



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DES ETUDES SUPERIEURES
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA



Mémoire

Présenté à

La Faculté Des Sciences Appliquées – Département de Génie mécanique

Pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et techniques / Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Par

BEN DJELLOUL Walid & REHALEM Azzeddine

Thème :

Réalisation et expérimentation d'un prototype séchoir solaire de type serre avec systèmes de stockage thermique, par chaleur latente et sensible

Soutenu le 25 Juin 2019 Devant le jury composé par Messieurs :

ZIANI Lotfi	Université Kasdi Merbah – Ouargla	Président
BENSEDDIK Abdelouahab	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – Ghardaïa	Encadreur
BOUBEKRI Abdelghani	Université Kasdi Merbah – Ouargla	Co-Encadreur
ACHOURI El Hadj	Université Kasdi Merbah – Ouargla	Examineur

Remerciements

Le présent travail a été effectué dans le cadre du mémoire de Master académique en génie mécanique énergétique au département de génie mécanique à l'université Kasdi Merbah de Ouargla. La partie expérimentale de ce travail a été réalisée à l'unité de recherches appliquées en énergies renouvelables (URAER) de Ghardaia.

Nous tenons tout d'abord à remercier très vivement monsieur **Dr. BENSEDDIK Abdelouahab** et monsieur le professeur **BOUBEKRI Abdelghani** qui ont eu l'aimable volonté de proposer et diriger ce travail.

Nous remercions également messieurs, **Dr. ZIANI Lotfi** et **Mr. ACHOURI El- Hadj** pour avoir gentiment accepté de juger le travail de ce mémoire.

Nos remerciements sont aussi particulièrement adressés à messieurs **le directeur de l'unité de recherche URAER (Ghardaïa)** et **le directeur du laboratoire LENREZA (Ouargla)** pour avoir accueilli et supporté le présent travail.

Nos remerciements distingués sont aussi adressés à l'équipe de recherche (**Systemes énergétiques pour l'agriculture**) de l'URAER (Ghardaia) et la société (**Algeria Sun Power**) pour l'aide précieuse en matière de réalisation expérimentale et instrumentation. Sans oublier **Mr. Abderrahmane Mahfoud** pour l'assistance technique lors des travaux en atelier.

Nous remercions également l'ensemble du corps enseignants du département de Génie Mécanique pour la qualité de la formation dont on a bénéficié sur toutes nos années d'étude.

Que toute personne ayant aidé de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	2
I-1 SECHAGE	5
I-2 DIFFERENTS TYPES DE SECHOIRS SOLAIRES.....	5
I-2.1 Séchoirs naturels	5
I-2.2 Séchoirs directs	6
I-2.3 Séchoirs indirects.....	8
I-2.4 Séchoirs mixte.....	10
I-2.5 Séchoirs hybrides	11
I-3 APPLICATIONS DU SECHAGE SOUS SERRE.....	11
I-3.1 Aperçue sur quelques travaux réalisés sur différents produits.....	12
II-1 STOCKAGE THERMIQUE.....	18
II-2 MODE DE STOCKAGE DE CHALEUR.....	18
II-2.1 Stockage par chaleur sensible	18
II-2.2 Stockage par chaleur latente	18
II-2.3 Stockage thermochimique.....	20
II-3 STOCKAGE DE CHALEUR DANS LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE.....	20
II-3.1 Matériaux à changement de phase (MCP)	20
II-3.2 Caractéristiques d'un MCP idéal.....	21
II-3.3 Classification des matériaux à changement de phase.....	22
II-3.3.1 MCP organiques.....	22
II-3.4. Critères de choix d'un matériau à changement de phase	23
II-4 AMELIORATION DU TRANSFERT THERMIQUE DANS LES MCP.....	25
II-4.1 Echangeur à contact direct.....	25
II-4.2 Augmentation de la surface d'échange.....	25
II-4.3 Macro-encapsulation	25
II-4.4 Tubes ailetés	25
III-1 DESCRIPTION DU PROTOTYPE EXPERIMENTAL	28
III-1.1 Matériaux utilisés dans la relation du séchoir solaire de type serre.....	29
III-2 INTENSIFICATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DE LA PARAFFINE	30
III-3 INSTRUMENTATION DES CAPTEURS.....	32
III- 3.1 Mesure des températures	32
III-3.2 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air.....	33

III-3.3 Acquisition et traitement des données	33
III-3.4 Données mesurées par la station météorologique	33
III-3.5 Détermination du masse sèche du produit.....	34
III-3.6 Mesure de la teneur en eau	34
III-4 MATIÈRES PREMIÈRES.....	35
III. 4.1 Betterave.....	35
III-4.2 Courgette.....	35
III-4.3 Menthe.....	36
III-5 SECHAGE DE LA MENTHE, LA COURGETTE ET LA BETTERAVE	36
III-5.1 Conditions de séchage	36
III-5.2 Courbes de séchage	37
III-5.3 Modélisation des cinétiques de séchage	37
III-5.4 Détermination de la diffusivité effective de l'eau	39
RESULTATS ET DISCUSSION	42
IV-1 COMPORTEMENT THERMIQUE DES SECHOIRS SOLAIRES DE TYPE SERRE, AVEC ET SANS SYSTEMES DE STOCKAGE THERMIQUE.....	42
IV-2 SECHAGE DE LA MENTHE, LA COURGETTE ET LA BETTERAVE	49
IV-2.1 Courbes de séchage	49
IV-2.2 Vitesse de séchage.....	50
IV-2.3 Différents modèles empiriques du processus de séchage en couche mince	51
IV-2.4 Détermination de la diffusivité effective de l'eau du menthe, courgette et betterave.....	54
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE.....	59

Liste des Figures

Figure I-1: Principe de séchage à l'air libre.....	6
Figure I-2 : Le principe d'un séchoir solaire direct.....	6
Figure I-3 : Principe du séchoir solaire fonctionnant en mode direct à convection naturelle.....	7
Figure I-4 : Exemple de séchoir solaire de mode direct à convection force.....	8
Figure I-5 : Le principe d'un séchoir solaire indirect.....	9
Figure I-6 : Exemples de séchoirs solaires directs et indirects en mode convection naturelle et en mode convection force.....	10
Figure I-7 : Le principe d'un séchoir solaire mixte.....	11
Figure I-8 : Séchoir solaire hybride	11
Figure I-9 : Représentation schématique de séchage à effet de serre.....	12
Figure I-10 : Séchage sous serre (a) convection naturelle et (b) convection force	13
Figure I-11 : Serre tunnel	13
Figure I-12 : Vue panoramique de la sécheuse à effet de serre améliorée (a) vue extérieure (bande) à l'intérieur de la vue	14
Figure I-13 : Séchoir de type serre à grande échelle avec brûleur GPL..	14
Figure I-14 : Schéma de séchoir solaire de type serre	15
Figure I-15 : Séchoir solaire de type serre améliorée.....	15
Figure I-16 : Séchoir solaire de type serre	16
Figure II-1 : Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible.....	19
Figure II-2 : Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase.....	21
Figure II-3 : Classification des matériaux à changement de phase	22
Figure III-1 : (a) Prototypes de séchoir solaire de type serre avec (droite) et sans (gauche) système de stockage, (b) intérieur du prototype	28
Figure III-2 : Étapes de la réalisation du séchoir solaire de type serre	29
Figure III-3 : (a) Canettes remplies de paraffine dans l'étuve, (b) Enceinte parallélépipédique en aluminium remplies de paraffine à l'intérieure de l'étuve	30
Figure III-4 : Photographies des matériaux ajoutés pour intensifier la conductivité thermique de la cire de paraffine.....	31
Figure III-5 : Configuration géométrique du système de stockage de la cire de paraffine sous serre	32
Figure III-6 : Photographies du capteur lors de la phase d'instrumentation... ..	32

Figure III-7: Anémomètre Testo 440 + thermo-hygromètre testo 610	33
Figure III-8 : Photographie du séchoir solaire équipé avec la centrale de mesure.....	33
Figure III-9 : Station radiométrique.....	34
Figure III-10: Balance analytique.....	34
Figure III-11 : Matériels utilisés pour déterminer la teneur en eau initiale	35
Figure III-12 : Betterave	35
Figure III-13 : Courgette	36
Figure III-14 : Menthe	36
Figure III-15 : Prototype utilisé pour le séchage de la menthe, la courgette et la betterave....	37
Figure IV-1 : Emplacement des thermocouples à l'intérieur du prototype de séchoir solaire..	43
Figure IV-2 : Evolution de la température ambiante, humidité relative et rayonnement solaire global pour les jours de l'expérience.....	44
Figure IV-3 : Evolution de la température (a) à l'entrée, (b) à la sortie, (c) à l'air intérieur et(d) dans la plaque du prototype de séchoir solaire de type serre avec et sans le lit de roche pour la journée du 18 avril 2019.....	45
Figure IV-4 : Evolution de la température (a) à l'entrée, (b) à la sortie, (c) l'air à l'intérieur et (d) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de roche et le lit de sable pour la journée du 18 avril 2019.....	46
Figure IV-5 : Evolution de la température (a) à l'entrée, (b) à la sortie, (c) à l'air intérieur et (d) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de roche et le lit de sable pour la journée du 7Mai 2019... ..	47
Figure IV-6 : Evolution de la température (a) à l'entrée, (b) à la sortie, (c) à l'air intérieur et(d) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche + PCM) et le lit de sable pour la journée du 8Mai 2019	48
Figure IV-7 : Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage pour différentes produits.....	50
Figure IV-8 : Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour différentes produits.....	51
Figure IV-9 : Variation de Ln (MR) en fonction du temps de séchage des échantillons de menthe, betterave et courgette.....	55

Liste Des Tableaux

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients du séchoir solaire direct	7
Tableau II-1 : Tableau comparatif des avantages et des inconvénients du stockage de chaleur par chaleur sensible et par chaleur latent.....	20
Tableau II-2 : Caractéristique de quelques MCPs organiques.....	23
Tableau II-3 : Types d'ailettes et schémas associés	26
Tableau III-1 : Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces.....	38
Tableau IV-1 : Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la betterave.....	52
Tableau IV-2 : Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la menthe.....	53
Tableau IV-3 : Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la courgette	54
Tableau IV-4 : Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de betterave en couche mince.....	56
Tableau IV-5 : Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de courgette en couche mince.....	57
Tableau IV-6 : Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de menthe en couche mince.....	57

Notations

C_p :	Chaleur massique du matériau	J/kg.K
L_f :	Entehalpie de fusion du MCP	J/kg
Q :	Chaleur sensible	J
m :	Masse du MCP	kg
m_{prs} :	Masse du produit à sécher	kg
ΔT :	Variation de température	K
T_i :	Température initiale	K
T_m :	Température de fusion du MCP	K
T_f :	Température finale respectivement	K
$MR_{pré}$:	Teneur en eau issue de prédite	kg eau/kg Ms
MR_{exp} :	Teneur en eau issue de l'expérience	kg eau/kg Ms
MR :	Teneur en eau réduite	kg eau/kg Ms
M_0 :	Valeurs de la teneur en eau initiale	kg eau/kg Ms
M_{eq} :	Teneur en eau d'équilibre finale	kg eau/kg Ms

Lettre grecques

$RMSE$:	Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne	
χ^2 :	Ki-carrée réduite minimale	
R^2 :	Coefficient de corrélation	
N :	Nombre d'observations	
n :	Nombre de constantes du modèle	
t :	Temps	s
D_{eff} :	Diffusivité effective	m ² /s
L :	Demi d'épaisseur de la tranche	m

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

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, l'utilisation des séchoirs à air chaud avec un très haut pouvoir de chauffage sont utiles, cependant leur consommation en énergie demeure trop élevée. Néanmoins, le procédé de séchage conventionnel à air chaud étant énergétiquement coûteux, l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays à fort ensoleillement, présente une opportunité économique de grande importance. L'Algérie dispose d'un potentiel solaire considérable et suffisamment important, en particulier pour les applications à température relativement basse. L'ensoleillement annuel moyen est évalué à 2000 heures, avec un ensoleillement moyen de 6,57 kWh/m²/jour. Avec sa position géographique et un territoire d'une superficie de 2 381 741 km² composé de 86% de désert saharien, l'Algérie dispose d'un gisement solaire des plus importants dans le monde [Capderou, 1987] [Benseddik, 2018]. L'utilisation de cette importante énergie gratuite permet de réduire considérablement le coût du processus de séchage, connu pour être une opération intensive avec une consommation d'énergie élevée. Selon leur mode de fonctionnement, on peut trouver essentiellement deux types de séchoirs solaires - passif et actif [Bennamoun ,2013] [Daguenet ,1985] [Ekechukwu et al,1999] [Fudholi ,2010] : ils présentent tous deux un caractère intermittent, car ils ne fonctionnent généralement que pendant les périodes d'ensoleillement et présentent des limites d'utilisation. Dans des conditions climatiques défavorables, telles que par temps nuageux ou la nuit. Pour trouver une solution à cette propriété non constructive, des sources auxiliaires ou des systèmes de stockage d'énergie, ou les deux, sont ajoutés au système de séchage. L'utilisation de sources auxiliaires n'est pas utile car le séchoir solaire est maintenu dépendant d'une deuxième source d'énergie en plus de l'énergie solaire. Le stockage, en particulier le stockage d'énergie thermique, du surplus d'énergie pendant des périodes de rayonnement importantes, afin de l'utiliser dans des conditions défavorables, est proposé comme une question clé. Il permet, d'une part, d'allonger les périodes de séchage et d'accroître en

conséquence l'efficacité du séchoir solaire. D'autre part, cela évite d'endommager ou de dessécher le matériau en contrôlant la température [Lmre, 2006]. Dans ce contexte, le travail ici proposé est une contribution ayant pour objectif de :

- ✓ Développer un nouveau prototype de séchoir solaire de type serre équipé d'un système de stockage thermique par chaleur sensible et latente ;
- ✓ Tester les matériaux de stockage thermique par chaleur sensible par rapport à un fonctionnement de prototype sans stockage
- ✓ Intensifier la conductivité thermique de la cire de paraffine ;
- ✓ Déterminer la cinétique de séchage du menthe, betterave et courgette en couche mince pour des conditions météorologiques variables.
- ✓ Ajuster les courbes de séchage à sept modèles mathématiques.
- ✓ Calculer la diffusivité effective moyenne de l'humidité de menthe, betterave et courgette.

Afin de répondre à cette méthodologie de travail, les différentes parties d'étude du présent mémoire sont structurées et rédigées dans une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale.

CHAPITRE I: ETAT DE L'ART SUR LE SECHAGE SOLAIRE

I-1 SECHAGE

Le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant d'un corps, par vaporisation de ce solvant, le produit final dit « sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, éventuellement de « solide divisé » ou de poudre. Le produit passe ainsi d'un état initial dit « humide », selon le cas solide ou liquide, jusqu'à un état final dit « solide sec », même s'il contient encore une teneur en eau (ou solvant) résiduelle ; Le solvant considéré est le plus souvent l'eau, les mêmes principes pouvant s'appliquer à d'autres solvants. Le séchage est une opération de « séparation thermique », dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur. En séchage, on devra donc s'intéresser à la fois aux transferts de matière et de chaleur couplés [Benseddik, 2011].

I-2 DIFFERENTS TYPES DE SECHOIRS SOLAIRES

On peut classer les séchoirs suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects [SECAAR]. Pour chacun de ces types de séchoir, l'écoulement de l'air asséchant peut se dérouler par convection forcée ou par convection naturelle. Dans le cas où l'écoulement d'air est par convection forcé, les séchoirs sont appelés séchoirs solaires actifs. Lorsque l'écoulement se fait par convection naturelle, ils sont appelés séchoirs solaires passifs [Aumporn, 2017]

I-2.1 Séchoirs naturels

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé même au sol. (Le principe de séchage à l'air libre est simple, le rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchi vers l'environnement (Figure. I-1). [Souheyla, 2018].

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessite une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher.

Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation.

Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières).

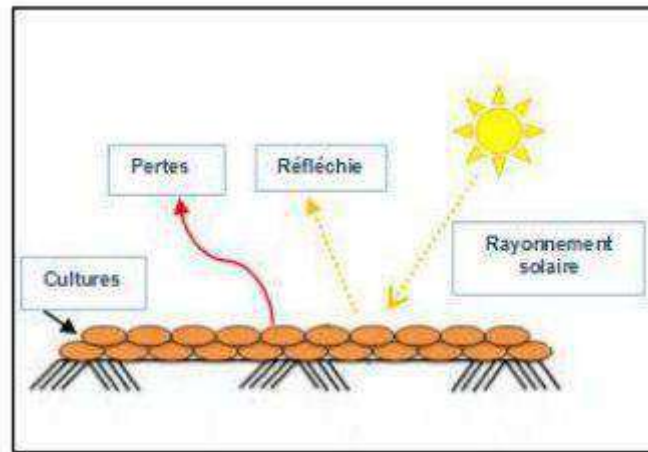


Figure I-1 : Principe de séchage à l'air libre [Souheyla, 2018]

I-2.2 Séchoirs directs

Dans ces séchoirs, les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Ces séchoirs 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 position et orienté généralement au Sud (Figure. I-2). La chaleur est générée par absorption des rayonnement solaire incidentes sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage. [Souheyla, 2018].

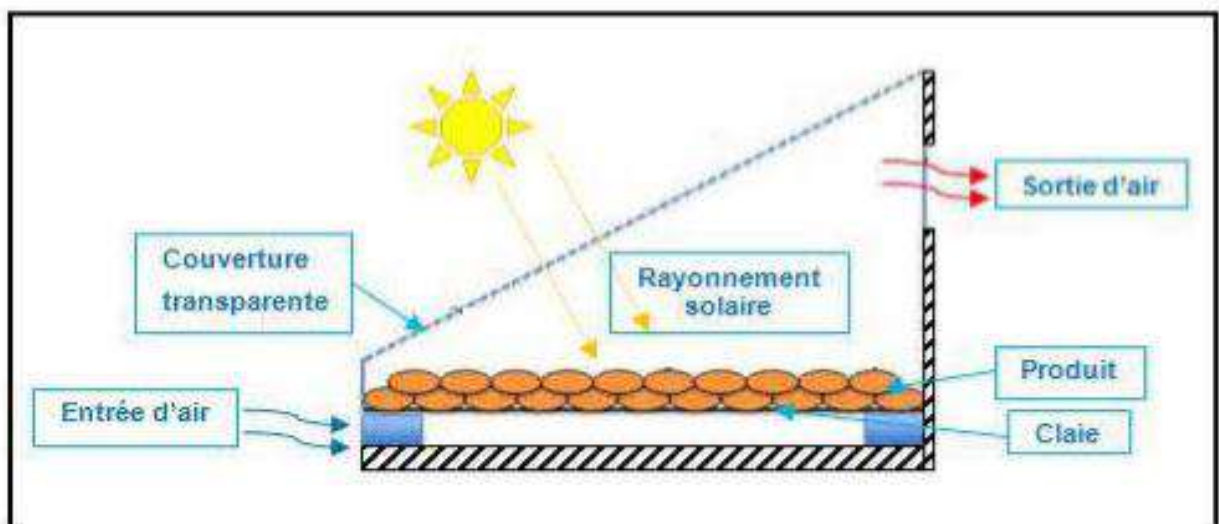


Figure I-2: Le principe d'un échoir solaire direct. [Souheyla, 2018]

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients du séchoir solaire direct [HOUTI Mohamed et al, 2016]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel. • Pas besoin de main-d'œuvre qualifié 	<ul style="list-style-type: none"> • Température élevée en fin de séchage • Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil • Jaunissement des légumes verts • Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure

➤ Séchoirs solaires passifs

Ce type de séchoir est connu sous la dénomination de boîte de séchage. La figure I-3 présente le principe de ce type de séchoir. Une fraction du flux solaire incident est réfléchiée par la couverture transparente, le reste est transmis dans le séchoir. Une partie du flux solaire transmis à l'intérieur du séchoir est réfléchiée par les produits à sécher, le reste est absorbé par ces produits et les matériaux dont sont composées les parois du séchoir. Il en résulte une augmentation de leurs températures qui provoque une émission d'un flux de chaleur de grande longueur d'onde pour lequel la transmissibilité de la couverture est faible. C'est l'effet de serre. La couverture transparente sert également à réduire les pertes de chaleur par convection avec le milieu ambiant [Aumporn, 2017].

