité d'une part (assurer des conditions opératoires favorable) et améliorer l'efficacité énergétique des séchoirs solaires indirect d'autre part
- L'efficacité énergétique du système de séchage solaire hybride qui fonctionne par échangeur air/eau varie entre 20% à 52%, la contribution de l'énergie solaire pour chauffer l'air caloporteur décroît de 47.2.% à 12.88%, la consommation de l'énergie électrique augmente de 52.8% à 87.11%
- L'efficacité énergétique du système de séchage solaire hybride qui fonctionne par résistance électrique varie entre 20% à 40%, la quantification de l'énergie solaire varie entre 19.62% à 28.55%, les fractions de l'énergie électrique sont 19.62% à 86.78%.
- L'efficacité énergétique du système de séchage solaire direct varie entre 49% à 70%
- le rendement du séchoir indirect sans appoint énergétique varie entre 18% à 39%

L'étude économique sommaire a mis en évidence l'importance du prix d'achat des produits d'étude et leurs prix de vente à l'état séchés, ainsi pour le système de séchage adapté

Le temps de retour sur l'investissement de ces systèmes est évalué en fonction de produits séché et son sollicitation dans le marché et en fonction des appoints énergétiques intégrés au système de séchage

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés à l'étude de possibilité de stabilisation des conditions opératoires dans les séchoirs solaires convectifs de type indirect et direct pour améliorer leurs performances thermiques et valoriser les produits alimentaires. Le séchage des produits alimentaires est une filière clé de la transformation des aliments. Cette opération, largement utilisée dans l'industrie agro-alimentaire, permet d'augmenter significativement la durée et la diversité d'utilisation de nombreux aliments. Néanmoins l'instabilité des conditions opératoires notamment la température de l'air asséchant ,et l'exposition des produits à des débits d'air importants peuvent entraîner des différentes altérations du produit, en plus la méthode de séchage, les conditions opératoires défavorables (instables) et le temps de séchage sont des facteurs influençant directement la qualité des produits séchés et doivent donc être bien contrôlés et maîtrisés. Notre contribution pour l'amélioration énergétique des systèmes de séchage solaire a été pensée dans un objectif de maintenir des conditions opératoires favorables pour le bon achèvement de l'opération. A cet effet nous avons identifié plusieurs objectifs.

- Intégrer au système de séchage différents appoints énergétiques par un échangeur de chaleur air/eau fonctionnant en mode continu et par une résistance électrique en mode discontinue, les appoints expérimentés servent à l'amélioration de l'efficacité énergétique. .
- Choisir une technique d'amélioration assurant une opération de séchage en continue (échangeur air-eau) couplé avec un simulateur de l'eau géothermique
- Trouver le modèle mathématique approprié pour nos produits d'étude (dattes deglet nour , pomme de terre tranchée et grains de fève) dans des conditions opératoires spécifiques; confronter les résultats expérimentaux avec les résultats théoriques.
- Une réflexion sur les problèmes de consommation de l'énergie et les dépenses économiques lors des opérations de séchage, nous amène à calculer le quote-part de l'énergie électrique et solaire dans cette opération, ainsi que la rentabilité des séchoirs solaires utilisés (direct , indirect et hybride) par évaluation du retour de l'investissement en fonction des prix d'achat des produits d'étude à l'état frais et leurs prix de vente à l'état séché.

La stabilisation par résistance électrique permet d'atteindre l'ensemble des résultats avantageux.

- Obtention d'un séchage homogène en régime constant.

Conclusion générale

- Extraire de l'humidité en vitesse pour éviter le risque de développement des moisissures et de formation de la croûte sur la surface du produit avant d'atteindre la teneur en eau finale.

La multiplicité des essais expérimentaux réalisés avec la variation du nombre de panneaux solaires nous a permis de stabiliser la température de l'air dans la chambre de séchage selon des intervalles de temps en fonction du nombre des panneaux solaires connectés en parallèles, pour optimiser la température de séchage des dattes deglet noir

- On utilise pratiquement 4 panneaux pendant deux heures de séchage (9 H à 11 H) pour avoir une température varie entre 50 °C à 67°C
- On utilise pratiquement 2 panneaux pendant deux heures de séchage (11 H à 14 H) pour avoir une température varie entre 60 °C à 65°C
- On utilise pratiquement 3 panneaux pendant deux heures de séchage (14 H à 15.5H) pour avoir une température de l'ordre de 69°C à 75°C,

L'intégration au système du séchage un échangeur (air-eau) fonctionnant par la source solaire couplée avec un appoint via échangeur de chaleur fonctionnant par eau géothermique), nous a permis de :

- réaliser un séchage homogène en continu.
- éviter les risques de saturation en eau de l'air avec l'utilisation d'un système de ventilation forcée.

- développer un mode de séchage indirect rapide et continue afin de réduire fortement le risque de dégradation des produits séchés.

- appliquer cette technique pour le séchage agricole par énergie géothermique possibilité de procéder au séchage à n'importe quel mois de l'année. Les conditions opératoires assurant un meilleur compromis (stabilité des températures /durée de séchage /couleur) ont été choisis pour :

- Le séchage solaire hybride (séchage par énergie électrique à T=60°C) des échantillons des grains de fèves séchées avec une distance de couleur $\Delta E = 4.54$ et une durée de séchage $t = 6h$, en plus les grains de fève séchés sous séchage par énergie géothermique, le temps de séchage $t = 7h$ et la distance de couleur $\Delta E = 4.86$ sont considérés des cas optimum de séchage avec une qualité finale acceptable pour la commercialisation.

- le séchage solaire hybride (séchage par énergie photovoltaïque) des échantillons des dattes deglet noir séchés pourrait être défini comme état optimal de séchage, la distance de

Conclusion générale

couleur est $\Delta E=0.76$ a été trouvée avec l'échantillon séché dans l'essai de changement des panneaux solaire avec un temps de séchage égale 6.5h.

- le séchage hybride (solaire, photovoltaïque) des échantillons des pomme de terre tranchées avec une optimisation du nombre de panneaux solaires connectées pourrait être défini comme état optimale, la distance de couleur calculé égale $\Delta E= 24.13$,le temps de séchage est 2h15min.

Les résultats de la modélisation mathématique par le logiciel curve expert 1.4 montrent que le modèle de Midilli et Kucuk décrit le séchage des dattes deglet noir et les pommes de terre tranchées, le séchage des grains de fève est décrit par le modèle de page

D'après l'analyse énergétique, l'efficacité du système de séchage solaire hybride qui fonctionne par échangeur air/eau en mode continue varie entre 20% à 52%, le rendement de séchage hybride par résistance électrique en mode discontinu varie entre 20% à 40%.

Au vu des résultats des études technico-économiques, les trois systèmes de séchage (direct , indirect , hybride) étudiés présentent certains avantages et des inconvénients bien que le séchoir solaire le plus adaptable pour le séchage des produits alimentaires dépend des considérations sociales, des critères de consommation énergétique et du bénéfice

De cette analyse, découlera le choix sur l'investissement à effectuer, car l'analyse des coûts et de la rentabilité est un préalable incontournable avant toute décision d'investissement sur des équipements énergétiques que ce soit en énergie solaire ou en une autre énergie conventionnelle (électrique). L'opportunité de ce travail est double. Il permet d'avoir une idée précise sur les coûts d'investissement en connaissant les dépenses de l'opération pour les modes proposés d'une part, et d'autre part pour optimiser le bénéfice de l'opération.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] S. Misha, S. Mat, M.H. Ruslan, K. Sopian 2013 . Review on the Application of a Tray Dryer System for Agricultural Products Sallah World Applied Sciences Journal 22 (3): 424-433, ISSN 1818-4952
- [2]Murthy, R. 2009. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.13, pp. 835-844.
- [3]Shanmugam, V., Natarajan, E., 2006. Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renewable Energy*, Vol.31, pp. 1239–1251.
- [4]Sharma, A., Chen, C. R., Vu Lan, N., 2009. Solar- energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.13, pp. 1185-1210.
- [5] REFERENCES GISEMENT CDER Alger. www.cder.dz
- [6]Koyuncu, T.2006. An investigation on the performance improvement of green house type agricultural dryers. *Renewable Energy*, Vol.31, pp. 1055–1071
- [7] P. Arlabosse : 2008. Séchage industriel. aspects pratiques. *Techniques de l'Ingénieur*, J 2 455:1–24.
- [8] J.D. Seader et E.J. Henley 2006 : *Séparation process principles*. Wiley & Sons, 2e édition,
- [9] A.S. Mujumdar : , 2006. *Handbook of Industrial Drying*. Taylor and Francis Group, L.L.C., third edition
- [10] T.H. Wentz et J.R. Thygeson : 1979. Drying of wet solides. *In Handbook of separation techniques for chemical engineers*, pages 141–184. Mc GrawHill
- [11] J. Bear : *Dynamics of Fluids in porous media*. Dover Publication, Haifa, 1972.
- [12] J.P. Couderc, C. Gourdon et A. Liné : *Phénomènes de transfert en génie des procédés*. Edition Tec. & Doc., 2008.
- [13] A.S. Mujumdar : An overview of innovation in industrial drying : current status and r&d needs. *Transport in Porous Media*, 66:1–18, 2007.
- [14] G. Ashton : Design of energy efficient batch processes. *In Energy efficiency in process technology*, page 190. Elsevier Applied Science, London, 1993.
- [15] C. Bonazzi et J-J. Bimbenet : Séchage des produits alimentaires. Appareils et applications. *Techniques de l'Ingénieur*, F 3002:1–17, 2008.
- [16] Z.H. Wang et G Chen : Heat and mass transfer in fixed-bed drying. *Chemical Engineering Science*, 54(19):4233–4243, 1999.
- [17] S. S. Sablani et M. S. Rahman : Fundamentals of food dehydration. *In Food Drying. Science and Technology*. DES Tech Publications, Inc., 2008.
- [18] C. Bonazzi et J-J. Bimbenet : Séchage des produits alimentaires. *Techniques de*

Références bibliographiques

l'Ingénieur, F 3000:1–14, 2003.

[19] H.S. Ramaswamy et M. Marcotte : Food processing : principles and applications. *In Thermal Processing*, pages 67–168. Boca Raton, Fla. : Taylor & Francis, 2006.

[20] Mujumdar, A.S., & Menon, A. (1995). Drying of solids. Principles classification and selection of dryer. Handbook of industrial drying, 2nd edition, chapter 1, pp.1-45 in A.S Mujumdar (Ed) Marcel Dekker, New York.

[21] Van't Land, C.M., & Dekker, M.(1991). Industrial Drying Equipment: Selection and Application, New York.

[22] Mujumdar, A.S., (2000). Guide pratique du séchage industriel Application, principes, équipements et nouveau développement. Sakamon Devahastin, Montréal Exegex Corporation, Quebec.

[23] Mahlbouer, W., Esper, A., & Muller, J. (1993). Solar energy agriculture. ISES solar world congress, August, Budapest, 23-27.

[24] Charreau A., Cavaille R. (1991) Séchage théorie et pratique *Technique de l'Ingénieur*, génie des procédés, 2480-1; 2480-23

[25] Jean Claude Charpentier, (1996) *Technique de l'Ingénieur*, génie des procédés, 2480-4; 2480-20.

[26] Touati B. (2008) Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*mentha viridis*). *Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon Ecole Doctorale M.E.G.A (I.N.S.A. de Lyon) Et Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen.*

[27] M. Dagueneat : *Séchoirs solaires : Théorie et pratique. Rapport technique, Unesco, France, 1985.*

[28] J.P Nadeau , Puiggali J.R., Séchage: des processus physiques aux procédés industriels. Tec & Doc- Lavoisier, 1995.

[29] Swetman T., Le séchage solaire, Pratical Action, Note technique, Royaume Uni, Novembre 2007.

[30] Charreau A., Cavaille R. (1991) Séchage théorie et pratique *Technique de l'Ingénieur*, génie des procédés, 2480-1; 2480-23

[31] Diamante, L.M. and P.A. MUNRO (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 51 (4): 271-276.

Références bibliographiques

- [32] Youcef-Ali, S., H. Messaoudi, J.Y. Desmons, A. Abene and M. Le Ray (2001). Determination of the average coefficient of internal moisture transfer during the drying of a thin bed of potato slices. *Journal of Food Engineering* 48: 95-101.
- [33] Hassini, L., S. Azzouz, R. Peczalski and A. Belghith (2007). Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering* 79: 47-56.
- [34] Tripathy, P.P. and S. Kumar (2009). Modeling of heat transfer and energy analysis of potato slices and cylinders during solar drying. *Applied Thermal Engineering* 29: 884-891.
- [35] Movagharnejad K. and M. Nikzad (2007). Modeling of tomato drying using artificial neural network. *Computers and Electronics in Agriculture* 59: 78-85.
- [36] Nadir N., B. Bouchekima, S. Boughali W. Belachi, R. Mahdadi et D. Mennouche (2008). La cinétique de séchage à convection forcée des tranches de tomate. *2ème séminaire maghrébin sur les sciences et technologies de séchage SMSTS2008*.
- [37] Nitz M. and O. P. Taranto (2004). Drying of beans in a pulsed-fluid bed dryer – fluid-dynamics and the influence of temperature, airflow rate and frequency of pulsation on the drying rate. *Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)* B: 836-843
- [38] Hashemi G., D. Mowla, M. Kazemeini (2009). Moisture diffusivity and shrinkage of broad beans during bulk drying in an inert medium fluidized bed dryer assisted by dielectric heating. *Journal of Food Engineering* 92: 331-338.
- [39] Pardeshi, I.L.; Arora, S.; Borker, P.A. Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. *Drying Technology* 2009, 27, 288–295.
- [40]Ahmed-Zaïd, A. Moulla, A. Hantala1, M. S. et Desmons; J.Y. (2001).Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans à Air: Application au Séchage de l'Oignon Jaune et du Hareng. *Rev. Energie Renouvelable* 4 : 69-78.
- [41] Desmorieux H. and N. Decaen (2005). Convective drying of spirulina in thin layer. *Journal of Food Engineering* 66: 497-503.
- [42] Dissa, A.O., H. Desmorieux, P.W. Savadogo, B.G. Segda, J. Koulidiati (2010). Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of spirulina. *Journal of Food Engineering* 97: 410- 418.
- [43] Abdelghani Boubekri1., Hocine Benmoussa , Djamel Mennouche . Solar drying kinetics of date palm fruits assuming a step-wise air temperature change .*Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 4, No. 3 (2009) 292 - 304 © School of Engineering, Taylor's University College 292

