

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie mécanique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الميكانيكية
المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister

Spécialité : Génie mécanique
Option : Energétique

**Etude théorique et expérimentale des performances d'un
séchoir couplé à un capteur solaire plan à air**

Présenté par :
DJEBNOUN KHALED

Soutenu publiquement le :

Devant le jury composé de :

Président : Mr. MOUMMI Nouredine
Examinateur : Mr. BENCHABENE Adel
Examinateur : Mr. BRIMA Abdelhafid
Rapporteur : Mr. MOUMMI Abdelhafid

MC(A)
MC(A)
MC(A)
MC (A)

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra

REMERCIEMENT

Je tiens à adressé mes plus vifs remerciements à Monsieur **Abdelhafid Moummi**, d'avoir dirigé mes travaux de thèse et qui m'a accordé sa confiance dès la réalisation de ce travail.

Je remercie également l'équipe pédagogique du département Génie-mécanique de l'université de Biskra qui n'a ménagé aucun effort pour nous donner le meilleur d'eux même.

Ma profonde gratitude et sincère reconnaissance envers mon père **Mohamed Laïd** et ma mère **Méssaouda** pour tout ce qu'ils mon offert pendant toute ma vie, ils sont et ils resteront toujours mes plus chères. Sans oublier mes frères et sœurs ainsi que toute ma grande famille petits et grands tout on espérant du dieu qu'il nous unisse pour le bien.

Il est aussi très important de remercier ma chère épouse qui n'a pas cessée de m'encourager, surtout pour la reprise des études, et me soutenir pendant les moments difficiles, que dieu soit avec elle. Sans oublié mes petits enfants **Younes** et **Yousra** que je leurs dédie ce travail que j'espère qu'ils leurs servent d'exemple.

Résumé

Nous avons développé un code de calcul permettant de simuler le comportement d'une chaîne énergétique capteur solaire-séchoir fonctionnant en convection forcée pour des applications au séchage de produits agro-alimentaires. Ce code est validé par comparaison de ces résultats à ceux d'autres travaux expérimentaux sur les feuilles de la verveine qui, après être séchée, présente un grand intérêt pour l'industrie notamment pour la médecine, la pharmacie et le cosmétique.

Le capteur plan à air, relié à l'armoire de séchage, est à simple passe arrière, la veine d'air mobile pouvant être munie d'ailettes permettant d'améliorer les performances de ce capteur.

Le séchoir proprement dit, est une armoire en bois comportant trois grilles superposées et amovibles, sur lesquelles le produit à sécher est disposé en couches minces.

Le premier sous-programme itératif développé détermine les performances thermiques instantanées du capteur plan à air. Le second, pour lequel les données d'entrée sont celles de sortie du premier, gère un modèle théorique, à la fois mathématique et physique, qui repose sur les équations de bilan de chaleur et de masse.

Nous présentons aussi quelques prédictions du modèle numérique pour différentes valeurs des paramètres aérothermiques de l'air de séchage.

Et enfin, nous avons essayé de toucher, avec les moyens disponibles, à l'expérimentation tout en déterminant quelques courbes de la cinétique de séchage des feuilles de la verveine.

Mots clés : capteur solaire plan, convection forcée, humidité, Verveine, séchage, simulation numérique, transfert de chaleur, transfert de masse.

Abstract

We have developed a numerical simulation model to predict the performance of energy chain (flat plate collector-dryer) in the forced convection in the application of foodstuff drying. This model is validated by a study on the Verbena which, after being dried and grinded, presents a great interest for the industry and especially for the medical, pharmacetic and cosmetic.

The solar air flat plate collector, with single back draughts, is linked to the dryer. It can be equipped with offset plate fins placed in the dynamic air vein, in order to improve its performance.

The wooden drying chamber contains three racks (stacked and removable) upon which the product is spread in a thin bed.

The first developed iterative algorithm calculates the instantaneous thermal performance of the collector. The second algorithm, whose data inlet corresponds to the outlet of the first one, utilizes a theoretical model, both mathematical and physical, which stems from balance equations of heat and mass in a porous medium

We present also a few predictions of the numerical model for different values of the drying air aérothermal parameters.

Finally, we trayed to touch, with available means, at the expirience, to determine some drying courbs for verbena leaf.

SOMMAIRE

Nomenclature

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : Notions théoriques sur le séchage

1.1 Introduction	1
1.2 Les différents modes de séchage	1
1.2.1 Séchage par conduction	1
1.2.2 Séchage par convection.....	1
1.2.3 Séchage par rayonnement	1
1.3 Les différentes phases du séchage	2
1.3.1 Phase initiale.....	3
1.3.2 Phase à vitesse de séchage constante.....	3
1.3.3 Phase à vitesse de séchage décroissante.....	5
1.4 Notions hygroscopiques d'un milieu poreux	8
1.4.1 Les forme d'eau dans un milieu poreux.....	8
1.4.2 L'activité de l'eau dans le produit.....	10
1.4.3 Isothermes de sorption.....	11
1.4.4 Formes et modèles des isothermes de sorption.....	12
1.4.5 Chaleur isostérique ou enthalpie différentielle de sorption.....	14
1.5 Les séchoirs solaires	16
1.5.1 Les séchoirs naturels.....	16
1.5.2 Les séchoirs solaires directs.....	17
1.5.3 Les séchoirs solaires indirects.....	18
1.5.4 Les séchoirs mixtes.....	18
1.5.5 Les séchoirs hybrides.....	19

Chapitre 2 : Développement de la théorie et des travaux sur le séchage

2.1 Classification des modèles du séchage.....	21
2.1.1 Les modèles empiriques.....	22
2.1.2 Les modèles diffusifs	22
2.1.3 Les modèles basés sur le transfert de chaleur et de masse.....	22
2.1.4 Le concept de la courbe caractéristique de séchage.....	23
2.1.4.1 Principe de la méthode.....	23
2.1.4.2 Exemples de quelques courbes caractéristique de séchage.....	26
2.2 Présentation de quelques travaux récents sur le séchage.....	27