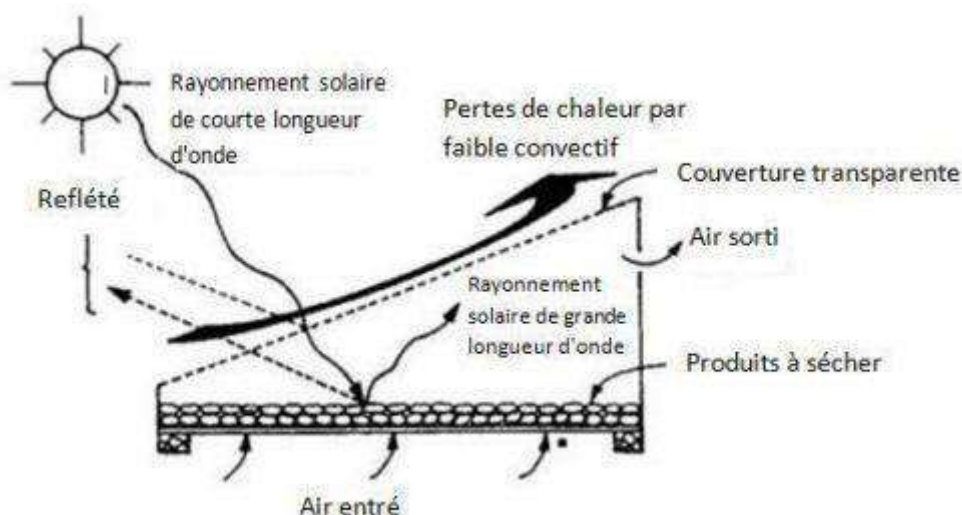


Figure I-3 : Principe du séchoir solaire fonctionnant en mode direct à convection naturelle [Aumporn, 2017].

➤ Séchoirs solaires actifs

Dans ce type de séchoir, l'air asséchant circule dans le séchoir sous l'action d'un ventilateur. Ainsi, le contrôle du débit d'air contribue à la réduction de la surchauffe du produit et à une diminution de la durée de séchage. La figure I-4 présente un exemple de ce type de séchoir. [Aumporn, 2017].

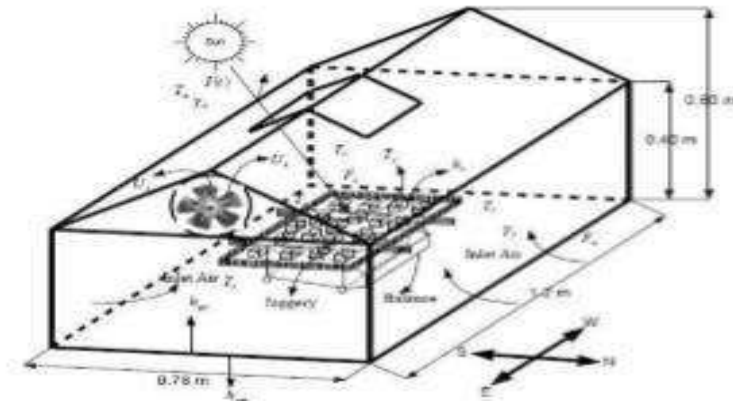


Figure I-4 : Exemple de séchoir solaire de mode direct à convection forcée [Aumporn, 2017]

I-2.3 Séchoirs indirects

Dans les séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont même mis à l'abri de la lumière entraînant une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment. Les séchoirs indirects se composent essentiellement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage (Figure. I-5). 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. Il est constitué d'une surface vitrée située au-dessus et d'une surface absorbante, généralement peinte en noir. L'air est d'abord chauffé dans le capteur solaire, puis conduit dans la chambre de séchage où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours de l'air de séchage. [Souheyly, 2018].

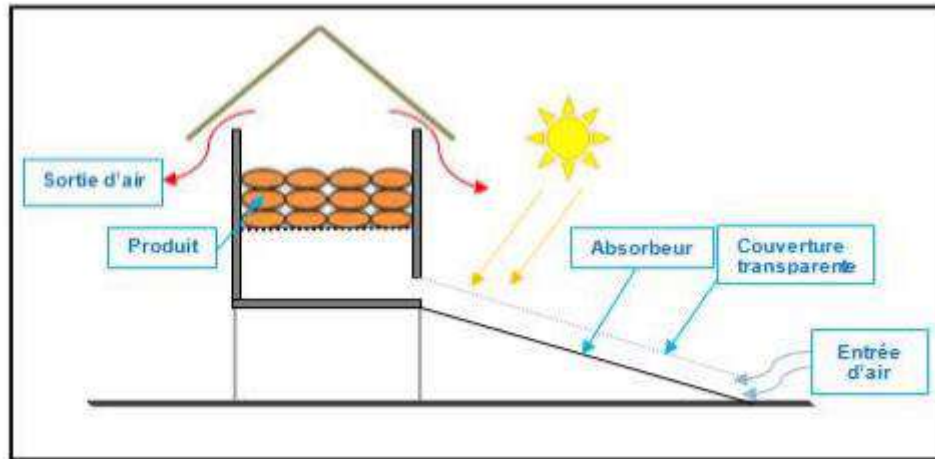


Figure I-5 : Le principe d'un échoir solaire indirect. [Souheyla, 2018]

➤ Séchoirs solaires passifs

L'air asséchant est préchauffé dans l'insolateur puis s'écoule par convection naturelle dans l'armoire de séchage. Les transferts dans l'armoire de séchage et l'insolateur peuvent être intensifiés par l'effet cheminé d'un conduit surmontant l'armoire de séchage. Il est caractérisé par sa simplicité de construction et donc un faible coût [Aumporn, 2017].

➤ Séchoirs solaires actifs

Ils sont généralement composés d'un insolateur à air pour préchauffer l'air asséchant, d'une armoire de séchage et d'un ventilateur pour envoyer l'air chaud dans l'armoire de séchage [Aumporn, 2017]

Une étude comparative entre le séchage par convection naturelle et le séchage par convection forcée de bananes dans un séchoir solaire indirect a conduit à des résultats semblables à ceux de Mohanraj et Chandrasekar (2007) et Bennamoun et Belhamri (2003) [Hassanain, 2009]. La figure I-6 présente un schéma de séchoirs solaires directs et indirects fonctionnant en convection naturelle et en convection forcée.

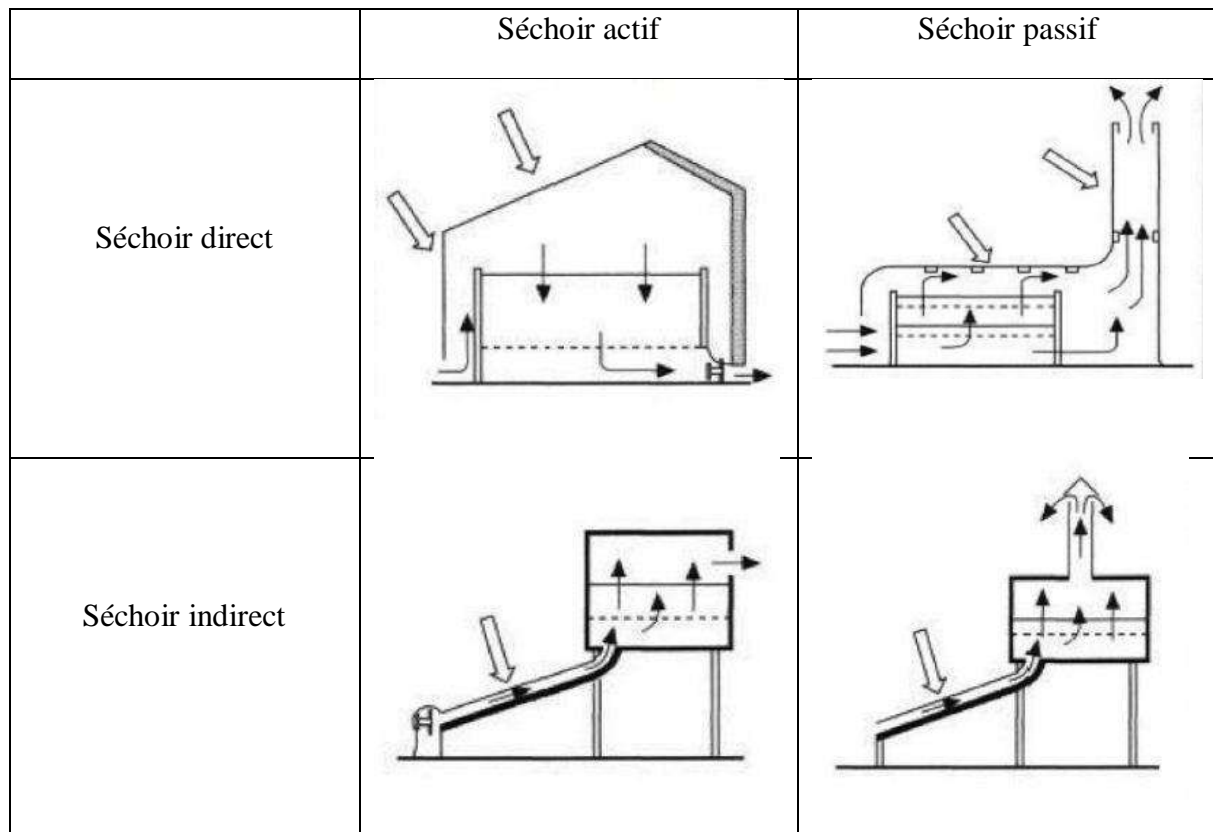


Figure I-6: Exemples de séchoirs solaires directs et indirects en mode convection naturelle et en mode convection forcée [Aumporn, 2017].

I-2.4 Séchoirs mixte

Ces séchoirs combinent les principes des deux modes de séchage direct et indirect. Les produits subissent l'action combinée des rayonnements solaire directes sur le produit 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. I-7). [Souheyla, 2018].

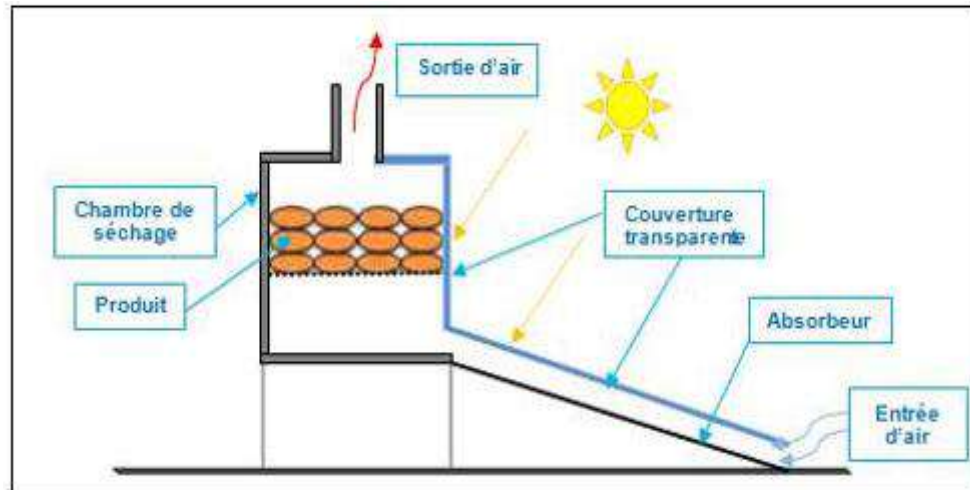


Figure I-7: Le principe d'un séchoir solaire mixte [Souheyla, 2018].

I-2.5 Séchoirs hybrides

Ces séchoirs utilisent, en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'énergie solaire sert souvent, dans ce cas, de préchauffage de l'air. Ces systèmes, plus coûteux, sont généralement réservés à des applications à grande échelle, ou à des applications commerciales pour lesquelles la qualité et le débit du produit fini ne peuvent dépendre des conditions climatiques [SECAAR], d'importante quantité de produits et permettent l'obtention de produits séchés de bonne qualité (figure I-8)

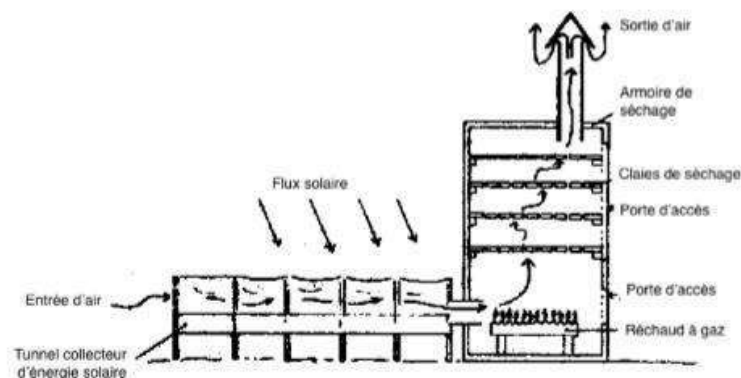


Figure I-8: Séchoir solaire hybride [Aumporn, 2017]

I-3 APPLICATIONS DU SECHAGE SOUS SERRE

La serre est une structure encadrée entourée de toits transparents et de murs en verre, polycarbonate, film en polyéthylène, etc. Le principe de fonctionnement de la technologie des serres est illustré à la figure I-9 dans lequel le produit est placé dans des plateaux recevant les

rayonnements solaires par une couverture plastique et l'humidité est éliminée par convection naturelle ou forcée.

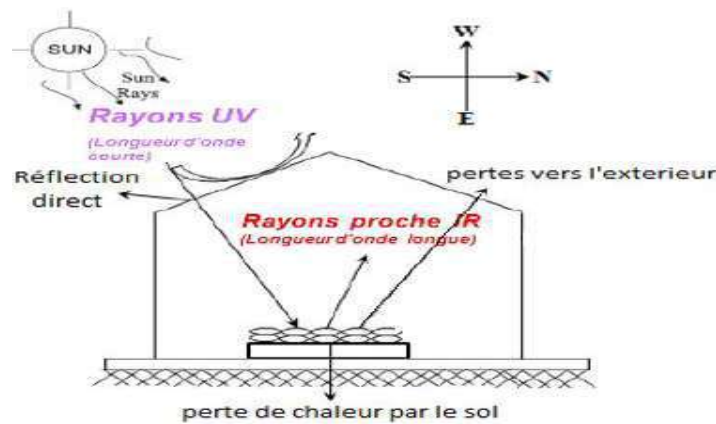


Figure I-9 Représentation schématique de séchage à effet de serre

Un examen complet des développements de divers systèmes de séchage à effet de serre a été présenté par [Sahdev et al, 2016] ; [Kumar, 2014a]. [Prakash et al, 2013]. Les auteurs ont présenté un examen complet de la conception, des détails de construction et des principes opérationnels des séchoirs solaires. Récemment, une analyse complète des séchoirs en polyéthylène en termes de conception et d'efficacité a également été présentée par [sangamithra et al, 2014]

I-3.1 Aperçue sur quelques travaux réalisés sur différents produits

De nos jours, la demande de produits agricoles, de légumes, de fruits, d'herbes, d'épices alimentaires, etc., a augmenté. Traditionnellement, les produits sont séchés à l'abri du soleil et sont bon marché, mais la qualité de ces produits est détériorée par les rayons ultraviolets, les poussières, les insectes, les animaux, les microorganismes, etc. Donc, les produits ouverts au soleil ne répondent pas aux normes internationales. La culture hors saison des produits agricoles dans un environnement contrôlé augmente également. Par conséquent, les moyens avancés de séchage, c'est-à-dire le séchage sous serre solaire sont utilisés pour réduire les pertes et augmenter la qualité des produits séchés.

Dans la suite nous allons exposer quelques informations utiles issues de quelques études effectuées sur le séchage solaire sous serre appliqués aux produits agroalimentaires.

[Tiwari et al, 2004] ont déterminé les coefficients de transfert de masse convectif (CMTC) pour le séchage de jaggery sous serre à convection naturelle et forcée (Figure I-10 (a) et (b)). On a constaté que les valeurs de CMTC pour le séchage de jaggery varient de $0,55 \text{ W} / \text{m}^2\text{C}$ -

1,43 W / m²°C et 0,33 W / m²°C-1,80 W / m²°C sous des modes de séchage sous serre solaire à convection naturels et forcés respectivement.

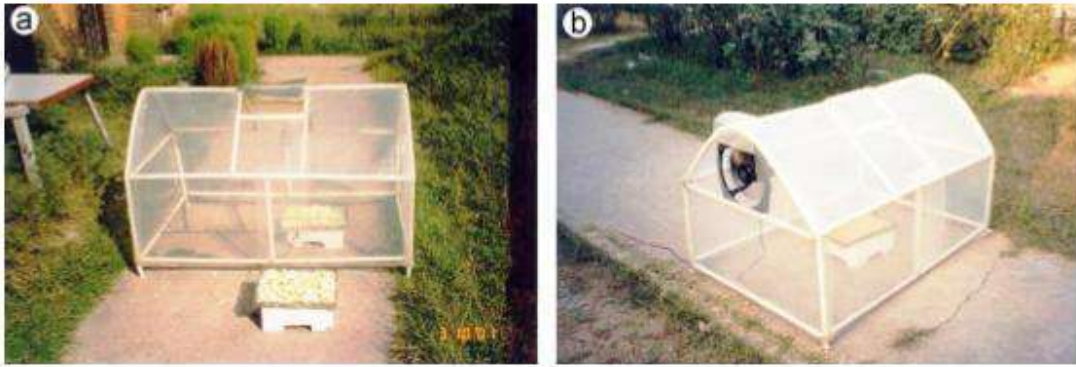


Figure I-10: séchage sous serre (a) convection naturelle et (b) convection forcée [Tiwari et al, 2004].

