



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DES ETUDES SUPERIEURES
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMEN



Mémoire

Faculté de Technologie – Département de Génie mécanique

Pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER ENERGETIQUE

Présenté par :

- MANSOURI SIDI MOHAMMED
- LAHRECHE ABDELKHALIQ

Thème :

Etude comparative des procédés de séchage solaire, en termes de cinétique. Applications à la valorisation des produits locaux

Soutenu le 23 juin 2019 Devant le jury composé de Messieurs :

Okacha MIMOUN	Université Abou-Bakr Belkaïd -Tlemcen	Président
Rachid SAIM	Université Abou-Bakr Belkaïd -Tlemcen	Examineur
Brahim ROSTANE	Université Abou-Bakr Belkaïd -Tlemcen	Examineur
Ahmed AZZI	Université Abou-Bakr Belkaïd -Tlemcen	Encadreur
Abdelouahab BENSEDDIK	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – Ghardaïa	Co-Encadreur

Dédicace

Grâce à Dieu tout puissant, on dédie ce modeste travail à tous les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de master plus particulièrement :

- *A nos familles (Mansouri et Lahreche), nos très chers parents, tout notre respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et orientations.*
- *A nos très chers frères, et sœurs.*
- *A toute nos familles.*
- *A tous nos enseignants.*
- *A tous nos amis.*

A tous ceux qui me sont chers et à ceux qui ont contribué à notre formation.

Remerciement

On remercie ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.

On remercie vivement en premier lieu Monsieur Ahmed AZZI, notre directeur de mémoire de master, qui par sa compétence, ses encouragements et son soutien moral a su nous informer, nous conseiller, et nous rendre de plus en plus autonome pour bien réaliser ce travail.

On tient à remercier également notre codirecteur de mémoire de master Monsieur Abdelouahab BENSEDDIK, pour l'honneur qu'il nous a fait en nous confiant ce travail et en acceptant de le codiriger dans le cadre de la convention de notre université et l'unité de recherche de Ghardaïa. On a eu la chance de profiter de son expérience, de ses grandes qualités humaines, et professionnelles.

On exprime nos sincères remerciements à monsieur Okacha MIMOUN, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire de master ainsi qu'à messieurs Rachid SAJM et Brahim ROSTANE Pour avoir bien voulu juger ce travail.

On remercie également nos enseignants du département de génie mécanique, pour leur soutien et d'avoir collaboré à notre formation ainsi à toute l'équipe de URAER de Ghardaïa, ainsi la société Algeria Sun Power de nous avoir donnée leur équipements de mesure, sans oublier mes collègues.

NOMENCLATURE

A_c	: surface de captation du capteur plan à air	m^2
A_w	: activité en eau	-
Cp_b	: Chaleur massique du bois, $Cp_b = 2300$	$J/kg.K$
Cp_e	: Chaleur massique de l'eau dans le produit, $Cp_e = 4180$	$J/kg.K$
Cp_f	: Chaleur massique de l'air, voir l'annexe 2	$J/kg.K$
Cp_{fs}	: Chaleur massique du bois, $Cp_f = 1000$	$J/kg.K$
Cp_{pr}	: Chaleur massique du produit humide	$J/kg.K$
Cp_{prs}	: Chaleur massique du produit sec	$J/kg.K$
Cp_v	: Chaleur massique de la vapeur dans l'air	$J/kg.K$
D_v	: La diffusivité de l'humidité dans l'air de séchage	m^2/s
D_{app}	: diffusivité apparente de l'eau dans le produit	m^2/s
D_H	: diamètre hydraulique	m
e	: épaisseur de la veine d'air mobile	m
e_b	: épaisseur du bois	m
e_{is}	: épaisseur de l'isolant	m
e_l	: épaisseur du lit de particules	m
F'	: coefficient d'efficacité local de transfert air-absorbeur	-
F_R	: coefficient global de transfert air-absorbeur	-
G_s	: débit massique surfacique	$kg/s.m^2$
H	: coefficient de transfert global à travers les parois du séchoir	W/m^2K
h_c	: coefficient de transfert de chaleur par convection	W/m^2K
h_r	: coefficient de transfert de chaleur entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant	W/m^2K
h_{rc}	: coefficient d'échange radiatif entre la paroi extérieur de l'armoire de séchage et la voute céleste	W/m^2K
h_{vfpe}	: coefficient d'échange entre l'air et la paroi extérieur de l'armoire de séchage	W/m^2K
h_{vfpi}	: coefficient d'échange entre l'air et la paroi intérieur de l'armoire de séchage	W/m^2K
h_{vv}	: coefficient d'échange convectif du au vent, entre la face inférieure du capteur et l'air extérieur	W/m^2K
l_c	: largeur du capteur plan à air	m
l_s	: largeur de l'armoire de séchage	m
L_c	: longueur du capteur plan à air	m
L_s	: longueur de l'armoire de séchage	m
L_v	: chaleur latente de vaporisation de l'eau	J/kg
\dot{m}	: débit massique d'air	kg/s
\dot{m}_e	: débit d'eau évaporée du produit	$kg\ eau/s$
m_e	: masse d'eau évaporée	kg
M_h	: masse humide	kg
m_{pr}	: masse du produit continu dans une claie à l'instant t	kg
m_{prs}	: masse sèche du produit continu dans une claie	kg

M_s	: masse sèche	kg
N	: nombre de vitrage	-
N_{pr}	: nombre de produits frappés par l'air asséchant dans une claie	-
P_t	: pression atmosphérique	Pa
$P_{sat}(T_{pr})$: pression de vapeur d'eau saturante à la température T_{pr} de la surface	Pa
$P_V(T_{fs})$: pression partielle de vapeur d'eau dans l'air	Pa
P_{ev}	: puissance d'évaporation	W
P_u	: puissance utile	W
Q_u	: l'énergie utile emportée par le fluide caloporteur	W/m^2
Q_P	: déperditions thermiques par les différents modes de transfert vers le milieu ambiant	W/m^2
Q_{p1}	: quantité de chaleur perdue à l'avant	W/m^2
Q_{p2}	: quantité de chaleur perdue à l'arrière	W/m^2
Q_s	: l'énergie stockée dans les différentes parties du capteur	W/m^2
Q_v	: puissance absorbée par la vitre	W/m^2
r	: Coefficient de corrélation	-
R	: constante des gaz parfaits	$J/mol.K$
R_V	: constante caractéristique de l'eau $R_V = 462$	$J/kg.K$
S_{fpr}	: surface moyenne de contact, entre l'air et le produit	m^2
t	: temps	t
T_1	: Température moyen de l'absorbeur	K
T_2	: Température de la plaque d'aluminium	K
T_a	: température ambiant	K
\dot{T}_a	: température équivalente extérieure	K
T_c	: température équivalente de la voûte céleste	K
T_f	: température moyen de l'air dans la veine d'air mobile du capteur solaire	K
T_{fe}	: température de l'air à l'entrée du capteur solaire	K
T_{fs}	: température de l'air asséchant à la sortie du capteur solaire	K
T_{pe}	: température de la surface extérieure de l'armoire de séchage	K
T_{pi}	: température de la surface intérieure de l'armoire de séchage	K
T_{pr}	: température du produit	K
T_s	: température du solide	K
U_b	: coefficient de perte thermique à l'arrière du capteur	W/m^2K
U_L	: le coefficient global de pertes thermique entre l'absorbeur et l'air extérieur	W/m^2K
U_t	: coefficient de perte thermique à l'avant de l'absorbeur	W/m^2K
V	: volume d'une particule de produit à sécher à l'instant t	m^3
V_{air}	: volume de l'air contenu dans un lit de particule du produit à sécher	m^3
V_l	: volume apparent du lit	m^3
V_r	: volume du produit	m^3
V_f	: vitesse de l'air dans la veine d'air mobile du capteur solaire et vitesse moyenne de l'air à proximité du produit dans le lit de particules	m/s

V_{fs}	: vitesse débitante de l'air asséchant dans le séchoir	m/s
v_v	: vitesse du vent	m/s
W	: tenure en humidité absolue de l'air	$kg\ vap\ eau/kg\ as$
w	: humidité absolue du produit à l'instant t à base humide	$kg\ eau/kg\ Mh$
X	: humidité absolue du produit à l'instant t à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$
X_0	: humidité absolue du produit initiale à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$
X_{eq}	: humidité absolue du produit à l'équilibre à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$
XR	: humidité absolue réduite du produit à l'instant t à base sèche	$kg\ eau/kg\ MS$

Nombres adimensionnels

NU	: nombre de Nusselt
Pr	: nombre de Prandtl
Re	: nombre de Reynolds

Lettre grecques

α_n	: coefficient d'absorptivité	-
τ_v	: coefficient de transmittivité du vitrage	-
β	: angle d'inclinaison du capteur	-
ε	: porosité apparente du lit de particule placée dans une claie du séchoir	-
ε_{pr}	: Porosité du produit	-
ε_n	: émissivité de l'absorbeur	-
ε_v	: émissivité de la vitre	-
σ	: constante de Stephan-Boltzmann	-
σ_f	: amplitude volumique de la source de masse d'air humide	W/m^3
σ_{pr}	: amplitude volumique de la source de masse du produit	W/m^3
σ_T	: amplitude volumique de la source de chaleur d'origine solaire	W/m^3
φ	: quantité sans dimensions	-
φ_g	: flux global reçu par l'isolateur	W/m^2
φ_{fs}	: humidité relative de l'air asséchant	%
η	: rendement thermique du capteur	%
η_t	: rendement thermique du séchoir solaire	%
ρ_b	: masse volumique du bois	kg/m^3
ρ_f	: masse volumique de l'air	kg/m^3
ρ_{pr}	: masse volumique du produit à l'instant t	kg/m^3

λ_b	: les conductivités thermiques du bois	$W/m.K$
λ_f	: conductibilité de l'air à l'instant t	$W/m.K$
λ_{is}	: conductivités thermiques de l'isolant	$W/m.K$
μ_f	: viscosité dynamique de l'air à l'instant t	$kg/m.s$
ν_f	: viscosité cinématique de l'air à l'instant t	m^2/s

Sommaire :

INTRODUCTION GENERALE :	1
CHAPITRE I : GENERALITES ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	4
I.1 Introduction :	4
I.2 Le séchage :	4
I.2.1 Définition :	4
I.2.4 Activité de l'eau et l'isotherme de sorption	7
I.2.4.1 Activité de l'eau dans le produit	7
I.2.4.3 Isothermes de sorption :	8
I.3 Les séchoirs solaires :	9
I.3.1 Séchoir solaire direct :	9
I.3.2 Séchoir solaires indirects :	10
I.3.3 Séchoir solaire mixte :	11
I.4 Le stockage :	12
I.4.1 Stockage thermique	12
I.4.1.1 Stockage sensible :	12
I.4.1.2 Stockage latent :	12
I.4.1.3 Stockage thermochimique	13
I.4.2 Comparaison des systèmes de stockage	14
I.4.3 Types de MCP	16
I.4.4 Critère de sélection d'un bon MCP	18
CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE	21
II.1 Introduction.....	21
II.2 Modélisation du capteur.....	23
II.3 Puissance absorbée	26
II.4 Calcul des pertes thermiques	27
II.4.1 Pertes à l'avant	27
II.4.2 Pertes à l'arrière	28
II.5 Modélisation des coefficients d'échange thermique.....	29
II.5.1 Transfert conductif.....	29
II.5.2 Transfert convectif.....	29
II.5.2.1 Transfert convectif du au vent	29
II.5.2.2 Transfert convectif dans le dans la veine d'air mobile	30
II.5.3 Transfert radiatif	31
II.6 Algorithme de calcul des performances du capteur plan a air	31

CHAPITRE III : MATÉRIELS ET MÉTHODES	37
III.1 Description du prototype expérimental	37
III.2 Intensification de la conductivité thermique du paraffine	38
III.3 Instrumentation des capteurs	39
III. 3.1 Mesure des températures	39
III. 3.2 Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air	39
III. 3.3 Acquisition et traitement des données	40
III. 3.4 Données mesurée par la station météorologique	40
III. 3.5 Mesure de poids.....	41
III. 3.6 Mesure de la teneur en eau	41
III.4 Matières premières	42
III. 4.1 Betterave.....	42
III. 4.2 la courgette	42
III.5 Séchage la courgette et la betterave.....	43
III. 5.1 Conditions de séchage	43
III. 5.2 Courbes de séchage	44
III. 5.3 Modélisation des cinétiques de séchage :	44
III. 5.4 Détermination de la diffusivité effective de l'eau	46
III.5.5 Amélioration du transfert thermique dans les MCP :	47
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION	51
IV.1 Comportement thermiques de prototype de séchoirs solaires indirects sans et muni des chicanes OSF (Offset Strip Fins).....	51
IV.2 Séchage de la courgette et la betterave.....	57
IV.2.1 Courbes de séchage	57
IV.2.2 Vitesse de séchage.....	60
IV.2.3 Différents modèles empiriques du processus de séchage en couche mince	63
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	70
Bibliographies:	71

URAER

L'Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER) de Ghardaïa affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) dispose d'importants atouts lui conférant un rôle de plateforme internationale d'expérimentation et de nœud de communication et d'échange en matière d'énergies renouvelables. Créée comme première Unité de Recherche dans le sud algérien en novembre 2002 et affiliée au CDER, selon ses statuts, l'URAER, qui compte plus de 83 chercheurs et 75 agents de soutien, veille à la maîtrise et au développement de nouvelles technologies et s'attelle à l'innovation, à la recherche et à la formation dans le domaine des énergies renouvelables appliquées aux différents domaines socioéconomiques.

INTRODUCTION GENERALE :

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire L'Algérie dispose d'un important ensoleillement durant la majeure partie de l'année. Elle bénéficie d'une durée annuelle moyenne d'ensoleillement de l'ordre de 2500 heures, et reçoit une énergie solaire moyenne quotidienne de 16.2 à 27 MJ/m² sur le plan horizontal. Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles. [1]

Le séchage solaire des récoltes, fruits et légumes, a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles en plein air du soleil. Il a été employé pour sécher des grains, des viandes et d'autres produits agricoles afin de la consommation. Une grande partie de l'offre du monde en fruits et légumes secs continue à être séchée selon la manière traditionnelle au soleil dans l'ouvert sans aides techniques. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air du soleil. La méthode traditionnelle du séchage souffre de maint problème, parmi ces derniers sont le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, incertitude du temps, coût de main d'œuvre élevé, nécessité des zones vastes, infection par des insectes et autres corps étrangers. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, ou les séchoirs solaires. Un séchoir solaire correctement conçu peut alléger les inconvénients liés au séchage ouvert du soleil, et les qualités du produit sec (final) peuvent être améliorées. [1]

L'augmentation des prix et la pénurie de carburants conduits à des études et recherches profondes sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source énergétique alternative, particulièrement dans les pays en voie de développement. Beaucoup des scientifiques ont étudié la modélisation de séchage solaire des produits agricoles et il y a également simulation des études sur les séchoirs solaires (directs, indirects) et le comportement de divers légumes et fruits, caractérisé par la cinétique de séchage. Pour utiliser librement, l'énergie renouvelable et non polluante comme source principale fournie par le soleil, l'introduction des séchoirs solaires dans les pays en voie de développement peuvent réduire des pertes de récoltes et améliorer sensiblement, la qualité du produit sec comparé aux méthodes traditionnelles de séchage. Ces dernières années, les nombreuses tentatives ont été faites pour développer le séchage solaire principalement pour préserver les produits agricoles et les forêts. Des systèmes de séchage solaire doivent être correctement conçus pour répondre à des exigences de séchage particulier, de récoltes spécifiques, et pour donner l'exécution satisfaisante en ce qui concerne le besoin en énergie. Des caractéristiques du séchage des matériaux particuliers étant séchés et des modèles de simulation sont nécessaires dans la conception, la construction et l'exploitation des

systèmes de séchage. Plusieurs chercheurs ont développé des modèles de simulation pour les systèmes à convection normale et à convection forcée. A cet effet, un système d'équations régissant le fonctionnement du séchoir et les différents coefficients d'échange thermique est établi. Un logiciel (Origin) nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion, des résultats et en plus d'une conclusion générale. Le présent travail comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre, se focalise sur les différents types de séchage et de stockage. Une comparaison des trois types de stockage permet de mieux cerner pourquoi le choix s'est porté sur le stockage de la chaleur sous forme latent. Ensuite, un état de l'art sur les différents types de MCP permet de faire le point sur les matériaux les plus couramment employés. Des critères de sélection sont aussi présentés et discutés.

Le deuxième chapitre est consacré à l'établissement des différentes équations, gouvernant le fonctionnement du système capteur, les expressions des différents coefficients intervenant dans ce système d'équations avec une étude de simulation, et la discrétisation des équations thermiques.

Le troisième chapitre décrit la réalisation d'un séchoir solaire indirect et son fonctionnement ainsi le matériels utilisé et les méthodes de mesure.

Le quatrième chapitre présente les différents résultats obtenus, l'influence de certains paramètres thermo- physiques sur le comportement du séchoir et son rendement, avec leur interprétation.

CHAPITRE I

GENERALITES ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : GENERALITES ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction :

Le soleil fournit en permanence à la Terre de l'énergie avec une densité de puissance de 1361 W.m^2 sous forme de rayonnement. Ce rayonnement électromagnétique qui arrive au sommet de l'atmosphère s'étale sur une large plage de longueur d'onde – de 100 nm à 2500 nm – se répartissant pour moitié dans la plage du visible (400-700 nm) et pour moitié dans la plage de l'infrarouge (700-2500 nm), avec 1 % dans la gamme ultraviolet (<400 nm). L'eau, le dioxyde de carbone et l'oxygène de l'atmosphère en filtrent certaines parties, formant ainsi des bandes d'absorption à certaines longueurs d'onde avant qu'il n'atteigne le sol. Un des principaux problèmes de l'énergie solaire est son intermittence induite par les cycles jour/nuit ou la nébulosité. De plus, l'intensité de l'énergie émise par le soleil varie temporellement à différentes échelles :

- à l'échelle quotidienne, l'irradiation solaire présente une forme gaussienne ;
- à l'échelle annuelle, l'irradiation solaire varie avec les saisons.

Plusieurs études ont été réalisées sur le séchage solaire qui s'est intéressés à la conception des capteurs et séchoirs, des études numériques sur le transfert de chaleur et de masse pour qui ont pour objectif de déterminer le bilan énergétique. [2]

I.2 Le séchage :

I.2.1 Définition :

Le séchage est une opération qui permet d'extraire plus ou moins une partie de l'eau présente dans un matériau. C'est l'un des procédés les plus anciens utilisés pour la conservation des denrées agro-alimentaires.

Le séchage est l'opération ayant pour but d'extraire tout ou une partie de l'eau (solvant) d'un matériau, par évaporation (Nadeau et Puiggali, 1995). L'objectif étant non seulement la conservation des produits, mais également la diminution du poids afin de réduire les coûts de transport et de stockage, ou de donner une présentation particulière au produit.

Pendant le séchage, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire l'eau d'un produit ; il s'agit de l'évaporation et/ ou de l'entraînement (convection). Dans tous les cas lorsqu'un produit est placé dans un environnement gazeux, un phénomène de transfert d'eau s'établit lorsqu'il existe une différence de pression partielle d'eau entre le produit et son environnement. Les dispositifs de séchage permettent d'établir cette condition en exploitant différentes technologies consistant à générer autour du produit des conditions thermodynamiques favorables à l'évaporation. [3]

I.2.2 Historique :

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figues, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois,...), ou pour les textiles (lavage, teinture,...) et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [Vasseur, 2008]. [8]

I.2.3 Différents modes de séchage :

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur [Mujumdar, 1995 ;Van't Land, 1991]. [3]

- **le séchage par conduction** : L'échange de chaleur se fait par contact entre la surface du matériel chauffant et le produit. Il est très utilisé dans l'industrie du textile et de la papeterie. [3]
- **le séchage convectif** : Le produit est séché par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur appelé agent séchant. Il se produit un échange de chaleur et de matière entre le produit et son milieu environnant. Il représente plus de 85% des séchoirs industriels (Mujumbar, 2000) et est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire. [3]
- **le séchage par infrarouge** : Permet un chauffage rapide des produits en couches minces ; la faible pénétration des IR dans le produit fait qualifier ce séchage de chauffage surfacique, la chaleur absorbée diffusant ensuite dans le produit par conduction. Il est très appliqué dans l'industrie des vernis, des peintures et des pellicules photographiques. [3]
- **le séchage par micro-ondes** : Le transfert se fait grâce aux propriétés diélectriques des matériaux. L'eau est très réceptive à ce type de chauffage. Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Il est appliqué aux séchages d'encre, de peinture, des adhésifs et au séchage sous vide des produits pharmaceutiques. [3]
- **Séchage par atomisation** : Un liquide ou une suspension est dispersée sous forme de fines gouttelettes dans un courant d'air chaud Exemples : fabrication du lait en poudre, d'engrais.
- **Le séchage solaire** : Utilise l'énergie des rayonnements solaires pour chauffer le produit et l'air environnant. On peut utiliser des capteurs solaires pour capter et/ou concentrer le rayonnement

solaire, assurant ainsi une augmentation de la température de l'air. Il est de plus en plus utilisé dans le domaine agro-alimentaire. [3]

Tous ces modes de séchage, à l'exception du séchage solaire, engendrent un coût énergétique et des équipements pour la fourniture en énergie qui peuvent rendre leur application difficile, coûteuse et voire impossible dans certaines régions ; surtout dans les pays en Développement (PED). Le séchage solaire est donc le mode le plus adapté pour les PED ce d'autant plus que la plupart de ces pays possèdent un potentiel énergétique solaire assez important (Muhlbaueret *al.* 1993).