Chapitre 3 : Description et modélisation du séchoir

3.1 Introduction.....	35
3.2 Description du système de séchage.....	36
3.3 Matière première à sécher.....	37
3.4 Modélisation du séchoir.....	37
3.4.1 Hypothèses simplificatrices.....	38
3.4.2 Mise en équations.....	39
3.4.2.1 Bilans thermiques.....	40
3.4.2.2 Bilans massiques pour l'eau.....	44
3.4.2.3 Modèle mathématique	46

Chapitre 4 : Simulation numérique et résultats

4.1 Introduction.....	47
4.2 Les différentes étapes de la résolution du modèle mathématique.....	47
4.3 Choix de la méthode numérique.....	50
4.4 Discrétisation du modèle mathématique	51
4.5 Programmation numérique.....	54

4.6 Résultats et discussion	57
4.6.1 Performances du capteur solaire.....	57
4.6.1.1 Intensité du rayonnement solaire.....	58
4.6.1.2 Température à l'entrée et à la sortie du capteur.....	59
4.6.2 Performances du séchoir.....	61
4.6.2.1 1 ^{ier} cas : Sans utilisation du capteur solaire.....	62
4.6.2.1.1 Validation du modèle numérique.....	62
4.6.2.1.2 Influences des paramètres climatiques de l'air asséchant.....	64
4.6.2.2 2 ^{ième} cas : Utilisation du capteur solaire.....	68
4.6.2.2.1 Influence du débit de l'air de séchage.....	68
4.6.2.2.2 Cinétique de séchage de la verveine pour les trois claies.....	69
4.7 Conclusion	71

Chapitre 5 : Validation expérimentale

5.1 Introduction	72
5.2 Description du dispositif expérimental	72
5.3 Fonctionnement du dispositif expérimental	74
5.4 Protocole expérimental	75
5.5 Résultats et discussions	77
5.7 Conclusion	80

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexes

Annexes 1 : Propriétés et grandeurs physiques de l'air humide

Annexes 2 : Notions sur les capteurs solaires plans à air

Annexes 3 : Listing du programme SECHDJEB

NOMENCLATURE

A : surface de captation de l'insolateur plan à air	m^2
a_w : activité de l'eau du produit	
a_v : surface volumique d'une particule à l'instant t	m^2/m^3
$C_{p_b} = 2300$, chaleur massique du bois	J/kgK
$C_{p_e} = 4180$, chaleur massique de l'eau dans le produit	J/kgK
C_{p_f} : chaleur massique de l'air	J/kgK
$C_{p_{fs}} = 1000$, chaleur massique de l'air sec	J/kgK
$C_{p_{pr}}$: chaleur massique du produit humide	J/kgK
$C_{p_{prs}}$: chaleur massique du produit sec	J/kgK
$C_{p_v} = 1860$, chaleur massique de la vapeur dans l'air	J/kgK
d_m : diamètre moyen des particules de produit à sécher	m
D_e : diffusivité de l'eau dans le produit	m^2/s
D_v : diffusivité de l'humidité dans l'air de séchage	m^2/s
D_H : diamètre hydraulique	m
e : épaisseur de la veine d'air mobile	m
e_b : épaisseur de la paroi en bois de l'armoire de séchage	m
e_c : hauteur d'une claie	m
e_l : épaisseur du lit de particules à l'instant t	m
e_p : épaisseur initiale des rondelles du produit à sécher	mm
G : débit massique d'air	kg/h
G_c : débit massique d'air par unité de surface de captation	kg/hm ²
G_s : débit massique d'air par unité de section de l'armoire de séchage	kg/sm ²
h_{vfpr} : coefficient de transfert convectif entre le produit et l'air	W/m ² K
H_m : coefficient de transfert de masse global	m/s
h_{me} : coefficient de transfert de masse externe	m/s

l : largeur du capteur plan à air	m
l_s : largeur de l'armoire de séchage	m
L : 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
M : humidité absolue du produit à l'instant	kg eau/kg MS
M_e : humidité absolue du produit à l'équilibre	kg eau/kg MS
M_0 : humidité absolue du produit initiale	kg eau/kg MS
\dot{m}_a : débit d'air massique	kg/s
\dot{m}_e : débit d'eau évaporée du produit	kg eau/s
m_e : masse de l'eau du produit humide à l'instant t contenu dans une claie	kg
m_{pr} : masse du produit humide à l'instant t contenu dans une claie	kg
m_{pro} : masse initiale du produit humide contenu dans une claie	kg
m_{prf} : masse finale du produit humide contenu dans une claie	kg
m_{prs} : masse du produit sec contenu dans une claie	kg
$P = 101,325$, pression atmosphérique	kPa
p_v : pression partielle de vapeur dans l'air	kPa
p_{vp} : pression de vapeur à la surface du produit	kPa
p_{sat} : pression de vapeur saturante	kPa
P_{ev} : puissance totale d'évaporation	W
P_u : puissance utile récupérée par l'insolateur	W
Q_{ev} : quantité de chaleur d'évaporation	W/m ²
Q_u : quantité de chaleur utile récupérée par l'insolateur	W/m ²
Q_s : quantité de chaleur de séchage	W/m ²
$R = 8,314$, constante des gaz parfaits	J/molK
$R_v = 462$, constante caractéristique de l'eau	J/kgK

S_{fpr} : surface d'échange entre l'air et le produit disposé dans une claie	m^2
t : temps	s
T_a : température ambiante	$^{\circ}\text{C}$
T_{sc} : température sèche de l'air à la sortie du capteur	$^{\circ}\text{C}$
T_{pr} : température à la surface du produit à sécher	$^{\circ}\text{C}$
v : vitesse de l'air dans la veine d'air mobile du capteur plan et vitesse moyenne de l'air à proximité du produit dans le lit de particules	m/s
V : volume d'une particule de produit à sécher à l'instant t	m^3
V_a : volume de l'air contenu dans une particule de produit à sécher	m^3
V_{air} : volume de l'air contenu dans un lit de particules de produit à sécher	m^3
W : teneur en humidité absolue de l'air	kg eau/kg air sec
X : teneur en eau moyenne du produit	(kg eau/kg.ms)
X_{eq} : teneur en eau d'équilibre déterminée par les isothermes de sorption.	(kg eau/kg.ms)
X_{cri} : teneur en eau critique marquant la transition entre la phase de séchage à vitesse constante (phase 1) et celle à vitesse décroissante (phase 2).	(kg eau/kg.ms)
X^* : teneur en eau réduite	(kg eau/kg.ms)

Introduction générale

Depuis le stade de la récolte ou de l'abattage, qui marque la fin de la phase de production, jusqu'à la consommation par l'être humain, les matières premières alimentaires subissent un certain nombre d'opérations parmi lesquelles nous pouvons citer : le séchage, le stockage, la conservation, la maturation, le nettoyage, le mélange, la cuisson, la présentation et la consommation.