[Sacilik et al, 2006] ont présenté les caractéristiques de séchage en couches minces de la tomate organique dans une serre tunnel sous les conditions climatiques d'Ankara, en Turquie (figure I-11). Les tomates ont été séchées à partir de la teneur en eau initiale de 93,35% (w.b.) jusqu'à la teneur en eau finale de 11,50% (w.b.) en 4 jours dans un séchoir solaire à effet de serre par rapport à 5 jours de séchage sous soleil ouvert. Le produit séché était protégé contre les insectes, les oiseaux, les pluies et les poussières.



Figure I-11 : serre tunnel [Sacilik et al, 2006]

[Sethi et al, 2009] ont amélioré la serre conventionnelle en utilisant une réflexion inclinée du mur nord (INWR) pour un séchage plus rapide des tranches de gourdes amères sous des modes de convection naturelle et forcée (figure I-12). La température de l'air à l'intérieur de la serre est améliorée selon les modes de convection naturelle et forcée a été augmentée de 1 °C à 6,7 °C et de 1 °C à 4 °C, respectivement.

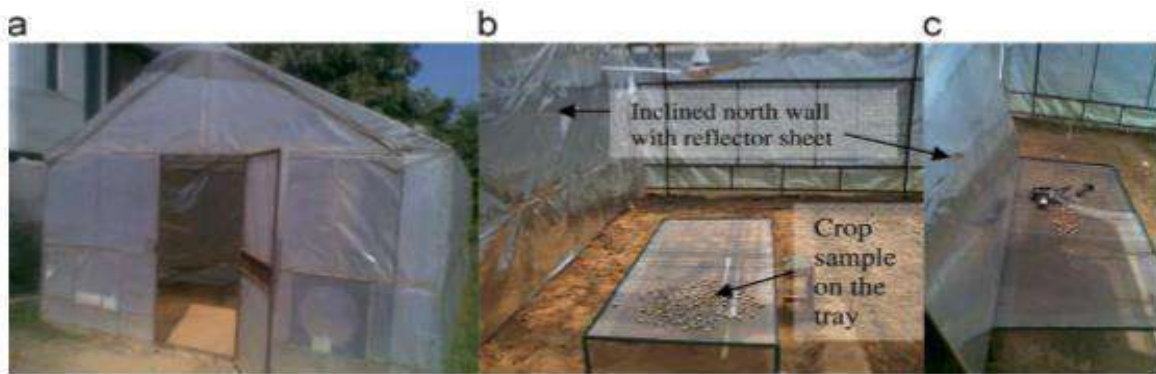


Figure I-12: Vue panoramique de la sécheuse à effet de serre améliorée (a) vue extérieure (bande) à l'intérieur de la vue [Sethi et al, 2009].

[Janjai et al, 2011] ont développé un séchoir solaire à effet de serre modifié à grande échelle (sol en béton noir) ayant une capacité de chargement de 1000 kg (figure I-13). Le chili, la banane et le café ont été utilisés pour être sécher à l'intérieur du séchoir à effet de serre modifié d'une teneur en eau initiale de 75% (wb) en 3 jours, 68% (wb) en 5 jours et 52% (wb) en 2 jours par rapport à 5 jours, 7 jours et 4 jours dans des conditions de séchage au soleil ouvertes respectivement. La période de récupération de la sécheuse a été estimée à 2,5 ans.



Figure I-13 : Séchoir de type serre à grande échelle avec brûleur GPL [Janjai et al, 2011].

[Elicin et al, 2005] ont étudié la cinétique de séchage des pommes dans le séchoir solaire tunnel de la teneur en eau initiale de 82% (wb) à la teneur en eau finale de 11% (wb). Les pommes ont été séchées en 28 h dans le séchoir solaire de type serre par rapport à 32 jours en séchage au soleil ouvert.

[Fadhel et al, 2005] ont comparé le séchage des raisins de Sultanine au soleil ouvert, au séchoir solaire à convection naturelle et au séchoir solaire de type serre. On a signalé que la serre solaire tunnel était la plus appropriée pour le séchage des raisins.

[Rathore et al, 2010] ont développé et étudié la performance d'un séchoir solaire de type serre (figure I-14) avec une paroi nord protectrice de chaleur pour sécher les raisins sans pépins (mutant : Sonaka). Les raisins ont été séchés à partir de la teneur en eau initiale de 85% (wb) jusqu'à une teneur en eau finale de 16% (wb) en environ 7 jours dans la sécheuse, où il a fallu environ 11 jours en séchage à soleil ouvert.

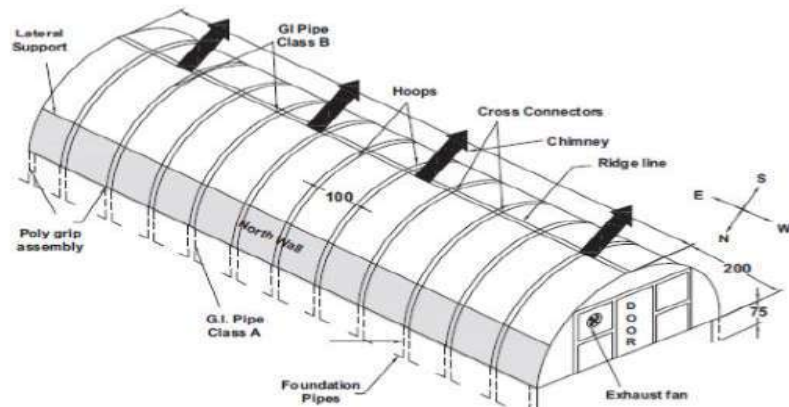


Figure I-4 : Schéma de séchoir solaire de type serre [Rathore et al, 2010].

[Almuhanna, 2012] a utilisé la serre solaire (figure I-15) comme chauffe-eau solaire pour le séchage des dates et a étudié la performance thermique de la serre solaire. L'efficacité thermique globale moyenne quotidienne de la serre solaire au cours de l'expérience était de 57,2%.



Figure I-15 : séchoir solaire de type serre améliorée [Almuhanna, 2012]

[Phusampao et al, 2014] ont étudié la performance du séchoir solaire à effet de serre pour le séchage des noix de macadamia. On a signalé que les noix étaient séchées à partir de la teneur en eau initiale de 16% (wb) jusqu'à la teneur en eau finale en de 3% (wb) dans 5 jours. Le temps de récupération pour la sécheuse a été estimé à un an.

Récemment [Elkhadraoui et al, 2015] ont étudié la performance d'un nouveau séchoir solaire à serre solaire mixte (Figure I-16) avec convection forcée pour le séchage du poivron rouge et du raisin sultana. Un collecteur à plaque plate a été intégré à la serre pour augmenter la température de l'air à effet de serre. La teneur en eau du poivre rouge et des raisins Sultana a été réduite à 16% (wb) et 18% (wb) en 24 h et 50 h respectivement.



Figure I-16 : Séchoir solaire de type serre [Elkhadraoui et al, 2015]

CHAPITRE II : STOCKAGE THERMIQUE ET MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

II-1 STOCKAGE THERMIQUE

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé. La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes :

- La chaleur sensible : stockage dans des matériaux inertes
- La chaleur latente : utilisation de matériaux à changement de phase qui emmagasinent l'énergie à mesure qu'ils changent de phase.
- La chaleur des réactions : thermochimie et absorption [Adèle, 2015].

II-2 MODE DE STOCKAGE DE CHALEUR

II-2.1 Stockage par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est le plus simple et le plus ancien des modes de stockage. Dans les systèmes de stockage par chaleur sensible, l'énergie est stockée, puis libérée par élévation ou réduction de la température du matériau de stockage solide ou liquide. La quantité d'énergie stockée dépend de la masse du matériau de stockage (m), de la chaleur spécifique du matériau (C_p) et de la variation de température (ΔT) et est déterminée par l'Equation (I-1) [Eric Kenda, 2017].

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad (I-1)$$

Avec

Q : chaleur sensible (J)

m : masse du matériau (kg)

C_p : chaleur massique du matériau (J/(kg K))

ΔT : la variation de température (K)

Les matériaux utilisés pour le stockage par chaleur sensible peuvent être :

- Gazeux : vapeur d'eau surchauffée
- Liquide : eau, sels fondus, huile de synthèse ou naturelle, etc.
- Solide : roche, métal, béton, etc.

II-2.2 Stockage par chaleur latente

Le stockage par chaleur latente est basé sur une absorption de la chaleur par un matériau lors d'un passage de l'état solide à l'état liquide à une température plus ou moins constante (figureII-1) [Laghzaoui, 2010]. Le stockage par chaleur latente nécessite moins de volume que le stockage par chaleur sensible parce que la chaleur latente d'un matériau est beaucoup

plus élevée que sa capacité calorifique. La quantité de chaleur solaire par mode latent avec un matériau à changement de phase (MCP) peut être déduite de la relation suivante [Aumporn, 2017].

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} Q = m \cdot C_{P(sol)} \cdot dT + m \cdot L_f + \int_{T_m}^{T_f} Q = m \cdot C_{P(liq)} \cdot dT \quad (I-2)$$

Avec

m = masse du MCP (kg)

C_p = chaleur spécifique du MCP (J/ (kg. K))

L_f = enthalpie de fusion du MCP (J)

T_i , T_m , T_f = température initiale, de fusion et finale respectivement (K)

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe température vs énergie de la Figure II-1. [Adèle,2015].

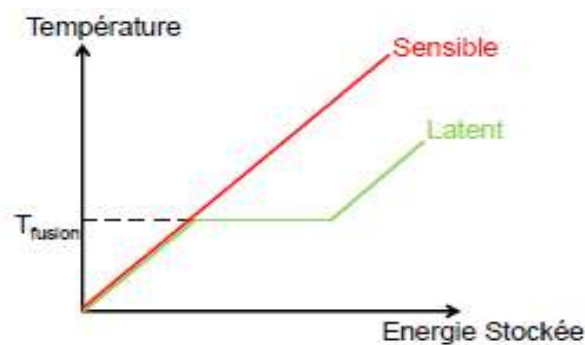


Figure II-1 : Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible [Aumporn, 2017]

Lorsque le matériau est chauffé, il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible lui permettant d'atteindre la température de changement de phase. A ce stade, l'énergie apportée au matériau cesse de le chauffer et est utilisée à la place pour accomplir le changement de phase. La chaleur est stockée de façon isotherme à condition que le corps soit pur sous forme de chaleur latente. Une fois que la transformation est complète, la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur. Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puisque pour arriver au point de changement de phase, le matériau doit subir une montée en température, stockant inévitablement une part d'énergie sensible. [Adèle,2015].

Tableau II-1: Tableau comparatif des avantages et des inconvénients du stockage de chaleur par chaleur sensible et par chaleur latente [Aumporn, 2017]

	Stockage par chaleur latente	Stockage par chaleur sensible
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Température du matériau reste constante dès le début de la transformation de phase 	<ul style="list-style-type: none"> • Bon marché • Non toxicité • Capacité thermique plus élevée
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé • Faible conductivité thermique 	<ul style="list-style-type: none"> • Déperditions thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du système qui requiert une bonne isolation

II-2.3 Stockage thermochimique

Le stockage par voie thermochimique est basé sur un phénomène physico-chimique réversible, Ce mode de stockage se base sur l'utilisation d'une chimie-sorption entre un gaz et un solide, d'une absorption ou une adsorption physique d'un gaz par un liquide ou un solide. Le mécanisme du processus de stockage thermique par sorption ou par voie thermochimique peut être décrit par l'Equation (I-3) :



Pendant le processus, la chaleur fournie au couple de sorption AB le dissocie en absorbant la chaleur pour donner naissance à deux composés A et B qu'on peut stocker séparément : c'est le phénomène endothermique. Lorsque ces deux produits sont mis en contact, le phénomène exothermique se produit pour former à nouveau le composé AB en libérant de la chaleur [Eric Kenda, 2017].

II-3 STOCKAGE DE CHALEUR DANS LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE

II-3.1 Matériaux à changement de phase (MCP)

Les matériaux à changements de phase (MCPs) sont des composés qui stockent et libèrent de la chaleur latente lors d'une transformation de phase (solide-liquide) à température constante. Leur principe de fonctionnement est simple et est illustré par la figure II-2. Comme pour la transformation de la glace en eau qui se produit lorsque la température dépasse les 0 °C, les matériaux à changements de phase changent d'état (solide-liquide) en fonction de leur température de fusion [Stéphane, 2013].

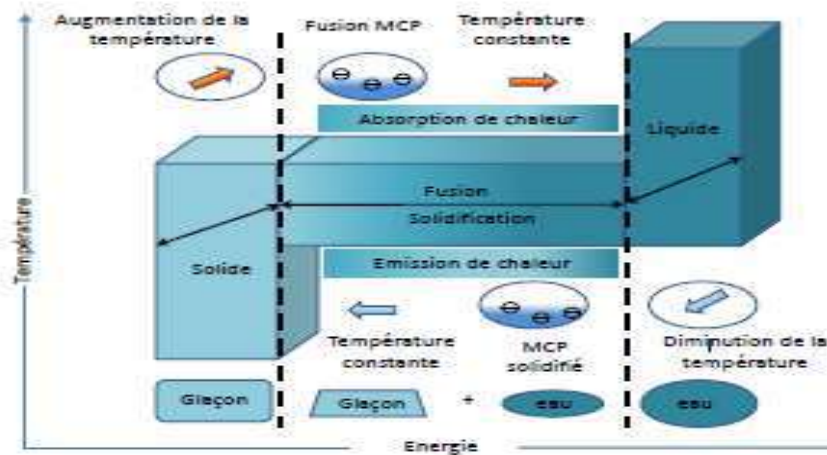


Figure II-2 : Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase [Stéphane, 2013].

II-3.2 Caractéristiques d'un MCP idéal

Pour résumer, le MCP idéal devrait posséder les propriétés optimales suivantes [Fabien, 2012]:

Propriétés thermodynamiques et thermiques :

- ✓ Une température de fusion dans la gamme de températures désirée ;
- ✓ Une chaleur latente de fusion par unité de masse importante ;
- ✓ Une haute densité, pour diminuer le volume du stockage ;
- ✓ Une bonne conductivité thermique¹, pour améliorer les transferts thermiques et diminuer les gradients de température requis à la charge et à la décharge ;
- ✓ Une bonne chaleur spécifique², pour bénéficier des effets du stockage en chaleur sensible ;
- ✓ Une faible variation de volume pendant le changement de phase, pour pouvoir utiliser des géométries simples de capsules et d'échangeur.

Stabilité chimique :

- ✓ Vis à vis de la température : Pas de décomposition chimique dans la gamme de température de fonctionnement du stockage. Une fusion congruente, pour que la composition chimique du MCP ne change pas au cours du temps ;
- ✓ Vis à vis du milieu environnant : Pas de corrosion avec les matériaux de construction, pas de risque d'inflammabilité ni d'explosion en contact avec l'atmosphère.

Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement) :

- ✓ Être disponible en grandes quantités ;
- ✓ Être bon marché ;
- ✓ Être non toxique pour le vivant ;
- ✓ Être recyclable en fin de vie.

II-3.3 Classification des matériaux à changement de phase

Température de fusion, leur chaleur latente de changement de phase ainsi que leurs caractéristiques thermo-physiques. Les sels hydratés (MCP inorganique) ne sont pas tous utilisés dans l'enveloppe du bâtiment en raison de : la corrosion engendrée par leurs présences ; la tenue mécanique des matériaux qui les contiennent ; le vieillissement propre ; l'inflammabilité ainsi que la plage de température en inadéquation avec le confort requis à l'intérieur du bâtiment La figure II-3 représente la classification des MCP [N. Madjoudj et al, 2016].

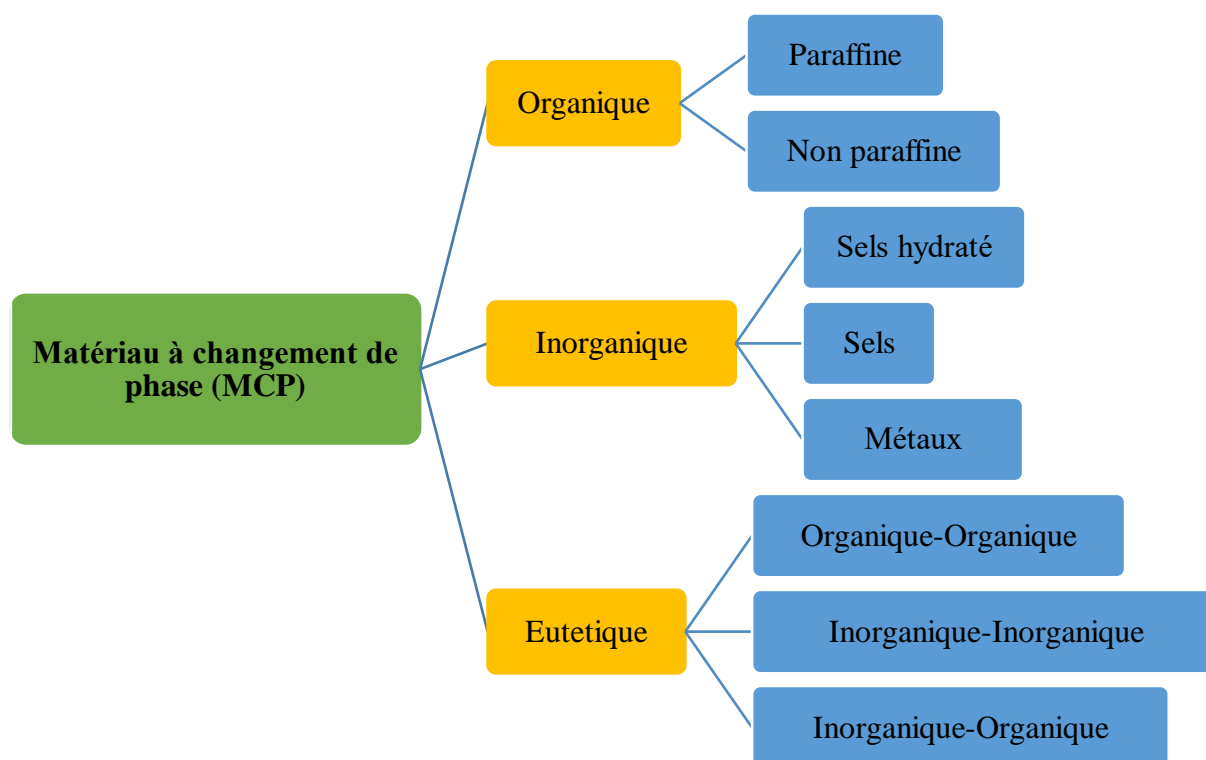


Figure II-3 : Classification des matériaux à changement de phase

II-3.3.1 MCP organiques

Les matériaux organiques ont une température de fusion comprise entre 0°C et 150°C. Les plus utilisés dans le domaine du stockage de la chaleur sont principalement à base de paraffine, d'acides gras et d'alcools. Ils présentent de nombreux avantages tels que leurs disponibilités dans une large gamme de températures et leurs stabilités chimiques. Ils ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. En outre, ils sont généralement non réactifs et recyclables. Leurs principaux inconvénients sont leurs faibles conductivités et chaleur latente de fusion et ils sont inflammables. Les MCPs organiques comportent deux types : paraffines et non-paraffines [Aumporn, 2017].