- **Séchage à l'air libre :** Le séchage traditionnel ou le séchage à l'air libre est l'une des méthodes de conservation des aliments les plus fréquentes et les plus longues dans un grand nombre de pays en raison de sa simplicité et de l'abondance du rayonnement solaire. Dans ce procédé, l'énergie solaire est utilisée pour chauffer directement les produits qui sont placés sur une plateforme (sol, tapis, béton). Ils sont laissés jusqu'à ce qu'ils soient asséchés jusqu'à atteindre la teneur en humidité souhaitée. 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 réfléchiée vers l'environnement. L'énergie absorbée par la surface des cultures est convertie en énergie thermique et augmente la température de la culture.



Figure I.1 Séchage a l'air libre des herbes aromatiques

I.2.4 Activité de l'eau et l'isotherme de sorption

I.2.4.1 Activité de l'eau dans le produit

L'absorption de la vapeur d'eau par les aliments est importante dans les processus de déshydratation, de conditionnement et de changement de la qualité du produit pendant le stockage.

« L'activité de l'eau du système vapeur-solide est définie comme le rapport de la pression partielle P à la pression de vapeur d'eau P₀, à l'équilibre ». [9]

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}}$$

Avec :

P_{vp}: Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)

P_{vs}: Pression partielle de vapeur saturante (Pa)

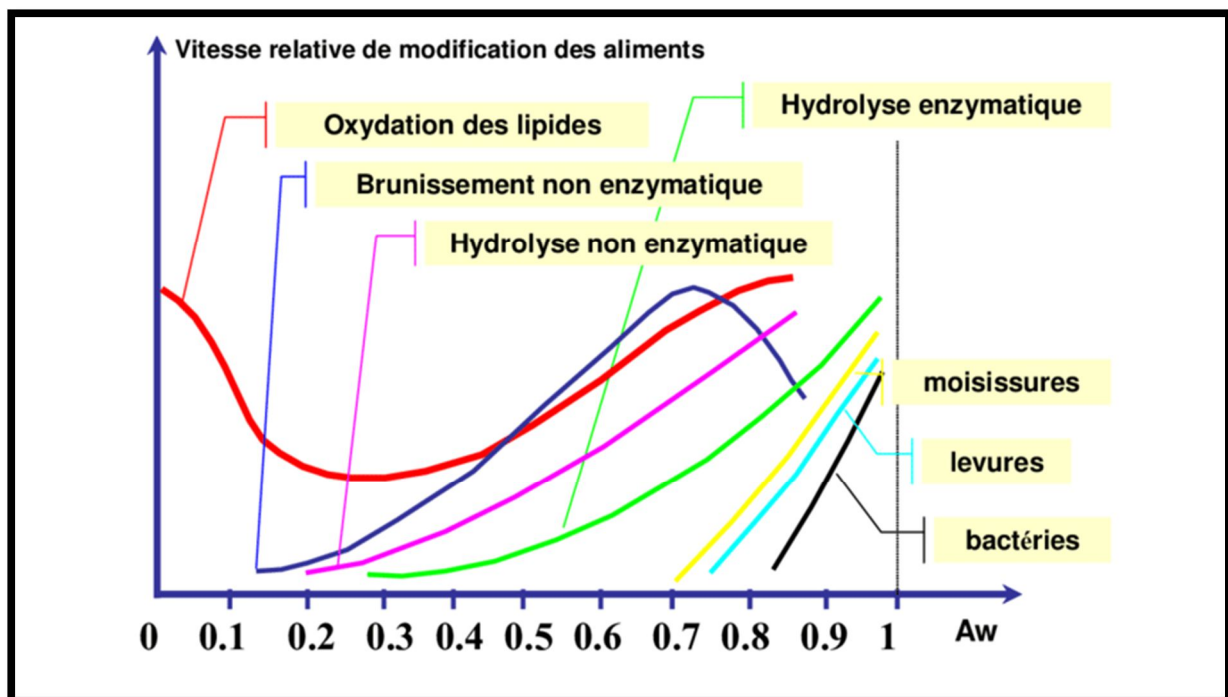


Figure I.2 Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau (Labuza, 1968). [9]

Les conclusions déduites de leurs travaux peuvent se résumer comme suit :

Pour $A_w < 0,9$, la plupart des bactéries nocives cessent de croître dans le produit donné ;

Pour $A_w < 0,8$, beaucoup d'enzymes sont inactives ;

Pour $A_w < 0,75$, la prolifération des bactéries halophiles est arrêtée ;

Pour $0,8 < A_w < 0,7$, les réactions de Maillard (brunissement non enzymatique des sucres en présence de groupements aminés) présentent un maximum.

La zone optimale de conservation des produits, sans additif ni réfrigération, correspond à des valeurs d'activité A_w comprises entre 0,18 et 0,30.

I.2.4.2 Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau hygroscopique où l'humidité absolue est définie par la masse quantité d'eau contenue dans un produit, exprimée en pourcentage de la masse sèche de ce produit. Cette valeur est importante pour tous les produits vendus au poids. Elle est exprimée en pourcentage comme suit :

$$x_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

Avec :

x_{eq} : Teneur en eau d'équilibre (% MS)

M_s : Masse sèche (kg)

M_h : Masse humide (kg).

I.2.4.3 Isothermes de sorption :

L'activité de l'eau A_w dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau X et de sa température.

La courbe représentant pour une température donnée la teneur en eau X d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau A_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HRE est appelée :

- Isothermes d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec
- Isothermes de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

La figure I montre que les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un produit (passage de $A_w = 1$ à $A_w = 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité.

Il y a un phénomène d'hystérésis.

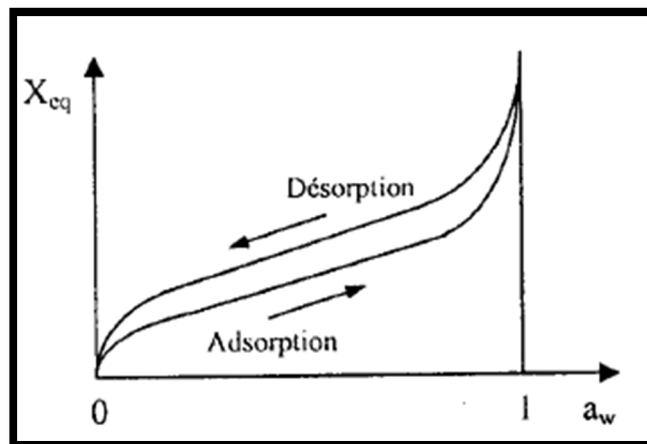


Figure I.3 Isothermes de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis

I.3 Les séchoirs solaires :

Le soleil est toujours considéré comme la source d'énergie renouvelable la plus importante. Chaque seconde, le soleil perd environ $4,5 \times 10^9$ tonnes de ses substances qui se transforment en radiations solaires. Cependant, la terre reçoit une très faible quantité de ces radiations, qui correspond à 18×10^{13} kW. Ce chiffre correspond à 10^4 fois la puissance installée par l'homme, toutes formes confondues. L'énergie que le soleil met à notre disposition est d'environ 4×10^{17} kWh/an. Elle est alors considérée comme une source d'énergie inépuisable mais sous une forme dissipée. Généralement, on a besoin de surfaces importantes pour capter les quantités suffisantes. [4]

Le séchage solaire est souvent différencié du séchage à l'air libre par l'utilisation d'équipements (cabinet de séchage, capteur solaire ...) pour capter le rayonnement solaire afin d'exploiter l'énergie reçu pour le séchage.

Les séchoirs solaires sont généralement classés en deux grandes catégories : les séchoirs passifs (convection naturelle) et les séchoirs actifs (convection forcée). Sous chaque catégorie, trois familles de séchoirs solaires sont identifiées en fonction de la façon dont l'énergie du rayonnement solaire arrive au produit à sécher, à savoir, les séchoirs solaires directs, indirects et mixtes.

Les séchoirs solaires passifs (à convection naturelle) utilisent l'énergie solaire pour chauffer l'air qui a tendance à monter vers le haut pour sortir à travers une cheminée. L'écoulement de l'air est assuré grâce à la différence de la température d'air à travers le séchoir. Dans les séchoirs solaires actifs (ou à convection forcée), le déplacement de l'air est assuré mécaniquement en utilisant des ventilateurs ou des soufflantes pour forcer l'air à circuler à travers le séchoir. Ce type de séchoir nécessite un coût de production et d'investissement relativement plus élevé comparé au cas du séchoir passif. [4]

I.3.1 Séchoir solaire direct :

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 . La chaleur est générée par absorption des radiations solaires incidentes sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage. [7]

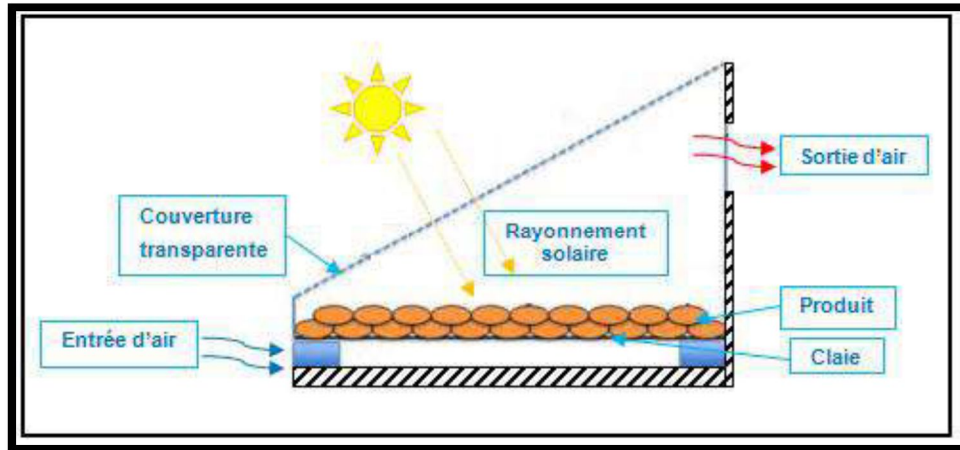


Figure I.4 Le principe d'un échoir solaire direct. [4]

I.3.2 Séchoir solaires 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. 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. [7]

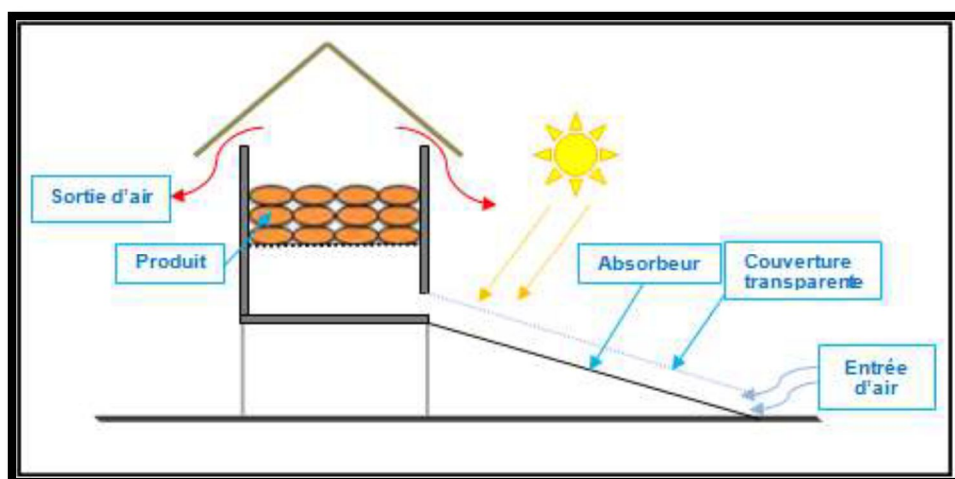


Figure I.5 Le principe d'un échoir solaire indirect. [4]

I.3.3 Séchoir solaire mixte :

Ces séchoirs combinent les principes des deux modes de séchage direct et indirect. Les produits subissent l'action combinée des radiations solaires 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

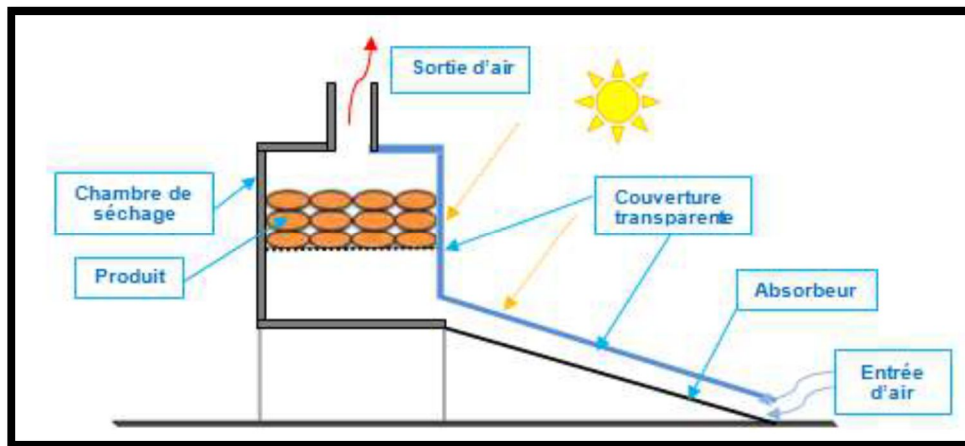


Figure I.6 Le principe d'un séchoir solaire mixte. [4]

Les principaux types de séchoirs à énergie solaire sont illustrés dans la figure suivante :

	Les séchoirs actives	Les séchoirs passifs
Type direct		
Type indirect		
Type mixte		

Figure 1.7 Représentation typique des séchoirs solaires

I.4 Le stockage :

Le stockage de l'énergie consiste à emmagasiner une quantité d'énergie durant laquelle celle-ci est abondante ou moins coûteuse, en un lieu donné afin de la restituer ultérieurement lorsqu'elle est rare ou plus chère

I.4.1 Stockage thermique

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé [5]. 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

I.4.1.1 Stockage sensible :

Le stockage sensible est le moyen le plus commun de réutiliser la chaleur. Dans les enceintes de stockage sensible, la température du moyen de stockage augmente avec la chaleur transférée. Ce stockage, non isotherme accumule une quantité de chaleur proportionnelle à sa masse et à sa capacité calorifique telle que présentée dans l'équation

$$E_{\text{sensible}} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{I.1})$$

I.4.1.2 Stockage latent :

Le stockage de la chaleur latente implique de chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, c'est-à-dire soit de la phase solide à la phase liquide, soit de la phase liquide à la phase gaz ou encore lors de sa transition solide-solide. Lorsque le matériau atteint sa température de changement de phase, il absorbe une quantité de chaleur pour réaliser la transformation, connue sous le nom de chaleur latente de fusion ou de vaporisation selon le cas. A l'inverse, lorsque le matériau liquide ou gaz est refroidi, il retourne à la phase solide ou liquide en restituant sa chaleur latente. La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau et selon l'équation :

$$E_{\text{latent}} = m \cdot \Delta h_{\text{S-L ou L-G}} \quad (\text{I.2})$$

La quantité de chaleur stockée dans un système latent est présentée sur le graphe température – énergie de la Figure ci-dessous

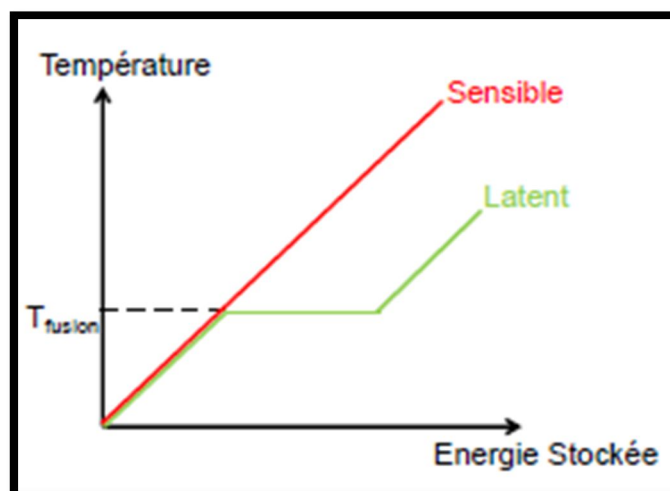


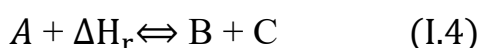
Figure I.8 Graphe température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible [5]

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. La quantité d'énergie stockée peut être exprimée pour le cas de la transition solide-liquide selon l'équation :

$$Q = \int_{T_{initial}}^{T_{fusion}} mC_{p,s}dT + m\Delta h_{s-l} + \int_{T_{fusion}}^{T_{final}} mC_{p,l}dT \quad (I.3)$$

I.4.1.3 Stockage thermochimique

La troisième façon de stocker l'énergie thermique consiste en l'utilisation de l'énergie endothermique des réactions chimiques réversibles. La chaleur de réaction qui est stockée est souvent associée à la dissociation des réactifs chimiques en deux composants. Tout ou une partie de cette chaleur peut être récupérée plus tard lorsque la réaction de synthèse a lieu.



Avec : : Réactif solide ou liquide

ΔH_r : Chaleur de réaction en J/mol

B et C : Produits sous forme gaz, liquide ou solide

I.4.2 Comparaison des systèmes de stockage

Tous les systèmes de stockage sont utilisés selon trois étapes majeures : la charge, le stockage et la décharge. Un grand nombre de moyens de stockage peuvent être identifiés selon leurs propriétés, leur température d'utilisation, le type de stockage souhaité et le domaine d'application envisagé.

Pour sélectionner le type de stockage, il conviendra de regarder pour quelle application il sera mis en œuvre. Par exemple, les systèmes latents et sensibles seront plutôt utilisés comme stockage tampon pour lisser la production ou différer l'utilisation de l'énergie. Alors que les stockages thermochimiques seront plus adaptés à un stockage de long terme ou inter saisonnier qui emmagasinerait la chaleur produite en excès par certaines installations l'été pour la restituer l'hiver.

D'un point de vue économique, l'évaluation nécessite de prendre en compte les coûts d'investissement mais aussi d'exploitation, de maintenance et de recyclage. Ces coûts varient souvent en fonction du volume de stockage. La densité énergétique, c'est-à-dire la quantité d'énergie stockable par unité de volume, est ainsi un critère primordial. Pour le stockage sensible, c'est le produit de la capacité calorifique, du gradient de température ainsi que de la masse volumique qui permet de calculer cette grandeur. Pour comparer les matériaux, un gradient de 100 °C a volontairement été utilisé, à part pour l'eau qui ne peut pas être utilisée sur une plage de 100 °C. Pour le stockage latent, la chaleur latente est multipliée par la masse volumique. Pour le stockage thermochimique, enfin, la chaleur de réaction divisée par la masse molaire de produit permet de calculer la densité énergétique.