Références bibliographiques

- [44] Samira Chouicha Abdelghani Boubekr iHamza Bouguettaia Djamel Mennouche Séchage et qualité des dattes Deglet-Nour réhumidifiées par utilisation d'un séchoir solaire hybride *Annales des Sciences et Technologie* Vol. 2, N° 1, Juin 2010
- [45] Basunia1 , h.h. handali1 , M.i. al-balushi1 , M.s. rahman1 , o. Mahgoub1 1 m.a. Basunia, sultan qaboos drying of dates in oman using a solar tunnel, xviii World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR) Hosted by the Canadian Society for Bioengineering (CSBE/SCGAB) Québec City, Canada June 13-17, 2010
- [46] Zangiabadi, B., M. Ameri and M.M. Mahmoud abadi (2007). Experimental study of pistachio drying behavior in a mixed-mode pv operated forced convection solar dryer. *Proceedings of ISES Solar World Congress*.
- [47] Togrul I. T. and D. Pehlivan (2002). Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering* 55: 209-216.
- [48] Akpinar E. and K., F. Koçyigit (2009). Experimental investigation of thermal performance of solar air heater having different obstacles on absorber plates. *International Communications in Heat and Mass Transfer*.
- [49] Bozkır O. (2006). Thin-layer drying and mathematical modeling for washed dry apricots. *Journal of Food Engineering* 77: 146-151.
- [50] Chiang W-C. and J. N. Petersen (1987). Experimental measurement of temperature and moisture profiles during apple drying. *drying technology* 5(1): 25-49.
- [51] Menges H. O. and C. Ertekin (2006). Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering* 77: 119-125.
- [52] Białobrzewski I. (2006). Simultaneous Heat and Mass Transfer in Shrinkable Apple Slab During Drying. *Drying Technology* 24: 551-559.
- [53] Togrul I. T., D. Pehlivan (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under openair sun drying process. *Journal of Food Engineering* 65: 413-425.
- [54] Guiné R. P. F., M. A. Ramos and M. Figueiredo (2006). Shrinkage characteristics and porosity of pears during drying. *Drying Technology* 24: 1525-1530.
- [55] El-Beltagy A. , G.R. Gamea, A.H. Amer Essa (2007). Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering* 78: 456-464.
- [56] Shulyak V. A. and L. A. Izotova (2009). Shrinkage Kinetics during Convective Drying of Selected Berries. *Drying Technology* 27: 495-501.
- [57] Kreider, S. F., & Kreith, F. (1981). Solar energy handbook. New York, USA. McGrawHill Book Co

Références bibliographiques

- [58] Rabl, A. (1985). Active solar collectors and their applications. Oxford University Press, New York, USA.
- [59] Sharma, A., Chen, C.R., & Nguyen, V.L. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1185–1210.
- [60] Ekechukwu, O.V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology *Energy Conversion & Management*, 40, 615-655.
- [61] Gikuru, M., & Njoroge S. (2006). Performance of a solar dryer with limited sun tracking capability. *Journal of Food Engineering*, 74, 247-25
- [62] Simata, I.N. (2003). Optimization of mixed mode and indirect mode natural convection solar dryer. *Renewable Energy*, 28, 435-453
- [63] Shanmagaam, V., & Natarajan, E., (2005). Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer. *Renewable energy*, 31, 1239-1251.
- [64] S. Misha, S. Mat, I,2 I M.H. Ruslan, IK. Sopian and IE. Salleh Review on the Application of a Tray Dryer System for Agricultural Products *World Applied Sciences Journal* 22 (3): 424-433, 2013
- [65] Aboul-Enein, S, El-Sebaii, A.A., Ramadan, M.R.I., & El-Gorary, H.G. (2000). Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying application. *Renewable Energy*, 21, 505-521.
- [66] Gikuru, M., & Njoroge S. (2006). Performance of a solar dryer with limited sun tracking capability. *Journal of Food Engineering*, 74, 247-25
- [67] M.A. Leon, S. Kumar, S.C. Bhattacharya, 2002. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 367-393.
- [68] G. Prakash, 1997. Solar energy fundamental and application. New Delhi: Tata Mc Graw-Hill. Publishing Co. Ltd.
- [69] ASHRAE Standards 93-77. Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors. New York: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1977.
- [70] ASHRAE Std. 94-77. Methods of testing thermal storage devices based on thermal performance. New-York American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1977
- [71] ASHRAE Standards 95-81. Methods of testing to determine thermal performance of solar water heating systems. New-York: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, 1981.
- [72] SRCC Standard 200-82. Solar Rating and Certification Corporation, Washington DC. Test methods and minimum standards for certifying solar water systems, 1983.
- [73] MS. Soda, R. Chandra, 1994. Solar drying systems and their testing procedures: a review. *Energy Conversion and Management* 35 (3), 219-267.

Références bibliographiques

- [74] M. Grupp, B. Hannelore, M. Owen-Jones, G. Schroder. Comparative tests of solar dryers. Technology Demonstration Center (TDC) Serial Report 2/95, Plataforma Solar de Almeria (PSA), Spain, August 1995.
- [75] T.A. Reddy, 1985. Testing procedures of solar components and systems: fundamental considerations. In: T.A. Reddy, Ph. Bouix, editors. Proceedings of the fourth Asian School on Solar Energy Harnessing, Decembre, 1985. Bangkok: Asian Institute of Technology; 1985.
- [76] G. Nonhebel. Drying of solids in the chemical industry. London: Butterworth & Co. Publishers Ltd, 1971.
- [77] Inci Türk Toğrul, Dursun Pehlivan, 2003. Modeling of drying kinetics of single apricot, *Journal of Food Engineering*, 58, 23–32.
- [78] Bakri H. Hassan and Ali I. Hobani. 2000. Thin-layer drying of date. *Journal of Food Processes Engineering* 23, 177-189.
- [79] T. L. Togrul, & D. Pehlivan, 2003, Mathematical modelling of solar drying of apricot in thin layers, *Journal of Food Engineering*, vol. 55, pp. 209-216.
- [80] A. Belghit, & al., 2000, Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants, *Energy Conversion and Management*, vol. 44, n° 12, pp. 1303-1321.
- [81] A. A. El-Sebaï, & al., 2002, Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables, *Energy*, vol. 27, n° 9, pp. 845-859.
- [82] C. Ertekin, & O. Yaldiz, 2004, Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model, *Journal of Food Engineering*, vol. 63, n° 2, pp. 349-359.
- [83] P.C. Panchariya, & al., 2002, Thin-layer modelling of black tea drying process, *Journal of Food Engineering*, vol. 52, n° 4, pp. 349-357.
- [84] Nitz M. and O. P. Taranto (2004). Drying of beans in a pulsed-fluid bed dryer – fluid dynamics and the influence of temperature, airflow rate and frequency of pulsation on the drying rate. *Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)* B: 836-843
- [85] Lamharrar A., Kouhila M., Idlimam A., Jamali A. et Kechaou N., 2005. Séchage solaire convectif en couches minces des feuilles d'absinthe (*Artemisia arborescens*), 12èmes Journées Internationales de Thermique, 371 – 373. Tanger, Maroc.
- [86] Dinçer, İbrahim and Calin Zamfirescu TP363.D48 2016 , Drying phenomena : theory and applications / İbrahim Dinçer Includes bibliographical references and index. ISBN 978-1-119-97586-1 (cloth)
- [87] C.L. Hii, S.V. Jangam, S.P. Ong and A.S. Mujumdar 2012 Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations ISBN: 978-981-07-3336-0

Références bibliographiques

[88] Caroline Heilporn 2010 , contribution au développement d'une nouvelle technologie de séchage solaire , application à la mangue . Université libre de Bruxelles (ULB) École polytechnique de Bruxelles Service Transferts, Interfaces et Procédés (TIPs)

[89] موسى احمد خير الدين كتاب ادارة المشاريع المعاصرة - منهج متكامل في ادارة الاعمال , دار وائل للنشر , الطبعة الثانية , 2014

[90] Deepali Atheaya , Economics of Solar Drying, Solar Drying Technology, Green Energy and Technology, DOI 10.1007/978-981-10-3833-4_15

[91] العاتي مختار المساهمة في تحسين مجفف شمسي للمحاصيل الزراعية مذكرة ماجستير جامعة ورقلة 2011

[92] ISO 665, 2000. Oilseeds - Determination of moisture and volatile matter content.

[93] Tripathy ; Kumar “ Determination of temperature dependent drying parameters for potato cylinders and slices during solar drying ” Energy conversion and management 2008, 49, 2941 – 2948

[94] J.WangY.Chao Effect of gamma irradiation on quality of dried potato Radiation Physics and Chemistry Volume 66, Issue 4, March 2003, Pages 293-297

[95] Lemuel M. Diamante Peter Aaron Munro Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices June 2007 International Journal of Food Science & Technology 26(1):99 – 109 DOI: 10.1111/j.1365-2621.1991.tb01145.x

[96] Fateh Singh, V. K. Katiyar, and B. P. Singh T I Mathematical Modeling to Study Drying Characteristic of Apple and Potato International Conference on Chemical, Environment & Biological Sciences (CEBS-2014) Sept. 17-18, 2014 Kuala Lumpur (Malaysia)

[97] Samira Naderinezhad Nasrin Etesami Arefe Poormalek Najafabady Majid Ghasemi Falavarjani Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters August 2015 , food science and nutrition Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156-8311, Iran

Références bibliographiques

- [98] ShivaRuhanianKamyarMovagharnejad Mathematical modeling and experimental analysis of potato thin-layer drying in an infrared-convective dryer Engineering in Agriculture, Environment and Food January 2016 Volume 9, Issue 1,, Pages 84-91
- [99] Boubekri, A., Benmoussa, H., Courtois, F., Bonazzi, C. Softening of overdried 'Deglet Nour' Dates to obtain high-standard fruits: Impact of rehydration and drying processes on quality criteria. *Drying Technology* 28(2), 222-231(2010).
- [100] < Kulkarni, S.G., Vijayanand, P., Aksha, M., Reena, P., Ramana, K.V.R. Effect of dehydration on the quality and storage stability of immature dates (*Phoenix dactylifera*) *LWT Food Sci. Technol.* 41(2), 278–283(2008).
- [101] Dowson M.V.W., Aten A., Récolte et conditionnement des dattes. FA.O., 1963.
- [102] Kechaou, N., Maalu M. and Kapseu C., 1996. Empirical approach of drying kinetics of dates. *Sciences des Aliments* 16(6), 593-606.
- [103] Kechaou N. and Maalej M., 2000. A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves. *Drying Technology* 18(4/5) : 1109-1125.
- [104] Bakri H. Hassan and Ali I. Hobani. 2000. Thin-layer drying of date. *Journal of Food Processes Engineering* 23,177-189.
- [105] Boubekri A., Benmoussa H., Courtois F. and Bonazzi C., 2007. Influence of drying on "Deglet-Nour" date quality. *European Drying Conference, Cahier de l'AFSIA n°22*, 104-105.
- [106] M.H. Hendaway', A.M.A. Younes. Biochemical evaluation of some faba bean cultivars under rainfed conditions at El-Sheikh Zuwayid . *Annals of Agricultural Sciences* Volume 58, Issue 2, December 2013, Pages 183–193
- [107] Cecilia Baginsky^{a,1}, Álvaro Peña-Neira^b, Alejandro Cáceres^b, Teresa Hernández^c, Isabel Estrella^c, Héctor Morales^b, Ricardo Pertuzé^a Phenolic compound composition in immature seeds of faba bean (*Vicia faba* L.) varieties cultivated in Chile *Journal of Food Composition and Analysis* Volume 31, Issue 1, August 2013, Pages 1–6

Références bibliographiques

- [108] Isabel Revilla Impact of Thermal Processing on Faba Bean (*Vicia faba*) Composition Processing and Impact on Active Components in Food 2015, Pages 337–343
- [109] Guillermo Petzold¹, Marisa Caro, Jorge Moreno Influence of blanching, freezing and frozen storage on physicochemical properties of broad beans (*Vicia faba* L) International Journal of Refrigeration Volume 40, April 2014, Pages 429–434
- [110] S.K. Sathe Beans: Overview Encyclopedia of Food Grains (Second Edition) 2016, Pages 297–306 VOLUME 1: THE WORLD OF FOOD GRAINS
- [111] Marçal Plans^{a,1}, Joan Simó^a, Francesc Casañas^a, Roser Romero del Castillo^a, Luis E. Rodriguez-Saona^b, José Sabaté^a Estimating sensory properties of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by near infrared spectroscopy Food Research International Volume 56, February 2014, Pages 55–62
- [112] Lijiao Kan^a, Shaoping Nie^{a,1}, Jielun Hu^a, Sunan Wang^b, Steve W. Cui^c, Yawen Li^a, Sifan Xu^a, Yue Wu^a, Junqiao Wang^a, Zhouya Bai^a, Mingyong Xie^a Nutrients, phytochemicals and antioxidant activities of 26 kidney bean cultivars Food and Chemical Toxicology
- [113] Touzi, A. A. Merzaia-Blama. La conservation des denrées agro alimentaires par séchage dans les régions sahariennes. Revue des énergies Renouv. Special Issue. 267-272(2009).
- [114] Djamel Menouche, Etude et amélioration de l'efficacité énergétique des séchoirs solaires dans les zones arides désertiques, Thèse de doctorat, université Bejaya, 2016
- [115] Documentation "FLUENT" User's Guide" Fluent Inc. July 26,1998.
- [116] FLUENT Tutorial Guide PDFftp.energia.bme.hu> pub >MSc >flu_tg
- [117] gambit tutorial guide: 1.creating and meshing the <https://www.shrcnet.ca>>Gambit>html
- [118] Engin demiray and Yahya tulek[2014], color degradation kinetics of carrot (*daucus carota* l.) slices during hot air drying, department of food engineering, pamukkale university, tr-20070 denizli, turkey journal of food processing and preservation issn 1745-4549
- [119] M.K. Krokida, et al. 2003. Drying kinetics of some vegetables. Journal of Food Engineering.59, 391-403