· *Paraffines*

Les paraffines sont, de façon générale, des substances à l'aspect cireux, aux propriétés très similaires. D'un point de vue chimique, elles font partie de la famille des alcanes, ces molécules linéaires d'hydrocarbures saturés à chaîne droite, de formule brute C_nH_{n+2} et de formule semi-développée $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$ [Fabien, 2012].

· *Les non-paraffines*

Les matériaux organiques non-paraffines constituent la plus grande gamme de MCP, avec des propriétés très diverses. De nombreux auteurs tels que [LANE, 1992], [ABHAT, 1983] ou [BUDDHI et al, 1994] ont mené de vastes recherches sur les matériaux organiques et identifié un bon nombre d'esters, d'acides gras ou carboxyliques, d'hydrocarbures aromatiques, d'oses, d'alcools ou polyols, adaptés au stockage de l'énergie thermique.

Ces matériaux possèdent généralement une chaleur latente de fusion adéquate, mais sont inflammables et ont un point éclair assez bas. Ils sont généralement instables à hautes températures et présentent un niveau de toxicité variable [Fabien, 2012].

Tableau II-2 : Caractéristique de quelques MCPs organiques [Aumporn, 2017].

Type de substance	Composé	Température de fusion (°C)	ΔH fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m.K)	Densité (kg/m^3)
Substance organiques	Paraffine C12-C50	66-68	189	0.21 sol	0.830liq.70°C 0.930sol.20°C
	Naphtalène	80	147.7	0.123liq.83.8°C 0.341sol.49.9°C	976 liq.84°C 1145 sol.20°C
Eutectique Organiques	67.1Naphtalène + 32.9%Acide benziq	67	123.4	0.130liq.100°C 0.282sol.38°C	n.d.
Acide gras	Acide caprique	32	152.7	0.153liq.38.5°C	878liq.45°C 1004sol24°C
	Acide stéarique	69	202.5	0.172liq.70°C	848liq.100°C 96.5sol 24°C

II.3.4. Critères de choix d'un matériau à changement de phase

Le choix d'un MCP doit être fait selon plusieurs critères. Les principaux pour le stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente sont :

Propriétés thermiques

- ✓ La température de transition de phase doit être conforme au domaine d'application.
- ✓ Une chaleur latente de transition élevée.

- ✓ Une bonne qualité de transfert de chaleur. Par exemple, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage de l'énergie

Propriétés physiques

- ✓ Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage petit. Durant le processus du changement de phase, il faudra étudier la variation de la densité (exemple : les MCP aqueux).
- ✓ Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique petite.
- ✓ Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur.

Propriétés chimiques

- ✓ Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification.
- ✓ La compatibilité avec les matériaux de construction.
- ✓ L'étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,) passant par les réglementations et normalisations en vigueur. La dangerosité du produit doit être minimisée.
- ✓ Recyclable.

Aspects économiques

- ✓ Le coût est un critère également très important. Celui-ci sera différent selon les utilisations. Par exemple, les utilisations domestiques demandent quelques kilogrammes alors que les utilisations industrielles quelques tonnes.
- ✓ Disponible en grande quantité.

Critères technologiques

- ✓ La fiabilité des matériels de confinement passe par une compatibilité avec les matériaux du conteneur.

En respectant l'ensemble de ces critères, l'étude menée jusqu'à présent et selon la thématique de notre cadre de travail, permet d'opter pour les matériaux à changement de phase solide/liquide. Généralement, la classe des MCP qui est utilisée est organique. En effet, les principaux travaux réalisés dans le secteur du bâtiment utilisent la cire de paraffine. [Stéphane, 2013].

II-4 AMELIORATION DU TRANSFERT THERMIQUE DANS LES MCP

II-4.1 Echangeur à contact direct

Les échangeurs à contact direct utilisent un MCP et un fluide caloporteur immiscibles lors d'une fusion et permettent ainsi de supprimer la paroi d'échange ou l'étape de fabrication d'un coulis.

II-4.2 Augmentation de la surface d'échange

Une dernière solution, présentée dans cette partie consiste à intégrer le MCP dans un échangeur à surface augmentée afin de maximiser le flux total transféré. Cette technique est beaucoup plus facile car elle consiste bien souvent à utiliser des designs d'échangeurs déjà existants et à les adapter ou les améliorer pour une application spécifique, en fonction des puissances et des densités énergétiques envisagées.

Plusieurs techniques sont actuellement envisagées :

- L'encapsulation du MCP qui permet de travailler dans un échangeur en batch avec lit fixe.
- L'utilisation d'ailettes, qu'elles soient transverses ou longitudinales.
- La mise en place d'un faisceau de tubes ou de tubes en U [Adèle, 2015].

II-4.3 Macro-encapsulation

Une première solution pour augmenter la surface d'échange est de piéger le MCP dans une capsule conductrice et compatible avec le MCP et le fluide caloporteur. L'extension de la surface d'échange ainsi créée permet d'augmenter le flux de chaleur transféré au MCP. Cette technologie réduit les dimensions caractéristiques de transfert et évite la formation de trop grandes résistances thermiques.

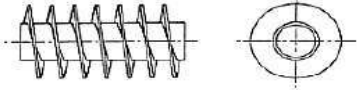
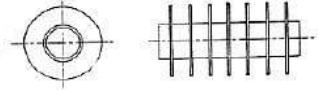
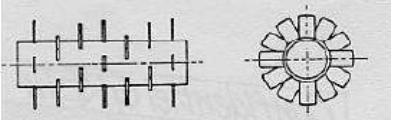
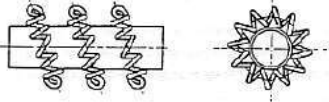
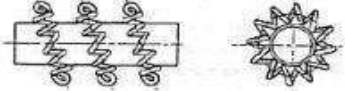
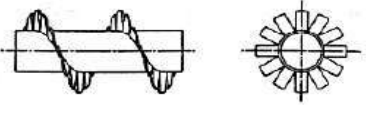
II-4.4 Tubes ailetés

Lorsque l'on se place dans la configuration d'un échangeur tube-calandre, une des possibilités d'augmentation de la surface d'échange est l'utilisation d'ailettes. Celles-ci peuvent prendre plusieurs formes regroupées dans le Tableau II-3.

Un nombre conséquent d'études expérimentales a été réalisé sur les échangeurs latents avec ailettes. Les plus pertinentes ont été classées ci-après par type d'ailettes et orientation de l'échangeur. L'état de l'art sur les ailettes est classé en deux parties :

- Les ailettes circulaires à l'horizontale et à la verticale
- Les ailettes longitudinales à l'horizontale et à la verticale [Adèle, 2015].

Tableau II-3 : Types d'ailettes et schémas associés

<p>Ailette shélicoïdales, les plus courantes, appelées ailettes transverses</p>	
<p>Ailettes annulaires</p>	
<p>Ailettes annulaires</p>	
<p>Ailettes en fil préformé</p>	
<p>Ailettes longitudinales</p>	
<p>Ailettes hélicoïdales segmentées</p>	

CHAPITRE III : MATÉRIELS ET MÉTHODES

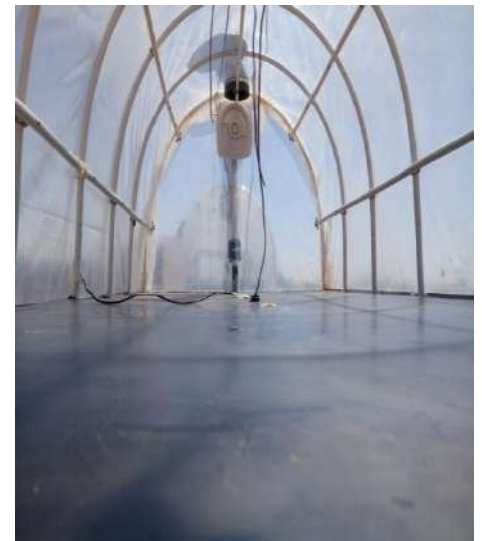
III-1 DESCRIPTION DU PROTOTYPE EXPERIMENTAL

Dans cette partie, nous allons faire une description générale du prototype expérimental réalisé dans le cadre de ce mémoire de master. Nous considérons deux séchoirs solaires de type serre, réalisés dans l'atelier de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa) ; ces deux séchoirs solaires de type serre ont été instrumentés de sorte à pouvoir étudier le comportement thermique du prototype avec et sans système de stockage ainsi que la cinétique de séchage du produit séché. Le premier, sans système de stockage thermique, sert de séchoir témoin, alors que le deuxième sera modifié afin de tester l'influence du matériau de stockage et toute modification rapportée.

Le séchoir de type serre, a une largeur de 1 m, une longueur de 2 m et une hauteur de 0.7 m. La serre est recouverte d'une couche de polyéthylène. La partie inférieure est constituée d'une plaque d'aluminium d'épaisseur 0.8 mm peints en noir et isolée vers le sol par une couche de polystyrène d'épaisseur 3 cm plus une feuille de contreplaqué d'une épaisseur de 0.5 mm. L'air est véhiculé dans les serres par l'action d'un ventilateur placé sur le mur opposé à l'entrée d'air pour forcer l'écoulement. La figure 1 montre une photographie du séchoir solaire de type serre avec et sans système de stockage.



A



b

Figure III-1 :(a) : prototypes de séchoir solaire de type serre avec (droite) et sans (gauche) système de stockage, (b) intérieur du prototype

III-1.1 Matériaux utilisés dans la relation du séchoir solaire de type serre

La réalisation de prototype de séchoir solaire de type serre a nécessité l'ensemble des outils et matériels suivants :

- ✓ Boulons, Vis et attaches ;
- ✓ Un film de polyéthylène ;
- ✓ Tube multicouche diamètres Ø16 mm ;
- ✓ Peinture noir mat ;
- ✓ Tube carré de fer 2x2cm ;
- ✓ Barres de fer en acier ;
- ✓ Tube de fer en forme (L) ;
- ✓ Ventilateur ;
- ✓ Une plaque d'aluminium d'épaisseur 0.8 mm et 0.5 mm ;
- ✓ Polystyrène d'épaisseur 3 cm ;
- ✓ Une feuille de contreplaqué d'une épaisseur de 0.5 mm ;
- ✓ Tuyau en plastique longueur 40 cm et diamètre 110 mm ;
- ✓ Collier de serrage pour échafaudage avec caoutchouc.



a



b



c



D



e



f

Figure III-2 : Étapes de la réalisation du séchoir solaire de type serre

III-2 INTENSIFICATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DE LA PARAFFINE

Il a été rapporté que les systèmes de stockage de chaleur latente, en particulier ceux utilisant des matières organiques, présentent une réponse thermique assez lente. Ceci est principalement dû à la conductivité thermique relativement faible des matériaux à chaleur latente organique. Dans cette partie, des expériences ont été menées pour intensifier la conductivité thermique de la cire de paraffine par l'ajout de :

- ✓ La poudre d'aluminium ;
- ✓ Bandes d'aluminium, obtenues à partir de canettes jetables ;
- ✓ Déchets de fil de cuivre ;
- ✓ Copeaux d'acier en spirale tordus.

Afin de déterminer la configuration géométrique du système de stockage qui conduit à une fusion optimale de la cire de paraffine, nous avons conçu et réalisé deux dispositifs : (i) Enceinte parallélépipédique (0,3×0,28×0,02 m) en aluminium d'épaisseur 0.8 mm (figure III-3. a) (ii) Canettes de boissons gazeuses (figure III-3. b)).



(a)



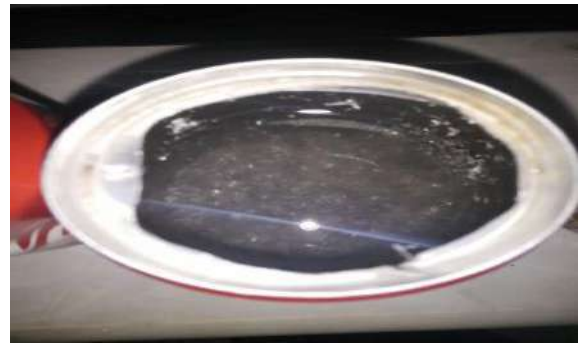
(b)

Figure III.3 :(a) : Canettes remplies de paraffine dans l'étuve, (b) Enceinte parallélépipédique en aluminium remplies de paraffine à l'intérieure de l'étuve

Les essais sont réalisés en utilisant l'étuve comme moyen pour la fusion de la paraffine. Les enceintes parallélépipédiques et les canettes ne sont pas complètement remplies pour tenir compte de l'augmentation de volume pendant le changement de phase. Il a été montré que l'ajout d'une quantité relativement faible de 5% en poids de la poudre d'aluminium, améliore la conductivité thermique de la paraffine wax par rapport aux autres conducteurs présentés dans les figures ci-dessous (bandes d'aluminium obtenues à partir de canettes jetables, déchets de fil de cuivre et copeaux d'acier en spirale tordus).



Poudre d'aluminium



Déchets de fil de cuivre



Bandes d'aluminium obtenues à partir de canettes jetables



Copeaux acier en spirale tordus



Figure III-4 Photographies des matériaux ajoutés pour intensifier la conductivité thermique de la cire de paraffine

Enfin, nous avons conçu et construit un séchoir solaire de type serre contenant de la cire de paraffine mélangée avec la poudre d'aluminium dans des canettes peintes en noir mat utilisées comme accumulateur d'énergie solaire. La figure III-5 montre la configuration géométrique du système de stockage de la cire de paraffine dans le séchoir solaire de type serre.



Figure III-5 : Configuration géométrique du système de stockage de la cire de paraffine sous serre.

III-3 INSTRUMENTATION DES CAPTEURS

III- 3.1 Mesure des températures

Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples Nickel-Chrome/Nickel-Aluminium, de type K. Ces thermocouples, peuvent aller jusqu'à des températures de 750 °C et permettent une précision de 0,1°C.



Figure III-6 photographies du capteur lors de la phase d'instrumentation.

III-3.2 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air

La vitesse de l'air asséchant est mesurée à la sortie du séchoir solaire de type serre. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre Testo modèle 440.

L'humidité relative est également mesurée grâce à la sonde du thermo-hygromètre testo 610.



Figure III-7: Anemometer Testo 440 + thermo-hygrometer testo 610

III-3.3 Acquisition et traitement des données

Le système d'acquisition et de traitement des données est constitué d'une centrale d'Acquisition de données Keithley 2701 combine un Multimètre de résolution 6,5 chiffres (22-bit) un système de commutation 40 voies Piloté par un ordinateur et équipé d'un logiciel Excelinx d'acquisition des données (voir Figure III-8).



Figure III-8 : Photographie du séchoir solaire équipé avec la centrale de mesure

III-3.4 Données mesurées par la station météorologique

Une station radiométrique comporte deux parties : une partie fixe qui est constituée d'un pyranomètre type EKO, pour la mesure du rayonnement global sur un plan horizontal et d'un pyranomètre différentiel type EPPLEY pour mesurer le rayonnement global sur un plan incliné de 32° et orienté vers le sud. Une partie mobile (système de poursuite solaire) qui est pourvue d'un pyréliomètre pointé vers le disque solaire, afin de mesurer le rayonnement direct, et d'un pyranomètre type EKO, muni d'une boule pare soleil pour la mesure de l'éclairement diffus

sur un plan horizontal. La température est mesurée à l'aide d'une sonde thermo-hygrométrique «Techoel sonde thermo-igrometriche » avec un étalonnage de précision égale $\pm 1.5 \%$, sensibilité à la température ambiante égale $0.1 (^{\circ}\text{C}/\text{mV})$ et une gamme de mesure s'étend de 0 à 100% HR, -40 à $+60^{\circ}\text{C}$. Tous les systèmes décrits ci-dessus sont relié à une acquisition de marque CAMPBELL SCIENTIFIC CR10x. celle-ci est reliée par interface RS232, à un ordinateur. Ces données sont ainsi collectées quotidiennement 24 h sur 24 et avec un pas de cinq minutes.

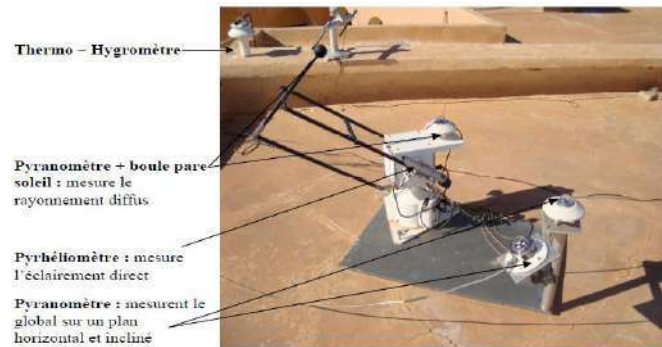


Figure III-9 : Station radiométrique

III-3.5 Détermination du masse sèche du produit

Le suivi de la masse au cours de séchage est effectué par pesée sur une balance de précision (Type KERN PCB 3500-2 Balance de précision à 3500 g).



Figure III-10: Balance analytique

III-3.6 Mesure de la teneur en eau

La détermination de la teneur en eau a été effectuée de la façon suivante : dans un bécher préalablement séché à l'étuve et taré, 2-4 grammes d'échantillons sont introduits pendant 24 heures à 105°C , ensuite, l'ensemble est mis à refroidir dans un dessiccateur pendant 20 minutes, puis pesé sur une Balance KERN ABT 220-4M: $220\text{g}/0,1\text{mg}$.



Figure III-11 : Matériels utilisés pour déterminer la teneur en eau initiale

III-4 MATIÈRES PREMIÈRES

Dans cette partie, nous allons présenter les produits que nous avons séchés dans ce travail. Il s'agit principalement du menthe, courgette et betterave.

III. 4.1 Betterave

La betterave a été achetée du marché local à Metlili, située à 40 Km au sud de Ghardaïa. La teneur en eau initiale de la betterave a été de 7.03 Kg H₂O/ Kg d.b (85.78 % base humide).



Figure III-12 : Betterave

III-4.2 Courgette

La courgette a été fournie par l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER). Il s'agit d'une culture sous serre tunnel en plastique. La teneur en eau initiale de la courgette a été de 26.29 Kg H₂O/ Kg d.b (96.197 % base humide).



Figure III-13 : Courgette

III-4.3 Menthe

La menthe a été fournie par une agriculture de Daya Ben Dahoua (10 km au nord de Ghardaïa).

La teneur en eau initiale de la menthe a été de 4.543 Kg H₂O/ Kg d.b (77.99 % base humide).



Figure III-14 : Menthe

III-5 SECHAGE DE LA MENTHE, LA COURGETTE ET LA BETTERAVE

III-5.1 Conditions de séchage

Dans cette partie, nous nous intéressons à la cinétique des feuilles de la menthe, des tranches de la betterave et de la courgette au cours de leur séchage dans des conditions météorologiques variables.

Les séries de campagnes expérimentales de séchage dans un climat semi-aride ont été effectuées en utilisant deux séchoirs solaire de type serre présentés dans la figure III-15.