Les densités énergétiques obtenues mais aussi les températures de fonctionnement de chaque système de stockage thermique sont présentées pour quelques matériaux dans le Tableau suivant :

Stockage sensible	Température (°C)		Capacité calorifique	Masse volumique	Densité énergétique
	Froid	Chaud	ρ (kJ/kg.K)	ρ (kg/ m ³)	(kWht/m ³)
Sable – roche – huile minérale	200	300	1.3	1700	61
Béton renforcé	200	300	0.85	2200	52
Huile minérale	200	300	2.6	770	56
Eau	20	80	4.18	1000	70
Nitrates de sels fondus	250	350	1.5	1825	76
Stockage latent	Température de fusion		Chaleur latente	Masse volumique	Densité énergétique
	T_{fusion} (°C)		Δh_{s-L} (kJ/kg)	ρ (kg/ m ³)	(kWht/m ³)
Acide maléique	131- 140		235	1590	103
Xylitol	95		232	1500	97
Erythritol	118		340	1450	137
MgCl ₂ .6H ₂ O	117		165	1569	72
NaNO ₃	307		172	2260	108
Stockage thermochimique	Température de réaction (°C)		Enthalpie de réaction		Densité énergétique
	Charge	Décharge	ΔH_r (kJ/mol)		(kWht/m ³)
MgH ₂ + $\Delta H_r \leftrightarrow$ Mg + H ₂	380 à 1 bar	230 à 4 bar	-75		430
CaCO ₃ + $\Delta H_r \leftrightarrow$ CaO + CO ₂	700	650	-178		110
MgH ₂ + $\Delta H_r \leftrightarrow$ Mg + H ₂	450	25-400	-94.6 (charge) 64.8 (décharge)		300

Tableau I.1 Comparaison des différents types de stockage en fonction de leur densité énergétique [5]

I.4.3 Types de MCP

En 1983, Abhat a donné une classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la Figure

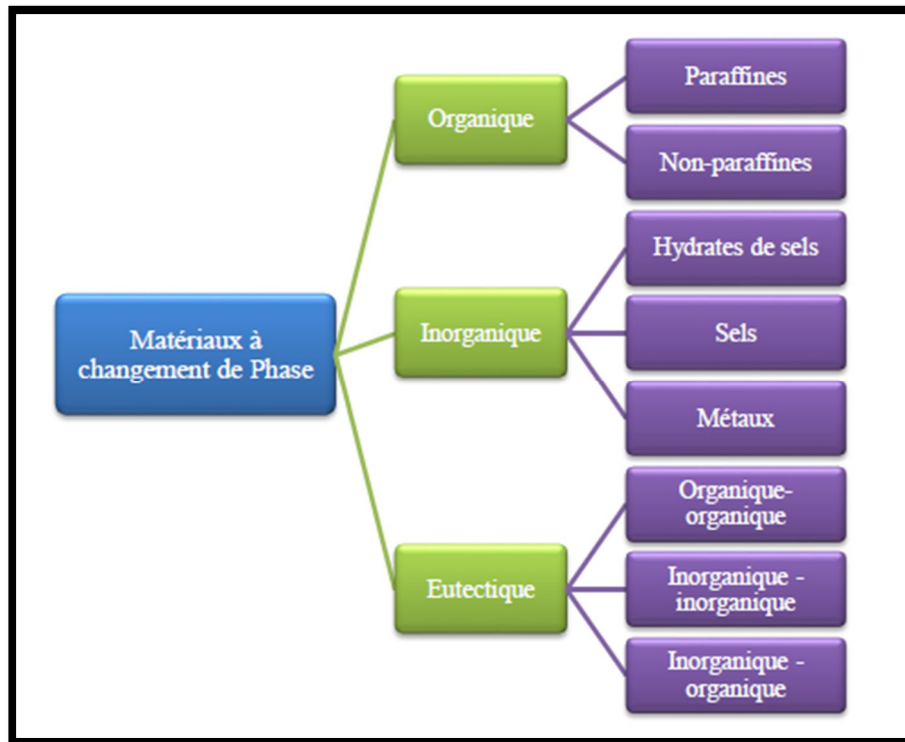


Figure I.9. Classification des MCP proposée par Abhat [5]

MCP organique

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 leur faibles conductivités et chaleur latente de fusion et ils sont inflammables [Sharma et al. 2009 ; Tyagi et Buddhi, 2007]. Les MCP organiques comportent deux types : paraffines et non-paraffines [Sharma et al. 2009]. [6]

- **Paraffine** : Les paraffines normales du type C_nH_{2n+2} sont une famille d'hydrocarbures saturés dont les propriétés physiques sont assez semblables. Les paraffines possédant un nombre d'atomes de carbone situé entre 5 et 15 sont caractérisés de liquides, et les autres de solides cireux. [10]

- **Non paraffine** : Il s'agit de la plus grande famille de matériaux à changement de phase dont les propriétés sont très différentes. Elles sont considérées comme la plus grande catégorie pouvant servir de stockage de l'énergie thermique. Des études ont été menées par [Abhat, 1978], [Buddhi & Sawhney, 1994], [Lane, 1983, 1989] pour identifier les candidats potentiels pour le stockage de l'énergie thermique. Ces recherches portaient principalement sur un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcools et de glycols. Elles ont conclu que ces matières sont extrêmement inflammables et ne doivent en aucun cas être exposées à une forte température, à des flammes ou à des agents oxydants. [11]

MCP inorganique :

La température de fusion de ces matériaux est comprise entre -100°C et $+1000^{\circ}\text{C}$. Les plus utilisés sont : les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), les sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), les mélanges de sels, les mélanges de métaux (température de fusion supérieure à 150°C). Ils ont beaucoup d'avantages : ils ont une chaleur latente de fusion importante, une conductivité thermique élevée, ne sont pas inflammables et ont un coût abordable. Parmi leurs inconvénients, citons la corrosion, la ségrégation et la surfusion [Sharma 2009, Tyagi et Buddhi, 2007]. [6]

- **Sels hydratés** : Ils peuvent être considérés comme des alliages de sels inorganiques et de l'eau formant un solide cristallin. Les sels hydratés sont le groupe qui a été largement étudié pour leurs utilisations en tant que MCP dans les systèmes thermiques de stockage de la chaleur car ils présentent de nombreux avantages
- **Les sels** : sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels purs et les mélanges de sels non eutectiques présentent généralement un large spectre de températures de fusion et une chaleur latente variant selon leur type. Les fluorures et les chlorures présentent ainsi une chaleur latente plus élevée que les nitrates ou les sulfates
- **Les métaux** : Il s'agit essentiellement des métaux à fusions basses et des métaux eutectiques. Cette catégorie n'a pour l'instant pas été envisagée pour la technologie de MCP en raison de leur poids. Leurs caractéristiques principales sont : une forte chaleur de fusion par unité de poids, une faible chaleur de fusion par unité de volume, une conductivité thermique élevée, une chaleur spécifique faible et une pression en vapeur relativement élevée.

MCP eutectiques :

Les MCP eutectiques sont composés de plusieurs MCP purs, en générale, de mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique -inorganique).

Ils ont deux principaux avantages : leur point de fusion est similaire à celui d'une substance pure et leurs chaleurs latentes de fusion sont supérieures à celle des composés organiques purs. Cependant, ils sont peu utilisés dans le domaine industriel et il y a peu de données sur leurs propriétés thermiques [Sharma 2009 ; Tyagi et Buddhi, 2007].

	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>Organiques</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ disponibles dans une large gamme de température ➤ pas de ségrégation ➤ chimiquement stables ➤ haute énergie de fusion ➤ non corrosifs ➤ recyclables 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ faible conductivité thermique ➤ chaleur latente faible ➤ non inflammables ➤ chaleur spécifique massique faible ➤ fort cout ➤ masse faible
<i>Inorganiques</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ chaleur latente élevée ➤ disponibles en grande quantité ➤ faible cout ➤ point de fusion net ➤ inflammables ➤ forte conductivité thermique ➤ chaleur spécifique massique élevée 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ phénomène de surfusion ➤ agent de nucléation étranger indispensable ➤ corrosifs ➤ vieillissement rapide
<i>Eutectiques</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ point de fusion net similaire a une substance pure ➤ chaleur latente légèrement supérieure à celle des composes organiques 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ peu de données disponibles sur les propriétés de ces matériaux ➤ peu utilises au niveau des applications industrielles

Table I.2 Avantages et inconvénients des différentes catégories de MCP [6]

I.4.4 Critère de sélection d'un bon MCP

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans une gamme de température compris entre 0 et 120 °C. Cependant, ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage de chaleur que lorsque leurs propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques respectent certains critères. [Abhat, 1981 et Duffie, 2006]. [5]

La sélection d'un MCP nécessite de se poser les bonnes questions quant à l'application et l'implantation du système de stockage futur. Une réflexion et analyse autour de la densité déstockage souhaitée, des puissances de charge et de décharge mais aussi des critères économiques et environnementaux sont à entreprendre pour sélectionner le meilleur MCP. Plusieurs méthodes ont été

proposées par différents auteurs afin de choisir au mieux un matériau pour une application spécifique. Cependant, il n'existe aucune méthode privilégiée.

a) Critères thermodynamiques : Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température adaptée au besoin donné
- Une chaleur latente par unité de masse élevée,
- Une chaleur spécifique élevée,
- Une fusion congruente,
- Une faible augmentation de son volume pendant la phase de transition.

La température atteinte par un MCP lors de l'apport de chaleur doit être adaptée à la transition solide-liquide du MCP. En outre, la chaleur latente doit être la plus élevée possible pour minimiser les dimensions du système de stockage de chaleur.

b) Critères cinétiques :

- Le matériau à changement de phase ne doit pas présenter de surfusion. Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification.

c) Critères chimiques :

- Stabilité chimique au cours du temps,
- Aucune action corrosive sur les matériaux du réservoir de stockage,
- Le matériau doit être non inflammable et non explosif.

d) Critères économiques :

- Disponible en grande quantité,
- Faible coût.

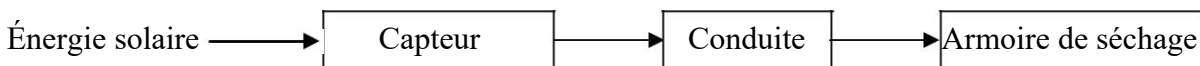
CHAPITRE II

MODELISATION MATHEMATIQUE DU CAPTEUR

CHAPITRE II : MODELISATION MATHEMATIQUE

II.1 Introduction

Il s'agit de « séchage solaire » en utilisant comme source thermique l'énergie solaire. Pour que cette énergie solaire soit utilisée, il est nécessaire qu'elle soit transformée et transmise. Les entités indispensables sont des capteurs plans à air (unité de chauffage) et une armoire de séchage (unité de séchage) reliés par des conduites.



L'analyse de l'état de l'art des capteurs solaires fait apparaître une série de modifications visant l'amélioration du rendement du système. Ces améliorations concernent l'utilisation de matériaux spéciaux, des arrangements des composants principaux ainsi que la réduction des déperditions thermiques. Plusieurs types de capteurs à air ont été construits et testés [Biondi, et al. ,1988] [Fohr, et al. ,1987] [Ahmed-Zaid, 1999] [Pawar, et al. ,1993] [Akpinar, et al. ,2009]...etc. Ils se différencient par leur configuration, dans la nature de l'écoulement de l'air caloporteur, le type de vitrage utilisé, et par l'introduction des chicanes dans la veine d'air mobile entre l'isolant et l'absorbeur. [8]

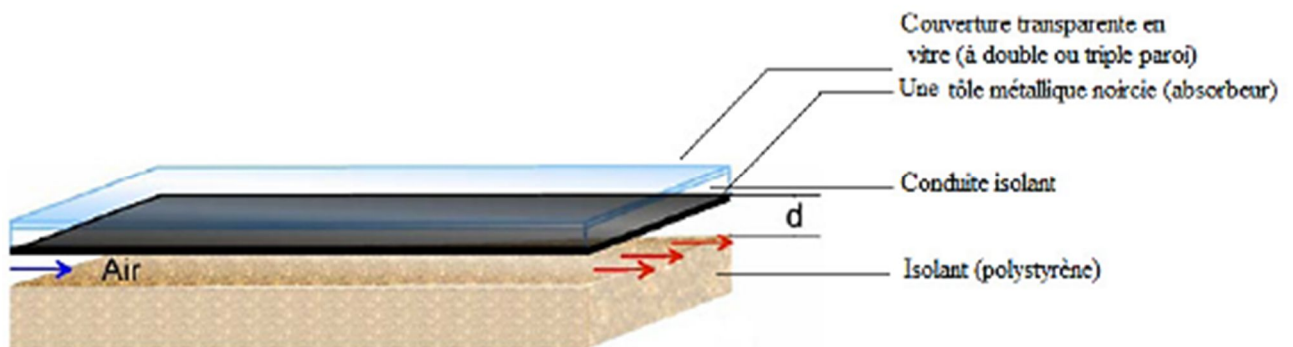


Figure II.1 : Schéma de base du capteur[Luna-sanchez, 2008]. [8]

Le capteur à air construit et expérimenté :

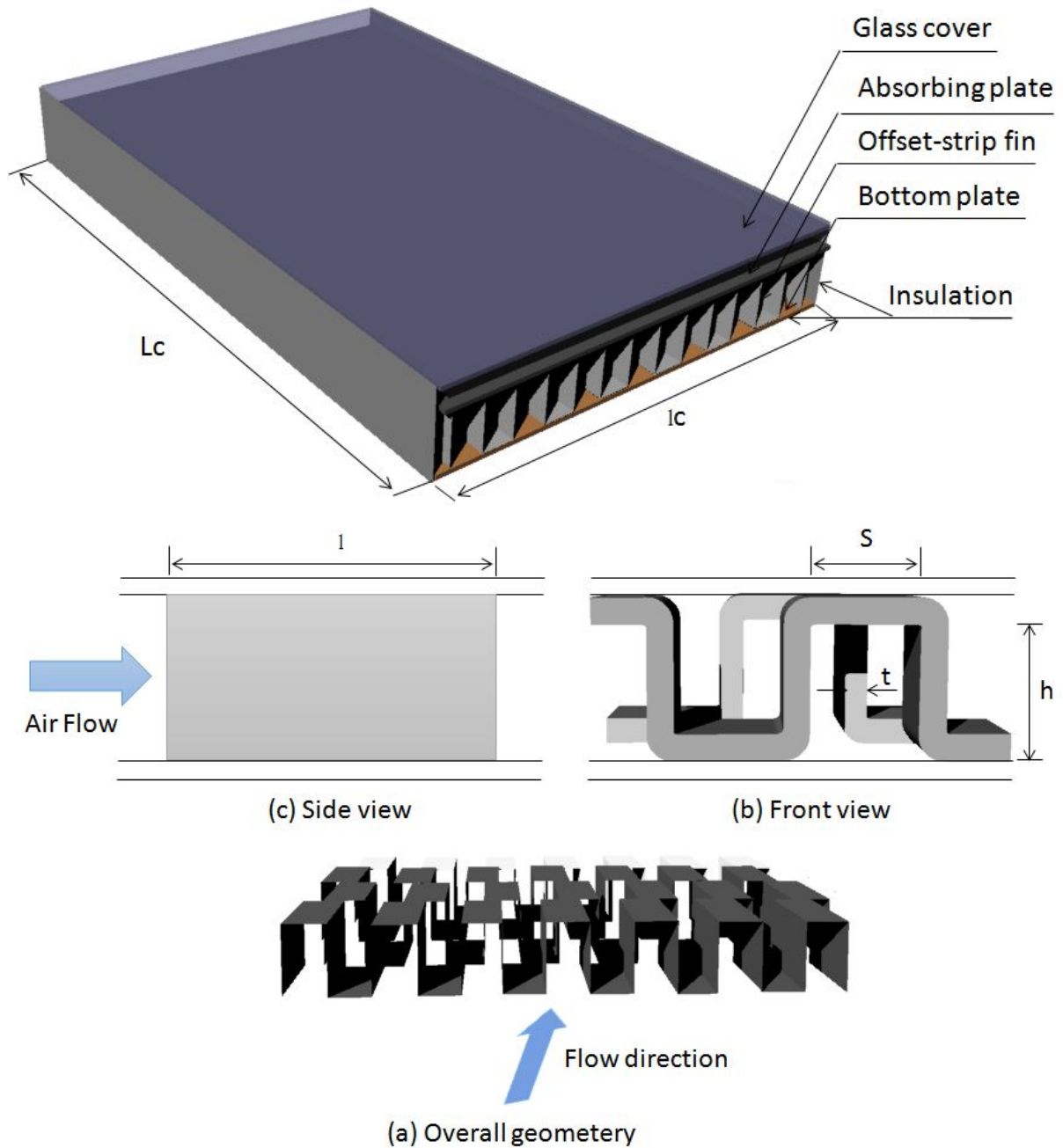


Figure II.2. Schéma du capteur muni d'ailettes OSF (Offset Strip Fins) [Benseddik, 2018]. [8]

II.2 Modélisation du capteur

On peut exprimer, de façon générale, le bilan thermique d'un capteur solaire par l'équation suivante rapportée à l'unité de surface :

$$Q_g = Q_u + Q_P + Q_S \quad (II.1)$$

Ce bilan se résume ainsi :

Φ_g : Le flux global reçu par le capteur représente la somme de

Q_u : Le flux emporté par le fluide caloporteur,

Q_P : Les déperditions thermiques par les différents modes de transfert vers le milieu ambiant

Q_S : Le flux stockée dans les différentes parties de capteur.

Dans le cas du régime thermique permanent et pour les capteurs à air, la quantité d'énergie stockée Q_S dans les différentes parties de capteur est négligeable, ce qui conduit à :

$$Q_g = Q_u + Q_P \quad (II.2)$$

L'énergie utile Q_u qui est relié aux températures T_{fe} et T_{fs} , est donné par l'expression :

$$T_{fs} = T_{fe} + \frac{Q_u A_c}{\dot{m} C_p} \quad (II.3)$$

Divers démarches existent [Daguenet, 1985]:

- Modélisation " pas à pas " qui rend compte de l'évolution des températures de tous les éléments du capteur dans le temps et l'espace.
- Modélisation globale.

Cette deuxième méthode est celle suivi par les chercheurs : Hottel, Whillier et Bliss. Elle suppose que le régime est permanent et que les éléments du capteur se trouve chacun à une température moyenne constante; elle néglige donc les effets de l'inertie thermique, les données météorologiques proviennent de fichiers ou de formules approchées. Notre choix s'est porté sur cette méthode pour la modélisation et l'étude des performances de capteur car la variation de la température à l'entrée du capteur est faible et les performances que nous déterminons sont instantanées.

L'équation de la chaleur dans le fluide caloporteur s'écrit :

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + \vec{V}_f \text{grad} T_f \right) = \text{div}(\vec{q}) + \sigma_T \quad (II.4)$$

Où :

q : est le flux de conduction dans le fluide,

σ_T : L'amplitude volumique de la source de chaleur d'origine solaire

ρ : La masse volumique

En régime permanent et en négligeant la conduction dans le fluide, on obtient :

$$\rho C_p \vec{V}_f \text{grad} T_f = \sigma_T \quad (II.5)$$

Où \vec{V}_f est la vitesse de fluide.

Pour un l'écoulement qui s'effectue suivant l'axe des abscisses :

$$\rho C_p V_f \frac{dT}{dx} = \sigma_T \quad (II.6)$$

Où :

$$\sigma_T = \frac{Qu}{e} \quad (II.7)$$

En introduisant le coefficient global de pertes thermique entre l'absorbeur et l'air extérieur U_L , la puissance utile apportée par l'air sortant du capteur s'écrit :

$$Pu = A_c Qu = A_c \left((\tau_v \alpha_n) \Phi_g - U_L (T_1 - T_a) \right) \quad (II.8)$$

Où A_c est la surface de captation.