Références bibliographiques

- [120] A.A. El-Sebaii, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan, H.G. El-Gohary, 2002. Empirical Correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables. *Energy* 27, 845-859.
- [121] Mohamed Hafed BERREBEUH , Abdelghani BOUBEKRI, Djamel Menouche et Samira CHOUICHA , *Choix et Validation d'un Modèle de Comportement pour le Séchage Convectif de la Datte Deglet-Nour*. *Annales des Sciences et Technologie* Vol. 5, N° 1, M ai 2013
- [122] A. Benhamou¹, A. Idlimam², A. Lamharrar², B. Benyoucef³ et M. Kouhila² , Diffusivité hydrique et cinétique de séchage solaire en convection forcée des feuilles de marjolaine , *Revue des Energies Renouvelables Vol 11 N°1 (2008) 75 – 85-75*
- [123] Lati moukhtar , Slimane Bouregaa, Hamza Bouguettaia, Mounira Guagi , Modélisation mathématique et estimation de la diffusivité de séchage solaire de pomme de terre(variété Désiré), conference paper March 2018
- [124]- İbrahim Doymaz a & Fergun Kocayigit a Drying and Rehydration Behaviors of Convection Drying of Green Peas journal of Drying Technology . *Drying Technology*, 29: 1273–1282, 2011
- [125] Akpınar, E., Midilli, A., Bicer, Y., 2003. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling. *Energy Convers. Manage.* 44, 1689–1705.
- [126] Yaldiz, O., Ertekin, C., 2001. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technol.* 19, 583–596.
- [127] R.N. Shukla, Priyadarshini and Atul Anand Mishra D, SHIATS, Allahaba an experimental study and mathematical modeling of microwave drying of green peas *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Jan. 2014. ISSN: 22311963
- [128] R. Bains *, T.A.G. Langrish Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas *Journal of Food Engineering* 79 (2007) 330–343
- [129] C. Tiris, N. Ozbalta. 1995. Thermal performance of new solar air heater. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 22, No. 3, 411-423.
- [130] M. Augustus Leon, S. Kumar, S.C. Bhattacharya, A comprehensive procedure for performance evaluation of food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 (2002) 367-393
- [131] V. Shanmugama, E. Natarajan Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer *Renewable Energy* 31 (2006) 1239–1251

Références bibliographiques

[132] Mohamed A. Eltawil, Said E. AbouZaher, Wagdy Z. El-Hadad, Solar-wind ventilation to enhance the cabinet dryer performance for medicinal herbs and horticultural products Agricultural Engineering International CIGR Journal 2012 Vol. 14, No.4

[133] S. Boughali a,*, H. Benmoussa b, B. Bouchekima a, D. Mennouche a, H. Bouguettaia a, D. Bechki a Crop drying by indirect active hybrid solar – Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara Solar Energy 83 (2009) 2223–2232

[134] P. Purohit, A., Kumar, T.C Kandpal, 2006. Solar drying vs. open sun drying: A framework for financial evaluation. Solar Energy 80, 1568-1579

[135] Jean-François Sacadura, 1993 Initiation aux transferts thermiques Tec Doc - Lavoisier

[136] Yves Jannot , Christian moyne 2012 Transfert thermiques cours et exercices , Edi livre <http://www.edilivre.com/transferts-thermiques-cours-et-55-exercices-corrige-20c28f73fc.html#.VyIS3nqHhPI>

[137] André BONTEMPS 2010 , Echangeur de chaleur , définition et principaux généraux BE9515

[138] Yves Jannot, (2007). Thermique solaire. Ecole des Mines de Nancy, France, 2007.

[139] lyes bennamoun an overview on application of exergy and energy for determination of solar drying efficiency international journal of energy engineering 2012, 2(5): 184-194

[140] Leon, M.A., Kumar, S., 2007. Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors. Solar Energy 81, 62–75.

[141] A. Ferradji¹, Y. Goudjal² et A. Malek³ Séchage du raisin de variété Sultanine par un séchoir solaire à convection forcée et un séchoir de type coquillage Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger (2008) 177 – 185

[142] Newnan D.G., Eschenbach et Lavelle J.P., Economic analysis: ninth edition, Oxford University Press, (2004).

[143] Sodha M.S., Chandra R., Pathak K., Singh N.P. et Bansal N.K., Techno-economic analysis of typical dryers, Energy Convers. Mgmt, 31 (6) (1991) 509-513.

[144] Audsley E. et Wheeler J., The annual cost of machinery calculated actual cash flows, J. Agric. Eng. Res., 23 (1978) 189-201.

[145] Tiwari Govind G.N., Economic analysis of some solar energy systems, Energy Convers. Mgmt, 24 (2) (1984) 131-135.

[146] Singh P.P., Singh S. et Dhaliwal S.S., Multi-shelf domestic solar dryer, Energy Conversion and Management, 47 (2006) 1799-1815.

[147] Banout J., Ehl P., Havlik J., Lojka B., Polesny Z. et Verner V., Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annum* L.),

Références bibliographiques

Solar Energy, 85 (2011) 506-515.

[148] Elkhadraoui A., Kooli S. et Farhat A., Study on effectiveness of mixed mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper, International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET), 3 (2015) 143-146.

[149] Fudholi A., Mat, S., Basri D.F., Ruslan M.H. et Sopian K., Performances Analysis of Greenhouse Solar Dryer with Heat Exchanger, Contemporary Engineering Sciences, 9 (3) (2016) 135-144.

[150] Banout J., Ehl P., Havlik J., Lojka B., Polesny Z. et Verner V., Design and performance evaluation of a Double-pass solar drier for drying of red chilli (*Capsicum annum* L.), Solar Energy, 85 (2011) 506-515.

[151] Smitabhindu R., Janjai S. et Chankong V., Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas, Renew. Energy, 33 (2008) 1523-1531.

[152] Janjai S, Tung P (2005) Performance of a solar dryer using hot air from roof-integrated solar collectors for drying herbs and spices. Renew Energy 30:2085–2095

[153] Boonyasri M., Lertsatitthanakorn C., Wiset L. et Poomsa-sd N., Performance analysis and economic evaluation of a greenhouse dryer for pork drying, KKU Engineering Journal, 38 (4) (2011) 433-442.

[154] Nabnean S., Janjai S., Thepa S., Sudaprasert K., Songprakorp R. et Bala B.K., Experimental performance of a new design of solar dryer for drying osmotically dehydrated cherry tomatoes, Renewable Energy 94 (2016) 147-156.

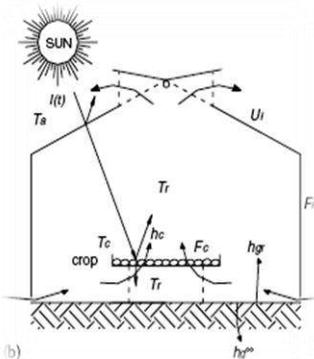
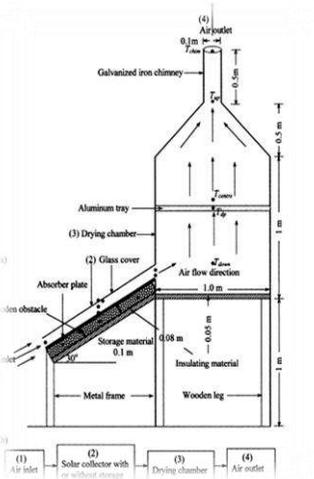
[155] Duffie J.A. et Beckman W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 4th edition, John Wiley & Sons, Canada, (2013).

[156] Orawan Aumporn ,Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase. Thèse de doctorat , 2017

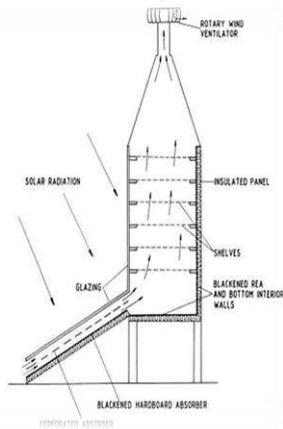
Annexe A

Annexe A

Tableau A1 Types des séchoirs à énergie solaires passifs

Type de séchoir	Principe de fonctionnement	Avantage	Inconvénient
 <p>Les séchoirs directs</p>	<p>Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Bien meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel. ♦ Pas besoin de main d'œuvre qualifiée. ♦ Grandes possibilités de conception. 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et C, décoloration. ♦ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement. ♦ Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.
 <p>Les séchoirs indirects</p>	<p>Dans les séchoirs solaires indirects, le collecteur convertit le rayonnement solaire en chaleur. L'air pénètre dans le collecteur, il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection jusqu'à la chambre de séchage, cet air est ensuite utilisé pour sécher les produits.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive. ♦ Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles. 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Coût important. ♦ Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.

Annexe A



Les séchoirs mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage.

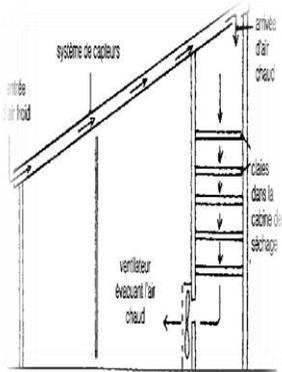
♦ Forte augmentation de la production par rapport à l'autre type de séchoirs solaires.

♦ Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.

Tableau A2 : Types des séchoirs à énergie solaires actifs

Type de séchoir	Principe de fonctionnement	Avantage	Inconvénient
	<p>Le collecteur solaire permet de préchauffer l'air. Si la température est insuffisante, un brûleur à gaz se d'éclanche pour obtenir la température désirée. Les produits peuvent donc sécher quelque soient les conditions climatiques.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Séchage rapide et d'excellente qualité. • Contrôle de température. • Très grande productivité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût très élevé de l'investissement • Nécessité d'avoir un marché important pour pouvoir écouler les produits.
Séchoir hybride solaire-gaz			

Annexe A



**séchoir solaire hybride à
convection forcée**

Le toit du bâtiment sert de capteur, un ventilateur assure une circulation importante de l'air permettant de sécher très rapidement les produits.

- Coût très élevé de l'investissement
- Nécessité d'avoir un marché important pour pouvoir écouler les produits.

- Nécessité de grandes quantités de fruits régulièrement sur l'année pour être rentable.

Annexe B

Annexe B



Figure B1 : Intégration d'un échangeur air-eau dans la chambre de séchoir solaire indirect



Figure B2 : Simulateur d'eau géothermique

Annexe B

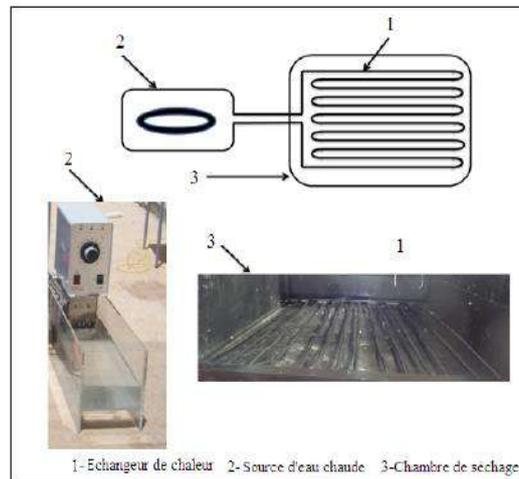
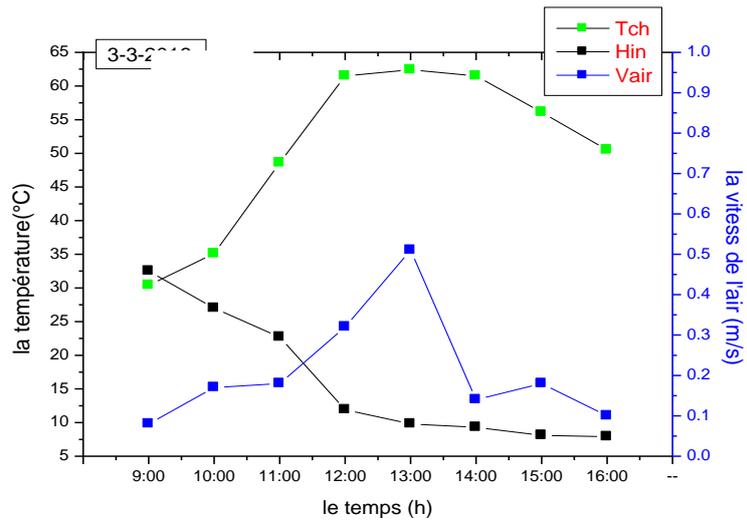
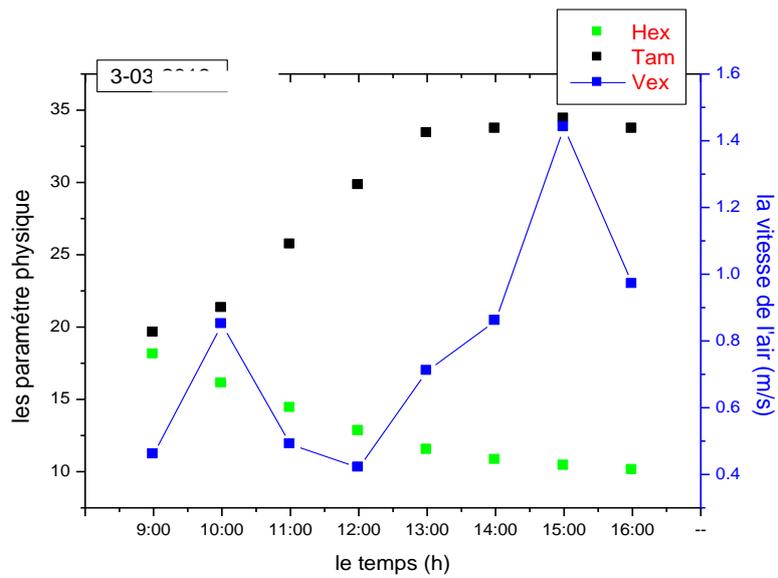


Figure B3 : Séchoir solaire direct avec échangeur de chaleur air/eau

Annexe B



(A)



(B)

Figure B4 (A,B) : Variation des paramètres de l'air asséchant à l'intérieur et à l'extérieur du séchoir solaire indirect (essai à vide)