Figure III-15 : Prototype utilisé pour le séchage de menthe, courgette et betterave.

III-5.2 Courbes de séchage

La pesée du produit au cours de séchage, c'est le moyen le plus simple lorsque l'on souhaite suivre et quantifier l'abaissement progressif de son humidité absolue moyenne M . Cette teneur en eau est définie par le rapport de la masse d'eau contenue dans le produit à l'instant (t) à la masse m_h du produit anhydre. Nous ne pourrions pas atteindre cette dernière masse (m_s) sauf si l'air de séchage est complètement sec. Cette humidité absolue du produit passe de la valeur initiale M_0 à la valeur de teneur en eau d'équilibre finale M_e qui est fonction des conditions de l'air asséchant. Les courbes de séchage présentent les variations de la teneur en eau $M(t) = \frac{m_h - m_s}{m_s}$ en fonction du temps. On atteint l'état d'équilibre pour une température de séchage fixée constante, lorsque pour deux pesées successives, la masse du produit est la même.

Afin de déterminer la masse sèche du produit m_s , le produit séché dans le séchoir solaire a été ensuite placé dans une étuve réglée à 105°C durant 24 heures jusqu'à ce qu'il atteigne sa déshydratation maximale.

III-5.3 Modélisation des cinétiques de séchage

Le problème de la modélisation des courbes de séchage solaire consiste en général à élaborer une fonction vérifiant l'équation suivante : $MR = f(t)$.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (\text{Eq. 0-1.})$$

Avec M_t , M_e et M_0 sont les valeurs de la teneur en eau (base sèche) respectivement à l'instant t , à l'infini (équilibre) et à $t=0$.

Les vitesses de séchage ont été calculées en utilisant l'équation suivante :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 0-2.})$$

Avec $M_{t+\Delta t}$ et M_t sont la teneur en eau à l'instant t et la teneur en eau à l'instant $t + \Delta t$ en kg d'eau / kg de matière sèche, respectivement, t est le temps de séchage en minute.

Etant donné la complexité des phénomènes intervenant lors du séchage d'un produit, plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes du séchage. Les équations de ces modèles expriment l'évolution de la teneur en eau réduite MR en fonction du temps. Ces formules contiennent des constantes qui sont ajustées pour faire concorder les résultats théoriques avec les courbes expérimentales de séchage.

Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'investigation expérimental pour lequel elles ont été établies. Le Tableau III-1 regroupe quelques équations empiriques rapportées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage solaire en couche minces d'un produit

Tableau III-1 : Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces [Benseddik, 2018].

N°	Modèles	Équations	Références
01	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential) Model	$MR = \exp(-kt)$	[Lewis, 1921]
02	Page Model	$MR = \exp(-kt^n)$	[Xanthopoulos et al., 2007]
03	Modified Page Model	$MR = \exp(-(kt)^n)$	[Midilli et al., 2002]
04	Henderson and Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	$MR = a \exp(-kt)$	[Zhang et al., 1991]
05	Logarithmic (Asymptotic, Yagcioglu et al.) Model	$MR = a \exp(-kt) + b$	[Yaldiz et al., 2002]
06	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[Midilli et al., 2002]
07	Approximation of Diffusion (Diffusion Approach) Model	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	[Yaldiz et al., 2001]

Le modèle le plus approprié sera à identifier parmi ces sept différents modèles proposés par les auteurs comme indiqué dans le Tableau III.1-1. Des analyses de régression ont été effectuées en utilisant le logiciel « Origin Pro 8.0 ». Le coefficient (R^2) était l'un des principaux critères pour sélectionner le meilleur modèle pour définir les courbes de séchage [Balbay et al., 2012]. En plus de (R^2), les différents paramètres statistiques tels que le khi-carré réduit (χ^2) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ont été utilisés pour déterminer la qualité de l'ajustement. Ces coefficients peuvent être calculés comme suit [Naderinezhad et al., 2016 ; Ruhanian et al., 2016] :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{exp}} - MR_{exp,i})^2} \quad (\text{Eq. 0-3.})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N - n} \quad (\text{Eq. 0-4.})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pré,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (\text{Eq. 0-5.})$$

Avec

$$\overline{MR_{exp}} = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{N}$$

Où MR_{exp} et $MR_{pré}$ sont, respectivement, la teneur en eau issue de l'expérience et prédite par le modèle, N est le nombre d'observations, n est le nombre de constantes du modèle. L'analyse statistique et de corrélations et les méthodes de régression sont largement utilisées dans la modélisation du comportement au cours du séchage de divers produits agricoles. Les modèles de régression linéaire et non linéaire sont essentiels pour établir une relation entre les variables et sont d'une importance primordiale dans le cas où les auteurs n'ont pas établi de relations empiriques.

III-5.4 Détermination de la diffusivité effective de l'eau

Le taux de transfert de masse par diffusion pure est proportionnel au gradient de concentration de la teneur en eau, avec le coefficient de diffusion effective. Ainsi, la détermination de ce dernier coefficient est essentielle pour mieux décrire le transfert de masse en utilisant la loi de Fick similaire, dont l'équation est exprimée par [Vasić et al., 2016]:

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla [D_{eff} \nabla MR] \quad (\text{Eq. 0-6.})$$

En supposant que la valeur de D_{eff} est constante, il est possible d'obtenir :

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 MR \quad (\text{Eq. 0-7.})$$

La tranche de produit séché peut être considérée comme une plaque uniforme soumise à un régime graduel non stationnaire avec une distribution initiale uniforme et des concentrations égales à la surface. En supposant que la matrice est une plaque infinie indéformable (rétractable négligeable ou étendue) avec une répartition uniforme de l'humidité initiale, une résistance externe négligeable et une diffusivité constante, la solution analytique de la deuxième loi de Fick a été développée par Crank [Crank, 1975] :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(- (2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (\text{Eq. 0-8.})$$

Où : D_{eff} est la diffusivité effective (en m^2/s), t est le temps (en s), L est le demi d'épaisseur de la tranche (en m) et n est un entier positif.

Pour un temps de traitement suffisamment long, tous les termes de la séquence suivante ($n \geq 1$) ont été considérés comme négligeables par rapport au premier terme. Donc l'équation (Eq. 0-8) peut être supposée comme suit :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp(-\pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (\text{Eq. 0-9})$$

L'équation (Eq. 0-10) peut être réarrangée et exprimée comme suit:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \pi^2 D_{eff} t / 4L^2 \quad (\text{Eq. 0-10.})$$

Les valeurs de données expérimentales de séchage sont représentées en termes de $\ln(MR)$ en fonction du temps de réhydratation pour différentes températures. La diffusivité effective est calculée comme suit :

$$\text{Slope}(k) = -\pi^2 D_{eff} / 4L^2 \quad (\text{Eq. 0-11.})$$

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre de mémoire, nous allons présenter les résultats de la série de campagnes expérimentales. Ce chapitre comprend deux parties. La première s'intéresse aux comportements thermiques des deux séchoirs solaires de type serre avec et sans système de stockage. L'étude des systèmes de stockage thermique, par chaleur latente et sensible est présentée. La deuxième partie traite le séchage solaire du menthe, betterave et courgette en couche mince qui a été effectuée pour des conditions météorologiques variables.

IV-1 COMPORTEMENT THERMIQUE DES SECHOIRS SOLAIRES DE TYPE SERRE, AVEC ET SANS SYSTEMES DE STOCKAGE THERMIQUE

Afin d'analyser l'influence des systèmes de stockage thermique, par chaleur latente et sensible, nous avons, dans un premier temps, conçu et construit deux séchoirs solaires de type serre à échelle réduite. Les séchoirs solaires de type serre (2×1×0.7 m) sont recouverts d'un film de polyéthylène. La partie inférieure est constituée d'une plaque d'aluminium d'épaisseur 0.8 mm peints en noir mat et isolée de la partie inférieure par une couche de polystyrène d'épaisseur 3 cm. L'air est véhiculé dans les séchoirs solaires de type serre naturellement par l'effet de cheminée ou forcé par l'action d'un ventilateur placé sur la paroi nord. Quatre thermocouples de type K ont été placés dans chaque séchoir solaire de type serre afin de mesurer les température des séchoirs solaires de type serre (à l'entrée, sortie et milieu) ainsi que la température du matériau de stockage thermique (Figure IV.1). Les essais ont été effectués sur la plate-forme expérimentale de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) à Ghardaïa, situé à une latitude de 32,37° Nord et une longitude de 3,77° Ouest en suivant le comportement thermique du capteur sur une journée dans des conditions réelles de fonctionnement.



Figure IV.1: Emplacement des thermocouples à l'intérieur du prototype de séchoir solaire

Les différents essais qui ont été faits sont les suivants :

- ✓ Tester les matériaux de stockage thermique par chaleur sensible par rapport à un fonctionnement de prototype sans et avec stockage.

Les deux cas réalisés sont :

- i) Un lit de roche : comparaison avec le prototype de séchoir solaire de type serre sans système de stockage (Figure IV.3).
- ii) Un lit de sable : comparaison avec le prototype de séchoir solaire de type serre contenant un lit de roche (Figure IV.4).

- ✓ Tester les matériaux de stockage thermique par chaleur latente au moyen d'un matériau à changement de phase.

Les deux cas réalisés sont :

- iii) Un lit de canettes remplies de paraffine wax : comparaison avec le prototype de séchoir solaire de type serre contenant un lit de sable (Figure IV.5).
- iv) Deux rangées superposées de canettes remplies de paraffine wax + un lit de roche : comparaison avec le prototype de séchoir solaire de type serre contenant un lit de sable (Figure IV.6)

La figure IV-2 présente l'évolution horaire des valeurs de rayonnement solaire, de la température ambiante et de l'humidité relative pour les jours de l'expérience dans les mois d'Avril et Mai 2019. Nous avons retenu ces mois étant juste après la fin de la réalisation de prototype de séchoir de type serre.

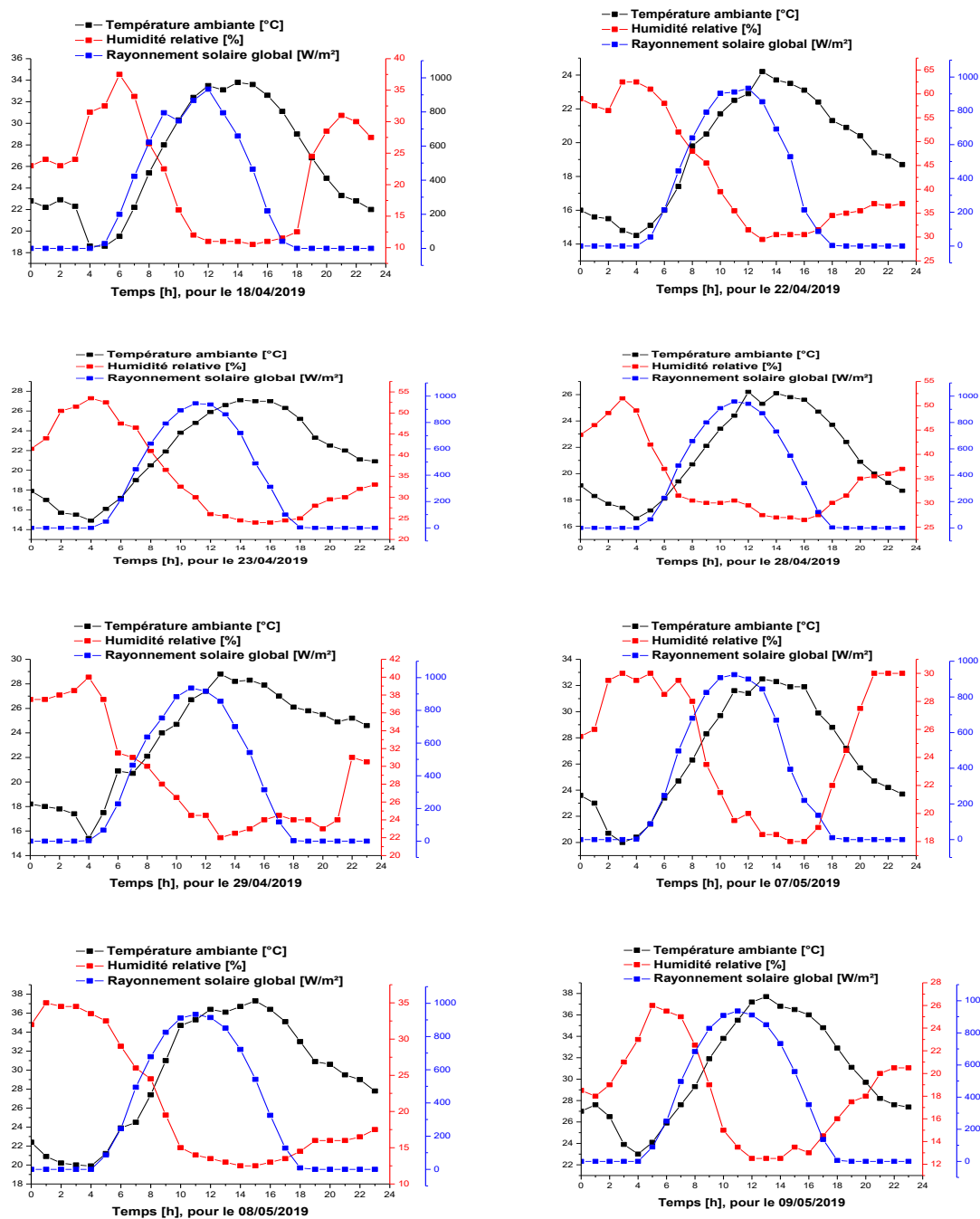


Figure IV.2: Evolution de la température ambiante, humidité relative et rayonnement solaire global pour les jours de l'expérience

Ainsi, nous avons commencé les essais expérimentaux dans un premier temps, dans l'un des séchoirs solaires de type serre, nous avons disposé à sa partie inférieure, un lit de roche qui sert de matériau de stockage (0,8×1,8×0,03 m) rempli de 60 kg de roche. La figure IV.3 montre que l'évolution de la température (a) à l'entrée, (b) à la sortie, (c) à l'air intérieur de la serre et (d) dans la plaque au cours de la journée à l'intérieur des deux séchoirs solaires de type serre sont semblables (même allure de la courbe).



Figure IV.3.1: prototypes de séchoir solaire de type serre avec (gauche) et sans (droite) système de stockage

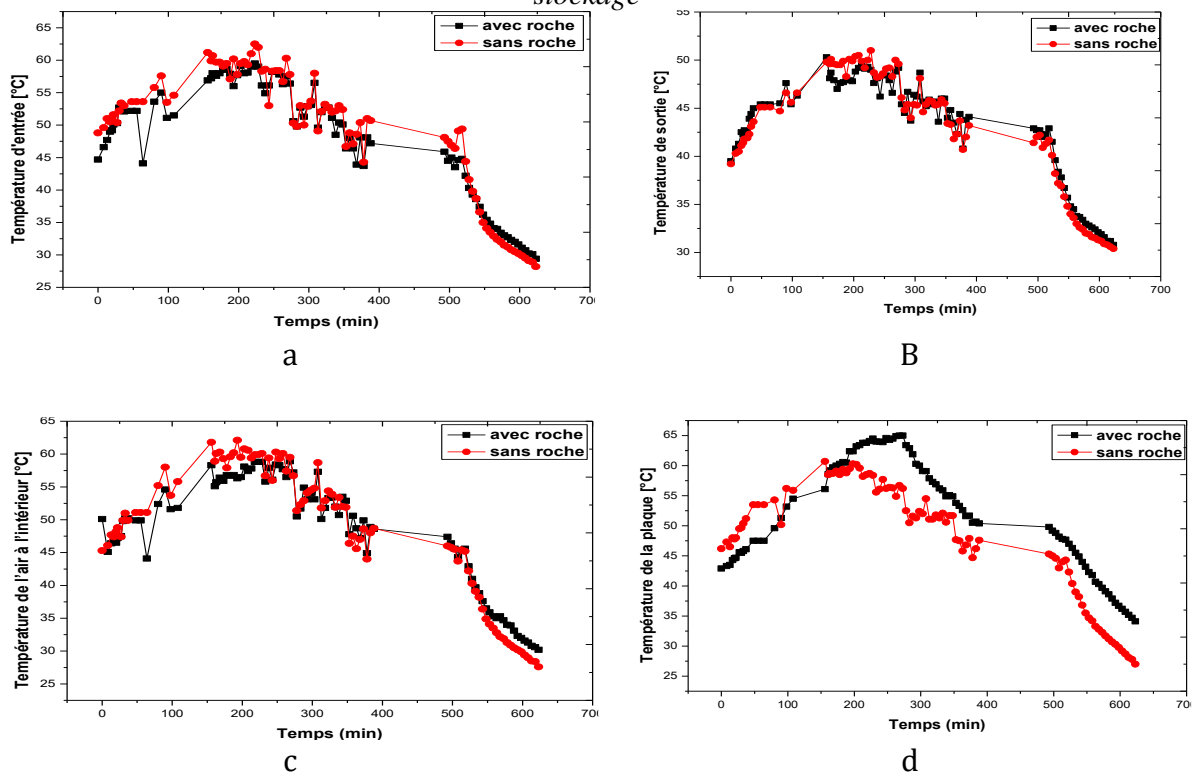


Figure IV.3: Evolution de la température (a) à l'entrée, (b) à la sortie, (c) à l'air intérieur de la serre et (d) dans la plaque du prototype de séchoir solaire de type serre avec et sans le lit de roche pour la journée du 18 avril 2019

Dans un deuxième temps, dans l'un des séchoirs solaires de type serre, nous avons disposé à sa partie inférieure, un réservoir parallélépipédique (0,8×1,8×0,02 m) rempli de 60 kg de sable et dans le deuxième, nous avons disposé sur la plaque d'aluminium, un lit de roche (0,8×1,8×0,03 m) rempli de 60 kg de roche. La figure 3 montre que l'évolution de la température (a) à l'entrée, (b) à la sortie, (c) à l'air intérieur de la serre et (d) dans le matériau

de stockage au cours de la journée à l'intérieur des deux séchoirs solaires de type serre sont semblables (même allure de la courbe).