La présente étude est, pour sa part, consacrée au séchage de produits agricoles par air chaud, première opération de transformation de l'aliment avant son stockage ou son utilisation pour l'industrie alimentaire, le chauffage étant assuré par un capteur solaire plan à air.

Il convient en effet de savoir que chaque mètre carré du sol, qu'il fasse beau ou qu'il pleuve, reçoit par jour, en moyenne sur un an, entre 3 et 5 kWh. Tout le problème est de piéger cette énergie solaire directe au lieu de la laisser se dissiper, et d'en piéger le maximum. C'est le rôle du capteur solaire, simple dans son principe, mais élaboré dans sa technique, et dont on peut améliorer substantiellement le rendement par l'adjonction d'une plaque d'aluminium et d'ailettes dans la veine d'air mobile.

L'étude de cette chaîne énergétique comportera donc deux volets, le premier concernant l'insolateur plan qui sert à convertir l'énergie solaire rayonnante incidente en énergie thermique, cette énergie étant véhiculée par un fluide caloporteur (air), le second concernant l'armoire de séchage où nous disposons le produit à sécher étalé sur des claies en grilles perforées superposées.

Notre travail se compose de cinq chapitres ; le premier est une étude bibliographique des notions théoriques sur le séchage, en particulier le séchage solaire. Nous y donnons quelques généralités sur le séchage et les séchoirs, mettant en évidence les différentes phases qui se succèdent au cours de la déshydratation des produits poreux, et les propriétés hygroscopiques de ceux-ci.

Le deuxième chapitre est consacré à une étude historique dont laquelle nous présentons d'une part, le développement de la théorie du séchage et d'autre part, quelques travaux récents effectués en ce domaine. Ce qui nous a guidé à choisir la méthode à suivre pour aborder ce travail. Cette méthode, de la courbe caractéristique de séchage, sera bien développée et détaillée dans ce chapitre.

Le capteur solaire est relié à l'armoire de séchage où se déroulent des transferts de chaleur et de masse, entre l'air et la paroi intérieure de l'armoire, et l'air et le produit à sécher. La modélisation de ces transferts est l'objet du troisième chapitre. La mise en équation du bilan de conservation de chaleur et de masse au niveau de chaque claie du séchoir, nous a conduit à un système d'équations mathématiques non linéaires qui ne peut être résolu que par une méthode numérique. Nous tenons compte dans ce modèle des variations des propriétés thermophysiques de l'air et du produit avec leurs températures et leurs humidités absolues.

Le quatrième chapitre de notre mémoire comporte deux parties : la première explicite la méthode mathématique et numérique de résolution choisie, et la discrétisation des équations, le programme général des calculs et l'ensemble des sous-programmes mis au point.

La seconde partie est consacrée, en premier lieu à une validation du code de calcul élaboré par comparaison des résultats obtenus à ceux d'autres auteurs, et en second lieu d'étudier l'influence des paramètres climatiques de l'air asséchant sur le processus du séchage pour les deux cas, avec et sans utilisation du capteur solaire.

Et, finalement, dans le cinquième chapitre nous essayons d'aborder le côté expérimental pour avoir une idée sur l'allure des courbes de la cinétique de séchage des feuilles de la verveine pour quelques valeurs des paramètres climatiques de l'air de séchage.

Chapitre 1 :

Notions théoriques sur le séchage

1-1-Introduction :

Le séchage a pour but d'éliminer par vaporisation le liquide qui imprègne un solide afin de le conserver à une température ambiante ou de réduire son poids.

Alors le séchage consiste à chauffer un produit afin de faire évaporer l'eau, ou autre solvant, qu'il contient.

Ainsi, pour bien comprendre ce phénomène de migration d'humidité dans les milieux poreux, on doit considérer simultanément les transferts de masse et de chaleur dans toutes les phases (solide, vapeur et liquide) du milieu poreux.

1-2-Les différents modes de séchage :

On rencontre une diversité dans les modes de séchage :

- **Séchage par conduction** : Le produit est en contact avec des surfaces chaudes.
- **Séchage par convection** : On envoie sur le produit à sécher un courant gazeux chaud qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée. Toutefois le séchage par convection, appelé aussi par entrainement, demeure la technique la plus répandue et la plus utilisée.
- **Séchage par rayonnement** : L'apport de la chaleur est assuré par l'application d'un rayon infrarouge sur le produit.

1-3-Les différentes phases du séchage :

Pendant le processus de séchage on s'intéresse généralement à deux paramètres :

- La teneur en eau du produit au cours du temps $X=X(t)$.
- La vitesse de séchage au cours du temps $dX/dt=f(t)$.

On peut distinguer plusieurs phases pendant le phénomène de séchage. La figure (1.1) présente l'évolution typique, en fonction du temps t , de la teneur en humidité absolue X (rapport de la masse d'eau contenue dans le produit et de la masse du produit sec) d'un produit à travers lequel circule un courant d'air chaud dont l'humidité et la température sont contrôlées tout au long du processus de séchage. On y distingue trois phases, plus visibles sur les courbes des figures (1.2 et 1.3) donnant la vitesse de séchage (dX/dt) en fonction du temps ou de X .