Si le transfert était idéal, on aurait $T_1 = T_f$ n'est jamais satisfaite, on est donc amené à définir un coefficient d'efficacité local de transfert air-absorbeur " F' ", qui représente le rapport de la puissance utile à la puissance récupérée par le capteur lorsque la température de l'absorbeur est précisément celle du fluide.

$$F' = \frac{(\tau_v \alpha_n) \Phi_g - U_L (T_1 - T_a)}{(\tau_v \alpha_n) \Phi_g - U_L (T_f - T_a)} \quad (II.9)$$

Soit :

$$Pu = A_c F' \left((\tau_v \alpha_n) \Phi_g - U_L (T_f - T_a) \right) \quad (II. 10)$$

En introduisant le débit massique \dot{m} , l'équation de la chaleur devient :

$$\dot{m} C_p \frac{dT_f}{dx} = l_c \cdot F' \left((\tau_v \alpha_n) \Phi_g - U_L (T_f - T_a) \right) \quad (II. 11)$$

Si l'on suppose que F' et U_L ne dépendent pas de x , la solution est de la forme :

$$\frac{T_f - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n) \Phi_g}{U_L}}{T_{fe} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n) \Phi_g}{U_L}} = \exp \left(- \frac{l_c \cdot x \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} C_p} \right) \quad (II. 12)$$

La température T_{fs} du fluide à la sortie de capteur de longueur L est donc telle que :

$$\frac{T_{fs} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n) \Phi_g}{U_L}}{T_{fe} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n) \Phi_g}{U_L}} = \exp \left(- \frac{l_c \cdot L \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} C_p} \right) \quad (II. 13)$$

Il est pratique d'exprimer la puissance utile en termes de conditions d'entrée en définissant un autre coefficient global de transfert air-absorbeur par :

$$F_R = \frac{(\tau_v \alpha_n) \Phi_g - U_L (T_1 - T_a)}{(\tau_v \alpha_n) \Phi_g - U_L (T_{fe} - T_a)} \quad (II. 14)$$

En introduisant le débit massique par m^2 du capteur $G_C = \frac{\dot{m}}{L \cdot L}$, la puissance Q_u récupérée par le fluide par m^2 du capteur est :

$$Q_u = G_C C_p (T_{fs} - T_{fe}) = G_C C_p \left(\left(T_{fs} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n) \Phi_g}{U_L} \right) - \left(T_{fe} - T_a - \frac{(\tau_v \alpha_n) \Phi_g}{U_L} \right) \right) \quad (II. 15)$$

$$Qu = F_R \left((\tau_v \alpha_n) \Phi_g - U_L (T_{fe} - T_a) \right) \quad (II. 16)$$

Avec :

$$F_R = \left(\frac{\dot{m} C_p}{U_L} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (II. 17)$$

En introduisant la surface A_c de l'capteur, le coefficient F_R s'écrit :

$$F_R = \left(\frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p} \right) \right] \quad (II. 18)$$

II.3 Puissance absorbée

La puissance incidente Φ_g reçue par un mètre carré de surface du capteur incliné d'un angle β peut être déterminée théoriquement, elle s'écrit :

$$\Phi_g = \Phi_{b\beta} + \Phi_{d\beta} \quad (II. 19)$$

Où : Φ_{bg} : est la composante directe,
 Φ_{dg} : est la composante diffuse.

La puissance transmise à travers le vitrage est donc égale à $(\Phi_{b\beta}\tau + \Phi_{d\beta}\tau_d)$ en désignant par τ la transmittivité totale directionnelle et τ_d la transmittivité totale hémisphérique. L'absorbeur capte la fraction α_n de cette puissance transmise et réfléchit vers le vitrage la fraction $(1 - \alpha_n)$. Si ρ_d est la réflectivité hémisphérique du vitrage, celui-ci réfléchit vers l'absorbeur la fraction $(1 - \alpha_n) \cdot \rho_d$. Ce dernier absorbe à nouveau la fraction $\alpha_n(1 - \alpha_n) \cdot \rho_d$ et réfléchit vers le vitrage la fraction $(1 - \alpha_n)^2 \cdot \rho_d$. La fraction $(1 - \alpha_n)^2 \cdot \rho_d^2$ est, à nouveau, réfléchi vers l'absorbeur et ainsi de suite.

Après réflexions sur le vitrage, la fraction réfléchi vers l'absorbeur est $(1 - \alpha_n)^n \cdot \rho_d^n$ de sorte qu'après une infinité de réflexions, la puissance captée est :

$$\Phi_n = \sum_{n=0}^{\infty} (1 - \alpha_n)^n \cdot \rho_d^n (\Phi_{b\beta}\tau + \Phi_{d\beta}\tau_d) = \frac{\alpha_n(\Phi_{b\beta}\tau + \Phi_{d\beta}\tau_d)}{1 - (1 - \alpha_n) \cdot \rho_d} \quad (II. 20)$$

Le rendement optique η_0 du capteur défini par le quotient $\frac{\Phi_n}{\Phi_g}$, également appelé "transmittivité-

absorptivité effective" du capteur et noté $(\tau_v \alpha_n)$ vaut donc :

$$\eta_0 = \tau_v \alpha_n = \frac{\alpha_n(\Phi_{b\beta}\tau + \Phi_{d\beta}\tau_d)}{(1 - (1 - \alpha_n) \cdot \rho_d)(\Phi_{b\beta} + \Phi_{d\beta})} \quad (II. 21)$$

Pour la suite, on se limitera à déterminer la puissance Φ_n par m^2 de surface de captation du capteur en utilisant la formule suivante :

$$\Phi_n = (\tau_v \alpha_n) \Phi_g \quad (II. 22)$$

II.4 Calcul des pertes thermiques

Supposons que :

- Le régime est permanent ;
- La puissance Q_v absorbée par la vitre est négligeable ;
- Les températures de l'absorbeur et de la plaque d'aluminium sont confondues.

Ces hypothèses nous permettent d'exprimer les pertes globales de l'absorbeur Q_p par m^2 de surface de captation du capteur à l'aide du coefficient de pertes U_L et l'inverse est la résistance au transfert thermique entre les potentiels T_1 et T_a :

$$Q_p = U_L(T_1 - T_a) = Q_{p1} + Q_{p2} \quad (II. 23)$$

Si les pertes latérales sont négligeables, Q_{p1} désignera les pertes à l'avant et Q_{p2} , les pertes à l'arrière.

II.4.1 Pertes à l'avant

Afin de déterminer le coefficient de pertes à l'avant U_t qui dépend de plusieurs paramètres, Une équation empirique pour le coefficient de perte par le bas du collecteur U_t a été développée par Klein après le procédé de base de Hottel et Woertz (1942) et Klein (1975) [Duffie et Beckman, 1980]:

$$U_t = \frac{1}{\frac{N}{C/T_1 \left(\frac{(T_1 - T_a)}{(N + f)} \right)^e + \frac{1}{h_{vv}}} + \frac{\sigma(T_1 + T_a)(T_1^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_1 + 0.00591N h_{vv})^{-1} + \frac{(2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_1)}{\varepsilon_v - N}} \quad (II. 24)$$

Les températures T_1 et T_a sont exprimées en [K].

Cette équation est valable pour :

$$47^\circ C < T_1 < 147^\circ C, \quad -13^\circ C < T_a < 37^\circ C, \quad 0.1 < \varepsilon_v < 0.95,$$

$$v_v < 10 \frac{m}{s}, \quad 1 < N < 3, \quad \text{et} \quad 0 < \beta < 90^\circ$$

N : est le nombre de couvertures en verre ($N = 2$) ;

ε_v : est l'émissivité de la vitre ;

ε_1 : est l'émissivité de l'absorbeur ;

f : est le facteur correctif tenant compte de l'effet du vent, il s'exprime par :

$$f = (1 + 0.089h_{vv} - 0.1166h_{vv}\varepsilon_1)(1 + 0.07866N)$$

Où :

C : est le facteur tenant compte de l'influence de l'inclinaison de l'capteur sur les coefficients de convection dans les conduits non utiles, il est exprimé par :

Pour $0^\circ < \beta < 70^\circ$

$$C = 520(1 - 0.000051\beta^2)$$

Et Pour $70^\circ < \beta < 90^\circ$, prendre $\beta = 70^\circ$

β : est l'angle d'inclinaison du capteur [$^\circ$]

e : est calculé par la relation suivante : $e = 0.430(1 - 100/T_1)$

II.4.2 Pertes à l'arrière

L'expression des pertes de la face arrière de l'capteur est :

$$U_b = \left[\frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{1}{h_{vv}} \right]^{-1} \quad (II. 25)$$

Où:

h_{vv} : est le coefficient d'échange convectif du au vent, entre la face inférieure de l'capteur et l'air extérieur.

II.5 Modélisation des coefficients d'échange thermique

En plus des hypothèses générales mentionnées pour la modélisation des capteurs utilisant la méthode globale, on pose les hypothèses particulières suivantes :

- La conduction thermique dans le sens de l'écoulement est négligeable ;
- Le vent extérieur est supposé de direction toujours parallèle aux faces de capteur ;
- Les gradients transversaux de température dans l'absorbeur sont négligés (la conductivité thermique de l'absorbeur est supposée très grande).

Pour déterminer les divers coefficients d'échange thermique, les relations suivantes sont utilisées, selon qu'il s'agit d'un transfert par conduction, convection ou rayonnement.

II.5.1 Transfert conductif

Le coefficient d'échange par conduction à travers l'isolant et le bois vers l'arrière de capteur est donné par :

$$h_{cond} = \left[\frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{e_b}{\lambda_b} \right]^{-1} \quad (II. 26)$$

Où:

λ_{is} et λ_b : sont respectivement les conductivités thermiques de l'isolant et du bois.

e_{is} et e_b : sont respectivement les épaisseurs de l'isolant et du bois.

II.5.2 Transfert convectif

On distingue deux types d'échanges convectifs :

- Ceux dus au vent
- Ceux intervenant dans le capteur

II.5.2.1 Transfert convectif du au vent

Pour rendre compte d'une façon plus globale de l'effet du vent sur la surface extérieure, la majorité des auteurs utilise la corrélation de Hottel et Wortz, rapporté dans [Duffie et Beckman 1980]. [8]

$$h_{vv} = 5.67 + 3.86. v_V \quad (II. 27)$$

D'autre auteur utilisent :

$$h_{vv} = 7.5 + 4. v_V \quad \text{Pour } 0 \leq v_V \leq 4 \quad (II. 28)$$

$$h_{vv} = 7.3. v_V^{0.8} \quad \text{Pour } 0 \leq v_V \leq 4$$

Une comparaison numérique de ces formules montre que les écarts les plus forts sont obtenus en faible vitesse de vent, la convection naturelle étant alors surévaluée dans la relation (II. 28) Nous avons adopté en définitive la relation(II. 27).

II.5.2.2 Transfert convectif dans le dans la veine d'air mobile

En ce qui concerne la convection forcée, et dans le cas des conduits rectangulaires, l'échange entre l'absorbeur et le fluide caloporteur est caractérisé par le coefficient :

$$h_f = \frac{N_u \lambda_f}{D_H} \quad (II. 29)$$

Pour calculer le nombre de Nusselt, la corrélation du facteur de colburn est recommandée (Manglik et Bergles, 1995) rapporté dans [Yousef-Ali, et al. ,2005], [8] est utilisé pour des échangeurs de chaleur plat muni d'ailettes et représente les données dans le régime laminaire, transition et turbulent :

$$N_u = j. RePr^{1/3} \quad (II. 30)$$

Avec:

$$j = 0.6522Re^{-0.5403} \alpha^{-0.1541} \delta^{0.1499} \gamma^{-0.0678} [1 + 5.269 \cdot 10^{-5} \alpha^{0.504} \delta^{0.456} \gamma^{-1.055}]^{0.1}$$

Où le nombre de Reynolds est donné par :

$$Re = V_f \frac{D_H}{v_f}$$

La vitesse de l'air dans la conduite V_f , dépend des paramètres géométriques de la veine d'air utile et de la forme des ailettes (*figure II.6*), elle s'exprime par :

$$v_f = \frac{\dot{m}}{\rho_f A_d} \quad (II. 31)$$

La section de passage de l'air A_d dans la veine d'air mobile, est calculée comme suit :

$$A_d = l_c D - \frac{l_c}{s+t} t(s+h+t) \quad (II.32)$$

Le diamètre hydraulique est défini par (Manglik et Bergles, 1995) comme suit :

$$D_H = \frac{4shl}{2(sl+hl+th)+ts} \quad (II.33)$$

Le coefficient d'échange entre la plaque d'aluminium et le fluide caloporteur est donné par :

$$h_1 = h_2 = h_f \quad (II.34)$$

II.5.3 Transfert radiatif

On considère un transfert radiatif entre deux plaques parallèles de température T_1 et T_2 . On applique la formule [Takeo, et al., 2002] :

$$h_r = \frac{\sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \frac{S_1}{S_2}}$$

Où:

ε_i : est l'émissivité du milieu i de surface S_i)

Le F_{12} : est le facteur de forme géométrique entre les surfaces S_1 et S_2 , pris généralement pour les diverses parties du capteur égale à 1

σ : est la constante de Stephan-Boltzmann.

coefficient de transfert de chaleur entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant, rapporté dans [Youcef-Ali, et al., 2005] s'écrit :

$$h_r = \frac{\sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (II.35)$$

II.6 Algorithme de calcul des performances du capteur plan a air

Les différentes étapes de l'algorithme de calcul des performances thermiques de l'capteur sont présentées sur la *figure II.8*. En utilisant la méthode globale de Hottel, Whillier et Bliss, rapporté dans

[Youcef-Ali, et al. ,2005], elles donnent une parfaite concordance entre les résultats de l'expérience et ceux de la simulation, ces étapes de calcul sont les suivants :

1. Introduction des données

- Dimension du capteur ;
- Caractéristiques des ailettes ;
- Données météorologique Φ_g, T_a, V_v ;
- Débit massique du fluide caloporteur \dot{m} ;
- Température d'entrée du fluide T_{fe} .

2. Initialisation des températures moyennes

- Du fluide dans l'capteur T_f ;
- Du l'absorbeur T_1 ;
- De la plaque d'aluminium placée sur l'isolant T_2 ;

3. Calcul des coefficients du transfert

- Coefficient du transfert convectif du au vent h_{vv} , voir équation (27) ;
- Coefficient du transfert convectif dans la veine d'air mobile h_f , voir équation (29) ;
- Coefficient du transfert radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium placée sur l'isolant h_r , voir équation (35) ;

4. Calcul des coefficients des pertes thermiques

- Pertes à l'avant U_t , voir équation (23) ;
- Pertes à l'avant U_b , voir équation (25) ;
- Pertes totales U_L en tenant compte des échanges radiatif, il s'écrit :

$$U_L = \frac{(U_b + U_t)(h_r h_2 \Phi + h_r h_1 + h_1 h_2 \Phi) + U_b U_t (h_1 + h_2 \Phi)}{h_r h_2 \Phi + h_r h_1 + U_b h_1 + h_1 h_2 \Phi} \quad (II.36)$$

5. Calcul d'autres coefficients appartenant dans le modèle

- La quantité sans dimensions Φ , il s'écrit :

$$\Phi = 1 + \frac{A_f}{A_c} \eta_f$$

- La surface totale des ailettes A_f , il s'écrit :

$$A_f = 4(lh + th) \frac{L_c}{2l} \frac{l_c}{s + t}$$

- L'efficacité des ailettes η_f , il s'écrit :

$$\eta_f = \frac{\tanh(m D)}{m D}$$

Dans laquelle :

$$m = \sqrt{\frac{2h_f}{k_f t}}$$

- coefficient d'efficacité local de transfert air-absorbeur " F' ", il s'écrit :

$$F' = \frac{h_r h_2 \Phi + h_r h_1 + U_b h_1 + h_1 h_2 \Phi}{(U_t + h_1 + h_r)(U_b + h_2 \Phi + h_r) - h_r^2} \quad (II. 37)$$

- coefficient de correction " F_R ", voir équation (II. 18) ;

6. Calcul de la puissance utile Q_u , voir équation (II. 16) ;

7. Calcul des températures

Les températures moyennes du l'absorbeur et du plaque d'aluminium sont obtenues par la résolution du bilan énergétique.

- Température de l'absorbeur T_1 , elle s'écrit :

$$T_1 - T_f = \frac{S(U_b + h_2 \Phi + h_r) - (T_f - T_a)(U_b U_t + U_b h_r + U_t h_2 \Phi + U_t h_r)}{(U_t + h_1 + h_r)(U_b + h_2 \Phi + h_r) - h_r^2} \quad II. (38)$$

- Température de la plaque d'aluminium muni d'ailettes T_2 , elle s'écrit

$$T_2 - T_f = \frac{h_r S - (T_f - T_a)(U_b U_t + U_b h_r + U_t h_r + U_b h_1)}{(U_t + h_1 + h_r)(U_b + h_2 \Phi + h_r) - h_r^2} \quad (II. 39)$$

La température moyenne de l'écoulement d'air a été montrée par Klein par la formule suivante:

$$T_f = T_{fe} + \frac{Q_u / A_c}{F_R U_L} \left(1 - \frac{F_R}{F'} \right) \quad (II. 40)$$

8. Comparer, la valeur initiale de T_n et celle calculée. Si l'écart est trop important, réitérer à partir de la troisième étape **(3)**, sinon continuer.

9. Calcul de

- La température du fluide à la sortie du capteur :

$$T_{fs} = T_{fe} + \frac{Q_u A_c}{\dot{m} C_p} \quad (II.41)$$

- Le rendement thermique de l'capteur :

$$\eta = \frac{Q_u}{\Phi_g} \quad (II.42)$$

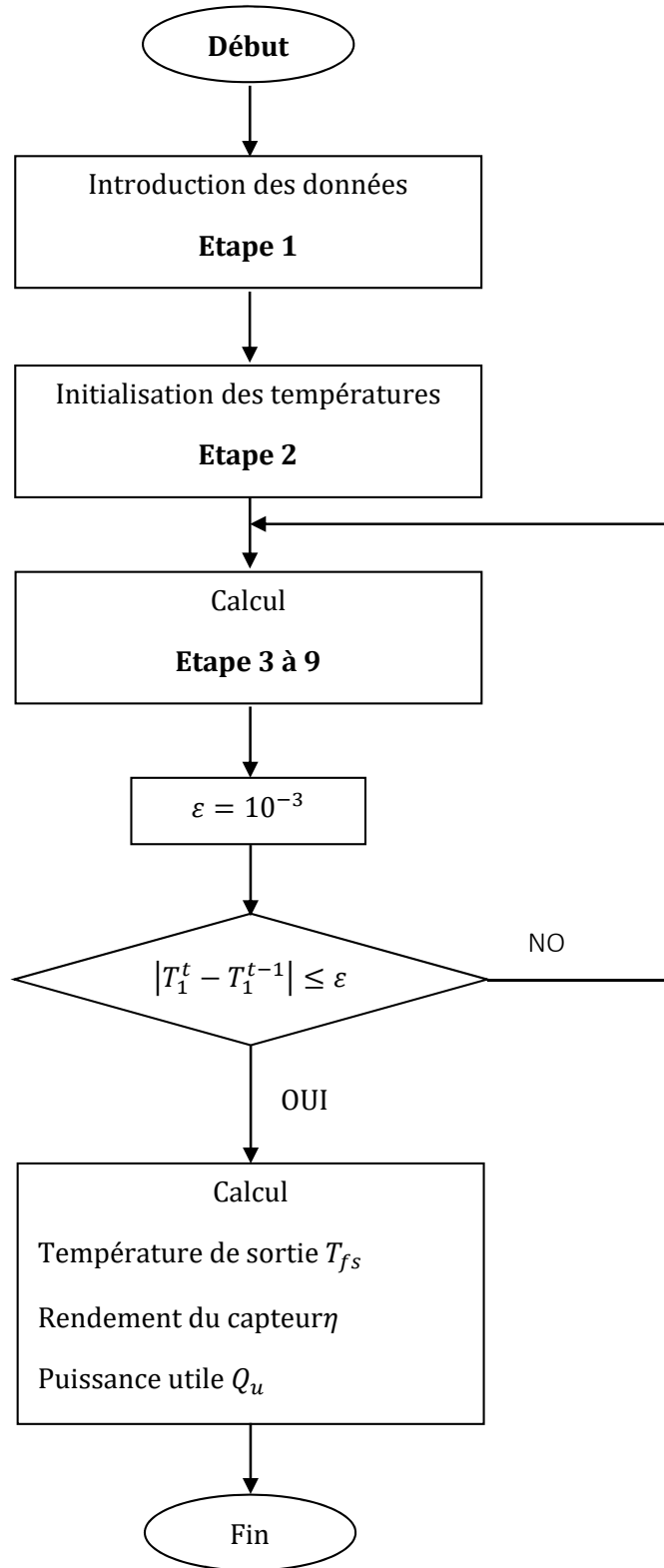


Figure II.3 Organigramme simplifié de sous-programme capteur

CHAPITRE III

MATERIELS ET METHODE

CHAPITRE III : MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.1 Description du prototype expérimental

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 direct et indirect, ces deux séchoirs solaires ont été instrumentés de sorte à pouvoir étudier le comportement thermique et la cinétique de séchage.