Annexe B

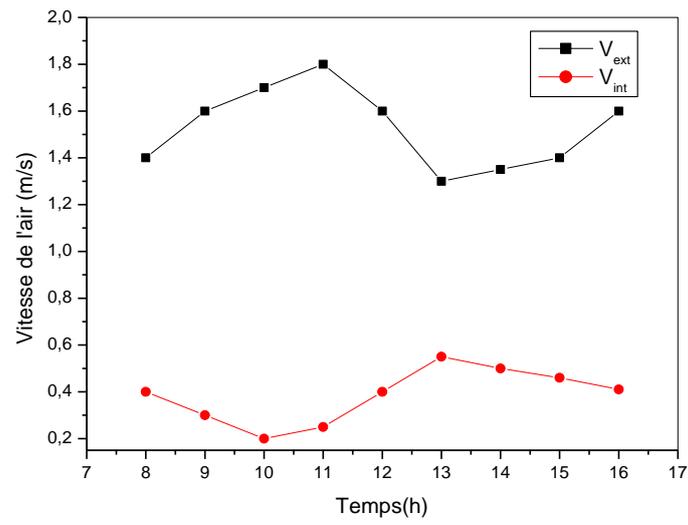


Figure B5: Evolution de la vitesse de l'air de séchage dans le séchoir solaire direct

Annexe C

Annexe C

Annexe C : Etude comparative de séchage de la fève par les trois systèmes de séchoir solaire (libre, direct et indirect)

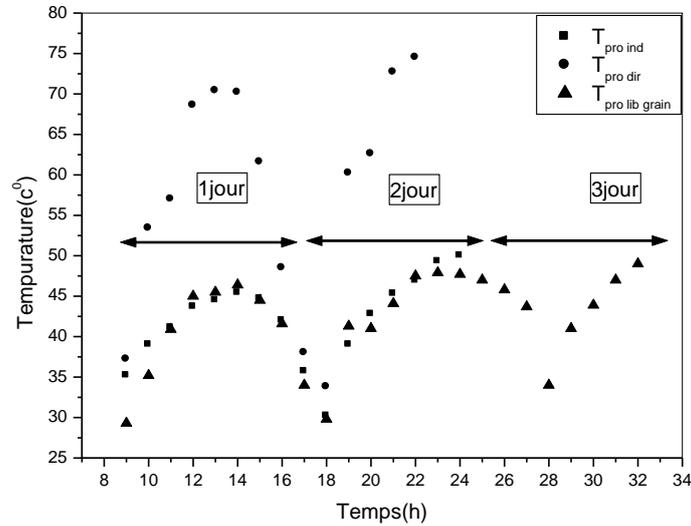


Figure C1: Variation des températures du produit en fonction du temps

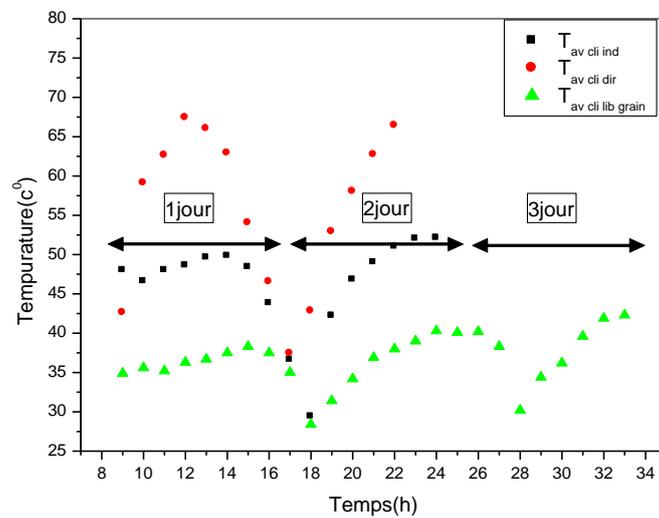


Figure C2: Variation des températures de l'air de séchage

Annexe C

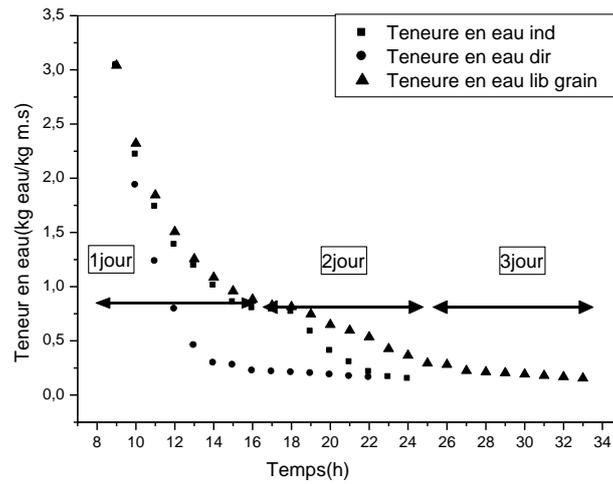


Figure C3: Variation de la teneur en eau en fonction du temps

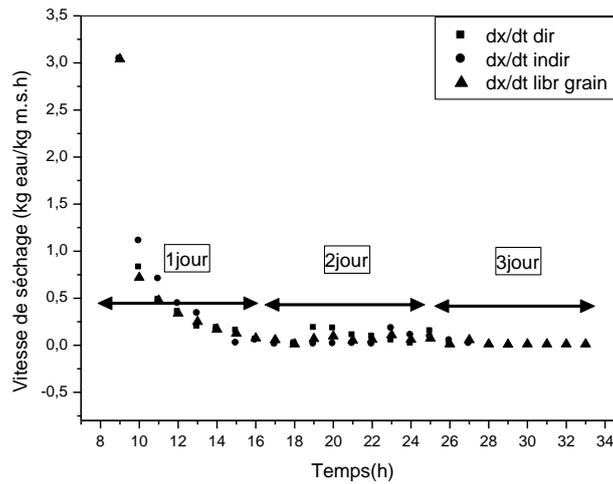


Figure C4: Variation de la vitesse de séchage dans différent essai en fonction du temps.

Annexe C

Tableau C1 : Résultats des paramètres de couleur L A B pour la pomme de terre

/	1 PANNEAUX			2 PANNEAUX			Vmoy (2,1 PANNEAUX)		
	Num	L	A	B	L	A	B	L	A
1	52.33	0.754	14.92	42.51	0.76	7.40	52.71	1.34	9.92
2	54.60	0.203	15.21	42.39	0.72	7.99	47.99	0.86	11.34
3	51.19	0.543	17.31	39.41	0.42	8.71	51.37	0.97	10.06
4	50.92	0.202	12.06	32.25	0.38	8.92	47.21	1.11	8.78
5	52.11	0.334	17.44	34.67	0.46	7.01	48.89	1.05	11.13
MOY	52,23	0.4072	15.4	38.246	0.548	8.006	49.63	1.066	10.24

tranchée

Tableau C2. Résultats des paramètres de couleur L A B pour les dattes deglet noir séchés

/	1 PANNEAUX			2 PANNEAUX			3 PANNEAUX		
	Num	L	A	B	L	A	b	L	A
1	28.00	7.48	8.37	29.69	5.53	5.98	29.05	9.72	11.23
2	28.88	7.91	9.49	23.57	4.55	4.36	27.03	5.98	7.41
3	30.13	9.08	7.96	28.73	7.07	7.93	26.95	7.73	6.89
4	26.48	8.36	7.20	35.48	7.78	13.71	28.42	7.67	8.68
5	27.17	7.65	7.17	32.32	9.89	13.38	26.23	6.68	7.36
6	28.66	11.94	10.90	28.19	6.78	6.68	27.81	8.17	8.15
7	31.18	9.12	11.96	35.04	7.77	12.07	30.15	7.78	9.30
8	25.55	9.65	10.67	28.65	6.77	9.75	21.23	5.44	6.53
9	33.83	8.94	10.80	25.26	6.54	7.11	22.21	8.89	6.72
10	26.91	8.37	8.93	31.03	7.74	9.95	27.30	5.96	7.78
Moy	28.67	8.85	9.34	26.82	7.04	9.09	26.63	7.40	8.00

Annexe C

Tableau C3 : Résultats des paramètres de couleur L A B pour Les dattes deglet nour séchés

. / Num	4 PANNEAUX			MIXT (4 ,2 ,3Panneaux)		
	L	A	B	L	A	B
1	25.15	4.68	4.58	25.29	7.67	5.72
2	29.35	5.48	6.61	25.01	7.46	6.21
3	27.05	6.24	5.05	27.28	8.36	8.57
4	26.54	5.15	4.83	29.57	10.35	7.76
5	23.26	4.40	4.60	30.42	10.39	11.12
6	26.83	7.00	7.85	29.28	10.35	10.37
7	30.57	8.35	10.80	25.46	7.42	6.72
8	27.47	7.32	7.55	32.94	6.95	13.38
9	15.76	3.89	3.56	26.33	6.71	9.33
10	15.76	3.89	3.56	29.99	10.91	11.18
Moy	22.09	5.64	5.89	28.15	8.63	9.03

Tableau C4 : Résultats des paramètres de couleur L A B pour Les grains de fève séchés

/	Régime variable			Utilisation d'échangeur (1 ^{ère} essai)			Utilisation d'échangeur (2 ^{ème} essai)		
	Num	L	A	B	L	A	B	L	A
1	109.68	-4.12	37.69	101.07	-8.87	35.96	108.69	-7.96	32.75
2	110	-4.3	38.94	101.42	-9.54	35.54	107.69	-8.31	31.98
3	113.74	2.4	37.35	96.03	-8.10	33.41	102.68	-2.25	36.86
4	113.67	-0.99	36.23	98.61	-7.95	35.19	104.62	-3.43	33.8
5	113.67	-3.35	37.74	102.47	-7.88	36.09	111.43	-1.61	32.03
6	115.7	-1.55	36.69	96.64	-5.48	33.11	111.65	-5.68	33.69
MOY	112.743	-1.985	37.44	99.373	-7.97	34.88	107.79	-4.87	33.51

Annexe C

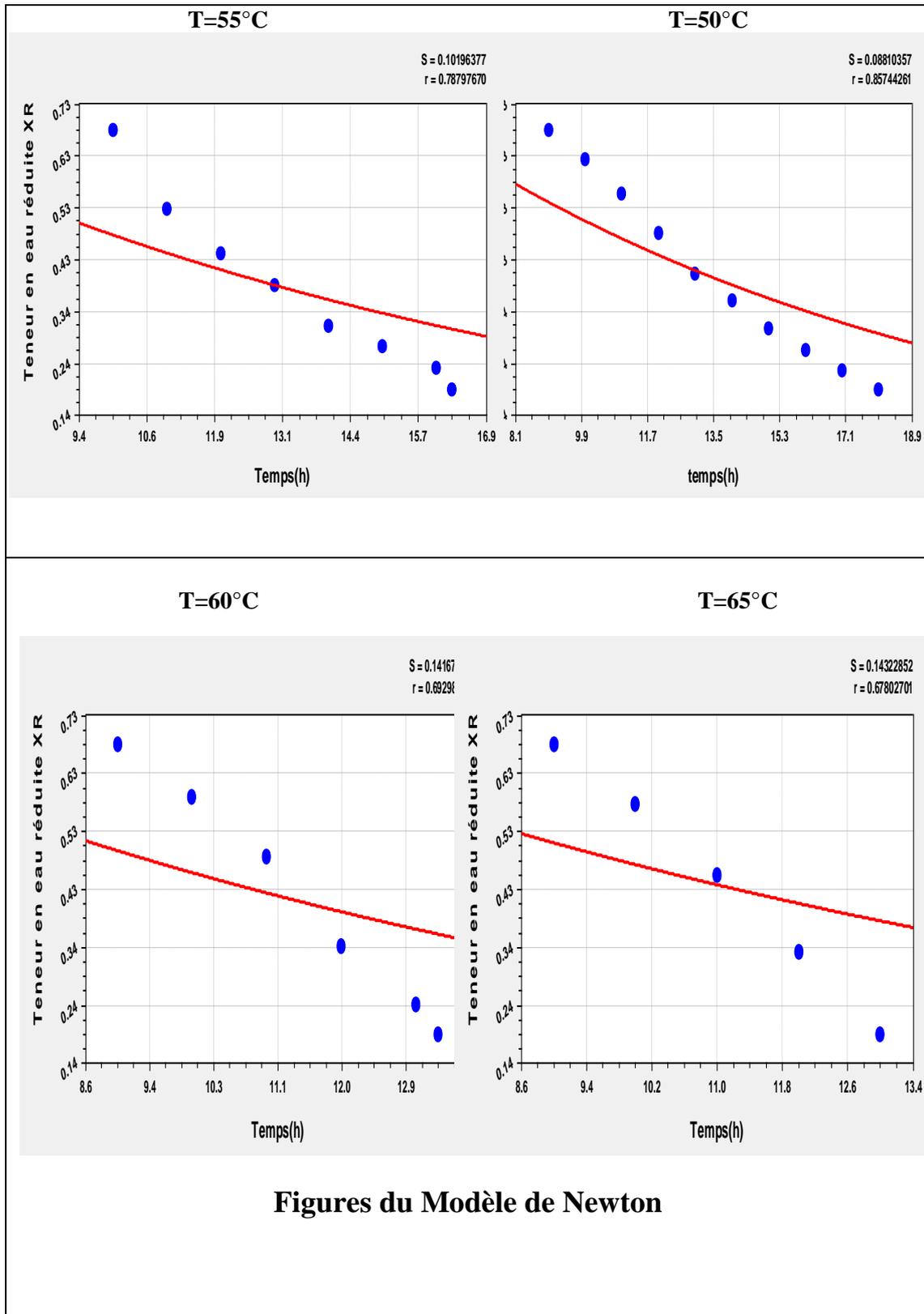
Tableau C5 : Paramètres de couleur L A B pour Les grains de fève séchés avec résistance

/	Resistance T=50°C			Resistance T=60°C			Resistance T=65°C		
	Num	L	A	B	L	A	B	L	A
1	102.76	-4.49	33.94	105.11	-8.11	37.72	108.96	-1.87	32.76
2	102.38	-6.8	34.67	110.89	-5.63	37.21	103.67	-1.46	31.19
3	108.13	-10.05	33.76	109.38	1.29	37.9	101.43	0.49	33.66
4	113.1	-7.42	34.95	106.86	4.78	36.05	99.1	2.09	33.16
5	108.26	-8.6	35.39	104.63	-1.11	33.97	99.9	0.5	32.75
6	109.56	-6.82	36.94	102.67	1.79	32.65	104.15	0.56	33.72
MOY	107.365	-7.363	34.94	106.59	-6.99	35.91	102.868	0.0516	32.873