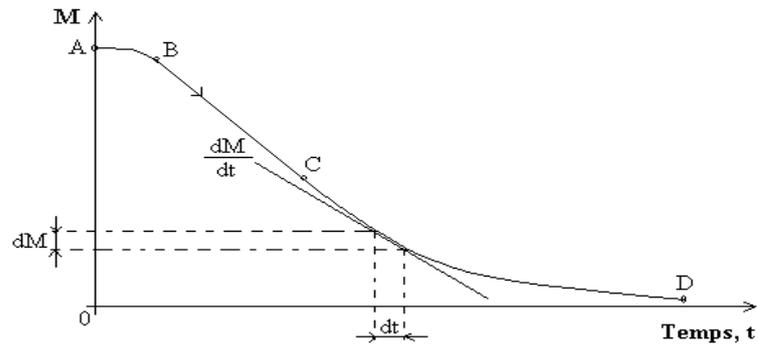


Fig.1.1. Courbe de séchage

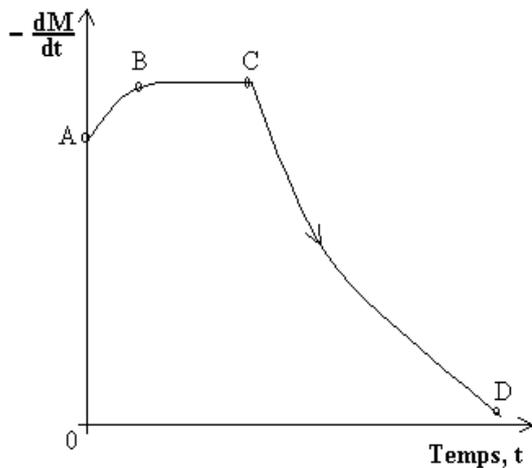


Fig. 1.2. Vitesse de séchage $dM/dt=f(t)$

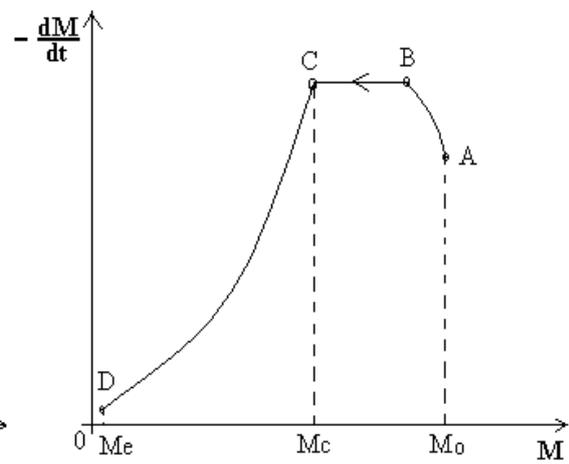


Fig. 1.3. Vitesse de séchage $dM/dt=f(M)$

1-3-1. Phase initiale (A-B) : C'est une phase transitoire d'échauffement au cours de laquelle la température du produit augmente. Physiquement, elle correspond à une phase de réchauffement du produit humide sans diminution appréciable de l'humidité ; ce qui explique vraisemblablement le peu d'intérêt manifesté par les chercheurs dans l'étude de cette phase, généralement de courte durée.

1-3-2. Phase à vitesse de séchage constante (B-C) : Durant toute la durée de cette phase jusqu'au point critique C, la surface du produit est saturée en eau. Un film mince de liquide est maintenu à la surface, dû à la migration d'eau du cœur du produit à sa surface externe causée par la pression capillaire. Ceci rend donc le processus de séchage assimilable à l'évaporation d'un liquide dont la vitesse de séchage dépend uniquement des conditions externes telles que l'humidité de l'air, sa température sèche et sa vitesse de circulation. Par

contre la nature du solide n'intervient pas, alors que sa forme peut influencer sur le débit d'eau évaporer \dot{m}_e , défini par :

$$\dot{m}_e = -m_{prs} \frac{dM}{dt} = K_m S_{fpr} (P_{sat}(T_{pr}) - P_v(T_{fs})) \quad (1.1)$$

Où :

- $P_{sat}(T_{pr})$: est la pression de vapeur d'eau saturante à la température T_{pr} à la surface du produit pendant la phase à vitesse constante ou pression saturante à la température humide de l'air en Pascal.
- $P_v(T_{fs})$: est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air de température locale T_{fs} en Pascal,
- $K_m = h_{me}/(R_v(T_{fs} + 273))$, est le coefficient global externe de transfert de matière exprimé en s/m, où h_{me} est le coefficient d'échange de matière par diffusion à travers la couche limite, il peut être déterminé expérimentalement et est exprimé en m/s
- R_v est la constante caractéristique de l'eau exprimée en J/kgK.

En considérant que le transfert de matière représenté par l'évaporation de l'eau s'accompagne d'un transfert thermique dirigé en sens inverse, la vitesse d'évaporation peut également s'exprimer sous une autre forme :

$$\dot{m}_e = h_{vfpr} S_{fpr} (T_{fs} - T_{pr}) / L_v \quad (1.2)$$

Où h_{vfpr} et S_{fpr} sont respectivement le coefficient d'échange par convection entre l'air et le produit (en W/m^2K) et la surface d'échange entre l'air et le produit (en m^2).

C'est une phase qui n'est pas toujours identifiable, même pour les produits végétaux qui ont une humidité absolue initiale importante. Ceci s'explique par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure.

Cette phase d'évaporation est observable tant que la vitesse de transport de l'eau liquide dans les pores du matériau vers sa surface est un phénomène rapide devant la vitesse globale d'évaporation ; les principaux facteurs diminuant sa durée sont :

- La diminution de la pression de vapeur d'eau dans l'air ou bien la diminution du taux d'humidité de l'air de séchage,
- L'augmentation des coefficients de transfert de matière et de chaleur par une augmentation de la vitesse de l'air de séchage,

- L'accroissement de la surface d'échange air-produit, qui peut s'obtenir en divisant le plus possible le produit à traiter,
- L'élévation de la température de séchage.

1-3-3. Phase à vitesse de séchage décroissante (C-D) : Durant la phase de ralentissement, on admet que le transfert de l'eau au sein du produit n'est plus assez rapide pour saturer la surface d'échange. La pression de vapeur d'eau sur cette surface diminue donc, ce qui diminue le potentiel d'échange, défini par la différence entre cette pression et la pression de vapeur d'eau dans le milieu ambiant ; par conséquent, la vitesse de séchage diminue.