Le séchoir de type indirect à une unité de production d'air chaud : Elle est constituée d'un capteur solaire à air à simple circulation et à simple vitrage de 5mm d'épaisseur, de surface inclinée, L'absorbeur en tôle d'aluminium d'épaisseur 0.5mm peinte en noire mate de dimension 2m×1m. L'isolation thermique est en polystyrène Pour notre cas on a utilisé du polystyrène au-dessus du contreplaqué et sur les parties latérales d'épaisseur 3 cm. La distance entre l'absorbeur et le vitrage est de 2.5 cm. Une chambre de séchage : Elle est de hauteur 1.17 m, de longueur 0.55 m, et de largeur 0.55 m, Cette chambre comporte 4 claies (étagères) sur lesquelles est posé le produit à sécher. L'air chauffé pénètre à travers les claies dans un écoulement par convection forcée. et des ventilateurs qui permet de créer un écoulement forcé.

Le séchoir de type serre à 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 peinte en noir et isolée du sol par une couche de polystyrène d'épaisseur 3 cm plus une feuille de Contreplaqué d'une épaisseur de 1.5 cm. 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.



a



b

Figure III.1 prototypes de séchoir solaire de type indirect (droite) a et direct (gauche) b

III.2 Intensification de la conductivité thermique du 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 et 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 : (a) Enceinte parallélépipédique ($0,3 \times 0,28 \times 0,02$ m) en aluminium d'épaisseur 0.8 mm et (b) canettes de boissons gazeuses (figure III.2).



a



b

Figure III.2 (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 7% en poids de la poudre d'aluminium, améliore la conductivité thermique de la paraffine wax par rapport aux autres conducteurs (bandes d'aluminium obtenues à partir de canettes jetables, déchets de fil de cuivre et copeaux d'acier en spirale tordus).

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, de diamètre 0,05 mm, peuvent aller jusqu'à des températures de 1370 K et permettent une précision de 0,1°C.



Figure III.3 montre des photographies du capteur lors de la phase l'instrumentation.

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

La vitesse de l'air asséchant est mesurée à l'entrée de la chambre de séchage. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre Testo modèle 440.

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



Figure III.4 anémomètre Testo 440 + thermo-hygromètre 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'Acquisitions de données Keithley 2701 combine un Multimètre de résolution 6,5 chiffres (22-bit) un système de commutation 40 voies Pilotée par un ordinateur et équipé d'un logiciel Excelinx d'acquisition des données (voir *Figure III.5*).



Figure III.5 : Photographie du séchoir solaire équipé avec la centrale de mesure

III. 3.4 Données mesurée par la station météorologique

Une station radiométrique comporte deux parties : une partie fixe qui est constituée d'un pyromètre type EKO, pour la mesure du rayonnement global sur un plan horizontal et d'un pyromètre différentiel type EPPLEY pour mesurer l'irradiance 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 pyromètre 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-hygométrique «Techoel sonde thermo-igrométrique » avec un étalonnage de précision égale $\pm 1.5\%$, sensibilité à la température ambiante égale 0.1 (°C/mV) et une gamme de mesure s'étend de 0 à 100% HR, -40 à +60°C. Tous les systèmes décrits ci-dessus sont reliés à une acquisition de marque CAMPBELL SCIENTIFIC CR10x. celle-ci est reliée par interface RS232, à un ordinateur. Ces données sont ainsi collectées quotidiennement 24/24h et avec un pas de cinq minutes.

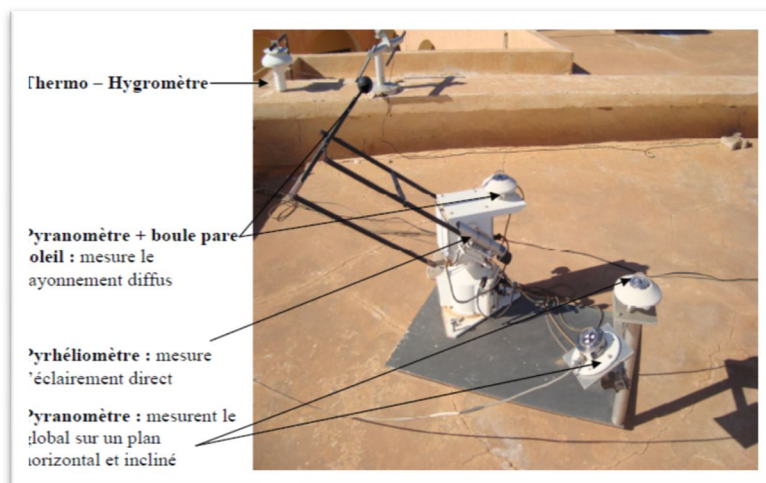


Figure III.6 : Station radiométrique

III. 3.5 Mesure de poids

Le suivi de la masse au cours de séchage est effectué par pesée sur une balance de précision 0.001 (Type KERN PCB 3500-2 Balance de 3500 g).



Figure III.7 : 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 séchée à l'étuve et tarée, 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 pesée sur une Balance KERN ABT 220-4M: 220g/0,1mg.



Figure III.8 : 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 de la courgette et la 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).



III. 4.2 la 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).



III.5 Séchage la courgette et la betterave

III. 5.1 Conditions de séchage

Dans cette partie, nous nous intéressons à la cinétique de séchage, 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 solaires de type direct et indirect présentée dans la figure III.9.



Figure III.9 Prototype réalisé pour le séchage de la courgette et la 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_s du produit séché. 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 : $MR = f(t)$.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (0)$$

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 $t=0$. 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 couches minces d'un produit

Tableau III.1 : Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces

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 sept différents modèles proposés par les auteurs comme indiqué dans le Tableau III.1-1. Des analyses de régression ont été effectuées en utilisant OriginPro 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] :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{exp}} - MR_{exp,i})^2} \quad (01)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N - n} \quad (02)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pré,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (03)$$

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]:

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \nabla [D_{eff} \nabla MR] \quad (06)$$

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

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 MR \quad (07)$$

La tranche de citrouille 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] :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp(-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (08)$$

Où : D_{eff} est la diffusivité effective (en m^2/s), t est le temps (en s), L est la 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 (08) peut être supposée comme suit :

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp(-\pi^2 D_{eff} t / 4L^2) \quad (09)$$

L'équation (09) peut être réarrangée et exprimée comme suit :

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \pi^2 D_{eff} t / 4L^2 \quad (00)$$

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 :

$$Slope(k) = -\pi^2 D_{eff} / 4L^2 \quad (01)$$

III.5.5 Amélioration du transfert thermique dans les MCP :

La faible conductivité thermique ($0,2 - 0,8 \text{ W m}^{-2}$) et le sur-refroidissement des MCP conventionnels limitent leurs capacités de stockage de chaleur qui peut être amélioré en introduisant dans les MCP des particules métalliques (Cu, Ag ou Al) de conductivité thermique élevée, par exemple, des fibres et des ailettes métalliques, des particules de carbone. L'ajout de ces particules modifie les propriétés thermiques du MCP et conduit à une amélioration des performances du stockage de chaleur. Elles peuvent être augmentée également par l'utilisation d'ailettes, de matériaux poreux à conductivité thermique élevée comme les mousses métalliques, la micro-encapsulation de MCP en carbone ou métalliques. Parmi ces techniques d'amélioration des performances thermiques lors des phases de stockage et déstockage de chaleur dans les MCP, l'utilisation d'ailettes fixées sur les parois du réservoir dans lequel les MCP sont disposés s'avère être une technique simple et efficace. Les ailettes sont utilisées pour accroître la surface d'échange des MCP contribuant ainsi à l'augmentation du flux de chaleur transféré entre les MCP et les ailettes. Ces dernières peuvent être radiales ou axiales et fixées au solide d'un échange de chaleur avec le milieu considéré. La forme et la disposition des ailettes dans le système de stockage de chaleur contribuent à l'accroissement de la quantité de chaleur stockée dans les MCP. Pour améliorer notre MCP on fait un test ou a on a pris cinq cannettes remplie de paraffine liquide et on a ajouté de différent conducteur

- ✓ Une cannette avec 7% cuivre
- ✓ Une cannette avec 7% fer
- ✓ Une cannette avec 7% chute aluminium
- ✓ Une cannette avec 7% poudre aluminium
- ✓ Une cannette avec paraffine seulement



Après que la paraffine se solidifie, on place les cannettes dans une étuve réglé à 80°C, puis on suit les changements.





Après 5h de suivi on voit clairement que la cire de paraffine mélangée avec 7% de la poudre d'aluminium se fusionnent vite par rapport aux autres cannettes.

III.6 Conclusion

De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées dans le passé concernant l'amélioration des performances des capteurs solaires plans à air. Les rendements obtenus pour différentes configurations ouvrent un grand éventail d'applications à basse et à moyen température, tel que le séchage des produits agro-alimentaires. Pour développer cette chaîne énergétique que constitue le couplage capteur-séchoir, nous serons amenés à faire une étude expérimentale détaillée du capteur. Le stockage de chaleur par mode latent s'avère être plus efficace que le stockage par chaleur sensible. L'amélioration de la conduction thermique des MCP peut être augmentée en introduisant des particules métalliques ou de carbone, les échanges de chaleur entre les parois du réservoir contenant les MCP sont augmentés par des ailettes de différentes formes fixées sur les parois du réservoir.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE IV : 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 indirects sans système de stockage. La deuxième partie traite le séchage solaire de la betterave et la courgette en couche mince a été effectuée pour des conditions météorologiques variables. En premier lieu, la présentation des cinétiques de séchage ainsi que les résultats relatifs à leur modélisation. Puis, la détermination des coefficients de diffusion de l'eau à partir des cinétiques de séchage.

IV.1 Comportement thermiques de prototype de séchoirs solaires indirects sans et muni des chicanes OSF (Offset Strip Fins)

Afin d'étudier des systèmes de stockage thermique, nous avons, dans un premier temps, conçu et construit deux séchoirs solaire indirectes à échelle réduite. Le séchoir solaire indirect (2×1 m) est recouvert par un simple vitrage. La partie inférieure est constituée d'une plaque d'aluminium d'épaisseur 0.8 mm peinte en noir mat et isolée de la partie inférieure par une couche de polystyrène d'épaisseur 3 cm. L'air est véhiculé par l'action d'un ventilateur placé à la sortie du capteur. Des thermocouples de type K ont été placés dans chaque séchoir solaire afin de mesurer la température de l'air à la sortie des séchoirs solaire ainsi qu'à l'entrée de l'armoire du séchage (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 $32,37^\circ$ Nord et une longitude de $3,77$ Ouest en suivant le comportement thermique du capteur sur une journée dans des conditions réelles de fonctionnement.

Nous avons étudié dans ce travail trois journées, une journée à ciel claire (Figure IV.1) et deux journées (Figure IV.2 et Figure IV.3) avec de nombreux passages nuageux ; elles représentent les différents cas possibles. Nous commençons nos essais expérimentaux à vide par la mesure de la température dans différente partie du prototype de séchoir solaire indirect à convection forcée sans et muni des chicanes OSF (Offset Strip Fins). Nous avons placé des thermocouples à la sortie de du capteur, à l'entrée, au milieu et à la sortie du frigo et aussi à l'ambiante.

Les essais expérimentaux ont été réalisés pour des éclaircissements variables le long de la journée ensoleillée. Les résultats expérimentaux illustrent l'évolution de la température d'air à la sortie de du

capteur, à l'entrée, au milieu et à la sortie du frigo pendant toute la journée ensoleillée dans les trois journées choisies

Nous remarquons que le passage nuageux constate sur la variation du rayonnement global incident sur le capteur (Figure IV.1) a un impact immédiat et direct sur les l'évolution de la température d'air. Dans la Figure IV.2, les températures d'air subissent de nombreuses fluctuations dues aux passages nuageux ainsi qu'aux fluctuations de la température ambiante. Au cours de la journée, la température de l'air à l'intérieur de séchoir solaire indirect atteint une valeur comprise entre 25°C et 70°C pour une température ambiante comprise entre 22°C et 39°C (figure). Lorsque le rayonnement solaire est de faible intensité (à la fin de la journée), la température de l'air à l'intérieur de séchoir solaire baisse jusqu'à atteindre la température ambiante

Le 16 mai 2019 a Ghardaïa :

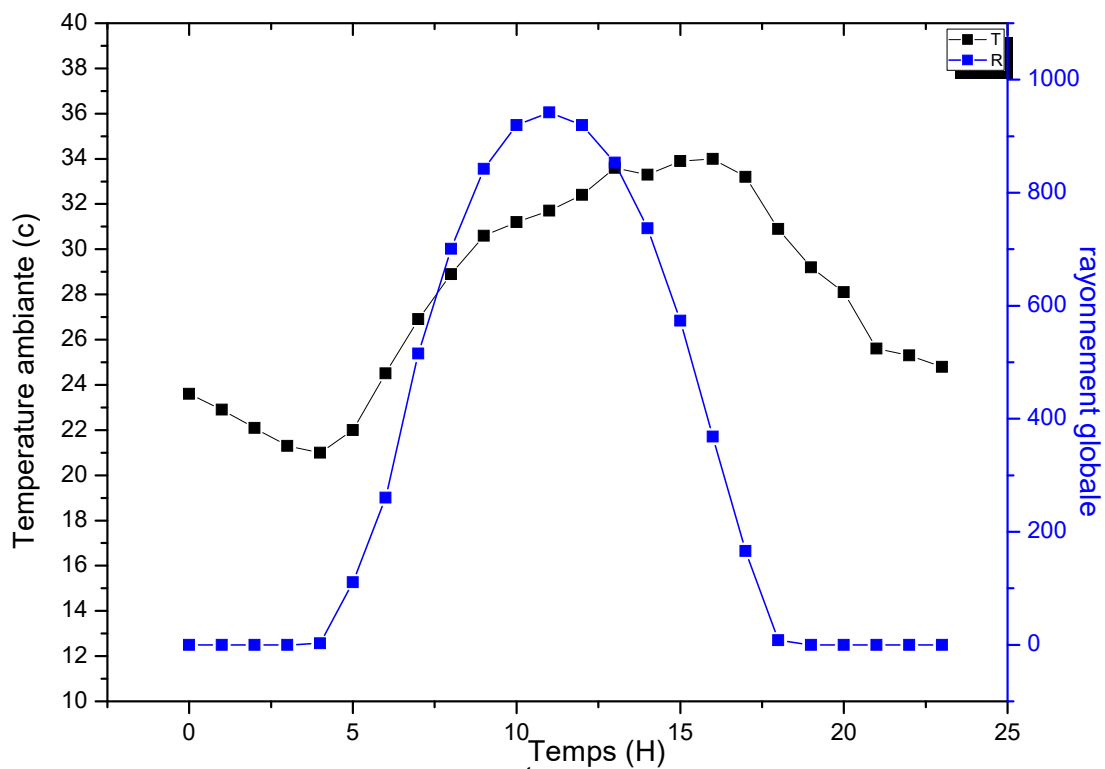
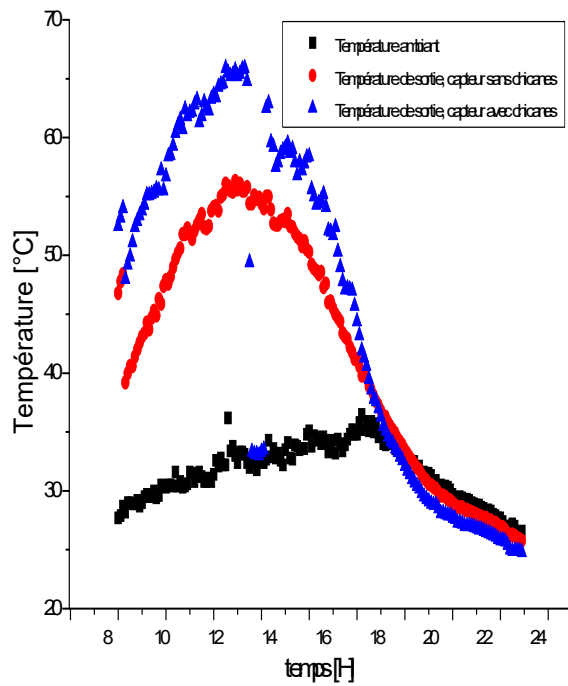
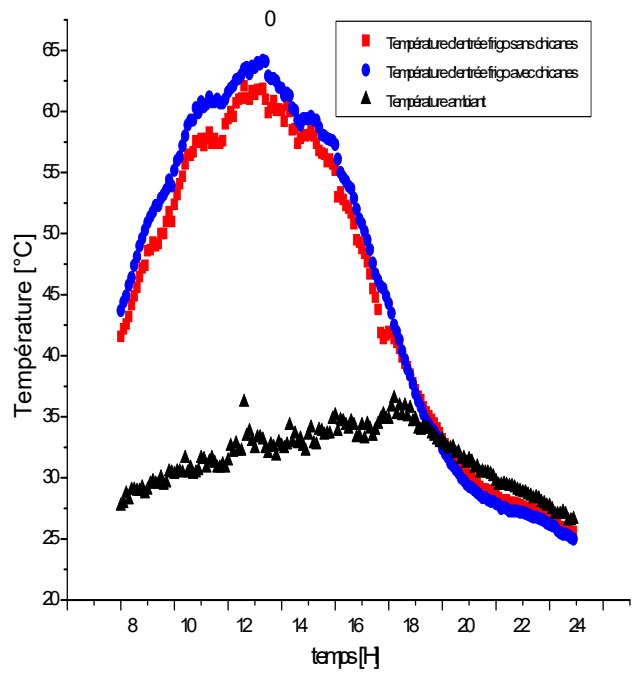


Figure IV.1 : Evolution de la température ambiante et du rayonnement global au cours de la journée (16 mai 2019)

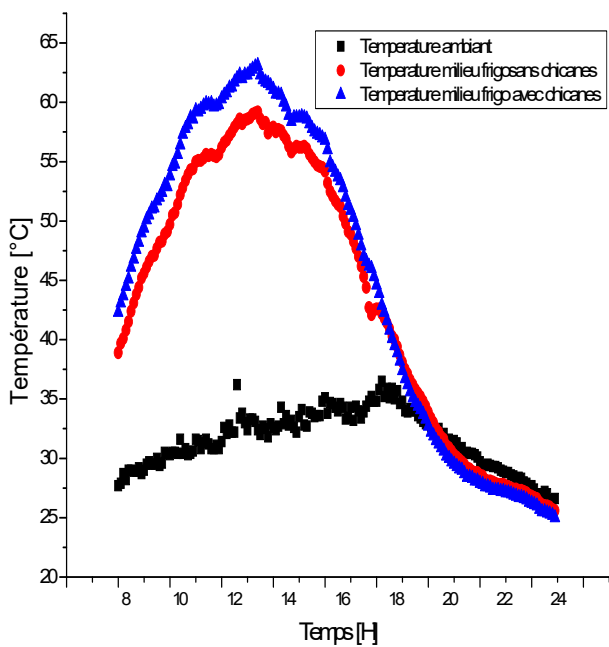
Et pour différentes parties du séchoir solaire on a mesuré les températures présentées sur la figure ci-dessous :



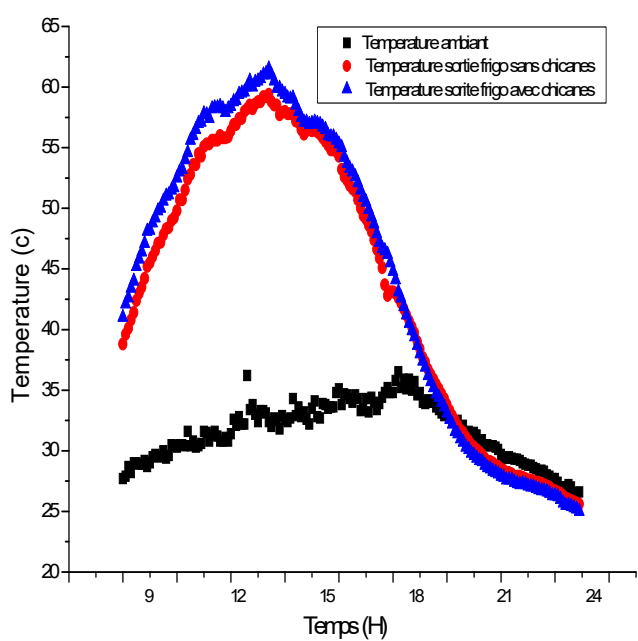
a



b



c



d

Figure IV.2 : Evolution de la température à la sortie du capteur et dans le frigo 16 mai 2019