Annexe D

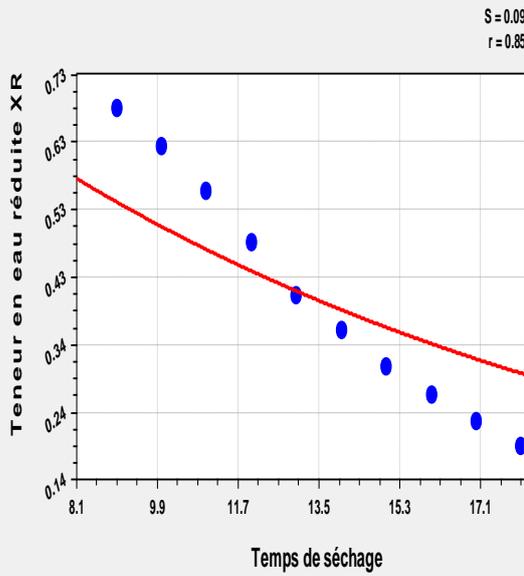
Annexe D

Figure D1 : courbes représentatifs de lissage des courbes expérimentales de séchage des grains de fève par les différents modèles choisis

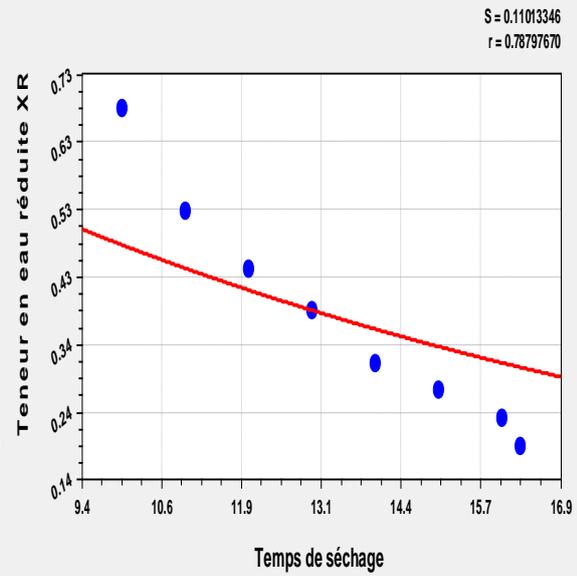


Annexe D

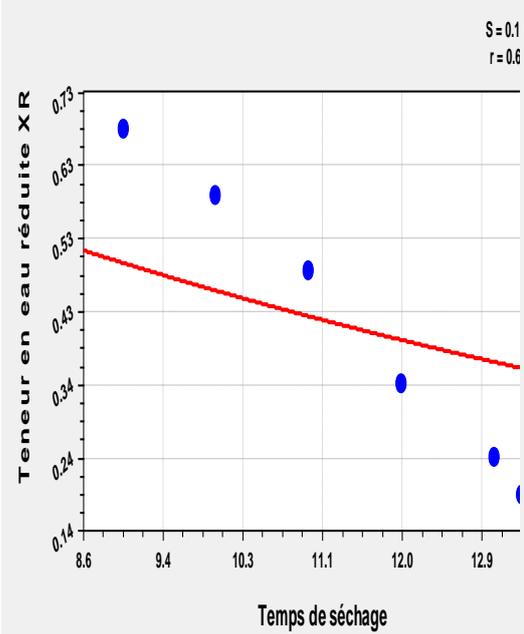
T=50°C



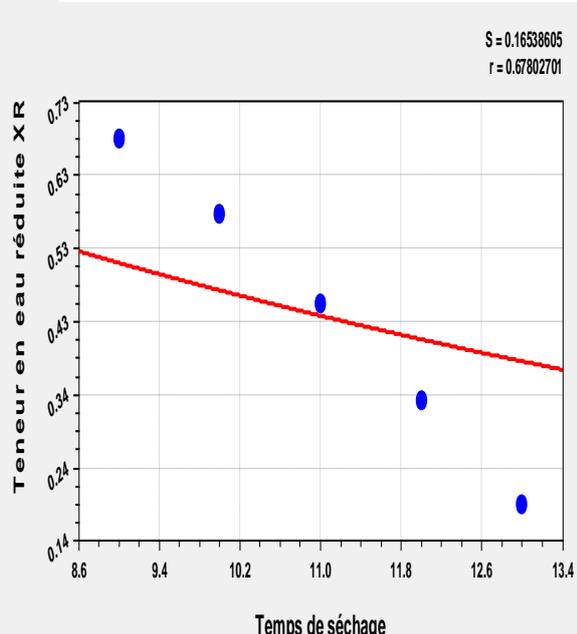
T=55°C



T=60°C



T=65°C

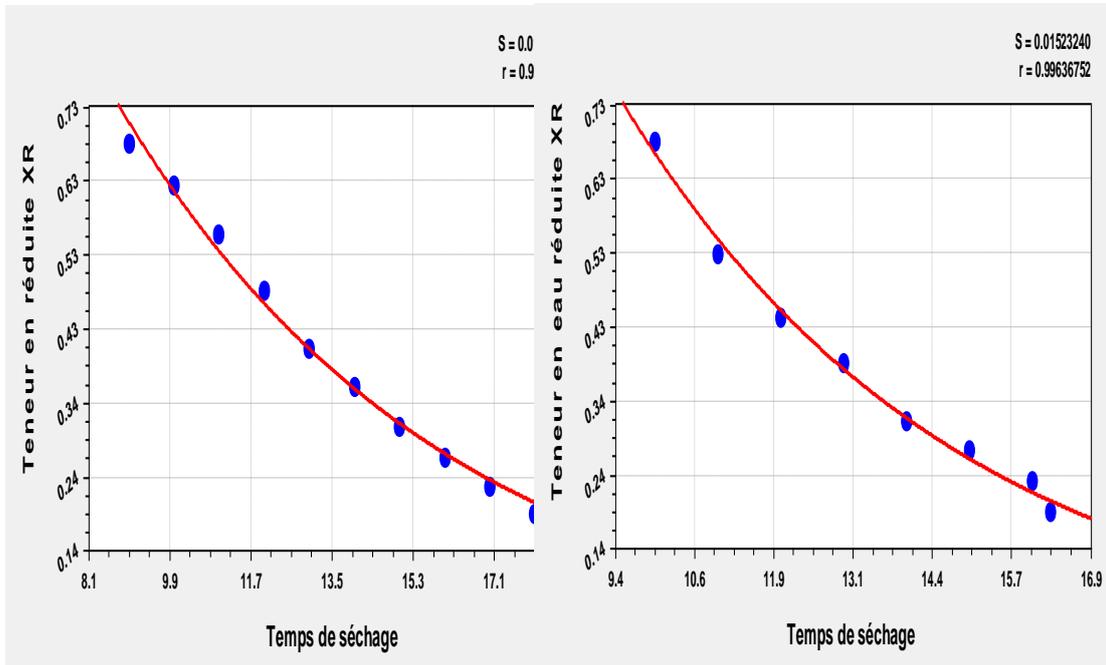


Figures de Modèle de page modifié

Annexe D

T=50°C

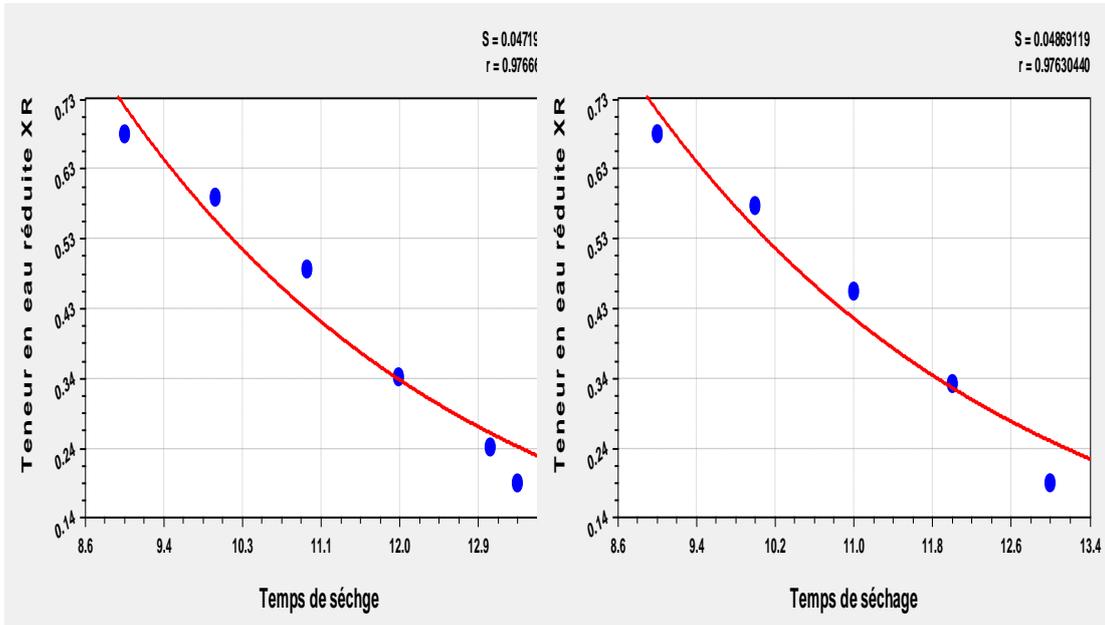
T=55°C



Annexe D

T=60°C

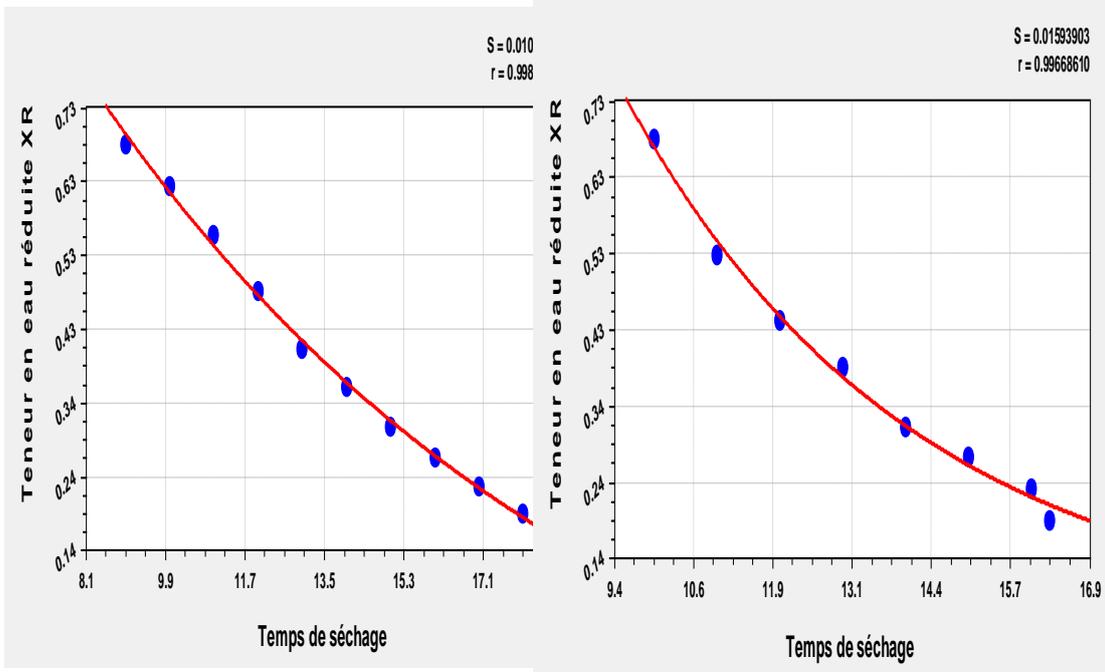
T=65°C



Figures de Modèle de Henderson et Pabis

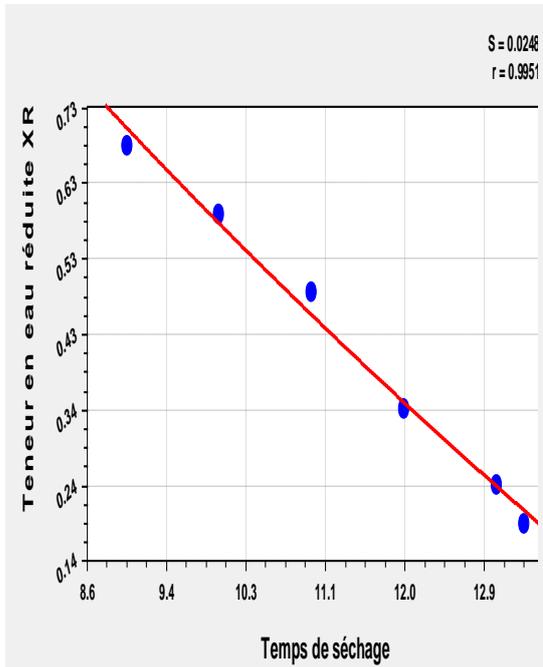
T=50°C

T=55°C

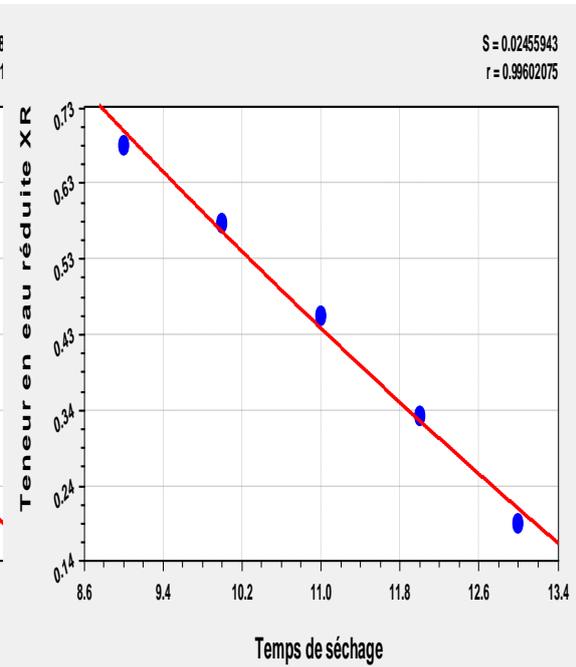


Annexe D

T=60°C

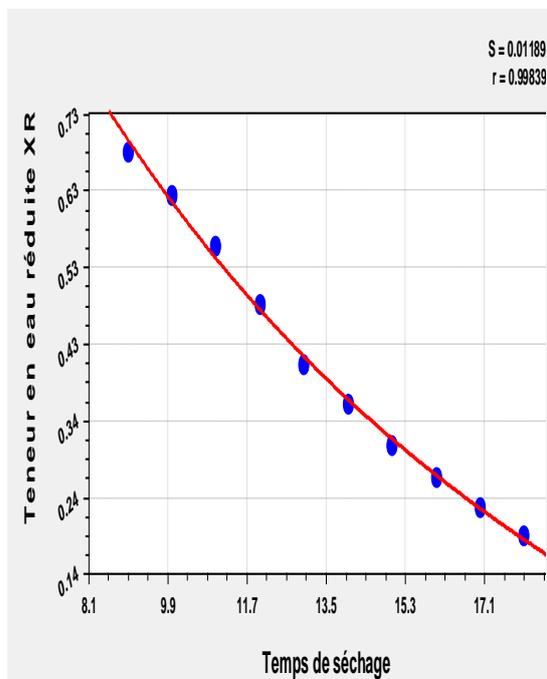


T=65°C

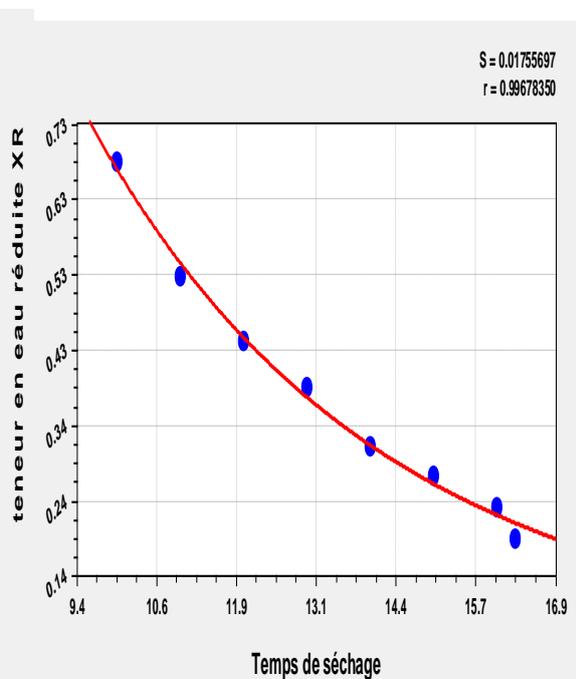


Figures de Modèle de logarithmique

T=50°C



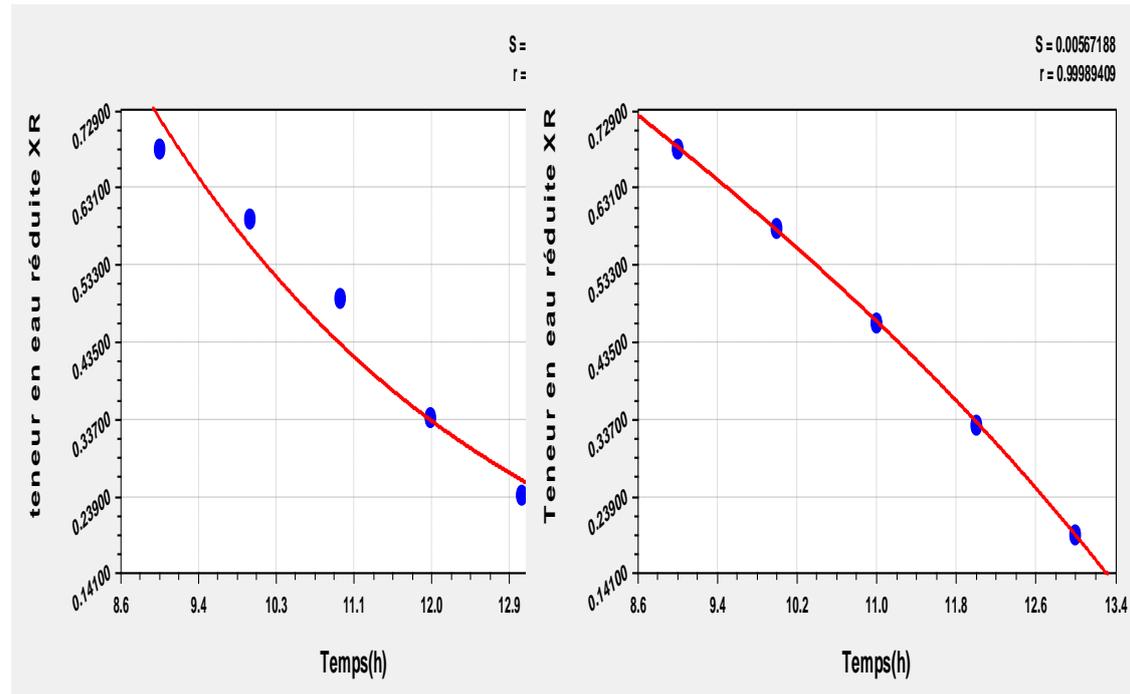
T=55°C



Annexe D

T=60°C

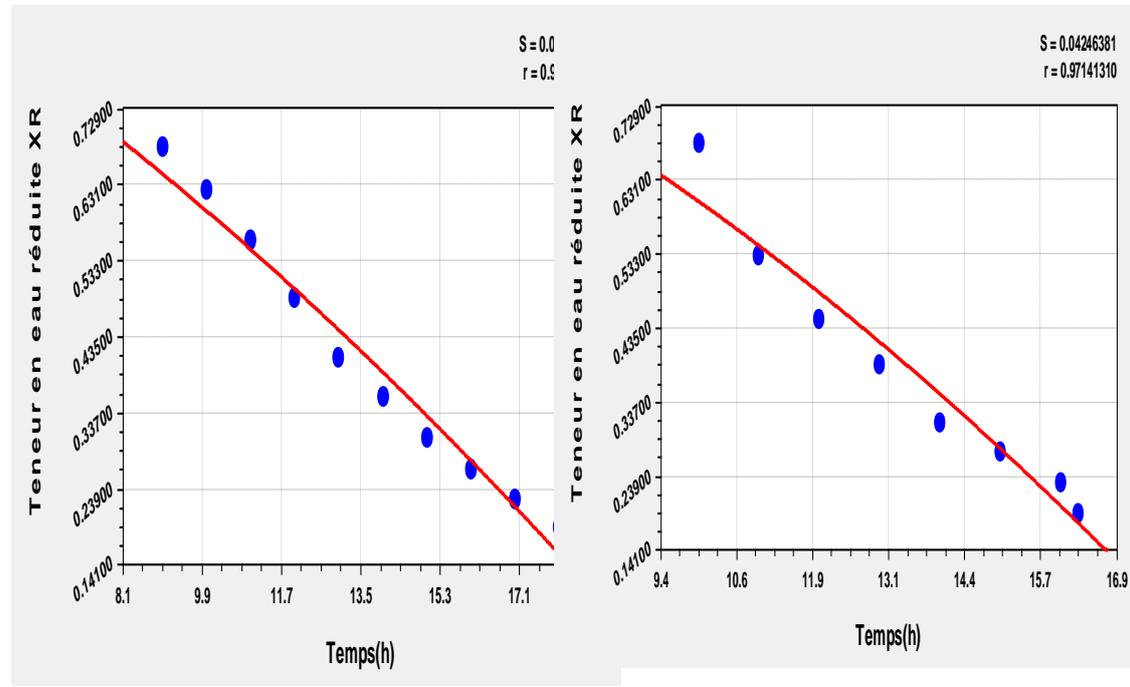
T=65°C



Figures de Modèle de deux thermes

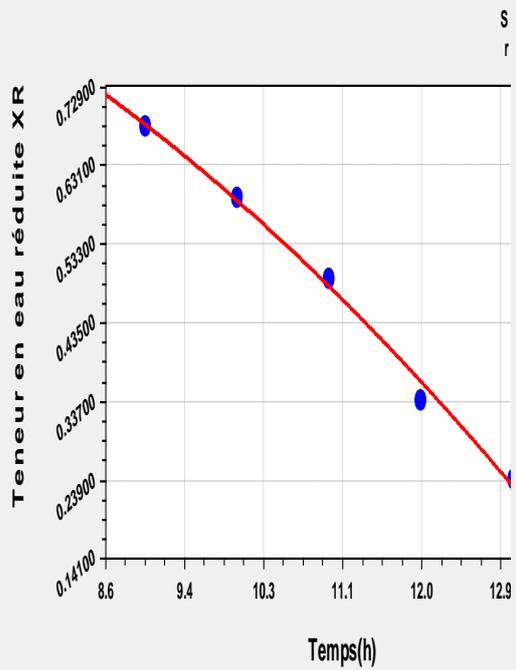
T=50°C

T=55°C

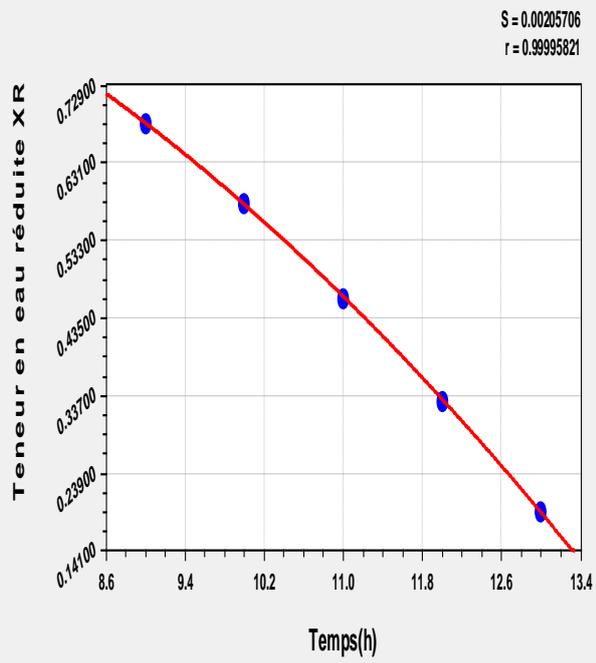


Annexe D

T=60°C

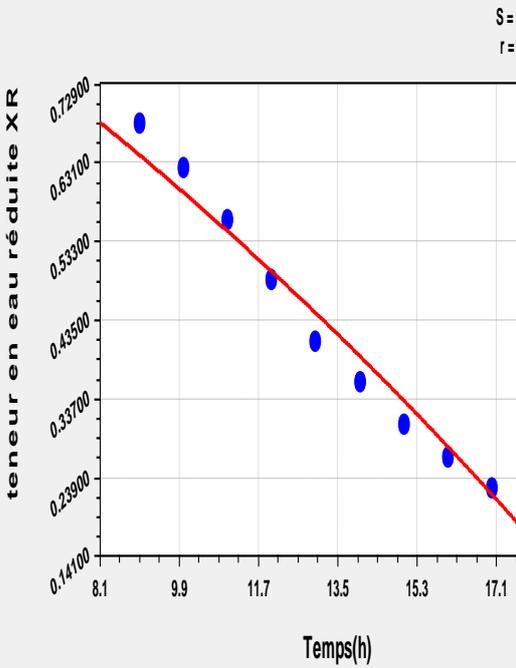


T=65°C

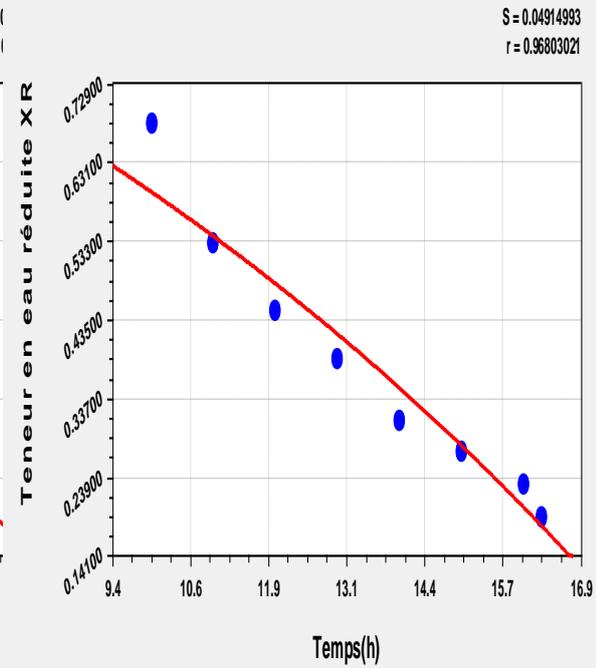


Figures de Modèle de Wang et Singh

T=50°C



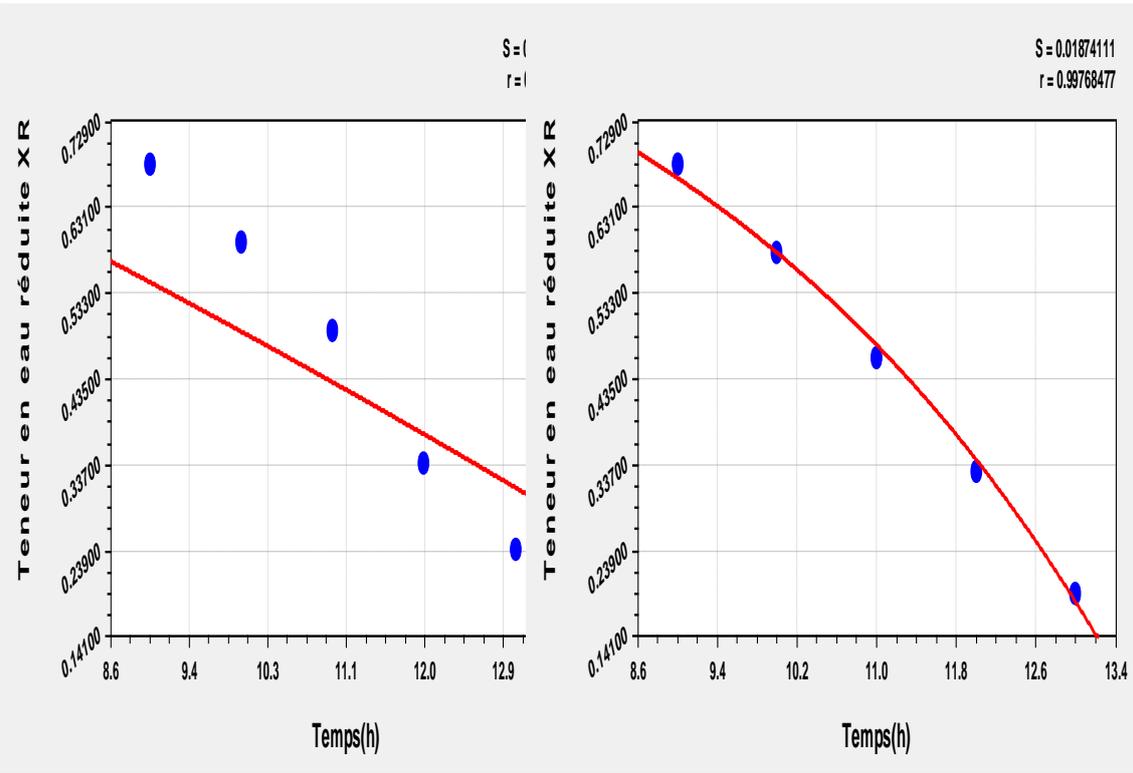
T=55°C



Annexe D

T=60°C

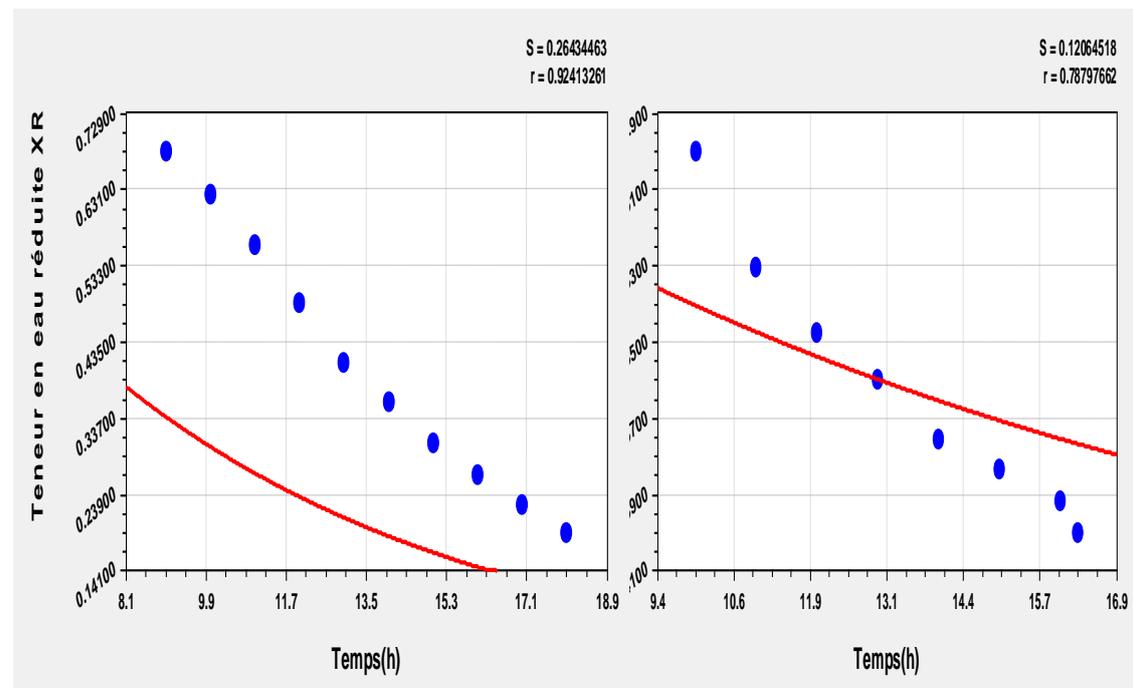
T=65°C



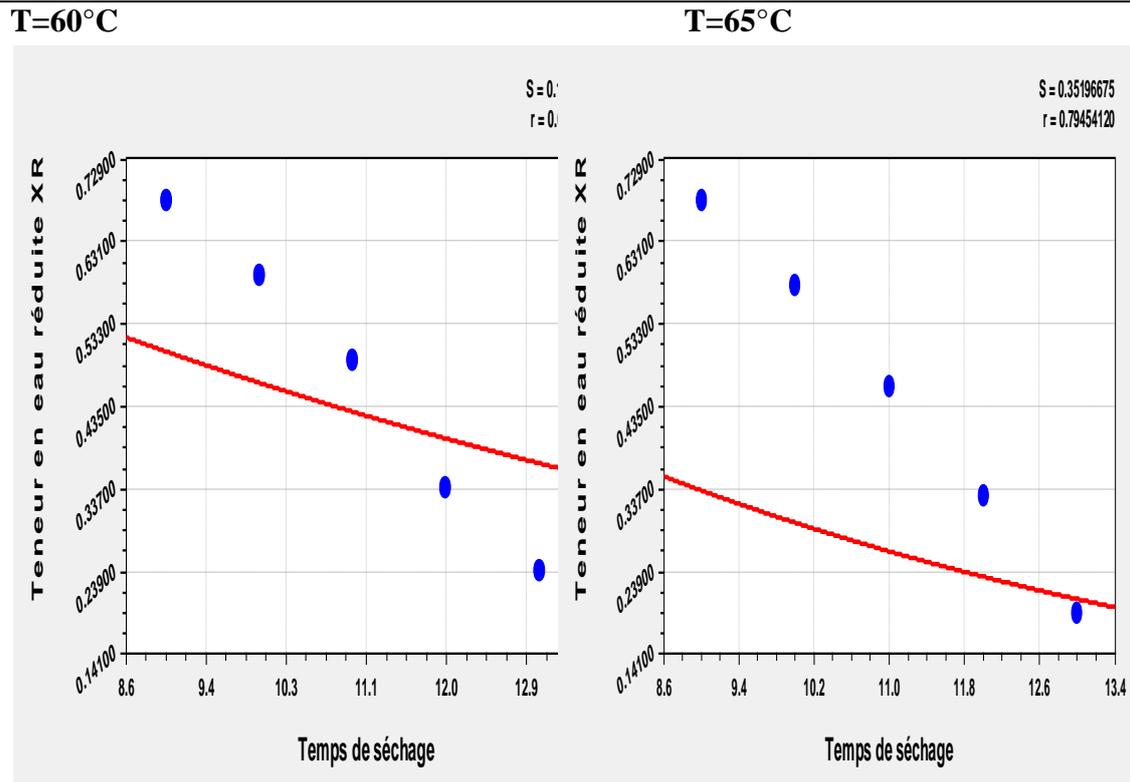
Figures de Modèle d'approche diffusion

T=50°C

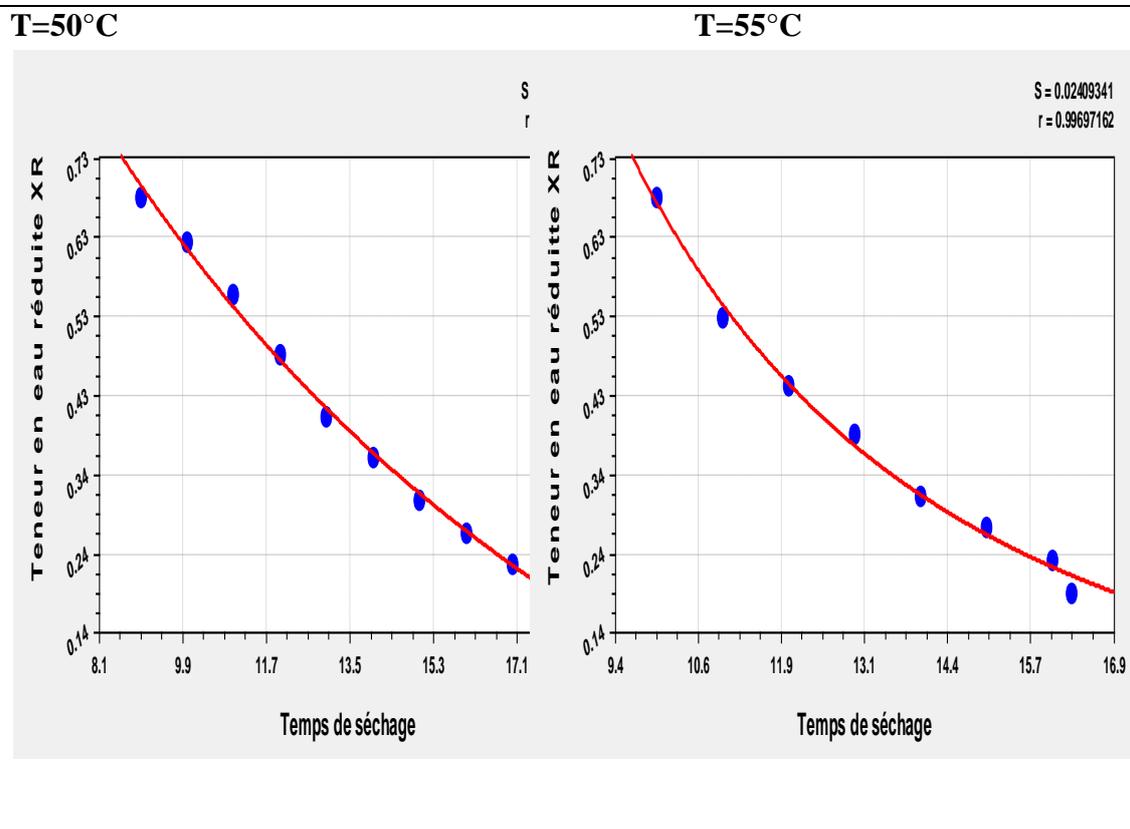
T=55°C



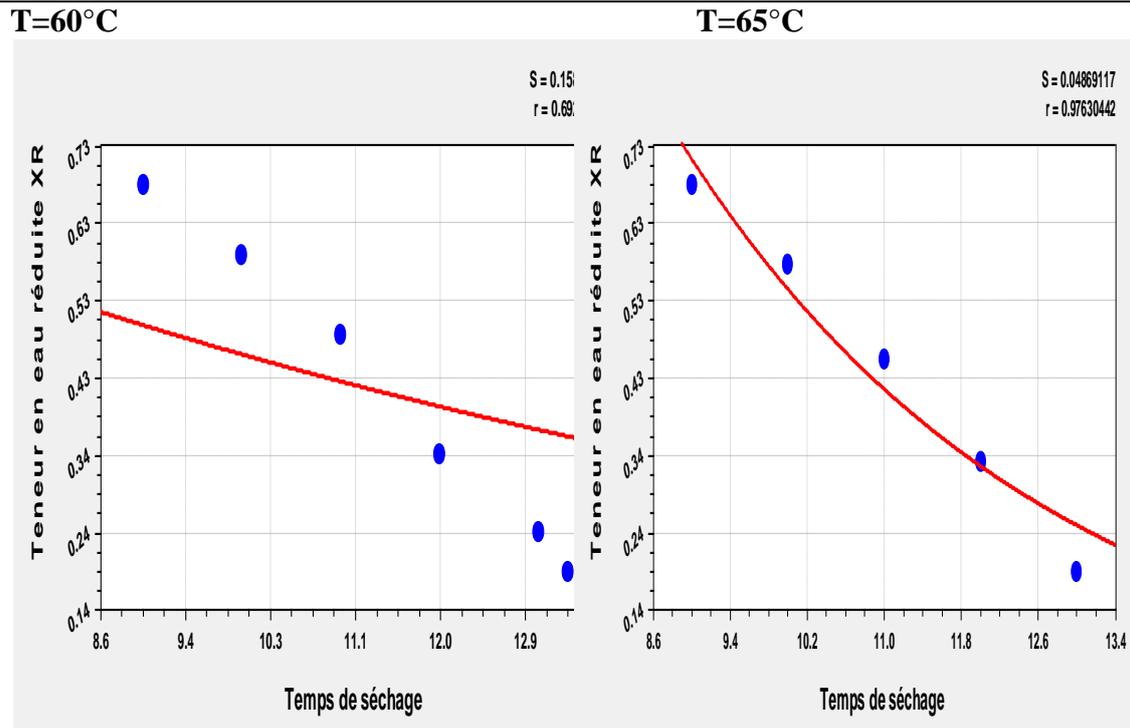
Annexe D



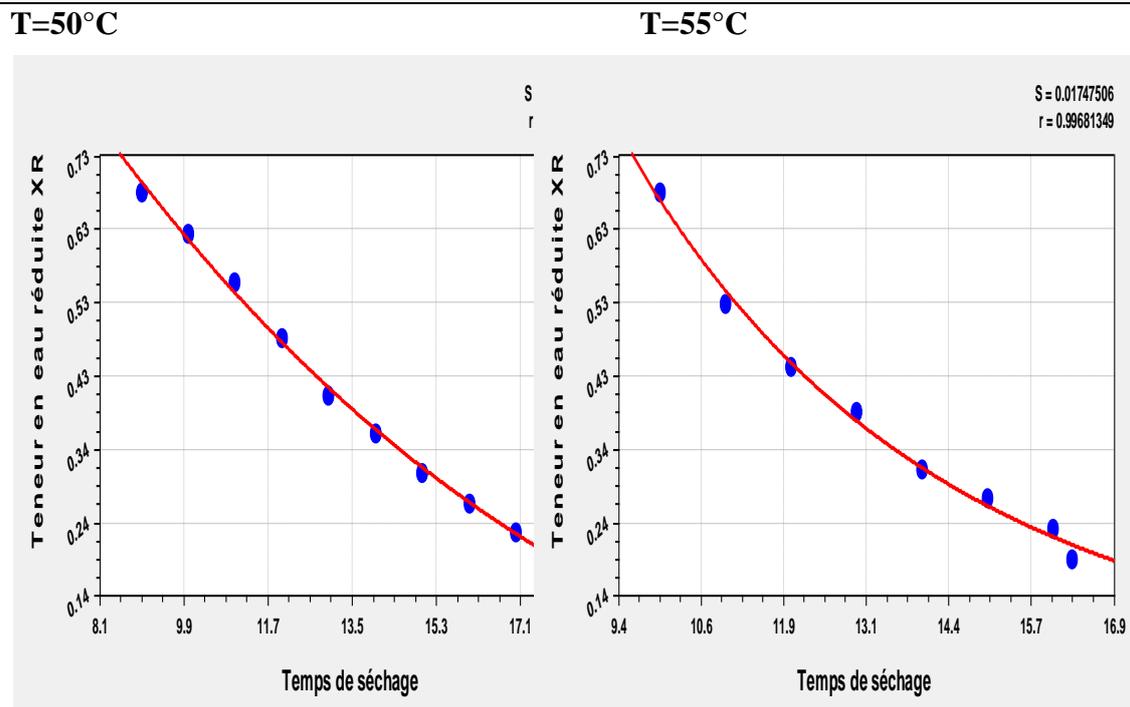
Figures de Modèle de Verma



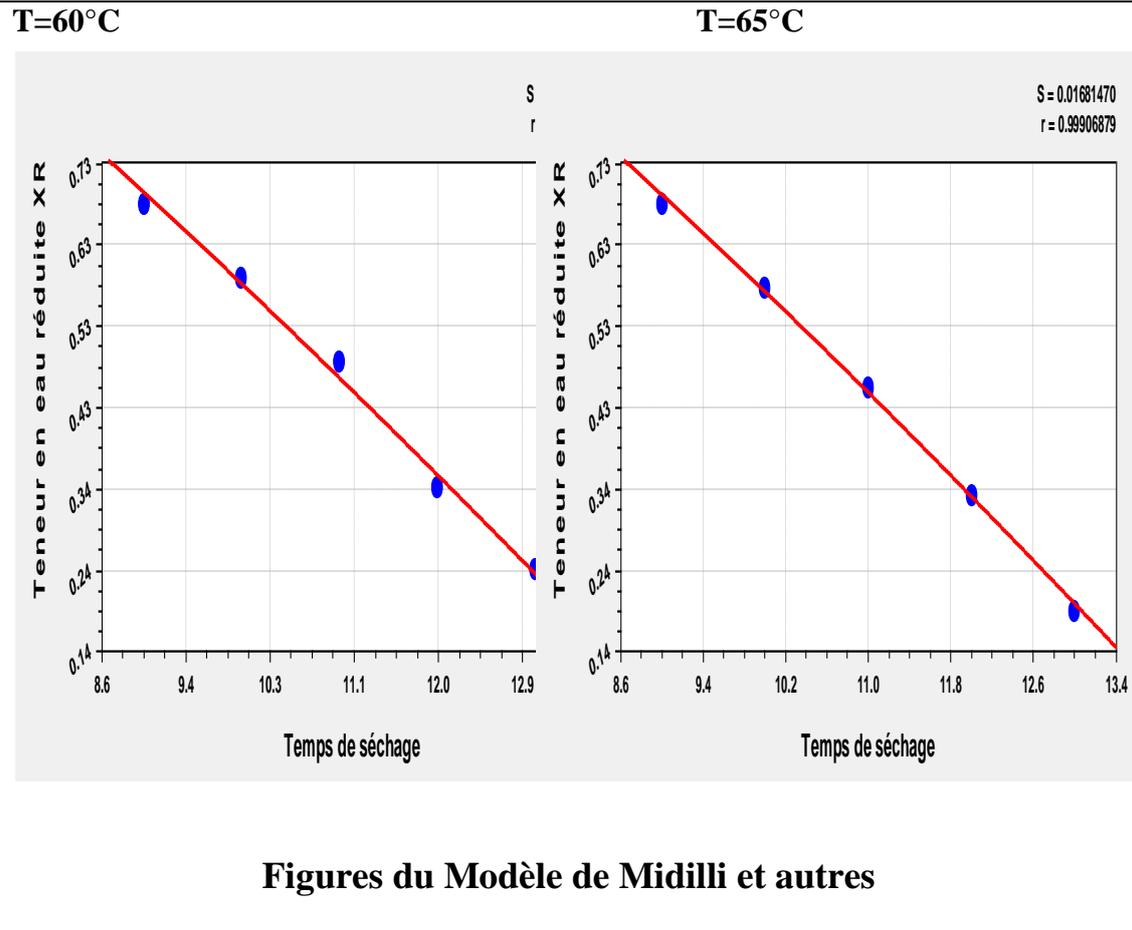
Annexe D



Figures de Modèle de deux termes exponentiels



Annexe D



Résumé

Résumé

Le séchage solaire présente un processus d'un grand intérêt pour préserver et stabiliser les produits agricoles, l'utilisation des séchoirs solaires dans les zones sahariennes peuvent réduire les pertes de récolte et améliorer la qualité des divers produits. Les problèmes rencontrés avec l'utilisation des séchoirs solaires sont la diminution des performances thermiques et l'instabilité des conditions opératoires ce qui influe directement sur la valorisation des produits alimentaires et l'optimisation des paramètres de séchage solaire. La présente étude porte sur l'amélioration énergétique de procédé de séchage solaire convectif afin de maintenir des conditions opératoires stables dans les séchoirs solaires de type indirect et direct pour valoriser divers produits alimentaires (les dattes deglet noir, les pommes de terre tranchées et les grains de fève) ; ces produits sont consommés en grande quantité dans notre région. L'amélioration est faite par l'intégration des appoints énergétiques (une résistance