Cette phase dépend, en premier lieu des propriétés de diffusion de l'eau dans le produit, l'influence des conditions d'écoulement de l'air asséchant est secondaire.

La théorie la plus appropriée dans cette phase est celle de la diffusion qui suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouverné par la seconde loi de Fick qui établit une relation linéaire entre le flux de matière Φ_m (kg/m²s) et le gradient de concentration volumique de l'eau C (kg eau/m³), au sein d'un volume de produit :

$$\vec{\Phi}_m = -D_e \vec{\text{grad}} C \quad (1.3)$$

- D_e : est la diffusivité de l'eau dans le produit à sécher : m²/s

La loi de conservation de la matière donne :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div} \vec{\Phi}_m = 0 \quad (\text{en l'absence de sources volumiques})$$

Qui peut s'écrire, lorsque la diffusivité est constante (matériau homogène isotrope) et indépendante de C :

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D_e \Delta C = 0$$

Lorsque l'on suppose que la masse volumique du produit est constante, cette équation devient :

$$\frac{\partial M}{\partial t} - D_e \Delta M = 0 \quad (1.4)$$

Si la diffusivité est constante, l'équation (1.4) peut être résolue analytiquement pour une distribution initiale M_0 uniforme dans le produit, et une distribution sur sa surface uniforme et égale à la teneur en humidité absolue à l'équilibre. Si \bar{M} est la moyenne dans le domaine considéré du champ M , on obtient pour un domaine sphérique :

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = \gamma \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_e \cdot t}{l_p^2}\right) \quad \text{avec } \gamma = 6/\pi^2 \quad (1.5)$$

Et on étend cette formule pour d'autres géométries, l_p est alors la longueur caractéristique du produit (rayon pour une sphère, épaisseur pour une plaque), γ est un coefficient dépendant de la forme du produit ($6/\pi^2$ sphère, $8/\pi^2$ plaque, etc.).

Pour un temps de séchage suffisamment long, lorsque le temps t est supérieur au temps critique à partir duquel débute la phase à vitesse de séchage décroissante et pour $(M - M_e)/(M_0 - M_e) < 0,6$, la série de l'équation (1.5) est pratiquement égale à son premier terme et on peut écrire :

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = \gamma \exp\left(- \frac{\pi^2 D_e t}{l_p^2}\right) \quad (1.6)$$

Plusieurs auteurs ont consacré des études sur le coefficient de diffusion de l'eau dans les produits, Citons : Gekas et Lamberg (1991) [31] qui ont traité la pomme de terre, Mulet (1994) [54] a étudié la pomme de terre et les carottes. Afzal et Abe (1998) [2] proposent une expression de ce coefficient, dont les valeurs sont comprises entre $5,93 \cdot 10^{-11}$ et $1,73 \cdot 10^{-9}$ m²/s, en fonction de la température interne du produit T_{pr} , de l'épaisseur e_p en mm, ainsi que de l'humidité absolue M de la pomme de terre :

$$D_e = 2,57 \cdot 10^{-11} \cdot (T_{pr} + 273) + 7,96 \cdot 10^{-11} \cdot e_p - 2,11 \cdot 10^{-10} \cdot M - 7,015 \cdot 10^{-11} \quad (1.7)$$

La théorie capillaire, elle, s'applique à des produits poreux et granulaires dont la teneur en humidité absolue à base sèche est généralement déterminée empiriquement. Si la teneur en eau est uniforme ou représente une valeur moyenne dans le produit, on écrit que :

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = b(M_e - \bar{M}) \quad (1.8)$$

où M_e , représente la teneur à l'équilibre qui est fixée.

La solution générale de cette équation s'écrit donc :

$$\bar{M} = (M_0 - M_e)e^{-bt} + M_e$$

- M_0 étant la teneur initiale moyenne.

- b est un coefficient qui dépend de la vitesse de séchage pendant la phase à vitesse constante, sa détermination est empirique.

1-4- Notion hygroscopique d'un milieu poreux :

1-4-1 Les formes d'eau dans un milieu poreux :

Pour caractériser un matériau poreux en termes de transferts, il est important de définir un certain nombre de paramètres physiques caractérisant la structure géométrique de la matrice de ce milieu et les interactions entre celle-ci et les phases fluides qu'elle contient.

Dans notre cas, ces phases sont au nombre de deux : l'eau liquide dont les interactions avec la matrice solide sont d'origine hydrodynamique ou capillaire (eau libre) et d'origine intermoléculaire ou chimique (eau liée), et une phase gazeuse (air humide) constituée d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. L'ensemble regroupant l'eau libre, l'eau liée et la vapeur d'eau contenues dans un milieu poreux est communément appelé "eau titrable" et correspond aux molécules d'eau qui peuvent être évacuées du milieu considéré par déshydratation thermique (à l'opposé de l'eau dite de constitution qui ne peut être évacuée que lors d'une opération de calcination).

- **L'eau libre** : Elle remplit la majeure partie des pores de la structure du milieu et est retenue sous forme de liquide par des forces d'origine capillaire.

- **L'eau liée** : Elle est adsorbée physiquement en couche multimoléculaire par des forces du type Van Der Waals ou de nature électrostatique sur, et parfois dans, les parois de la structure. Elle peut aussi être retenue par des forces capillaires fortes ; c'est le cas dans des pores de dimensions caractéristiques d'ordre inférieur ou égal au micromètre environ, pour lesquels les forces internes engendrées par une opération de séchage ne suffisent pas à surpasser les forces capillaires en présence.

- **La vapeur d'eau** : Elle est mélangée avec l'air sec et occupe les espaces libérés par l'eau libre, l'eau liée et la matrice solide.

On peut donc distinguer deux types d'eau d'un point de vue thermodynamique : l'eau libre et l'eau liée. Ces concepts ne sont pas respectés au sens strict dans la littérature abordant la répartition des différents types d'eau dans les milieux poreux (voir figure 1.4).