Le 17 Mai 2019

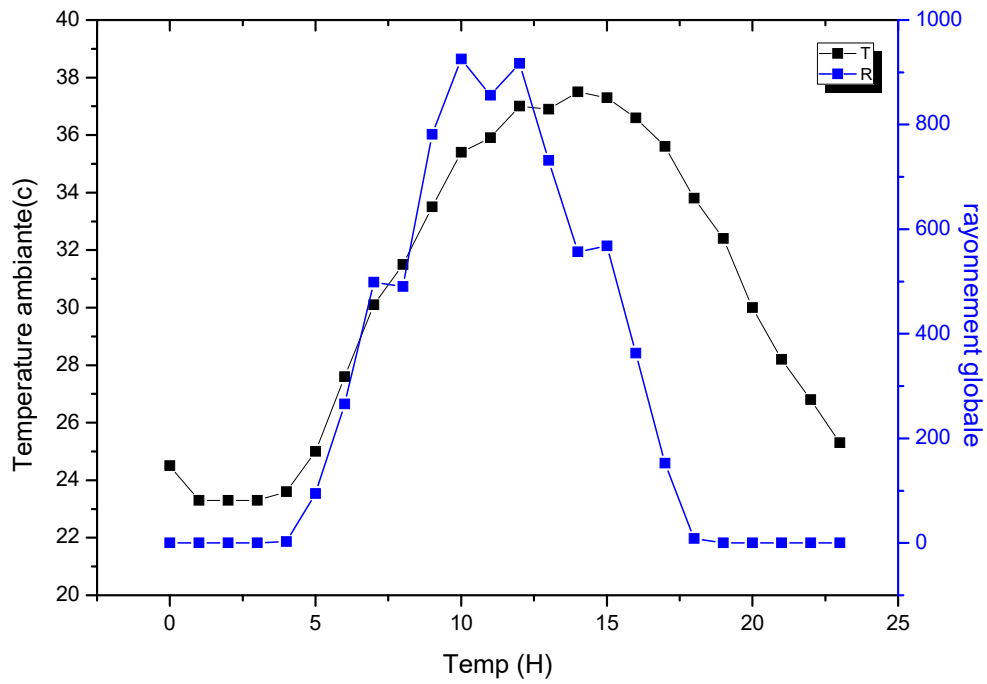
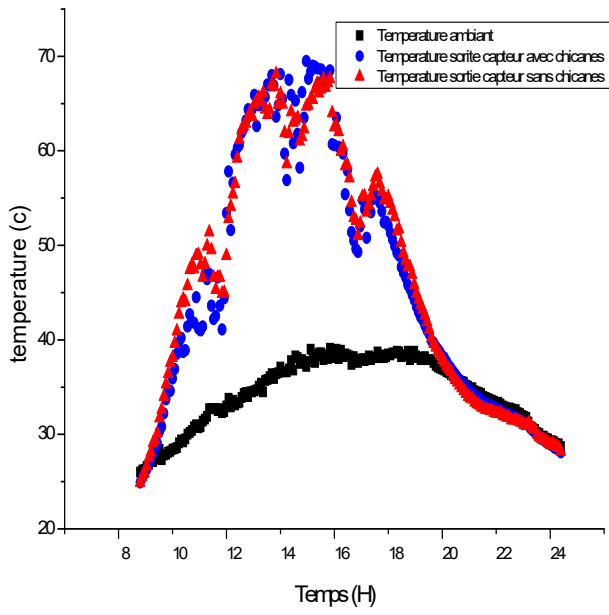
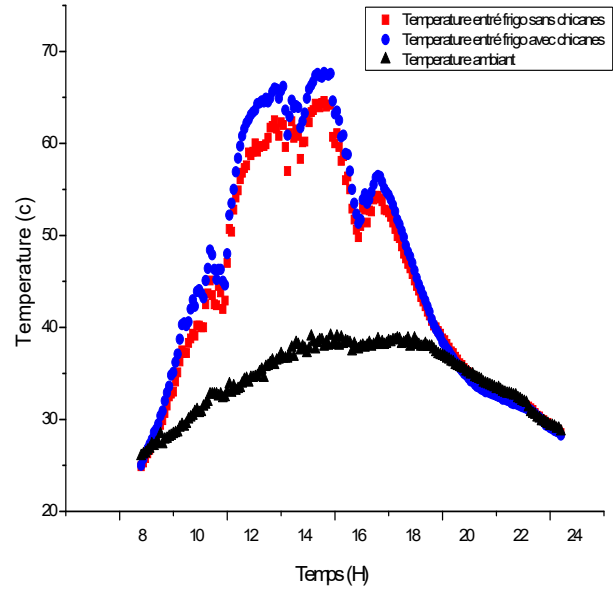


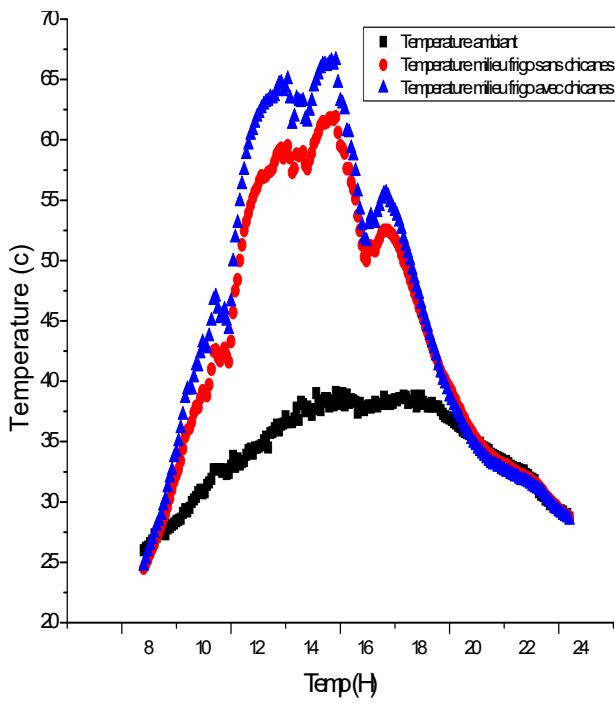
Figure IV.3 : Evolution de la température ambiante et du rayonnement global au cours de la journée (17 mai 2019)



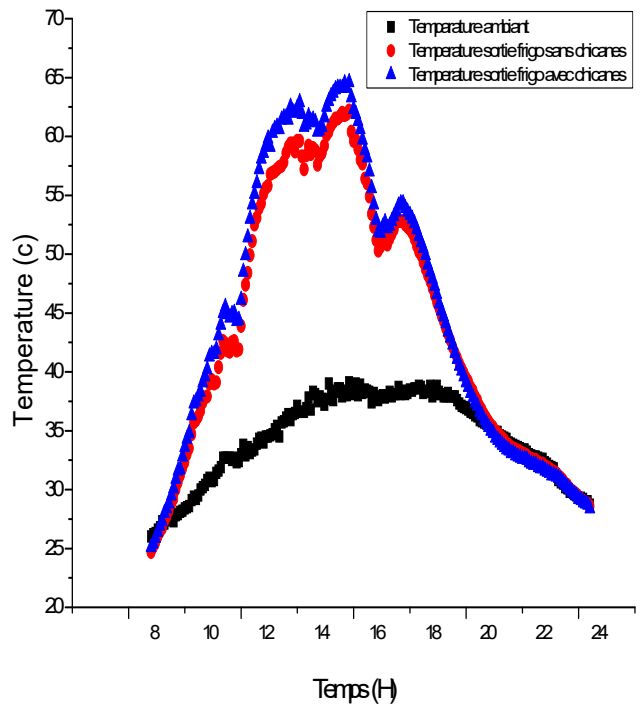
a



b



c



d

Figure IV.4: Evolution de la température à la sortie du capteur et dans le frigo 17 mai 2019

19 Mai 2019 :

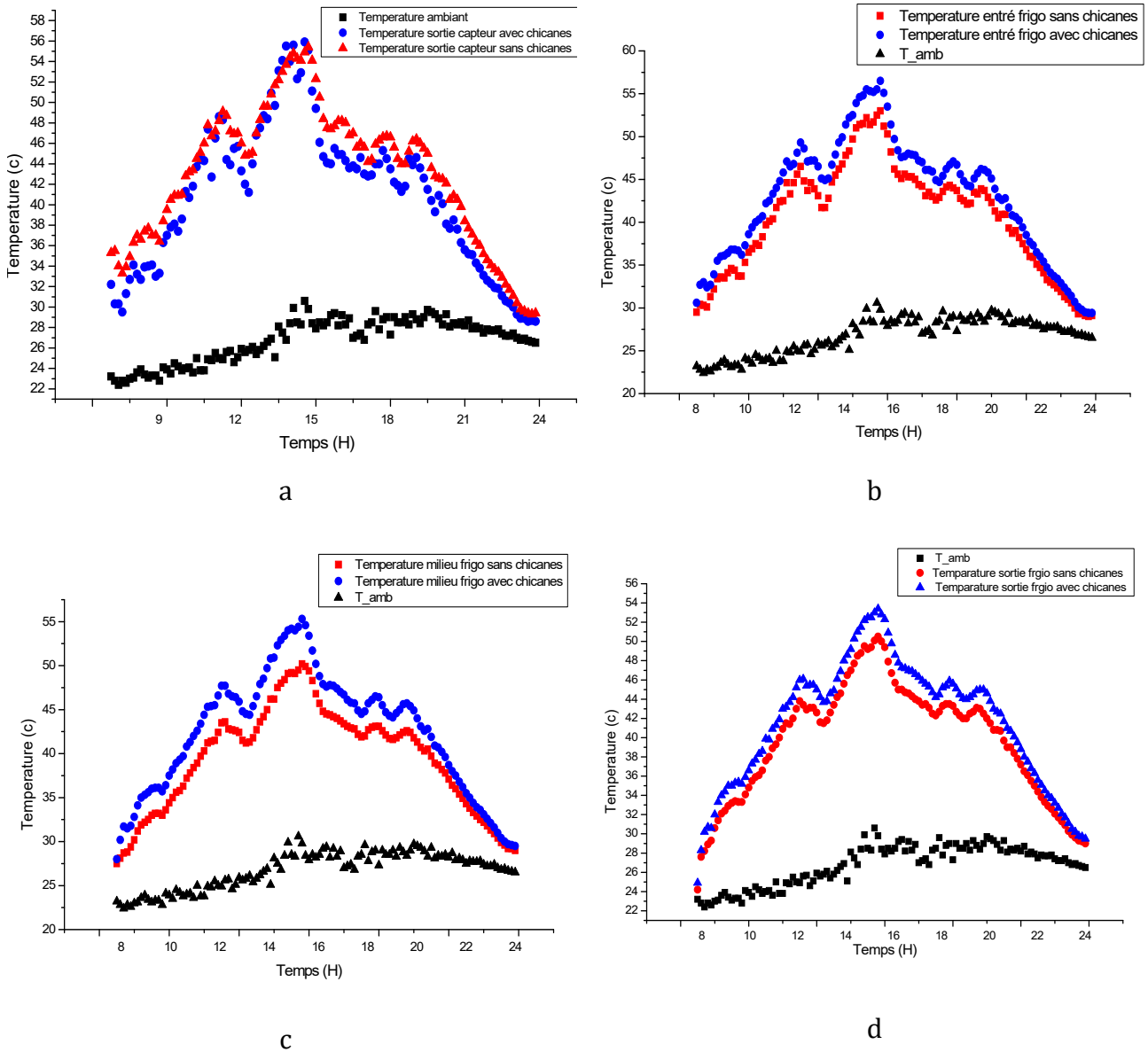


Figure IV.5 : Evolution de la température à la sortie du capteur et dans le frigo 19 mai 2019

Concernant l'influence de l'adjonction des chicanes sur les performances de capteur solaire, les figures IV.2, IV.4 et IV.5, montre que l'adjonction des chicanes OSF (Offset Strip Fins) dans la veine d'écoulement de l'air mobile a apporté une augmentation remarquable aux performances du capteur. Cette amélioration s'explique par : (i) l'augmentation de la surface d'échange convectif par la disposition d'une autre surface d'échange composée de plusieurs petites surfaces placées verticalement dans le sens de l'écoulement de l'air ; (ii) l'adjonction de chicanes dans la veine d'air mobile entre

l'isolant et l'absorbeur permet d'obtenir un écoulement turbulent qui favorise l'échange thermique convectif entre l'air et l'absorbeur.

IV.2 Séchage de la courgette et la betterave

IV.2.1 Courbes de séchage

Les données expérimentales en termes de teneur en eau (courbes de séchage) obtenues dans les conditions météorologiques de la zone semi-aride du Ghardaïa ont été converties en une forme plus utile, c'est-à-dire l'expression sans dimension de la teneur en eau (MR). La variation de la teneur en eau avec le temps pour différentes conditions météorologiques sont présentées à la Figure VI.6 et IV.7. L'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau est représentée dans la Figure IV.8 et IV.9.

• **BETTERAVE :**

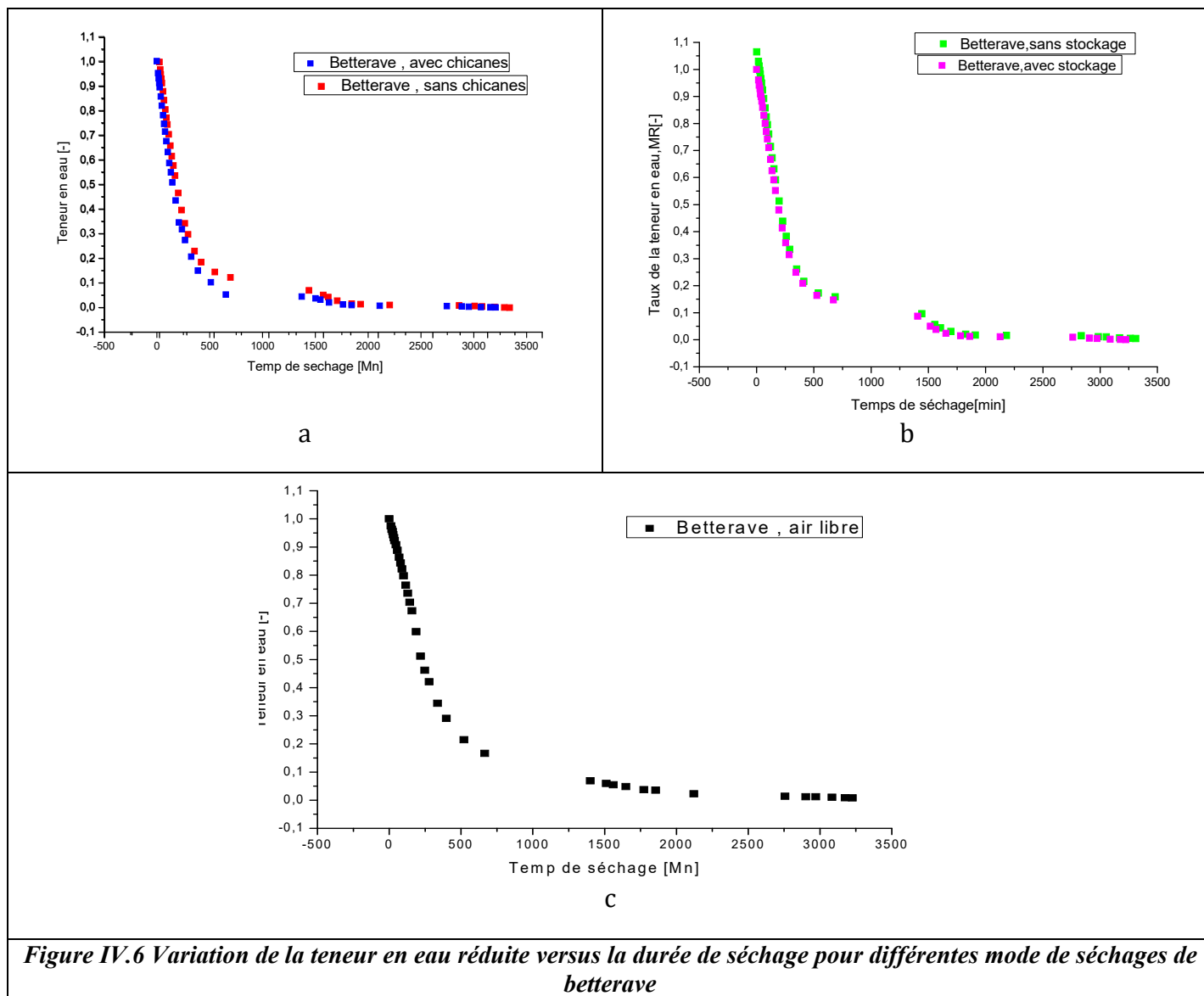
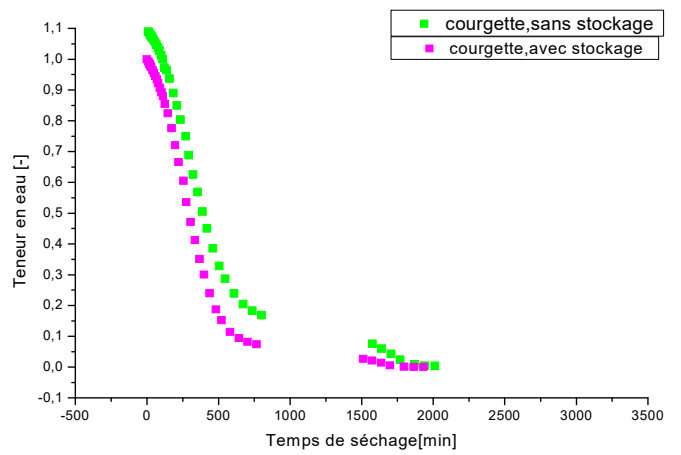
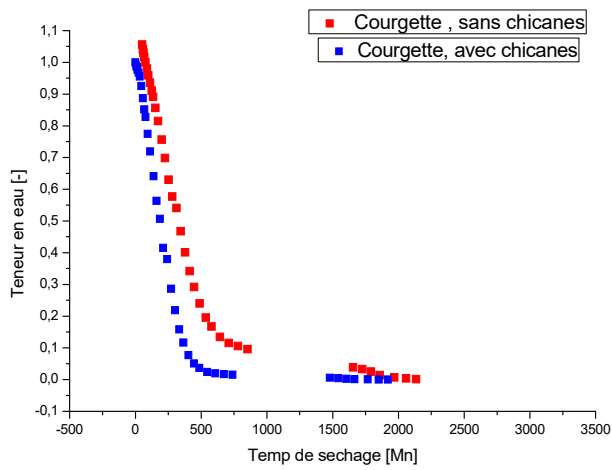


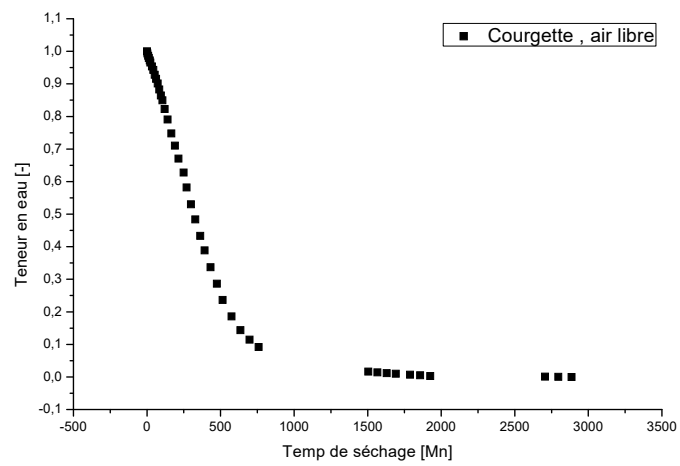
Figure IV.6 Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage pour différentes mode de séchages de betterave

• COURGETTE :



a

b



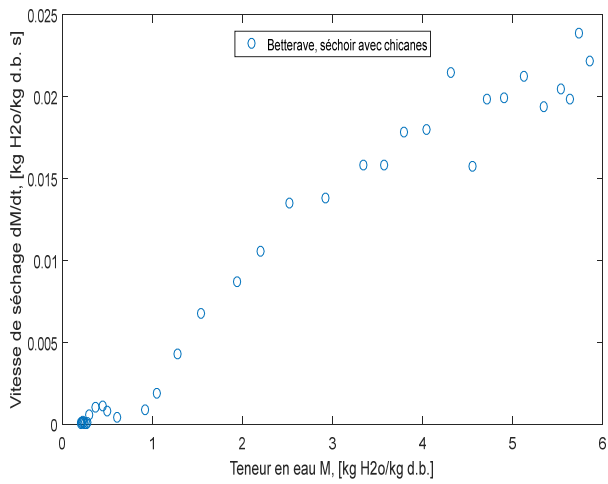
c

Figure IV.7 Variation de la teneur en eau réduite versus la durée de séchage pour différents mode de séchages de la courgette

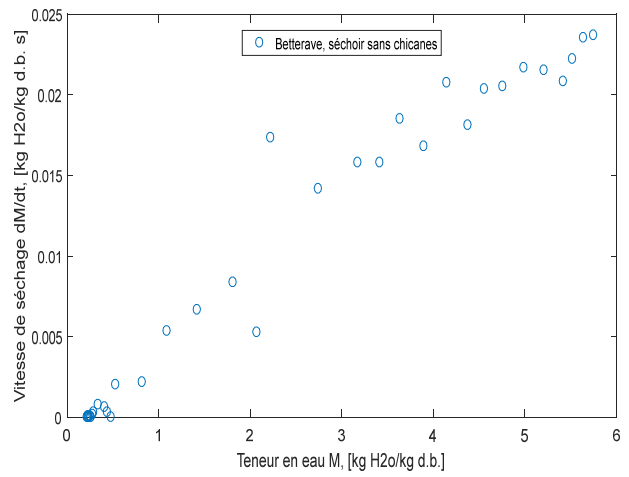
IV.2.2 Vitesse de séchage

Les variations des vitesses de séchage en fonction de la teneur en humidité pour différentes produits et prototypes de séchage solaire sont illustrées aux figures IV.8 (a, b, c, d, e) pour la figure VI.9 (a, b, c, d, e) pour la courgette. 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 de procédé de séchage solaire et des matériaux de stockage sur le taux de séchage, comme les montrent les figures IV.8 (a, b, c, d, e) et IV.9 (a, b, c, d, e). Ces résultats sont en accord avec les travaux précédents [12,13].