Figure IV-4.1: prototypes de séchoir solaire de type serre avec lit de sable (gauche) et avec lit de roche (droite)

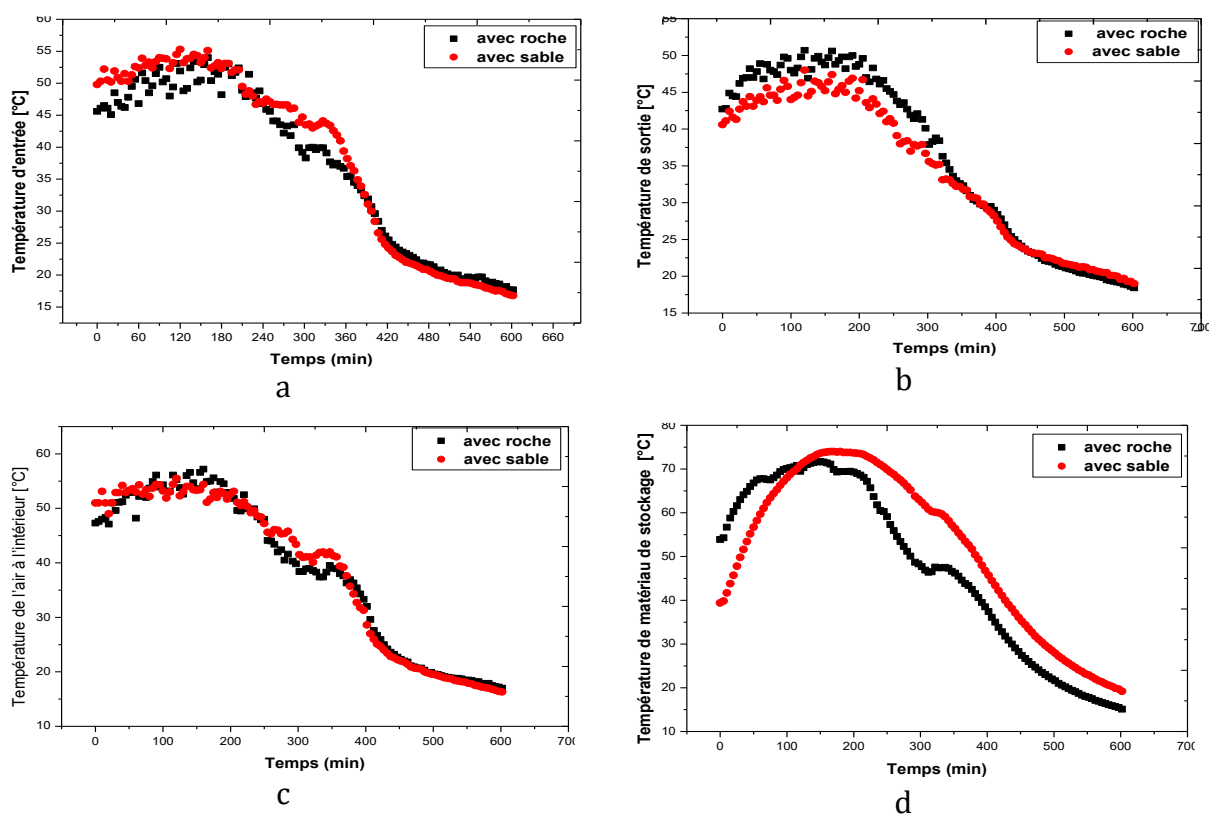


Figure IV-4: Evolution de la température (a) à l'entrée, (b) à la sortie, (c) l'air à l'intérieur de la serre et (d) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de roche et le lit de sable pour la journée du 28 avril 2019

Dans un troisième temps, dans l'un des séchoirs solaires de type serre, nous avons disposé à sa partie inférieure, un réservoir parallélépipédique (0,8×1,8×0,02 m) rempli de 60 kg de sable et dans le deuxième, nous avons disposé sur la plaque d'aluminium, un lit de roche

(0,8×1,8×0,03 m) rempli de 60 kg de roche et 51 canettes de soda en aluminium de même dimension peintes en noir remplies de paraffine wax. Chaque canette de 330 ml en contient 280 g de paraffine, donc un total de 14.280 kg de cire de paraffine dont la température de fusion est 56-58°C.



Figure IV-5.1: prototypes de séchoir solaire de type serre avec paraffine wax (droite) et avec lit sable (gauche)

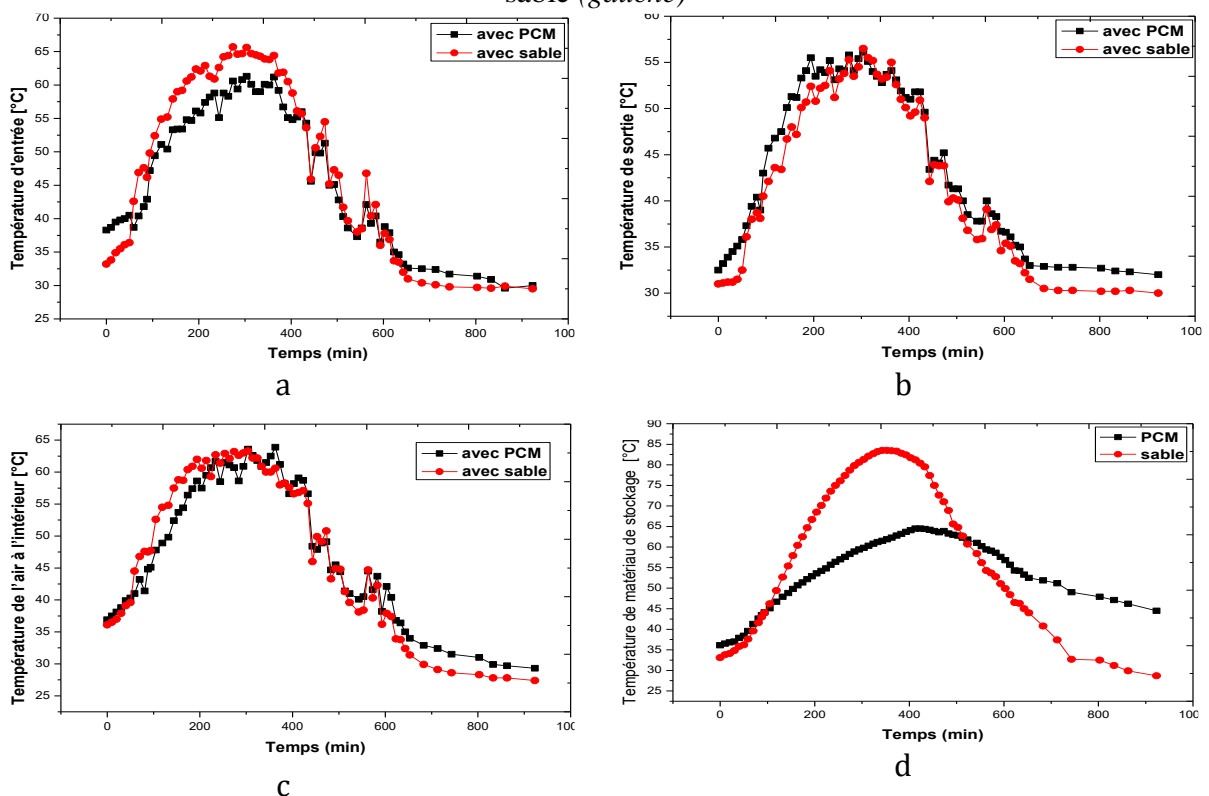


Figure IV.5: Evolution de la température (a) à l'entrée, (b) à la sortie, (c) à l'air intérieur de la serre et (d) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec le lit de roche et le lit de sable pour la journée du 7Mai 2019

Dans un quatrième temps, dans l'un des séchoirs solaires de type serre, nous avons disposé à sa partie inférieure, un réservoir parallélépipédique (0,8×1,8×0,02 m) rempli de 60 kg de sable et dans le deuxième, nous avons disposé sur la plaque d'aluminium, un lit de roche (0,8×1,8×0,03 m) rempli de 60 kg de roche et deux rangées superposées de 51 canettes remplies de paraffine wax (14.280 kg).



Figure IV.6.1: prototypes de séchoir solaire de type serre avec de paraffine wax + un lit de roche (droite) et avec lit sable (gauche)

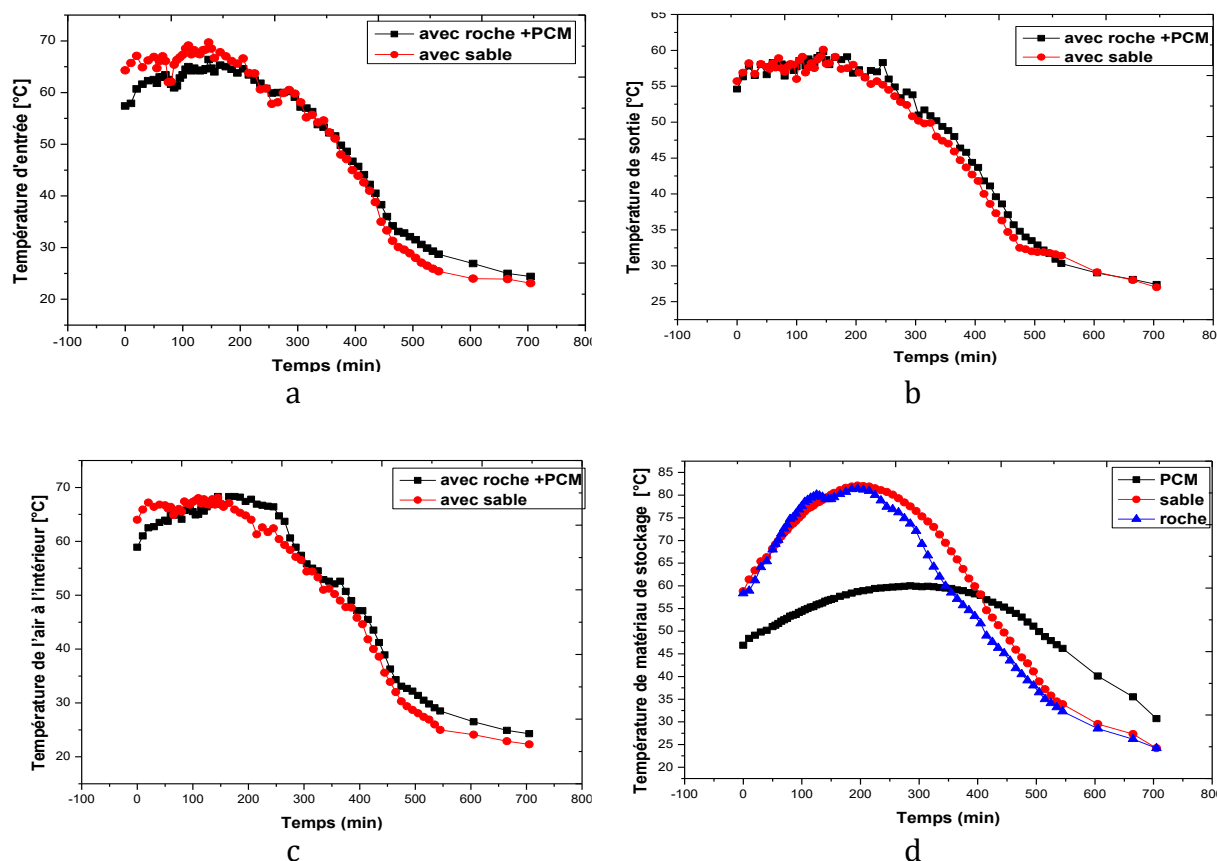


Figure IV.6: Evolution de la température (a) à l'entrée, (b) à la sortie, (c) à l'air intérieur de la serre et (d) dans le matériau de stockage du prototype de séchoir solaire de type serre avec (le lit de roche + PCM) et le lit de sable pour la journée du 8Mai 2019

Au cours de la journée, la température de l'air à l'intérieur de séchoir solaire de type serre atteint une valeur comprise entre 30°C et 70°C pour une température ambiante comprise entre 26°C et 37°C (figure IV.2). La température de l'air à l'intérieur du séchoir solaire de type serre, équipé avec des systèmes de stockage par chaleur sensible (figure 2, 3) et par chaleur latente (figure 4, 5), est inférieure à celle de séchoir solaire de type serre sans système de stockage de chaleur. Cette différence est due au fait qu'une partie de l'énergie solaire est absorbée par le matériau de stockage. En l'absence du système de stockage, l'énergie solaire absorbée par le matériau de stockage engendre une élévation de sa température et par conséquent une augmentation des transferts thermiques convectifs entre le matériau de stockage et l'air, par rayonnement entre la plaque et les autres composants de séchoir solaire de type serre. Ces échanges de chaleur contribuent avec l'effet de serre à l'augmentation de la température de l'air à l'intérieur du séchoir solaire de type serre.

Lorsque le rayonnement solaire est de faible intensité (à la fin de la journée), la température de l'air à l'intérieur de la serre du séchoir solaire de type serre sans matériau de stockage baisse rapidement jusqu'à atteindre la température ambiante. Dans le séchoir solaire de type serre avec le système de stockage de chaleur, la température de l'air baisse au cours du temps de façon lente. Il est à noter qu'en absence de rayonnement solaire, la température de l'air dans le séchoir solaire de type serre avec le matériau de stockage est supérieure à celle de séchoir solaire de type serre sans le matériau de stockage. Ce résultat montre qu'un séchoir solaire de type serre équipée d'un matériau de stockage peut être utilisée comme séchoir de type serre pour accroître la durée journalière de séchage. La présence d'un système de stockage thermique dans un MCP réduit donc la température de l'air de séchoir solaire de type serre à des valeurs encore acceptables pour le séchage des denrées agro-alimentaires.

IV-2 SECHAGE DE LA MENTHE, LA COURGETTE ET LA BETTERAVE

IV-2.1 Courbes de séchage

Les résultats expérimentaux en termes de teneur en eau (courbes de séchage) obtenues dans les conditions météorologiques de la zone semi-aride de Ghardaïa ont été convertis en une forme plus utile, c'est-à-dire l'expression sans dimension de la teneur en eau (MR). Les variations de la teneur en eau avec le temps pour différentes conditions météorologiques sont présentées sur la Figure IV.7(a, b, c, d, e et f). L'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau est représentée dans la Figure IV.8(a, b, c, d, e et f).

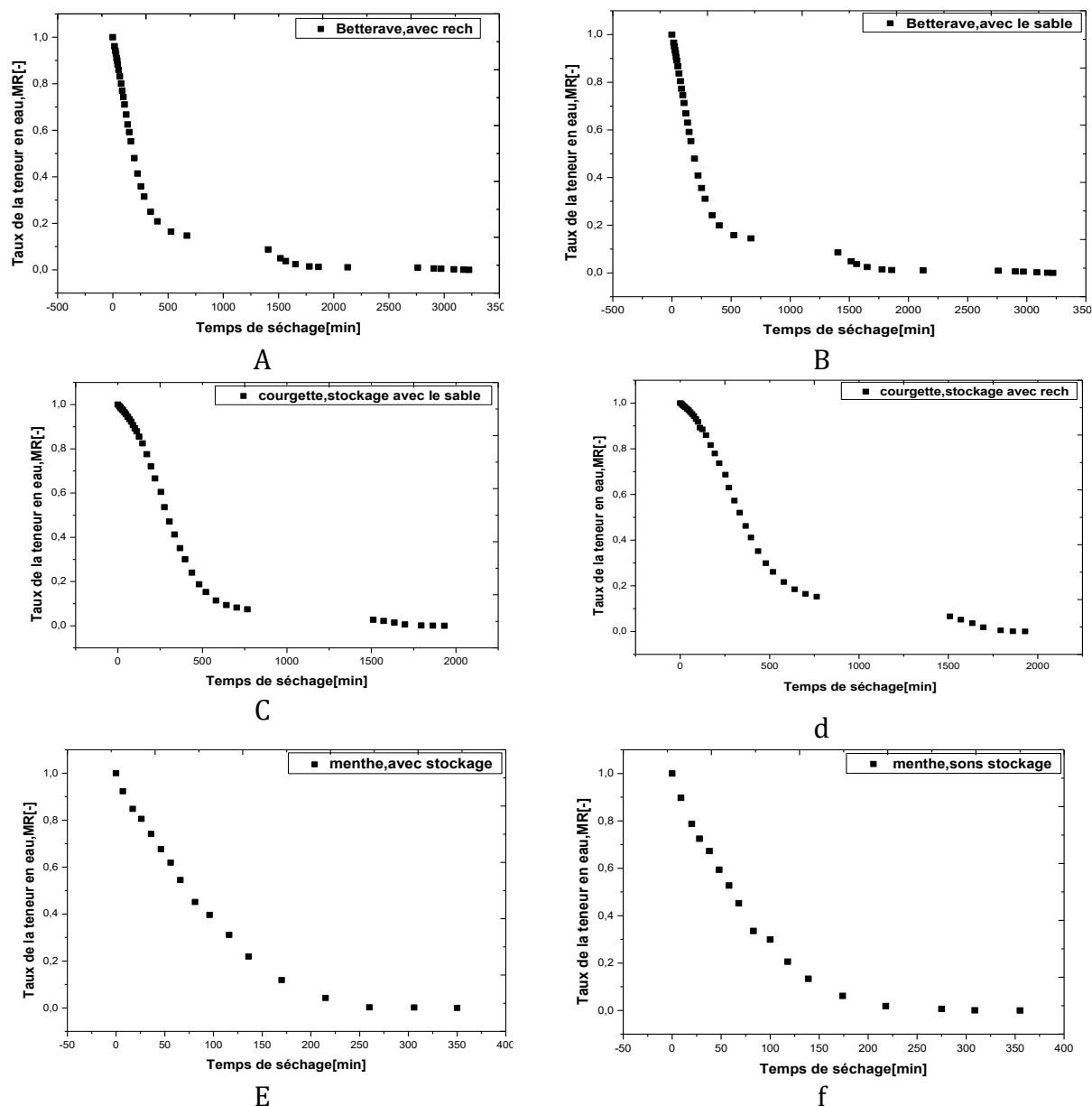


Figure IV-7 : Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage pour différents produits

IV-2.2 Vitesse de séchage

Les variations des vitesses de séchage en fonction de la teneur en humidité pour différents produits et prototypes de séchage solaire sont illustrées aux figures IV-2 (a, b, c, d, e et f). Il est évident que le processus de séchage comprenait deux périodes, une période d'accélération et une période de descente, sans période de séchage à vitesse constante. Au début du processus de séchage, la vitesse de séchage augmente rapidement avec la diminution de la teneur en eau et atteint son maximum. Ensuite, le taux de séchage décroît continuellement avec la teneur en eau, et les opérations de séchage se produisent pendant la période de taux de chute. Il a également été noté l'effet des matériaux de stockage sur le taux de séchage, comme les montrent les figures IV-2 (a, b, c, d, e et f). Ces résultats sont en accord avec les travaux précédents [Xiao-Kang, 2012 ; Seyfi S_ evik, 2013].