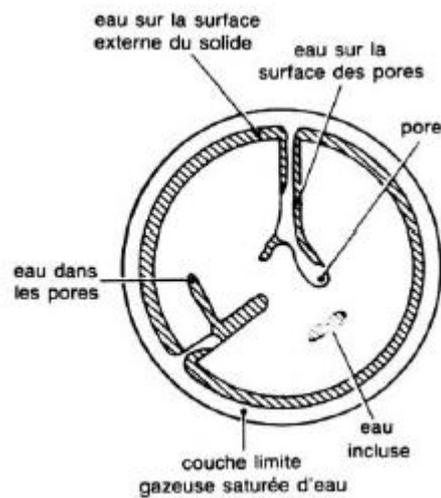


Fig. 1.4 : Représentation schématique d'un solide humide [16]

Pour Vesilind et Martel (1989) [58], l'eau libre est celle qui peut être éliminée par simple décantation gravitaire. L'eau interstitielle est celle qui est enfermée dans les floccs ou dans les structures cellulaires, son enlèvement nécessite la rupture des floccs ou des cellules, l'eau vicinale est celle qui est retenue en surface des particules solides par des liaisons hydrogènes, son élimination passe par un traitement thermique, enfin l'eau d'hydratation qui est chimiquement liée et qui nécessite une importante dépense énergétique pour son enlèvement.

Pour Smollen (1990) [56], l'eau libre est celle éliminée par déshydratation mécanique, l'eau qui subsiste est de l'eau liée.

Pour Tsang et Vesilind (1990) [57], l'eau libre est la somme de l'eau éliminée par déshydratation et par séchage à vitesse constante. Les ruptures de pente de la courbe de séchage leur permettent de distinguer l'eau interstitielle, l'eau de surface (eau vicinale) et l'eau liée chimiquement qui n'est pas éliminée.

1-4-2 L'activité de l'eau dans un produit :

Dans un matériau humide l'eau libre se comporte comme de l'eau pure : sa tension de vapeur correspond à la saturation à la température considérée. Par contre, l'eau liée va développer une tension de vapeur inférieure à la valeur de saturation. Et elle est définie par la relation :

$$a_w = \frac{P_v}{P_{sat}(T)} = \frac{HR(\%)}{100} \quad (1.9)$$

avec :

P_v : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)

P_{sat} : pression partielle de vapeur saturante (Pa)

HR : humidité relative de l'air contenant de la vapeur d'eau.

L'équilibre, dans le mélange solide-eau, se traduit par une teneur en eau dite teneur d'équilibre et notée X_{eq} , employée parfois pour remplacer celui de l'activité.

1-4-3 Isotherme de sorption :

Dans le domaine du séchage, l'équilibre solide-eau, obtenu à une température constante, est présenté sous forme d'un diagramme (a_w, X_{eq}) appelé **isotherme de sorption**. L'isotherme de sorption lie la teneur d'équilibre en eau du solide à la teneur en humidité de l'environnement, à une température donnée. Selon que l'on atteigne l'équilibre par prise ou perte de solvant, on obtient respectivement une isotherme **d'adsorption** ou **de désorption**. Précisons que ces deux courbes présentent une hystérésis plus ou moins importante selon le produit.

L'utilité des isothermes est d'une part, de connaître la teneur en eau finale d'un produit exposé à des conditions définies de séchage (humidité et température), qui est nécessaire lors de la modélisation, et d'autre part de décrire le comportement hygroscopique du solide.

A partir des isothermes, il est également possible de déterminer la chaleur isostérique de sorption qui est une mesure du degré de liaison de l'eau et de quantité d'énergie à fournir pour libérer cette eau.

1-4-4 Formes et modèles des isothermes de sorption :

De nombreuses équations ont été proposées pour modéliser les isothermes. Certaines se basent sur un modèle théorique d'adsorption, alors que d'autres sont de nature empirique. Un inconvénient de ces relations est qu'elles ne sont pas applicables sur toute la gamme des humidités relatives. Le tableau suivant reprend les modèles les plus utilisés.

Auteurs	Modèle	Domaine
Langmuir	$W = W_{12} \frac{C HR}{1 + C HR}$ (1.11)	HR < 35%
Brunauer Emmet Teller (BET)	$\frac{HR}{(1 - HR)W} = \frac{1}{C W_{12}} + \frac{C - 1}{C W_{12}} HR$ (1.12)	Courbe complète
Guggenheim Anderson Boer (GAB)	$W = \frac{W_{12} HR C K}{(1 - HR K)(1 + HR C K - HR K)}$ (1.13)	Courbe complète
Harkings	$HR = \exp\left(k - \frac{n}{W^2}\right)$ (1.14)	Courbe complète
Halsey	$HR = \exp\left[-\exp(A + BT)W^{-C}\right]$ (1.15)	Courbe complète
Henderson	$HR = 1 - \exp\left[-A(T + B)W^C\right]$ (1.16)	Courbe complète
Oswin	$HR = \left[1 + \left(\frac{A + BT}{W}\right)^C\right]^{-1}$ (1.17)	Courbe complète
Chung-Pfost	$HR = \exp\left[\left(\frac{A}{T + B}\right) \exp(-C W)\right]$ (1.18)	Courbe complète

Tableau 1.1 : modèles des isothermes de sorption [48]

Certains paramètres de ces modèles ont une signification physique :

- Dans les modèles de BET et de GAB, W_{12} [48] représente la teneur en eau du solide à la saturation de la monocouche.
- Dans le modèle de GAB, les paramètres C et K ont les expressions suivantes :

$$C = A \exp\left(\frac{H_w - H_m}{RT}\right) \quad \text{et} \quad K = B \exp\left(\frac{H_w - H_q}{RT}\right) \quad (1.10)$$

Où :

H_w : Chaleur de condensation de l'eau pure

H_m : Chaleur de sorption totale de la première couche

H_q : Chaleur de sorption totale des multicouches.

Le modèle approprié à la description de l'allure de la cinétique de séchage des feuilles de marjolaine est choisi selon les critères suivants:

- Coefficient de corrélation (r) élevé
- Erreur systématique moyenne (ESM) minimale
- χ -carrée réduite minimale.