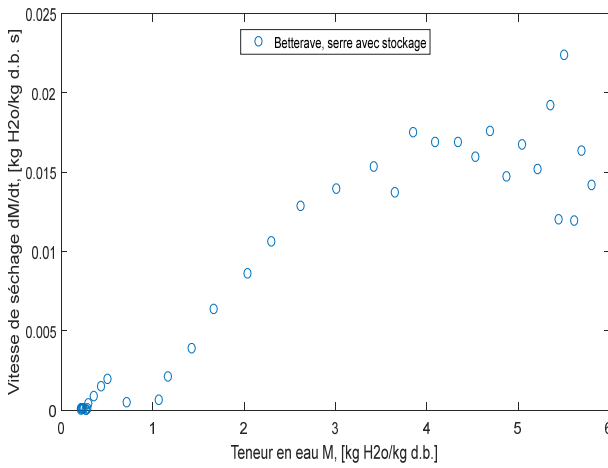
● **BETTERAVE**



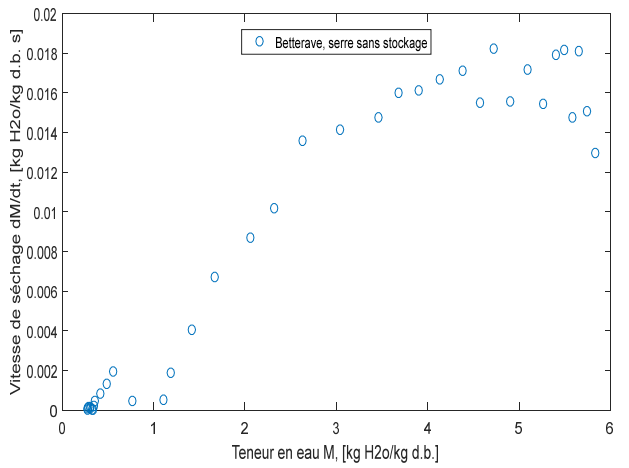
a



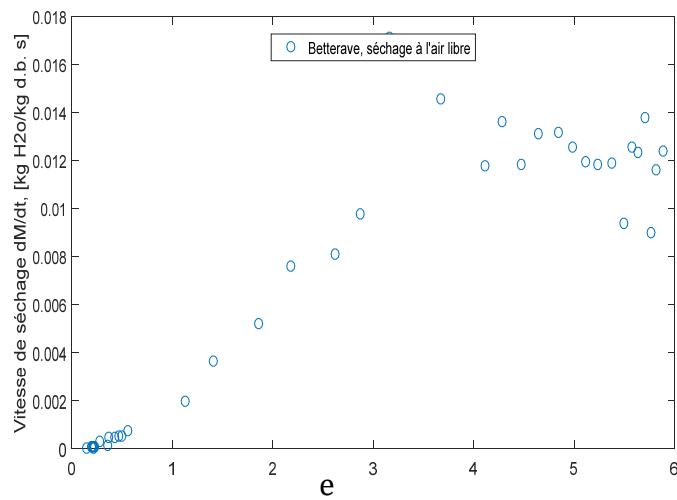
b



c



d



e

Figure IV.8 : Évolution de la vitesse de séchage des tranches de betteraves versus la teneur en eau pour différents procédés de séchage solaire

• COURGETTE

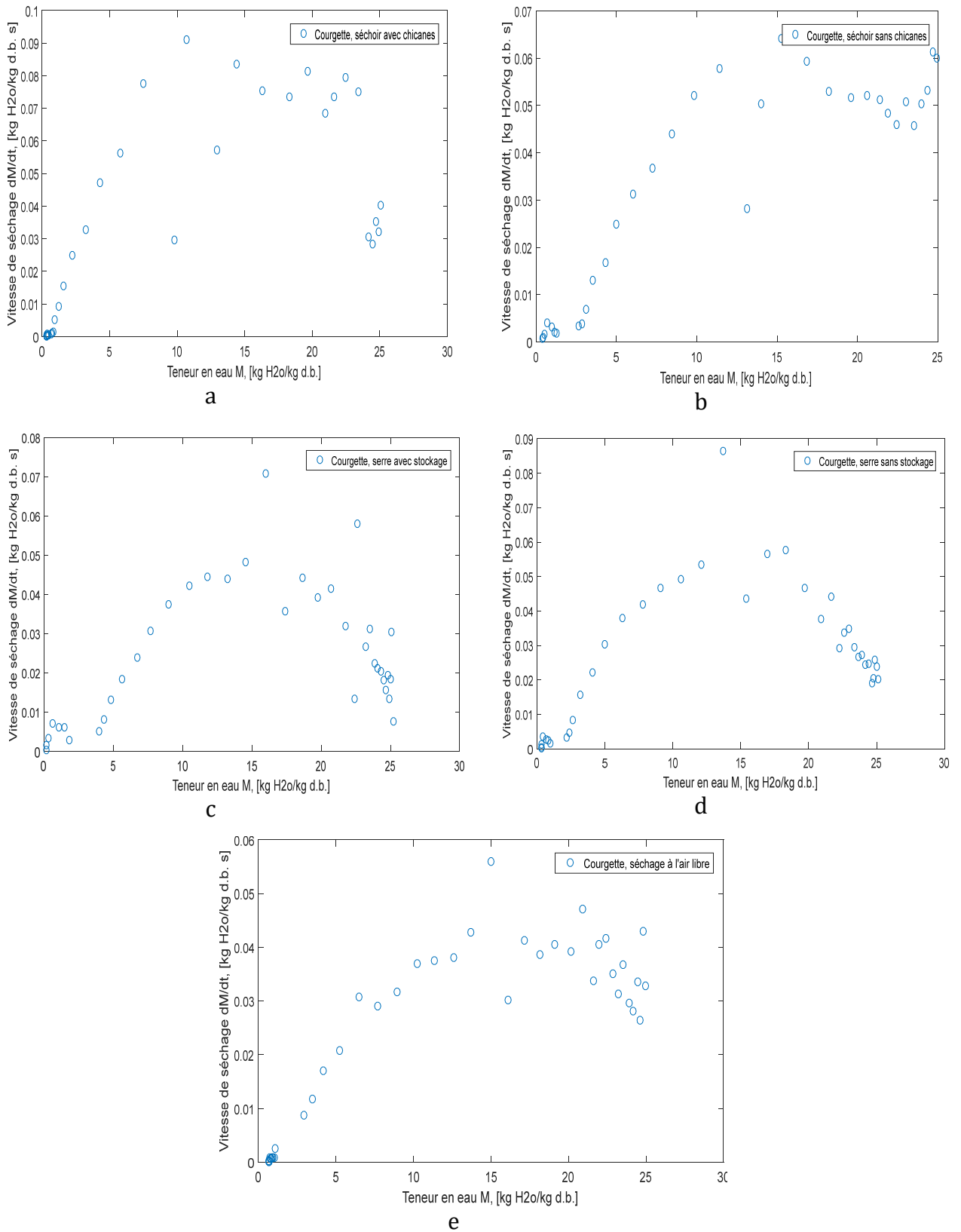


Figure IV.9 : Évolution de la vitesse de séchage des tranches de courgette versus la teneur en eau pour différentes procédés de séchage solaire.

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 VI.1, on suppose que le modèle le mieux adapté est celui qui a le coefficient de détermination le plus élevé R^2 , le plus bas réduit le quadrat 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 VI.1, 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.

IV.2.4 Détermination de la diffusivité effective de l'eau de la courgette et la betterave :

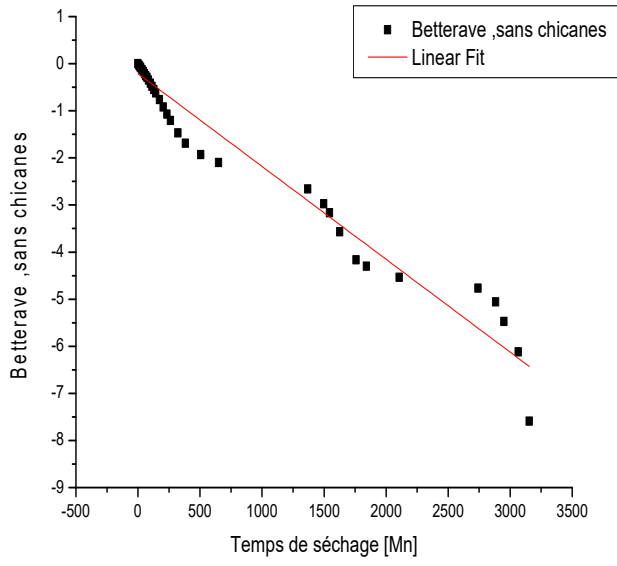
Pour analyser quantitativement la cinétique de séchage, nous avons ensuite déterminé la diffusivité effective selon la deuxième loi de Fick. la diffusivité effective de l'eau est calculé en considérant que l'eau initiale est uniformément distribuée dans toute la masse de l'échantillon, la teneur en eau 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 déterminé 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 cette équation (08) permet la détermination de la diffusivité effective au moyen des droites qui représentent $\ln(MR)$ en fonction du temps de séchage (t) (*Figure IV.10*).

Tableau IV.1 Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage pour la betterave.

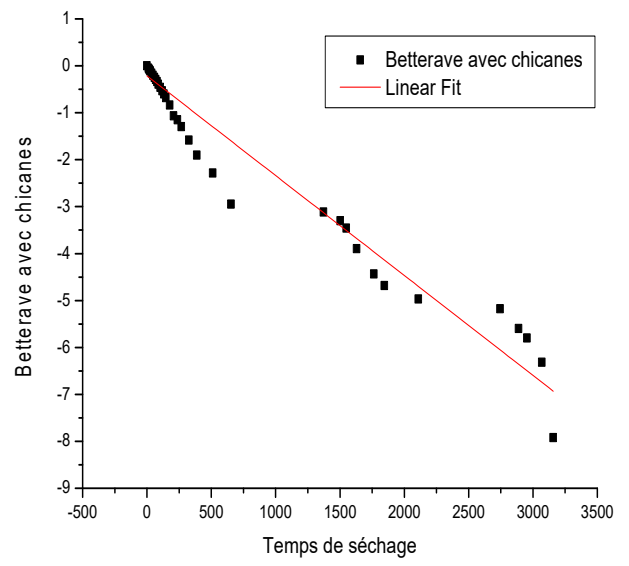
Système	N°	modèles	Constantes des modèles				R^2	RMSE	χ^2
			k	n	a	b			
Sans chicanes	1	Newton	0,0046				0,9934	0,0304	0,0009
	2	Page	0,0034	0,0034			0,9950	0,0269	0,0007
	3	Modified Page	0,0038	1,1204			0,9950	0,0269	0,0007
	4	Henderson and Pabis	0,0039		1,0393		0,9952	0,0265	0,0007
	5	Logarithmic	0,0041		1,0233	0,0199	0,9962	0,0239	0,0007
	6	Midilli-Kucuk	0,0027	1,0666	1,0233	0,0000	0,9969	0,0252	0,0006
	7	Approximation of Diffusion	0,0040		1,0479	6234,8120	0,9955	0,0258	0,0007
Avec chicanes	1	Newton	0,0046				0,9980	0,0164	0,0003
	2	Page	0,0034	1,0645			0,9985	0,0144	0,0002
	3	Modified Page	0,0047	1,0622			0,9985	0,0144	0,0002
	4	Henderson and Pabis	0,0048		1,0173		0,9983	0,0152	0,0002
	5	Logarithmic	0,2003		10,4299	-10,6662	0,9624	0,4475	0,0003
	6	Midilli-Kucuk	0,0033	1,0662	1,0005	0,0000	0,9988	0,0135	0,0002
	7	Approximation of Diffusion	0,0265		-0,0610	0,1902	0,9986	0,0141	0,0002
Sans stockage	1	Newton	0,0036				0,9934	0,0304	0,0009
	2	Page	0,0019	1,1273			0,9950	0,0269	0,0007
	3	Modified Page	0,0038	1,1204			0,9950	0,0269	0,0007
	4	Henderson and Pabis	0,0039		1,0393		0,9952	0,0265	0,0007
	5	Logarithmic	0,0041		1,0233	0,0199	0,9962	0,0239	0,0006
	6	Midilli-Kucuk	0,0027	1,0666	1,0233	0,0000	0,9959	0,0252	0,0006
	7	Approximation of Diffusion	0,0040		1,0479	6234,8180	0,9955	0,0258	0,0007
Avec stockage	1	Newton	0,0036				0,9937	0,0297	0,0009
	2	Page	0,0020	1,1155			0,9950	0,0268	0,0007
	3	Modified Page	0,0037	1,1089			0,9950	0,0268	0,0007
	4	Henderson and Pabis	0,0038		1,0371		0,9952	0,0263	0,0007
	5	Logarithmic	0,0040		1,0212	0,0200	0,9962	0,0236	0,0006
	6	Midilli-Kucuk	0,0028	1,0576	1,0230	0,0000	0,9958	0,0252	0,0006
	7	Approximation of Diffusion	0,0038		0,9524	0,1220	0,9946	0,0282	0,0008
Air libre	1	Newton	0,0036				0,9934	0,0304	0,0009
	2	Page	0,0012	1,1514			0,9957	0,0248	0,0007
	3	Modified Page	0,0029	1,1204			0,9957	0,0259	0,0007
	4	Henderson and Pabis	0,0029		1,0336		0,9955	0,0264	0,0007
	5	Logarithmic	0,0031		1,0150	0,0226	0,9967	0,0230	0,0006
	6	Midilli-Kucuk	0,0015	1,1134	1,0117	0,0000	0,9959	0,0252	0,0005
	7	Approximation of Diffusion	0,0032		1,1000	7,1115	0,9965	0,0236	0,0006

Tableau IV.2 Résultats statistiques obtenus à partir de différents modèles de séchage pour la courgette.

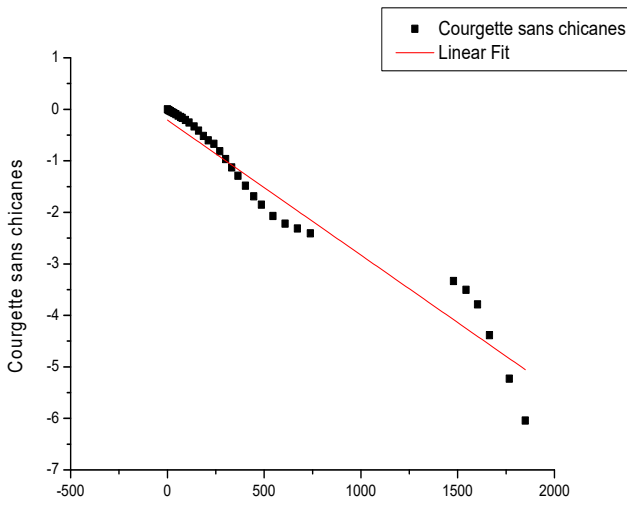
Système	N° modèles	Constantes des modèles				R^2	RMSE	χ^2
		k	n	A	b			
Sans chicanes	1 Newton	0,0031				0,9891	0,0391	0,0015
	2 Page	0,0007	1,2729			0,9980	0,0169	0,0003
	3 Modified Page	0,0032	1,2700			0,9980	0,0169	0,0003
	4 Henderson and Pabis	0,0033		1,0463		0,9924	0,0331	0,0011
	5 Logarithmic	0,0004		10,3603	-10,3196	0,9577	0,3452	0,1192
	6 Midilli-Kucuk	0,0005	1,3303	0,9858	0,0000	0,9986	0,0148	0,0002
	7 Approximation of Diffusion	0,0021		51,6034	0,9920	0,9909	0,0367	0,0014
Avec chicanes	1 Newton	0,0042				0,9727	0,0664	0,0044
	2 Page	0,0002	1,5491			0,9994	0,0101	0,0001
	3 Modified Page	0,0043	1,5530			0,9994	0,0101	0,0001
	4 Henderson and Pabis	0,0047		1,0950		0,9832	0,0529	0,0028
	5 Logarithmic	0,0006		11,1115	-10,8731	0,9446	0,6328	0,4004
	6 Midilli-Kucuk	0,0002	1,5755	0,9931	0,0000	0,9995	0,0099	0,0001
	7 Approximation of Diffusion	0,0094		-119,2418	0,9918	0,9986	0,0154	0,0002
Sans stockage	1 Newton	0,0025				0,9600	0,0790	0,0062
	2 Page	0,0000	1,7023			0,9986	0,0152	0,0002
	3 Modified Page	0,0027	1,7017			0,9986	0,0152	0,0002
	4 Henderson and Pabis	0,0029		1,1011		0,9755	0,0627	0,0039
	5 Logarithmic	0,0027		1,1299	-0,0330	0,9767	0,0619	0,0038
	6 Midilli-Kucuk	0,0000	1,7558	0,9908	0,0000	0,9989	0,0139	0,0002
	7 Approximation of Diffusion	0,0029		1,1143	2495,068	0,9774	0,0610	0,0037
Avec stockage	1 Newton	0,0020				0,9692	0,0665	0,0044
	2 Page	0,0001	1,5743			0,9967	0,0219	0,0005
	3 Modified Page	0,0023	1,5745			0,9967	0,0219	0,0005
	4 Henderson and Pabis	0,0023		1,0826		0,9818	0,0518	0,0027
	5 Logarithmic	0,0022		1,1036	-0,0242	0,9824	0,0517	0,0027
	6 Midilli-Kucuk	0,0001	1,5921	1,0002	0,0000	0,9976	0,0192	0,0004
	7 Approximation of Diffusion	0,0064		-1,6870	0,6199	0,9974	0,0200	0,0004
Air libre	1 Newton	0,0023				0,9859	0,0461	0,0021
	2 Page	0,0003	1,3772			0,9993	0,0103	0,0001
	3 Modified Page	0,0025	1,3806			0,9993	0,0103	0,0001
	4 Henderson and Pabis	0,0025		1,0528		0,9904	0,0385	0,0015
	5 Logarithmic	0,0024		1,0706	-0,0205	0,9910	0,0378	0,0014
	6 Midilli-Kucuk	0,0002	1,4422	0,9841	0,0000	0,9997	0,0076	0,0001
	7 Approximation of Diffusion	0,0049		-87,8920	0,9906	0,9993	0,0107	0,0001