électrique et un échangeur de chaleur air-eau) pour maintenir des conditions opératoires favorables et améliorer l'efficacité énergétique des séchoirs solaires convectifs. Trois techniques d'amélioration sont expérimentées : le régulateur de température en régime constant, les panneaux photovoltaïques en régime variable en mode discontinue et l'échangeur de chaleur (air-eau) en mode continue, le régulateur de température par thermostat fonctionnant par énergie électrique sous différentes températures constantes est utilisé, deux critères sont évalués (la durée de séchage et la sensibilité de couleur des produits séchés vis-à-vis au température constante du séchage) les expériences de séchage solaire hybride en utilisant une résistance électrique alimentée par les panneaux photovoltaïques nous offre des intervalles de stabilisation de température selon le nombre des panneaux photovoltaïques associés en parallèles, le séchage avec appoint énergétique par échangeur de chaleur (air-eau) utilisé comme un simulateur de l'eau géothermique assurant une opération de séchage en mode continue ; les résultats expérimentaux montrent notamment que les techniques utilisés contribuent à la réduction de la durée de séchage et augmentent les performances thermiques du séchoir indirect. ensuite la cinétiques de séchage solaire des produits d'étude est obtenue et modélisée par le logiciel curve expert 1.4, le model de page décrire le comportement hygroscopique des grains de fève, le modèle de cinétique de séchage des pommes de terre tranchées et des dattes deglet noir est celui de Midilli et Kucuk. L'étude de stabilisation des conditions opératoires par les différents techniques proposées est complétée par une analyse énergétique en déterminant les efficacités énergétiques et les fractions d'énergies fournies pour chaque système amélioré en mode (discontinu, continu, constant) et comparatif entre séchage direct et indirect, finalement pour assurer le développement des séchoirs solaires utilisés (indirect, direct, hybride) en suivant l'analyse énergétique par une étude de faisabilité technico-économique, nous étudions l'influence du prix d'achat des produits d'étude à l'état frais et leurs prix de vente à l'état séchés sur le temps de retour sur investissement en discutant la rentabilité des séchoirs solaires utilisés

Mots clés : Stabilisation des températures, appoints énergétiques, analyse énergétique, évaluation technico-économique, séchoir solaire direct et indirect

Abstract