Ces paramètres statistiques sont définis par:

$$r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{eqi,pre} - \overline{X_{eqi,exp}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{eqi,exp} - \overline{X_{eqi,exp}})^2}} \quad (1.11)$$

La teneur en eau moyenne expérimentale est définie par:

$$\overline{X_{eqi,exp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{eqi,exp} \quad (1.12)$$

$$ESH = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{eqi,exp} - X_{eqi,pre})^2}}{d_f}$$

$$EMR = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{eqi,exp} - X_{eqi,pre}}{X_{eqi,exp}} \right| \quad (1.13)$$

$X_{eqi,exp}$: $i^{\text{ème}}$ teneur en eau expérimentale d'équilibre (% MS).

$X_{eqi,pre}$: $i^{\text{ème}}$ teneur en eau prédite d'équilibre (% MS).

N : Nombre de points expérimentaux, {dans notre cas, ($N = 6$)}.

d_f : Degré de liberté de la régression du modèle, { $d_f = N - n$ }.

n : Nombre de variables de chaque modèle.

Pour identifier les paramètres du modèle et savoir si les résidus entre les valeurs calculées avec le modèle et celles de l'expérience sont minimales, on procède au calcul de l'erreur résiduelle, définie par:

$$e_i = X_{eqi,exp} - X_{eqi,pre} \quad (1.14)$$

1-4-5 Chaleur isostérique ou enthalpie différentielle de sorption :

La chaleur isostérique de sorption peut être calculée à partir d'une relation dérivée de l'équation de Clausius-Clapeyron. Cette relation nécessite de déterminer les isothermes à différentes températures afin de calculer la variation logarithmique de l'humidité relative en fonction de l'inverse de la température, pour une teneur en eau d'équilibre fixée.

Cependant, à partir des équations modifiées, il est possible d'obtenir l'expression analytique de la chaleur de sorption. Cette approche suppose que la chaleur isostérique ne varie pas avec la température

$$\frac{\partial \ln a_w}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} = - \frac{Q_{st} - L_v}{R} = - \frac{q_{st}}{R} \quad (1.15)$$

Où:

- Q_{st} : est la chaleur isostérique de sorption, (kJ/mol).
- q_{st} : est la chaleur isostérique nette de sorption à la teneur en eau d'équilibre,
- X_{eq} : (kg/mol); T la température absolue, (K); R est la constante des gaz parfaits (8.3145 J/mol.K); tandis que L_v représente la chaleur latente de vaporisation de l'eau pure (43.53 kJ/mol) à 35 °C.

La chaleur isostérique nette représente l'énergie de fixation de l'eau au substrat, c'est-à-dire la chaleur supplémentaire à la chaleur de vaporisation de l'eau pure qu'il faudrait fournir au produit pour le déshydrater.

Le calcul de q_{st} peut se faire en exploitant les courbes des isothermes de sorption obtenues à différentes températures. La valeur de q_{st} augmente généralement à mesure que le degré de déshydratation avance. La chaleur isostérique se calcule par la relation:

$$Q_{st} = q_{st} + L_v \quad (1.16)$$

1-5- Les séchoirs solaires :

On peut classer les séchoirs suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects [24] :

1-5-1-Les séchoirs naturels :

Ils utilisent directement le soleil et l'air, dont l'action n'est ni particulièrement favorisée, ni contrôlée. Le produit est réparti sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé à même le sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant.

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

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

Il présente cependant des inconvénients : pertes de produits mal séchés ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussière). Ainsi, le séchage du poisson sur le sable peut entraîner des pertes allant jusqu'à 50 % du fait du développement de larves.

1-5-2- Les séchoirs solaires directs :

Par définition, les rayons du soleil frappent directement dans ces séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes. Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet cheminée) ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur , du fait de la rusticité des modèles.

Ce type de séchage présente deux avantages :

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes,
- Ils sont soumis à un effet de serre au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température

du produit à sécher, ce qui permet de diminuer notablement les temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels.

Parmi les inconvénients de ce type d'appareil, on peut noter la destruction de certaines vitamines et la photo-oxydation du produit, dues à la partie des ultra-violets transmise par la couverture et au risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

Pour la construction de ces séchoirs, on dispose d'une gamme variée de possibilités. Les matériaux et techniques employés doivent être compatibles avec l'air chaud et humide et les produits à sécher. S'il s'agit d'améliorer des procédés traditionnels, ceux-ci fourniront une base de solutions classiques et adaptées.

Ces appareils conviennent bien à une production artisanale, dispersée et diversifiée. Leur productivité est assez faible, de l'ordre de 5 à 10 kg de produits frais par mètre carré de claies. Les durées d'exposition, selon les conditions météorologiques locales et les produits à traiter, varient entre quelques heures et trois à quatre jours.

Les bottes de séchage sont de petites unités, transportables, destinées le plus souvent à la cellule familiale pour la conservation de ses produits. Des surchauffes peuvent y apparaître du fait de leur faible volume et du faible débit d'air qui les traverse en convection naturelle.

Les séchoirs "serres" sont une version à grande échelle des bottes de séchage ; leur utilisation est à envisager lorsqu'il faut sécher une grande quantité de produits frais. Pour être efficaces, les surfaces de séchage doivent être limitées à quelques mètres carrés.

1-5-3. Les séchoirs solaires indirects :

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher. L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur qui les réchauffent en fonction du débit utilisé.

1-5-4- les séchoirs mixtes :

Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs. Les transferts de chaleur et de vapeur d'eau y sont complexes et assez mal connus.