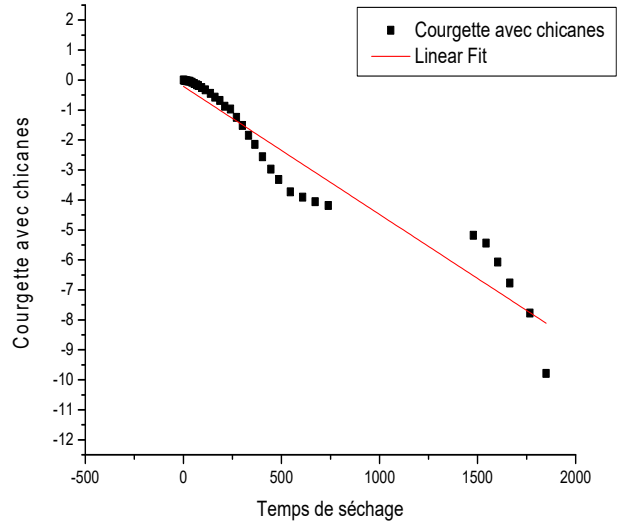
a



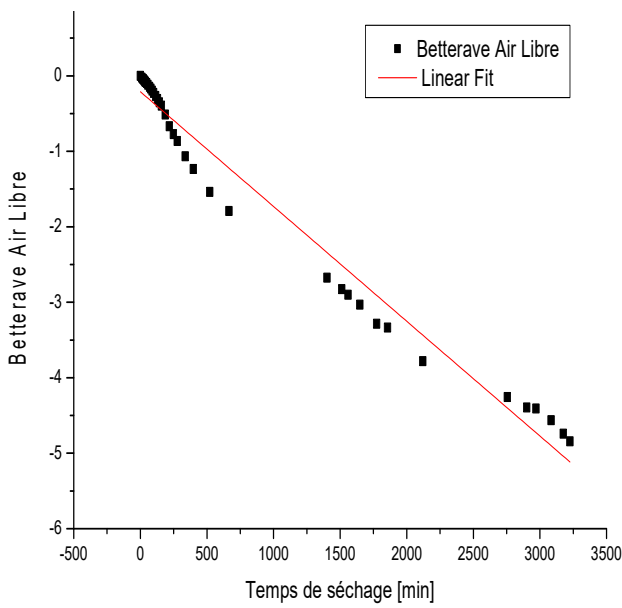
b



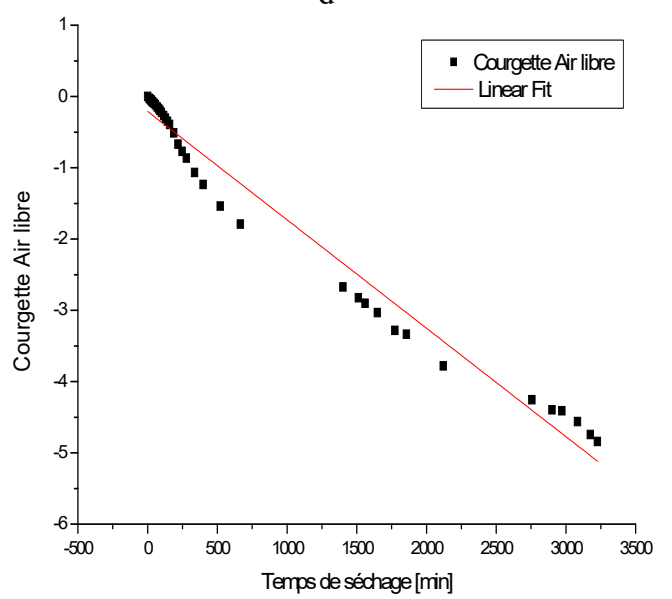
c



d



e



f

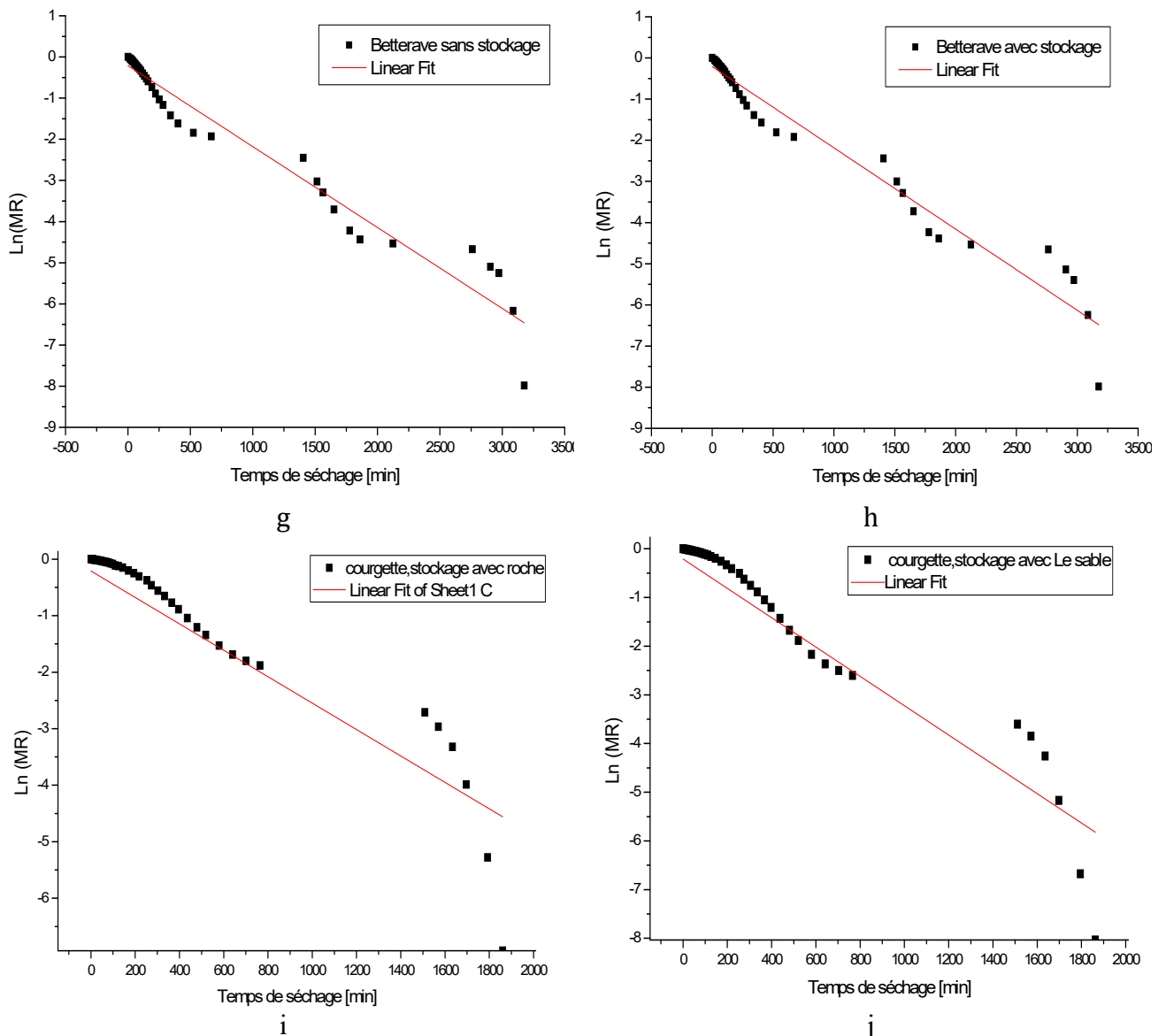


Figure IV.10 : Variation de $\text{Ln}(MR)$ en fonction du temps de séchage des échantillons de la betterave et la courgette

D'après l'équation (011), la pente des droites présentées dans les figures IV.10 est : $-\pi^2 D_{eff} / 4L^2$, avec L la demi épaisseur des échantillons de la courgette et la betterave. Les diffusivité effective de l'eau est obtenus pour les différents produits séchés sont consignés dans le *Tableau IV.3.IV.4*

Tableau VI.3. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de betterave en couche mince

betterave	Diffusivité effective moyenne $D_{eff} [m^2 s^{-1}]$	Valeurs statistiques		
		R^2	RMSE	χ^2
Sans chicanes	0.845×10^{-09}	0,97744	0,43029	0,97808
Avec chicanes	0.949×10^{-09}	0,97442	0,50214	0,97442
Sans stockage	0.799×10^{-09}	0,97606	0,44208	0.2078
Avec stockage	0.803×10^{-09}	0,97438	0,45585	0.19545
Air libre	0.659×10^{-09}	0,98676	0,26987	0,35791

Tableau VI.4. Résultats statistiques obtenus à partir de divers modèles de séchage de courgette en couche mince

Courgette	Diffusivité effective moyenne $D_{eff} [m^2 s^{-1}]$	Valeurs statistiques		
		R^2	RMSE	χ^2
Sans chicanes	1.179×10^{-09}	0,9722	0,36235	0,9722
Avec chicanes	1.798×10^{-09}	0,96006	0,69584	0,96006
Stockage dans le sable	1.221×10^{-09}	0,93936	0,59826	0,35791
Stockage dans la roche	0.949×10^{-09}	0,91624	0,55902	0,3125
Air libre	0.869×10^{-09}	0,91624	0,29434	0,08664

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.3. et IV.4 pour les différents cas examinés. Les diffusivités effectives (D_{eff}) lors du séchage des échantillons de betterave et de courgette ont varié de 0.6×10^{-09} à 1.7×10^{-09} m^2/s dans les différents prototypes de séchage solaire.

La diffusivité effective de l'humidité dans les tranches de betterave séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect muni des chicanes ($0.9 \times 10^{-09} m^2/s$) a été supérieure à celle des tranches de betterave séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect sans chicanes ($0.8 \times 10^{-09} m^2/s$). Aussi, elle a été supérieure à celles séchées dans le séchoir solaire de type serre équipé d'un système de stockage de chaleur sensible ($0.803 \times 10^{-09} m^2/s$ pour le lit de sable et $0.799 \times 10^{-09} m^2/s$ pour le lit de roche) et mieux de celui de l'air libre ($0.6 \times 10^{-09} m^2/s$).

Les mêmes remarques ont été observées dans le cas de séchage des tranches de courgette dont la diffusivité effective de l'humidité dans les tranches de courgette séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect muni des chicanes ($1.7 \times 10^{-09} m^2/s$) a été supérieure à celle des tranches de courgette séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect sans chicanes ($1.1 \times 10^{-09} m^2/s$). Aussi, elle a été supérieure à celles séchées dans le séchoir solaire de type serre équipé d'un système de stockage de chaleur sensible (lit de sable) ($0.949 \times 10^{-09} m^2/s$) et mieux de celui de l'air libre ($0.8 \times 10^{-09} m^2/s$). Néanmoins 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) ($1.221 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$) a été supérieure à celle des tranches de courgette séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect sans chicanes ($1.1 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$).

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

Le travail conduit dans le cadre du présent mémoire de master a pour objectif d'étudier l'importance d'adjonction des chicane OSF (Offset Strip Fins) dans le capteur sur les performances des séchoirs solaires indirect à convection forcée.

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 d'un nouveau prototype de séchoir solaire indirect à convection forcé.

L'étude expérimentale a été réalisée selon trois volets. Le premier est relatif à la réalisation de deux prototypes de séchoirs solaire indirect à convection forcé semblables sans et avec chicane OSF (Offset Strip Fins), afin de tester l'influence d'adjonction des chicane et toute modification rapportée. Le deuxième volet porte sur l'étude du comportement cinétique des échantillons de la betterave et la courgette lors de leur séchage convectif en couche mince dans différentes procédés de séchage solaire à des conditions météorologiques variables. Le troisième volet traite l'influence d'adjonction des chicane OSF (Offset Strip Fins) dans le capteur sur le comportement thermique de ce prototype de séchoir solaire indirect à convection forcé réalisé.

L'étude du séchage convectif des échantillons de la betterave et la courgette en couche mince a mis en évidence l'effet positif d'adjonction des chicane OSF. Les diffusivités effectives ($Deff$) lors du séchage des échantillons de betterave et de courgette ont varié de 0.6×10^{-09} à 1.7×10^{-09} m^2/s dans les différents prototypes de séchage solaire. La diffusivité effective de l'humidité dans les tranches de betterave séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect muni des chicane ($0.9 \times 10^{-09} m^2/s$) a été supérieure à celle des tranches de betterave séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect sans chicane ($0.8 \times 10^{-09} m^2/s$). Aussi, elle a été supérieure à celles séchées dans le séchoir solaire de type serre équipé d'un système de stockage de chaleur sensible ($0.803 \times 10^{-09} m^2/s$ pour le lit de sable et $0.799 \times 10^{-09} m^2/s$ pour le lit de roche) et mieux de celui de l'air libre ($0.6 \times 10^{-09} m^2/s$).

Les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire ne constituent qu'une première étape dans l'étude d'adjonction des chicane OSF dans le procédé de séchage solaire des produits agroalimentaires. D'autres travaux de recherche méritent donc d'être réalisés dans le but d'intégrer les matériaux de changement de phase à l'intérieur du capteur pour augmenter la durée de stockage thermique. Etudier différentes formes de chicane. Enfin, une simulation numérique s'avère aussi très utile pour réussir l'optimisation du procédé de séchage solaire indirect à convection forcé.

BIBLIOGRAPHIES:

- [1] Amar Boussalia. Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux. Université mentouri Constantine, 27 juin 2010
- [2] Adrien Lomonaco. stockage d'énergie thermique par matériaux à changements de phase adapté aux centrales solaires thermodynamiques, université de Pau et des pays de l'Adour, 22 septembre 2015
- [3] Ahmat Tom. Contribution au séchage solaire des produits carnés : modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux. L'école nationale supérieure d'arts et métiers le 10 juillet 2015
- [4] Souheyla Khaldi. Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie. Université bourgogne Franche-Comté, 24 septembre 2018
- [5] Adèle Soupert-caron. Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. Génie des procédés. Université Grenoble alpes, 3 février 2016.
- [6] 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
- [7] Slimane Boughali. Etude et optimisation du séchage solaire des produit agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques, universitaire hadj Lakhdar Batna, 13 juillet 2010
- [8] Abdelouahab Benseddik. 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.
- [9] Boumediene Touati. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de l'étude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (mentha viridis) université abou-bekr belkaid-tlemcen, novembre 2008
- [10] Thomas dufour. Optimisation énergétique et environnementale de l'intégration des matériaux de stockage dans les systèmes de réfrigération. Université Pierre et Marie curie - paris vi, 2017.
- [11] 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, 11 octobre 2016

[12] Xiao-Kang Yi, Wen-Fu Wu, Ya-Qiu Zhang, Jun-Xing Li, and Hua-Ping Luo. Thin-Layer Drying Characteristics and Modeling of Chinese Jujubes. *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2012, Article ID 386214, 18 pages

[13] Seyfi S_evik. Design, experimental investigation and analysis of a solar drying system. *Energy Conversion and Management* 68 (2013) 227-234

المخلص

الهدف من هذا العمل هو صنع وتجريب اثنين من مجففات الطاقة الشمسية الحرارية غير المباشرة. الأول هو مجفف شمسي غير مباشر بدون حواجز والثاني مع حواجز (الزعانف). يتم صنع وتجريب المجففات تجريبياً في وحدة البحوث التطبيقية للطاقة المتجددة (URAER) غرداية، الجزائر. تم إجراء تجربة النموذج الأولي غير المباشر لمجفف الطاقة الشمسية من أجل تحديد الأداء الحراري لمجفف الطاقة الشمسية المجهز بحواجز (زعانف). تم تحليل تأثير إضافة حواجز في الجهاز لتحسين الأداء الحراري بشكل تجريبي. أظهرت النتائج التجريبية أن إضافة حواجز تزيد من الأداء الحراري للمسخن الشمسي غير المباشر للحمل الشمسي.

وقد أجريت دراسة مقارنة لعمليات التجفيف الشمسي، من حيث الحركية. تم إجراء تجفيف الشمسي لشمندر الأحمر وكوسى (القرع) ذات الطبقات الرقيقة لعمليات التجفيف الشمسي المختلفة في ظل ظروف الطقس المختلفة. تم استخدام سبعة نماذج رياضية لوصف حركيات التجفيف بطبقة رقيقة من الشمندر الأحمر وكوسى. أظهرت النتائج أن نموذج Midilli و Kucuk هو الأنسب لوصف عملية التجفيف الشمسي. يوصف نموذج الانتشار الخاص بـ Fick نقل الكتلة المنتشر من عينات الشمندر الأحمر وكوسى أثناء عملية التجفيف. كان انتشار الرطوبة في شرائح شمندر الأحمر المجففة في السخان الشمسي غير المباشر المجهز بحواجز أعلى بمقارنة بشرائح شمندر الأحمر المجففة في السخان الشمسي غير المباشر دون حواجز. $0.8 \times 10^{-09} \text{ (م}^2/\text{ث)}$. كما أنها أعلى من تلك المجففة في المجفف الشمسي من نوع الدفينة البلاستيكية المجهز بنظام تخزين حراري الرملي $0.803 \times 10^{-09} \text{ (م}^2/\text{ث)}$ الصخور $0.799 \times 10^{-09} \text{ (م}^2/\text{ث)}$ وأفضل من التجفيف الطبيعي $0.6 \times 10^{-09} \text{ (م}^2/\text{ث)}$

الكلمات الأساسية: تجفيف الفواكه والخضروات، الطاقة الشمسية، حركية التجفيف، مختلف عمليات التجفيف الشمسي

Abstract:

The objective of this work is the realization and experimentation of two indirect convection solar dryers. The first is an indirect solar dryer without baffles and the second with OSF baffles (Offset Strip Fins). The two solar dryers are produced and tested experimentally at the Renewable Energy Applied Research Unit (URAER) Ghardaïa, Algeria.

The experiment of our indirect solar dryer prototype is done in order to determine the thermal performances of a solar dryer equipped with OSF baffles (Offset Strip Fins). The effect of the addition of OSF baffles in the insulator to improve thermal performance was analyzed experimentally. Experimental results showed that the addition of OSF baffles increases the thermal performance of the forced convection indirect solar dryer.

A comparative study of solar drying processes, in terms of kinetics has been carried out. Solar sun drying of beet and thin layer zucchini was performed for different solar drying processes under varying weather conditions. Seven mathematical models were used to describe the thin-layer drying kinetics of beet and zucchini. The results showed that the Midilli and Kucuk model was the most appropriate for describing the solar drying process of the two dried products in different solar drying processes. Diffusion mass transfer from the beet and zucchini samples during the drying process is described by Fick's diffusion model. The effective diffusivity of moisture in dried beet slices in the indirect solar dryer prototype with OSF baffles was greater ($0.9 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$) than that of the dried beet slices in the baffled indirect solar dryer prototype ($0.8 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$). Also, it was superior to those dried in the greenhouse type solar dryer equipped with a sensible heat storage system for the sand bed ($0.803 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$ and for the bed of rock et $0.799 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$ and better that of the open air ($0.6 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$).

Key words: drying of fruits and vegetables, solar energy, drying kinetics, mathematical modeling, solar drying processes.

Résumé :

L'objectif de ce travail est la réalisation et l'expérimentation de deux séchoirs solaires indirects à convection forcée. Le premier c'est un séchoir solaire indirect sans chicanes et le deuxième avec chicanes OSF (Offset Strip Fins). Les deux séchoirs solaires sont réalisés et testés expérimentalement à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) Ghardaïa, Algérie.

L'expérimentation de notre prototype de séchoir solaire indirect se fait dans le but de déterminer les performances thermiques d'un séchoir solaire muni des chicanes OSF (Offset Strip Fins). L'effet de l'adjonction des chicanes OSF dans le capteur pour améliorer les performances thermique a été analysé expérimentalement. Les résultats expérimentaux ont montré que l'adjonction des chicanes OSF augmente les performances thermiques du séchoir solaire indirect à convection forcée.

Une étude comparative des procédés de séchage solaire, en termes de cinétique a été effectuée. Le séchage solaire de la betterave et la courgette en couche mince a été effectué pour différentes procédés de séchage solaire dans des conditions météorologiques variables. Sept modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage en couche mince de 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 deux produits séchés dans différents procédés de séchage solaire. Le transfert de masse par diffusion à partir des échantillons de la betterave et la courgette, lors du processus de séchage, est décrit par le modèle diffusif de Fick. La diffusivité effective de l'humidité dans les tranches de betterave séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect muni des chicanes OSF ($0.9 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$) a été supérieure à celle des tranches de betterave séchées dans le prototype de séchoir solaire indirect sans chicanes ($0.8 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$). Aussi, elle a été supérieure à celles séchées dans le séchoir solaire de type serre équipé d'un système de stockage de chaleur sensible ($0.803 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le lit de sable et $0.799 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le lit de roche) et mieux de celui de l'air libre ($0.6 \times 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$).

Mots clés : séchage solaire des fruits et légumes, énergie solaire, cinétique de séchage, Modélisation mathématique, différents procédés de séchage solaire.