Solar drying presents a process of great interest to preserve and stabilize agricultural products, the use of solar dryers in Saharan areas can reduce crop losses and improve the quality of the various products. The problems encountered with the utilization of the solar dryers are the decrease of the thermal performances and the instability of the operating conditions which affects directly the valuation of food products and the optimization of solar drying parameters. This study focused on the energy improvement of convective solar drying processes in order to maintain stable operating conditions in direct and indirect solar dryers to save various food products (DegletNour dates, sliced potatoes and beans); those products are largely consumed in terms of quantity in our region. The improvement is made by the integration of energy supplements (electrical resistance and air-water heat exchanger) to maintain favorable operating conditions and improve the energy efficiency of convective solar dryers. Three improved techniques are experimented; first, the temperature controller in constant regime, the photovoltaic panels in variable regime and discontinuous mode, and the heat exchanger (air-water) in continuous mode, the thermostat temperature controller operated by electrical energy under different constant temperatures has been used, Two criteria are evaluated (the drying time and the color sensitivity of the dried products vis-à-vis the constant temperature of drying). Hybrid solar drying experiments using an electrical resistance powered by photovoltaic panels offer intervals of stabilized temperature according to the number of photovoltaic panels associated in parallel. Drying with energy supplement using heat exchanger (air-water) is used as a geothermal water simulator ensuring a continuous drying operation. The experimental results have shown in particular that the proposed techniques contribute in the reduction of the drying time and increasing the thermal performance of the indirect dryer. In the other side, the kinetics of solar drying of the studied products have been obtained and modeled by the software Curve Expert 1.4. The page of model describes the hygroscopic behavior of the bean grains, the kinetic model of drying of the sliced potatoes and dates degletnour is that of Midilli and Kucuk. The study of stabilization of the operating conditions using the different proposed techniques has been completed by an energy analysis which is based on the energy efficiencies and the energy fractions supplied for each improved system in different modes (discontinuous, continuous, constant), and comparative modes between direct and indirect drying. Finally, a technico-economic feasibility study has been conducted to confirm the development of the solar dryers (indirect, direct, hybrid) used the energy analysis. This study focused on the influence of the purchase price of the studied products in both fresh and dry states on the time of return of the investment, mean while the profitability of the solar dryers used has been discussed.

Keywords: Stabilization of temperatures, energy additions, energy analysis, techno-economic evaluation, direct and indirect solar dryer