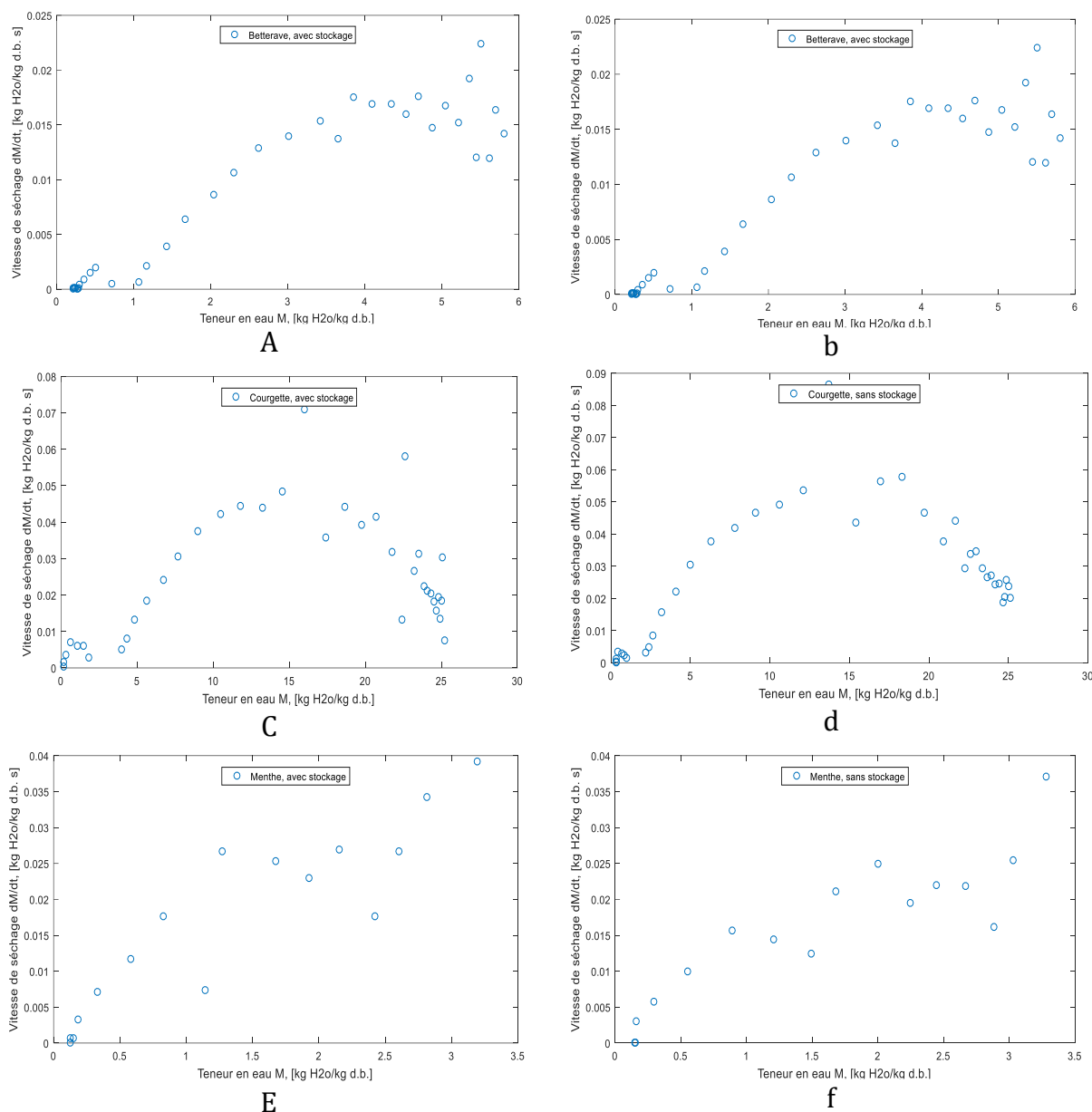


Figure VI-8 : Évolution de la vitesse de séchage versus la teneur en eau pour différents produits

IV-2.3 Différents modèles empiriques du processus de séchage en couche mince

Afin de déterminer le rapport de teneur en eau en fonction du temps de séchage, sept modèles de séchage de couche mince différents dans le Tableau III-1 ont été ajustés aux données expérimentales. A partir des valeurs de l'analyse statistique présentées dans le Tableau IV.1, on suppose que le modèle le mieux adapté est celui qui a le coefficient de détermination R^2 le plus élevé, le plus bas Ki -réduit χ^2 et l'erreur carrée moyenne $RMSE$. Ainsi, les chiffres en gras dans ces tableaux montrent les valeurs des modèles les mieux adaptés. Comme on peut le voir dans le Tableau IV., par rapport à d'autres modèles, le modèle de Midilli-Kucuk a donné

le meilleur accord entre le taux d'humidité expérimental et prévu, car il correspond le mieux aux données expérimentales en premier.

Tableau IV-1: Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la betterave.

Système	N°	Modèles	Constantes des modèles				R^2	RMSE	χ^2
			K	N	A	B			
Sans stockage	01	Newton	0,004				0,993	0,030	9,23E-04
	02	Page	0,002	1,127			0,995	0,027	7,23E-04
	03	Modified Page	0,004	1,120			0,995	0,027	7,23E-04
	04	Henderson and Pabis	0,004		1,039		0,995	0,027	7,00E-04
	05	Logarithmic	0,004		1,023	1,99E-02	0,996	0,024	5,69E-04
	06	Midilli-Kucuk	0,003	1,067	1,023	6,20E-06	0,996	0,025	6,35E-04
	07	Approximation of Diffusion	0,004		1,048	6,23E+03	0,996	0,026	6,67E-04
Avec stockage	01	Newton	0,004				0,994	0,030	8,79E-04
	02	Page Model	0,002	1,116			0,995	0,027	7,18E-04
	03	Modified Page Model	0,004	1,109			0,995	0,027	
	04	Henderson and Pabis	0,004		1,037		0,995	0,026	7,18E-04
	05	Logarithmic	0,004		1,021	2,00E-02	0,996	0,024	6,90E-04
	06	Midilli-Kucuk	0,003	1,058	1,023	6,13E-06	0,996	0,025	5,58E-04
	07	Approximation of Diffusion	0,004		0,952	1,22E-01	0,995	0,028	6,34E-04

Tableau IV-2 : Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la menthe

Système	N°	Modèles	Constantes des modèles				R^2	RMSE	χ^2
			K	N	A	B			
Avec sable	01	Newton	0,000				0,991	0,032	1,03E-03
	02	Page	0,006	1,166			0,997	0,020	3,96E-04
	03	Modified Page	0,012	1,171			0,997	0,020	3,96E-04
	04	Henderson and Pabis	0,013		1,029		0,992	0,031	9,60E-04
	05	Logarithmic	0,012		1,064	-4,69E-02	0,995	0,025	6,29E-04
	06	Midilli-Kucuk	0,005	1,205	0,976	-3,76E-05	0,998	0,019	3,45E-04
	07	Approximation of Diffusion	0,008		28,069	9,82E-01	0,996	0,022	4,81E-04
Avec Roch	01	Newton	0,010				0,986	0,041	1,71E-03
	02	Page Model	0,004	1,225			0,996	0,022	4,84E-04
	03	Modified Page Model	0,010	1,231			0,996	0,022	4,83E-04
	04	Henderson and Pabis	0,011		1,036		0,988	0,040	1,57E-03
	05	Logarithmic	0,009		1,112	-9,59E-02	0,995	0,026	7,01E-04
	06	Midilli-Kucuk	0,003	1,267	0,970	-7,49E-05	0,998	0,017	2,88E-04
	07	Approximation of Diffusion	0,018		-47,84	9,87E-01	0,997	0,021	4,47E-04

Tableau IV-3 : Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage en couche mince pour la courgette

Système	N°	Modèles	Constantes des modèles				R^2	RMSE	χ^2
			K	N	A	B			
Avec sable	01	Newton	0,002				0,960	0,079	6,24E-03
	02	Page	0,000	1,702			0,999	0,015	2,33E-04
	03	Modified Page	0,003	1,702			0,999	0,015	2,33E-04
	04	Henderson and Pabis	0,003		1,101		0,975	0,063	3,93E-03
	05	Logarithmic	0,003		1,130	-3,30E-02	0,977	0,062	3,83E-03
	06	Midilli-Kucuk	0,000	1,756	0,991	7,89E-06	0,999	0,014	1,93E-04
	07	Approximation of Diffusion	0,003		1,114	2,50E+03	0,977	0,061	3,72E-03
Avec Roch	01	Newton	0,002				0,969	0,067	4,42E-03
	02	Page Model	0,000	1,574			0,997	0,022	4,80E-04
	03	Modified Page Model	0,002	1,574			0,997	0,022	4,80E-04
	04	Henderson and Pabis	0,002		1,083		0,982	0,052	2,68E-03
	05	Logarithmic	0,002		1,104	-2,42E-02	0,982	0,052	2,67E-03
	06	Midilli-Kucuk	0,000	1,592	1,000	1,54E-05	0,998	0,019	3,68E-04
	07	Approximation of Diffusion	0,006		-1,687	6,20E-01	0,997	0,020	4,00E-04

IV-2.4 Détermination de la diffusivité effective de l'eau du menthe, courgette et betterave

La diffusivité effective de l'eau est calculé en considérant que l'eau initiale est uniformément distribuée dans toute la masse de l'échantillon, la teneur en eau à la surface atteint instantanément l'équilibre avec les conditions de l'air environnant, le transfert de matière est purement diffusif et se fait d'une manière symétrique par rapport à l'axe de la couche mince des échantillons assimilée à une plaque infinie, la résistance au transfert de masse à la surface

est négligeable par rapport à celle à l'intérieur de l'échantillon et que le coefficient de diffusion est constant et le retrait volumique de l'échantillon est négligeable

La diffusivité effective de l'eau est déterminée au moyen de la solution analytique de la deuxième loi de Fick développée par Crank (1975) dans le cas d'une plaque infinie.

La linéarisation du premier terme de l'équation (Eq. 0-6) permet la détermination de la diffusivité effective au moyen des droites qui représentent $\ln(MR)$ en fonction du temps de séchage (t). D'après l'équation (Eq. 0-6.), la pente des droites présentées dans les figures

IV-9 a, b, c, d, e, f est $-\pi^2 D_{eff}/4L^2$, avec L la demi épaisseur des échantillons de la menthe, courgette et betterave.

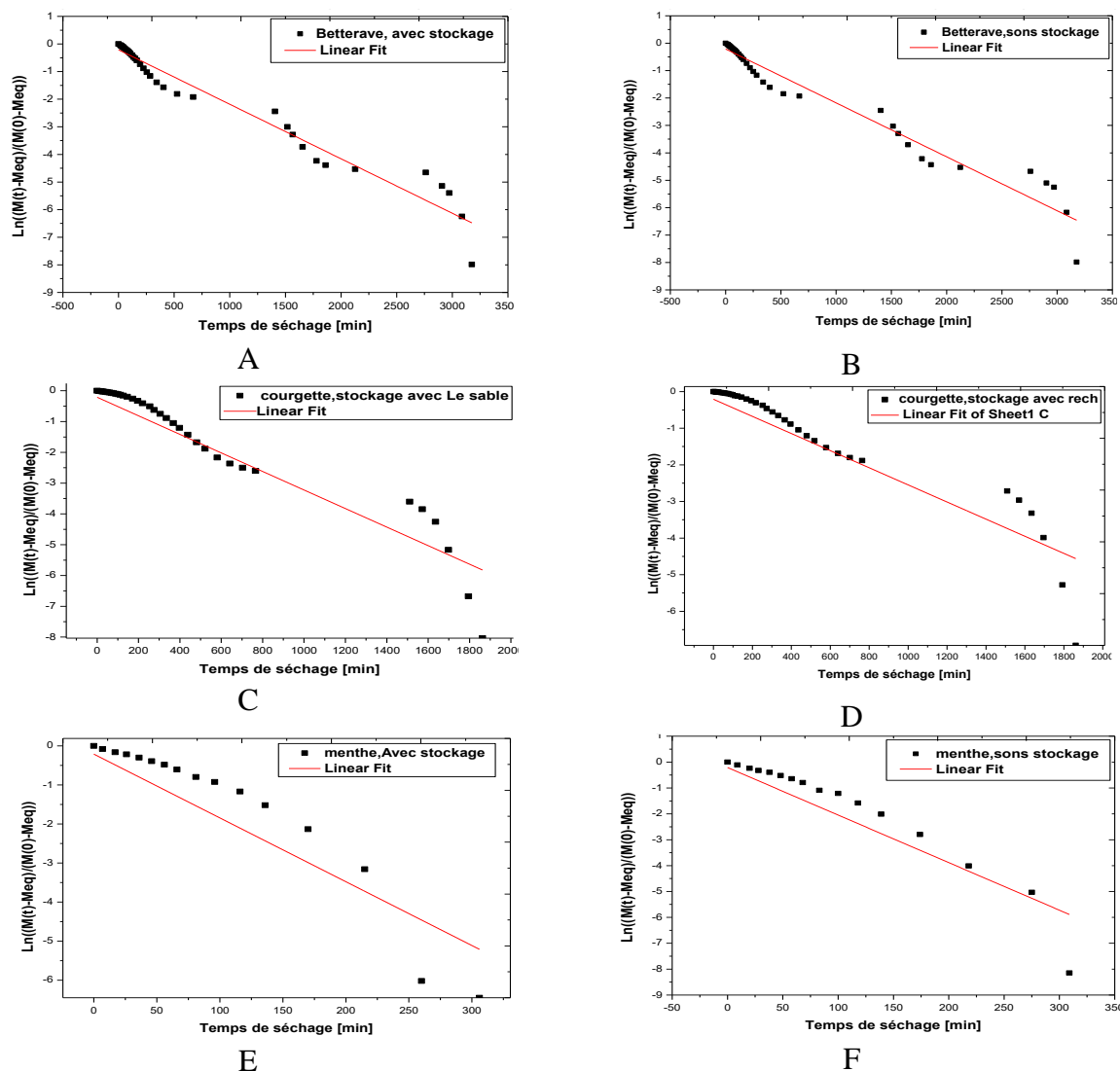


Figure VI-9 : Variation de $\ln(MR)$ en fonction du temps de séchage des échantillons de menthe, courgette et betterave

Généralement, une diffusivité effective est utilisée en raison d'informations limitées sur le mécanisme du mouvement de l'humidité pendant le séchage vu la complexité du processus. Les résultats sont présentés dans les tableaux IV-2.1 ? IV-2.2 et IV-2.3 pour les différents cas examinés. Les diffusivités effectives (D_{eff}) lors du séchage des échantillons de la betterave, de la courgette et de la menthe ont varié de $0.7992211 \times 10^{-09}$ à $1.8613 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$ dans les deux prototypes de séchoir solaire de type serre avec et sans systèmes de stockage. La diffusivité effective de l'humidité dans les tranches de betterave séchées dans le prototype équipé d'un lit de sable comme système de stockage de chaleur sensible ($0.803278 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$) était supérieure à celle des tranches de betterave séchées dans le prototype équipé d'un lit de roche comme système de stockage de chaleur sensible ($0.7992211 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$). Ainsi que la diffusivité effective de l'humidité dans les tranches de courgette séchées dans le prototype équipé de système de stockage de chaleur sensible (roche) et de chaleur latent (paraffine wax) ($1.2211449 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$) était supérieure à celle des tranches de betterave séchées dans le prototype équipé que de système de stockage de chaleur sensible (sable) ($0.9493286 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$). Néanmoins la diffusivité effective de l'humidité dans les feuilles de la menthe séchées dans le prototype équipé de système de stockage de chaleur sensible (roche) ($1.65726 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$) était inférieure à celle des feuilles de la menthe séchées dans le prototype sans système de stockage ($1.8613 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$) à cause de la courte durée de séchage des feuilles de la menthe. C'est principalement parce que pendant la phase de charge (stockage dans le lit de roche), la température à l'intérieur de la serre diminue (*Figure IV.2.c*) et donc la température élevée de la serre sans stockage pourrait accélérer l'évaporation rapide des molécules d'eau présentes dans les feuilles de la menthe, ce qui permettrait d'obtenir une valeur plus élevée de la diffusivité effective.

Tableau IV-4 : Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de betterave en couche mince

	Diffusivité effective moyenne $D_{eff} [m^2 s^{-1}]$	Valeurs statistiques		
		R^2	$RMSE$	χ^2
Avec roche	$0.7992211 \times 10^{-09}$	0,97438	0,45585	0.2078
Avec sable	0.803278×10^{-09}	0,97606	0,44208	0.19545

Tableau IV-5 : Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de courgette en couche mince

	Diffusivité effective moyenne $D_{eff} [m^2s^{-1}]$	Valeurs statistiques		
		R^2	RMSE	χ^2
Avec sable	$1.2211449 \times 10^{-09}$	0,93936	0,59826	0,35791
Avec roche	$0.9493286 \times 10^{-09}$	0,91624	0,55902	0,3125

Tableau IV-6 : Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de menthe en couche mince

	Diffusivité effective moyenne $D_{eff} [m^2s^{-1}]$	Valeurs statistiques		
		R^2	RMSE	χ^2
Sans stockage	1.8613×10^{-09}	0,92322	0,80462	0,64742
Avec stockage	1.65726×10^{-09}	0,90001	0,81002	0,65613

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

Le travail conduit dans le cadre du présent mémoire de master a pour objectif d'étudier l'importance d'intégration des matériaux de stockage thermique sensible et latent sur les performances des séchoirs solaires de type serre.

L'étude bibliographique qui a été réalisée dans ce mémoire nous a permis de découvrir les technologies mises en pratique pour pouvoir exploiter au mieux l'énergie solaire dans le séchage des produits agroalimentaires. Ainsi, nous avons pu exploiter quelques idées pour la réalisation du nouveau prototype de séchoir solaire de type serre.

L'étude expérimentale a été réalisée selon trois volets. Le premier est relatif à la réalisation de deux prototypes de séchoirs solaires de type serre semblables avec et sans système de stockage, afin de tester l'influence du matériau de stockage et toute modification rapportée. Le deuxième volet porte sur l'étude du comportement cinétique des échantillons de la menthe, la betterave et la courgette lors de leur séchage convectif en couche mince dans des conditions météorologiques variables. Le troisième volet traite l'influence du matériau de stockage thermique par chaleur sensible et latente sur le comportement thermique de ce prototype de séchoir solaire de type serre réalisé.

L'étude du séchage convectif des échantillons de la menthe, la betterave et la courgette en couche mince a mis en évidence l'effet positif du stockage thermique. La diffusivité effective de l'eau à partir des échantillons de la menthe, la betterave et la courgette, lors de leur séchage solaire, est décrite par le modèle de diffusion de Fick. La diffusivité effective de l'eau variait entre 0.799×10^{-09} et $0.803 \times 10^{-09} m^2 s^{-1}$ pour la betterave et entre 1.657×10^{-09} et 1.861×10^{-09} pour les feuilles de la menthe dans le cas avec et sans stockage thermique. Aussi, entre 0.949×10^{-09} et 1.221×10^{-09} pour la courgette dans le cas de stockage dans le sable et celui de la roche.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire ne constituent qu'une première étape dans l'étude des matériaux de stockage dans le procédé de séchage solaire des produits agroalimentaires. D'autres travaux de recherche méritent donc d'être réalisés dans le but d'augmenter la durée de stockage thermique. La nature du film plastique, le conditionnement dans des cartons et la disposition de produits objets de séchage sous serre sont nécessaires pour avoir une bonne qualité de produits finis. Enfin, une simulation numérique s'avère aussi très utile pour réussir l'optimisation du procédé de séchage solaire de type serre.

References bibliographies

ABHAT A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar Energy*, Vol. 30, No. 4: 313-332. 1983

Adèle Soupart-caron. 2015, stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. génie des procédés. université grenoble alpes,.

Adrien Lomonaco thèse université de pau et des pays de l'adour école doctorale des sciences exactes et leurs applications, le 22 septembre 2015 (b)

Aghbashlo, M., J. Muller, H. Mobli, A. Madadlou, and S. Rafiee. 2015. Modeling and simulation of deep bed solar greenhouse drying of Chamomile flower. *Drying Technology*, 33(6): 684-695.