الملخص

التجفيف الشمسي هو عملية ذات أهمية كبيرة للحفاظ على المنتجات الزراعية و تثمينها، يتم استخدام المجففات الشمسية في المناطق الصحراوية للتقليل من خسائر المحاصيل وتحسين جودة المنتجات المختلفة . المشاكل التي تواجه استخدام المجففات الشمسية هي انخفاض في الأداء الحراري وعدم استقرار ظروف التشغيل التي تؤثر بشكل مباشر على تقييم و تثمين المنتجات الغذائية و كذلك الاستفادة المثلى من معايير التجفيف الشمسي . ركزنا في دراستنا الحالية على تحسين الأداء الطاقوي لعملية التجفيف الشمسي بالحمل ألقسري من أجل الحفاظ على ظروف تشغيل مستقرة في المجففات الشمسية غير المباشرة والمباشرة لتثمين المنتجات الغذائية وقد ركزنا على منتجات ذات استهلاك كبير في المناطق الصحراوية وهي دجلة نور ، شرانح البطاطس وحبوب الفول قمنا بتحسين الأداء الطاقوي للمجفف الشمسي الغير المباشر من خلال دمج مكملات الطاقة بالطريقة التجريبية (المقاومة الكهربائية ، مبادل الحرارة للهواء والماء) للحفاظ على ظروف التشغيل المواتية وتحسين كفاءة الطاقة في المجففات الشمسية التي تشتغل بالحمل الحراري قمنا بتجريب ثلاث تقنيات لتحسين الأداء الطاقوي وتعديل الظروف التجريبية داخل المجفف الشمسي باستعمال وحدة التحكم في درجة الحرارة الثابتة عن طريق مقاومة كهربائية واستعمال ، الألواح الكهروضوئية والمبادل الحراري (الهواء- الماء) في الوضع المستمر من خلال استخدام ، وحدة التحكم في درجة الحرارة ترموستات باستخدام الطاقة الكهربائية في درجات حرارة ثابتة مختلفة ، قمنا بتقييم معيارين (وقت التجفيف و تأثير درجات حرارة التجفيف الثابتة على لون المنتجات الجافة)،تحصلنا من خلال تجارب التجفيف الشمسي باستخدام المقاومة الكهربائية المدعومة من اللوحات الكهروضوئية على فترات تثبيت درجة الحرارة وفقاً لعدد الألواح الشمسية المرتبطة بالتوازي ، والتجفيف باستخدام مكمل الطاقة من خلال المبادل الحراري المشتغل بالهواء و الماء حيث يمثل نموذج لمحاكاة المياه الجوفية مما يضمن لنا القيام بعملية التجفيف في الوضع المستمر خلال كل الأوقات خاصة الفترة الليلية . تظهر النتائج التجريبية على وجه الخصوص أن التقنيات المستخدمة تساهم في تقليل وقت التجفيف وزيادة الأداء الحراري للمجفف غير المباشر. تحصلنا على حركية التجفيف الشمسي للمنتجات المجففة باستخدام برنامج Curve expert حيث تحصلنا على نموذج باج (Page) الذي يمثل السلوك الاسترطابي للفول و نموذج ميديلي وكليك (Midilli et kucuk) يمثل النموذج الرياضي لتجفيف شرانح البطاطس وتمر دقلة نور , أكملنا دراسة استقرار ظروف التشغيل من خلال التقنيات المقترحة بدراسة تحليلية للطاقة من خلال تحديد المردود الطاقوي لمختلف أنظمة التجفيف الشمسي المستعملة و قمنا بحساب النسب المنوية لأنواع الطاقة المستعملة لكل نظام محسن ، وأخيراً لضمان تطوير المجففات الشمسية المستخدمة (غير المباشرة ، المباشرة ، الهجينة) قمنا بالدراسة التقنو اقتصادية درسنا من خلالها تأثير سعر شراء المنتجات المدروسة في الحالة العادية قبل التجفيف وأسعار بيعها في الحالة المجففة على نجاح مشروع التجفيف وذلك من خلال مناقشة ربحية المجففات الشمسية المستخدمة

الكلمات المفتاحية: تثبيت درجات الحرارة ، إضافات الطاقة ، تحليل الطاقة ، التقييم الفني-الاقتصادي ، المجفف الشمسي المباشر وغير المباشر