Almuhanna, E. A. 2012. Utilization of a solar greenhouse as a solar dryer for drying dates under the climatic conditions of the Eastern Province of Saudi Arabia Part I: Thermal Performance Analysis of a solar dryer. *Journal of Agricultural Science*, 4(3): 237-246.

Aritesty, E., and D. Wulandani. 2014. Performance of the rack type-Greenhouse effect solar dryer for wild ginger (*Curcuma Xanthorrhiza Roxb.*) drying. *Energy Procedia*, 47: 94-100.

Arun, S., K. Velmurugan, and K. V. Kumar. 2014b. Optimization and comparison studies of solar tunnel greenhouse dryer coupled with and without biomass backup heater. *International Journal of Innovative Science and Modern Engineering*, 2(11): 41-47. Sethi

Arun, S., K. Velmurugan, and S. S. Balaji. 2014. Experimental studies on drying characteristics of coconuts in a solar tunnel greenhouse dryer. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 4(5): 51-11.

Arun, S., S. Shankar, and P. Selven. 2014a. Experimental studies on drying characteristics of coconuts in a solar tunnel greenhouse dryer coupled with biomass backup heater. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 4(5): 56-60.

Aumporn Orawan. contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase. université de perpignan via domitia. 7 décembre 2017 (e) (K1)

Ayyappan, S., and K. Mayilsamy. 2010. Experimental investigation on a solar tunnel drier for copra drying. *Journal of Scientific and Research*, 69(8): 635-638

Ayyappan, S., K. Mayilswamy, and V. V. Sreenarayanan. 2015. Performance improvement studies in a solar greenhouse drier using sensible heat storage materials. *Heat Mass Transfer*, 1-9.

B. Cardenas et N. Leon, "High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, no. 0, pp. 724-737, Nov.2013.

Bala, B. K., M. R. A. Mondol, B. K. Biswas, B. L. D. Chawdury, and S. Janjai. 2003. Solar drying of pineapple using solar tunnel drier. *Renewable Energy*, 28(2): 183-190.

Barnwal, P., and G. N. Tiwari. 2008. Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: an experimental study. *Solar Energy*, 82(12): 1131-1144.

Bennamoun L. et Belhamri A., Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. *Journal of Food Engineering*, 59 259-266, 2003

Benseddik Abdellouahab , Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée mémoire de magistère énergétique , Université Abou-Bekr belkaid-Tlemcen , 06 Juillet 2011. (V1)

Benseddik Abdelouahab, Rapport annuel individuel, Unite de recherche appliquee en energies renouvelables Ghardaïa – Algeria 2017 (M1)

Bossart L. Contribution à l'optimisation du séchage en lit fluidisé. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles (ULB). 2006.

BUDDHI D., SAWHNEY R.L. Proceeding of thermal energy storage and energy conversion. School of energy and environmental studies. Devi Ahilya University. Indore, India. February 24-25. 1994

Condori, M., and L. Saravia. 2003. Analytical model for the performance of the tunnel-type greenhouse drier. *Renewable Energy*, 28(3): 467-485.

Condori, M., R. Echazu, and L. Saravia. 2001. Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse drier. *Renewable Energy*, 22(4): 447-460.

Daguenet M (1985) *Les séchoirs solaires: théorie et pratique*. UNESCO, Paris

Daguenet M., *Les séchoirs solaires: théorie et pratique*, Ed. Unesco (1985).

Ekechukwu OV, Norton B (1999) Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energ Convers Manage* 40:615–655

Elicin, A. K., and K. Sacilik. 2005. An experimental study for solar tunnel drying of Apple” *Tarim Bilimleri Dergisi*, 11(2): 207-211.

Elkhadraoui, A., S. Kooli, I. Hamdiand, and A. Farhat. 2015. Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. *Renewable Energy*, 77: 1-8.

Ergunes, G., S. Tarhan, M. Gunes, and Y. Ozkan. 2005. Greenhouse and open sun drying of European Plums (*Prunes domestica L.*). *Journal of Applied Science*, 5: 910-915.

Eric Kenda Nitedem. *Stockage thermique à base d'éco-matériaux locaux pour centrale solaire à concentration : cas du pilote csp4africa. génie des procédés. université de Perpignan ,2017.*
(L)

Fabien Roget. *définition, modélisation et validation expérimentale d'une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale thermodynamique solaire à basse température. autre [cond-mat.other]. université de toulon, 2012.* (f)

Fadhel, A., S. Koli, A. Farhat, and A. Belghith. 2014. Experimental study of the drying of hot red pepper in the open air, under greenhouse and in a solar drier. *International Journal of Renewable Energy and Biofuels*, 2014: 1-14.

Fadhel, A., S. Kooli, A. Farhat, and A. Bellghith. 2005. Study of the solar drying grapes by three different processes. *Desalination*, 185(1): 535-541.

Fudholi A, Sopian K, Ruslan MH, Alghoul MA, Sulaiman MY (2010) Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renew Sust Energ Rev* 14:1–30

GUESSOUM Abdennour HOUTI Mohamed Etude ,Mémoire de Master Académique et amélioration du fonctionnement d'un séchoir solaire direct à convection naturelle , UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA ,2016

Bennamoun L (2011) Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers. *Renew Sust Energ Rev* 15:3371–3379

Hassanain A.A., Simple Solar Drying System for Banana Fruit. *World Journal of Agricultural Sciences* ,5 (4) 446-455,2009.

HOUHOU HATEM , Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires , Mémoire de Magister en génie mécanique, Université de Biskra. (B1)

J. Alario et R. Haslett, "Active heat exchange system development for latent heat thermal energy storage,"1980.

J. Alario, R. Kosson, et R. Haslett, "Active heat exchange system development for latent heat thermal energy storage,"1979.

Jain, D. 2005. Modelling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying application. *Journal of Food Engineering*, 71(2): 170-178.

Jain, D., and G. N. Tiwari. 2004a. Effect of greenhouse on crop under natural and forced convection I: Evaluation of convective mass transfer coefficient. *Energy Conversion and Management*, 45(5): 765-783.

Jain, D., D. Mridula, P. Barnwal, and R. Kumar. 2010. Kinetics of convective heat and mass transfer coefficient of green chilli during open-sun and greenhouse drying. *Desalination and Water Treatment*, 24(1-3): 38-46.

Janjai, S. 2012. A greenhouse type dryer for small-scale dried food industries: development and dissemination. *International Journal of Energy and Environment*, 3(3): 383-398.

Janjai, S., N. Lamlert, P. Intawee, Mahayothee, B. K. Bala, M. Nagle, and J. Muller. 2009. Experimental and simulate performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled logan and banana. *Solar Energy*, 83(9): 1550-1565.

Janjai, S., P. Intawee, J. Kaewkiew, C. Sritus, and V. Khamvongsa. 2011. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic. *Renewable Energy*, 36(3): 1053-1062. Jain

Kadam, D. M., D. Nangare, R. Singh, and S. Kumar. 2011. Low-cost greenhouse technology for drying onion (*Allium Cepa L.*) Slices. *Journal of Food Process Engineering*, 34(1), 67-82.

Kumar, A., and G. N. Tiwari. 2006. Effect of shape and size on convective mass transfer coefficient during greenhouse drying (GHD) of jaggery. *Journal of Food Engineering*, 73(2): 121-134.

Kumar, A., and G. N. Tiwari. 2006a. Thermal modeling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: An experimental validation. *Solar Energy*, 80(9): 1135-1144

Kumar, A., and G. N. Tiwari. 2007. Effect of mass on convective mass transfer coefficient during open sun and greenhouse drying of onion flakes. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1337-1350.

Kumar, M. 2013a. Experimental study on natural convection greenhouse drying of papad. *Journal of Energy in Southern Africa*, 24(4): 37-43.

Kumar, M. 2014. Effect of size on the convective heat and mass transfer coefficients during natural convection greenhouse drying of khoa-a heat desiccated milk product. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014, 1-11.

Kumar, M. 2014a. Effect of size on forced convection greenhouse drying of khoa. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 7: 1157-1167.

Laghzaoui A. et Peerhossaini D., heat storage: solar energy and other applications, Ecole des mines de douai, (2010) (G)

LANE G.A. Phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 27: 135-160. 1992

Lmre L (2006) In: Mujumdar AS (ed) *Solar drying, Handbook of industrial drying*, CRC Press; 2006 .

Manohar, K. R., and P. Chandra. 2000. Drying of agricultural produce in a greenhouse type solar dryer. *International Agricultural Engineering Journal*, 9(3/4): 139-150

Matthieu Martinelli. stockage d'énergie thermique par changement de phase – application aux réseaux de chaleur. thermique [physics.class-ph]. université grenoble alpes, 2016.(c)

Mohanraj M. et Chandrasekar P., Drying of copra in a forced convection solar drier. *Biosystems Engineering*, 99 604-607.,2008

N. H. S. Tay, F. Bruno, et M. Belusko, "Experimental investigation of dynamic melting in a tube-in-tank PCM system", *Applied Energy*, vol. 104, no. 0, pp. 137-148, Apr.2013

N. Madjoudj * et K. Imessad . matériau à changement de phase au service de la bioclimatique .centre de développement des énergies renouvelables, cder b.p. 62, route de l'observatoire, bouzaréah, 16340 algiers, algeria,2016 (a)

NADIA CHALAL , Etude d'un sechoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect ,memoire de Magister en genie climatique , 16-12-2007. (C1)

Nayak, S., A. Kumar, J. Mishra, and G. N. Tiwari. 2011. Drying and testing of Mint (*Mentha piperita*) by a hybrid Photovoltaic-thermal based greenhouse dryer. *Drying Technology*, 29(9): 1002-1009.

Nour-Eddine Benaouda , Développement de séchoirs solaires pour plantes aromatiques et médicinales (PAM) , Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables , Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016 . (d1)

Panwar, N. L. 2014a. Energetic and exergetic analysis of walk-in type solar tunnel dryer for Kasuri Methi (Fenugreek) leaves drying. *International Journal of Exergy*, 14(4):519-531.

Panwar, N. L., N. S. Rathore, and N. Wadhawan. 2014. Thermal modelling and experimental validation of a walk-in type solar tunnel dryer for drying fenugreek leaves (Methi) in Indian climate. *Environmental Modeling & Assessment*, 20(3):211-223.

Phusampao, C., W. Nilnout, and S. Janjai. 2014. Performance of a greenhouse solar dryer for drying Macadamia Nuts. *International Conference and Utility Exhibition 2014 on Green*

Energy for Sustainable Development, Jomtien Palm Beach Hotel and Resort, Pattaya City, Thailand, 19-21 March 2014.

Prakash, O., and A. Kumar. 2012. ANFIS modelling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: an experimental validation. *International Journal of Sustainable Energy*, 33(2): 316-332.

Prakash, O., and A. Kumar. 2013. Application of artificial neural network for the prediction of jaggery mass during drying inside the natural convection greenhouse dryer. *International Journal of Ambient Energy*, 35(4): 186-192.

Rathore, N. S., A. S. Jhala, G. K. Mathur, and J. Vijayavargiya. 2006. Solar drying of Amla: a case study. *Journal Food Science Technology*, 43(6): 639-642.

Rathore, N. S., and N. L. Panwar. 2010. Experimental studies on hemi cylindrical walk-in type solar tunnel dryer for grape drying. *Applied Energy*, 87(8): 2764-2767.

S. Jegadheeswaran et S. D. Pohekar, "Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9, pp. 2225-2244, 2009.

Sacilik, K., R. Keskin, and A. K. Elicin. 2006. Mathematical model of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73(3): 231-238.

Sadodin, S., and T. T. Kashani. 2011. Numerical investigation of a solar greenhouse tunnel drier for drying of copra, arXiv preprint arXiv: 1102.4522 (2011).

Sahdev, R. K., M. Kumar, and A. K. Dhingra. 2016. A review on applications of greenhouse drying and its performance". *Agricultural Engineering International : The CIGR e-journal* 18 (2), 395 – 412

Sangamithra, A., G. J. Swamy, R. S. Prema, R. Priyavarshini, V. Chandrasekar, and S. Sasikala. 2014. An overview of a polyhouse dryer. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40: 902-910

SECAAR , Les sechoirs : une tres grande diversite 06 BP 2037 – Abidjan 06 – Côte d’Ivoire.
(A1)

Serge Ekomy ango. contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment :développement d'un système actif à matériaux à changement de phase. génie des procédés. arts et métiers paristech, 2011. (d)

Sethi, V. P., and S. Arora. 2009. Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall reflection. *Solar Energy*, 83(9): 1472-1484.

Shahi, N. C., J. N. Khan, U. C. Lohani, A. Singh, and A. Kumar. 2011. Development of polyhouse type dryer for Kashmir valley. *Journal of Food Science Technology*, 48(3):290-295.

Souheyla Khaldi. Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2018. (H1)

Stéphane Guichard. contribution à l'étude des parois complexes intégrant des matériaux à changements de phase : modélisation, expérimentation, et évaluation de la performance énergétique globale. matériaux composites et construction. université de la réunion, ,2013. (.)

Thu Ha Nguyen. Etude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux Génie des Procédés. Université de Bretagne Sud, 2015. (U1)

Tiwari, G. N., S. Kumar, and O. Prakash. 2004. Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of jaggery. *Journal of Food Engineering*, 63(2): 219-227

Résumé

L'objectif de ce travail est la réalisation et l'expérimentation de deux séchoirs solaires de type serre. Le premier, sans système de stockage (témoin) et le deuxième sera modifié afin de tester l'influence du matériau de stockage et toute modification rapportée.

Les deux séchoirs solaires de type serre sont réalisés et testés expérimentalement à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) Ghardaïa, Algérie.

L'expérimentation de notre séchoir solaire de type serre se fait dans le but de déterminer les performances thermiques d'un séchoir solaire de type serre équipé d'un système de stockage de chaleur dans des matériaux inertes (sable et roche) et des matériaux à changement de phase (MCPs). Le système de stockage, est composé d'un lit de canettes remplies de cire de paraffine mélangée à 5% de poudre d'aluminium, disposée sur la plaque d'aluminium peinte en noir et d'un lit de sable disposé sous cette plaque. L'effet de l'ajout de 5 % de poudre d'aluminium pour améliorer la conductivité thermique de la cire de paraffine a été analysé expérimentalement. Les résultats expérimentaux ont montré que les matériaux de stockage de chaleur augmentent les performances thermiques du séchoir solaire de type serre.

Le séchage solaire de la menthe, la betterave et la courgette en couche mince a été effectué pour des conditions météorologiques variables. Sept modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage en couche mince de la Menthe, la betterave et la courgette. Les résultats ont montré que le modèle de Midilli et Kucuk était le plus approprié pour décrire le processus de séchage solaire des trois produits séchés dans un séchoir solaire de type serre. Le transfert de masse par diffusion à partir des échantillons de la menthe, betterave et courgette, lors du processus de séchage, est décrit par le modèle diffusif de Fick. La diffusivité effective varie entre $(1.8613 \times 10^{-09}, 0.803278 \times 10^{-09}$ et $1.2211449 \times 10^{-09} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Mots clefs : séchage solaire ; séchoir type serre ; stockage thermique ; MCP ; diffusivité.

Abstract

The objective of this work is the realization and experimentation of two greenhouse type solar dryers. The first, without storage system (control) and the second will be modified to test the influence of storage material and any reported changes.

The two-greenhouse type solar dryers are produced and tested experimentally at the Renewable Energy Applied Research Unit (URAER) Ghardaïa, Algeria.

The experiment of our greenhouse type solar dryer is done with the aim of determining the thermal performances of a greenhouse type solar dryer equipped with a system of heat storage in inert materials (sand and rock) and materials to phase change (MCPs). The storage system, consists of a bed of cans filled with paraffin wax mixed with 5% aluminum powder, arranged on the black painted aluminum plate and a sand bed placed under this plate. The effect of adding 5% aluminum powder to improve the thermal conductivity of paraffin wax was analyzed experimentally. Experimental results have shown that heat storage materials increase the thermal performance of the greenhouse-type solar dryer.

Solar drying of mint, beet and thin layer zucchini was carried out for varying weather conditions. Seven mathematical models were used to describe the thin film drying kinetics of mint, beet and zucchini. The results showed that the Midilli and Kucuk model was the most appropriate for describing the solar drying process of the three dried products in a greenhouse-type solar dryer. Diffusion mass transfer from mint, beet and zucchini samples during the drying process is described by Fick's diffusion model. The effective diffusivity varies between (1.8613×10^{-09}) , $(0.803278 \times 10^{-09})$ and $(1.2211449 \times 10^{-09})$ $m^2.s^{-1}$.

Key words: solar drying; greenhouse type dryer; thermal storage; MCP; diffusivity.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تصميم, إنجاز وتجريب نموذجين متماثلين من المجففات الشمسية المباشرة ليتم استعمال الأول كشاهد بدون نظام تخزين حراري, والثاني لاختبار تأثير مواد التخزين على عمليات التجفيف. وقد تم إنجاز هذا الجهاز وتجريبه في وحدة البحوث التطبيقية للطاقة المتجددة (URAER) ، غرداية ، الجزائر.

تم إجراء تجربة المجفف الشمسي الخاص بنا بهدف تحديد الأداء الحراري لمجفف الطاقة الشمسية من نوع الدفيئة المجهز بنظام تخزين حراري محسوس في الوسط الصلب (الرمال والصخور) و تخزين بالحرارة الكامنة في المواد متغيرة الطور (MCPS) حيث يتكون نظام التخزين من سرير يحتوي على علب مملوءة بشمع البارافين الممزوج بمسحوق الألومنيوم بنسبة 5% ، مرتبة على لوح الألمنيوم المطلي باللون الأسود وسرير رمل يوضع أسفل هذه اللوحة. تم تحليل تأثير إضافة مسحوق الألومنيوم 5% لتحسين التوصيل الحراري لشمع البارافين بشكل تجريبي. وقد أظهرت النتائج التجريبية أن مواد تخزين الحرارة تزيد من الأداء الحراري للمجفف الشمسي المباشر.

تم إجراء التجفيف الشمسي بطبقات رقيقة من النعناع والبنجر والكوسة تحت ظروف الطقس المختلفة. ولقد تم استخدام سبعة نماذج رياضية لوصف حركية تجفيف الطبقات الرقيقة للنعناع والبنجر والكوسة حيث أظهرت النتائج أن نموذج Midilli و Kucuk هو الأنسب لوصف عملية التجفيف الشمسي للمنتجات الثلاثة. كما تم وصف نموذج الانتشار الخاص بـ Fick لتبادل الكتلة (بخار الماء) المنتشر من عينات النعناع والبنجر والكوسة أثناء عملية التجفيف حيث مجال تغير الانتشار الفعال تراوح بين 0.803×10^{-09} و 1.861×10^{-09} و $1.221 \times 10^{-09} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

الكلمات المفتاحية: تجفيف شمسي- تجفيف مباشر- تخزين حراري- مواد متغيرة الطور- معامل انتشار