1-5-5- les séchoirs hybrides :

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

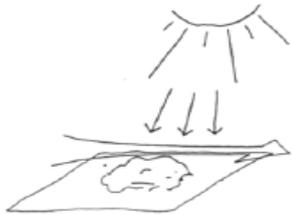
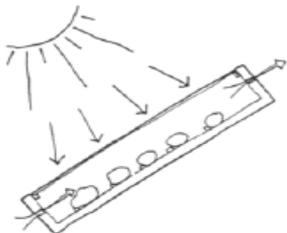
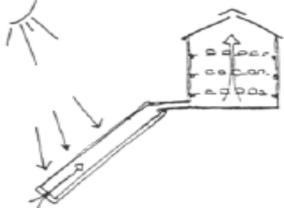
<i>Fonctionnement schématique</i>	<i>Type de séchage</i>	<i>Caractéristiques</i>
	Séchage naturel ou au soleil	<ul style="list-style-type: none">- très faible coût- travail important- perte de produit
	Séchage solaire direct	<ul style="list-style-type: none">- produit protégé- séchage rapide- une certaine dégradation du produit
	Séchage solaire indirect	<ul style="list-style-type: none">- produit parfaitement protégé et non dégradé- séchage assez rapide- coût et complexité plus importants

Tableau 1.2 : Différents types de séchoirs [24]

:

Chapitre 2 :

Développement de la théorie et des
Travaux sur le séchage

2-1 Développement de la théorie du séchage :

Les premiers travaux de la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse dans les milieux poreux datent de 1921 avec les publications de W.K.Lewis [61] qui décrit le séchage comme étant la conjugaison de deux processus, l'évaporation de l'humidité à la surface du matériau poreux et la diffusion de l'humidité de l'intérieur du solide vers sa surface.

Puis T.K.Sherwood (1929-1932) [62] a divisé le séchage en deux phases successives une période à allure constante et une période de ralentissement de l'allure de séchage.

En 1935, un spécialiste du textile, E. A. Fisher [63], a proposé trois relations pour décrire les phases successives du séchage de la laine. La première phase est à vitesse constante, les deux phases suivantes sont à décroissance linéaire, la vitesse s'annule à l'humidité d'équilibre.

Par la suite, on assiste à la naissance de deux grandes écoles qui ont permis une meilleure compréhension du phénomène :

La première école est née en 1962 sous le nom de Krisher [64] qui adopte la description des processus de séchage en trois phases détaillées précédemment au paragraphe 1.2.4. Il a aussi déterminé les isothermes de sorption et la conductivité thermique équivalente pour plusieurs produits.

La deuxième école en 1966 avec A.V. Luikov [65], s'intéresse aux transferts au sein du produit en se basant sur les équations des transferts couplés de chaleur et de masse dans les milieux poreux.

Par la suite, d'autres travaux ont vu le jour pour permettre de lever la complexité de la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse ayant lieu pendant le séchage des produits tels que les polymères, le bois, les sols et les produits agro-alimentaires (M. Daguinet, 1985, S. Whitaker, J. M. Hernandez[59] et A. Hamed [60]).

Par ailleurs, plusieurs travaux plus récents ont été publiés par divers scientifiques (J.Khemiri, G. M. Rios, D. A. De Vries, K. Ichimiya, D. Nguyen Haa et A. Touhami,.....) [66]. Ces travaux ont montré que la représentation des systèmes d'équations par des modèles mathématiques est difficile à cause de la complexité de ces équations qui nécessitent souvent le recours à des mesures expérimentales et exigent une solution numérique des équations différentielles non linéaires.

2-2 Classification des modèles de séchage :

Les modèles de séchage sont classés en trois types :

2-2-1. Les modèles empiriques :

Ces modèles sont basés sur l'expérimentation pour la détermination des paramètres de séchage. Chacun de ces modèles est spécifique aux conditions expérimentales ainsi qu'au type de produit, ce qui rend l'utilisation de ces modèles soit limitée et non extrapolables au-delà des limites de l'expérience (M. Kouhila, & al.) [49].

2-2-2. Les modèles diffusifs :

Ces modèles sont basés sur la loi de Fick et constituent le point de départ de la théorie de séchage :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_e \cdot \nabla X) \quad (2.1)$$

avec :

D_e : coefficient de diffusion de l'eau dans le produit.

X : teneur en eau du produit.

A.B. Neuman & T. K. Sherwood [62] ont été les premiers à avoir utilisé les modèles diffusifs dans le cas unidimensionnel. En supposant la diffusivité massique constante, l'équation (1,2) devient :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 X}{\partial X^2} \quad (2.2)$$

2-2-3. Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse :

Ces modèles détaillent le plus finement les différents phénomènes mis en jeu au cours du séchage. Et ils utilisent tout un ensemble d'équations de conservation de masse et de chaleur.

Les travaux de Luikov, Philip et De Varies, Krischer, Glaser et Whitaker [65] ont utilisé ce type de modèles.

2-2-4. Le concept de la courbe caractéristique de séchage:

La complexité des phénomènes intervenant au cours du séchage, la difficulté de déterminer certains paramètres comme la diffusivité, et le fait qu'il est toujours nécessaire d'avoir recours à l'expérimentation pour ajuster des constantes, ont fait que certains

spécialistes se sont orientés vers une démarche empirique, l'idée étant, à partir de quelques simples expériences de séchage, de déterminer une loi applicable au plus grand nombre de conditions opératoires.

C'est ainsi que Van Meel (1957) [ref] puis Krischer et Kast (1978) [64] ainsi que J. Van Brakel (1980) [55], ont proposé un mode de représentation des résultats de différentes expériences permettant, pour un produit donné, de tracer une courbe unique dite courbe caractéristique de séchage, notée **C.C.S.** Cette courbe permet le regroupement de résultats acquis dans des conditions différentes de vitesse d'air, de température et de taux d'humidité de l'air.

La démarche consiste à « normé » les teneurs en eau moyennes et les vitesses de séchage pour obtenir une courbe unique pour un produit donné, de dimensions déterminées et indépendamment des conditions aérothermiques (vitesse température et hygrométrie de l'air de séchage) (I. Doymaz, 2007 [68], et L. Ait Mohammed, 2006 [69]).

2-2-4-1 Principe de la méthode :

L'application du concept de la courbe caractéristique de séchage impose certaines corrélations de la forme :

✓ **Teneur en eau normée ou réduite :**

$$X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} \quad (2.3)$$

Avec :

- X : la teneur en eau moyenne du produit (kg eau/kg.ms)
 - X_{eq} : la teneur en eau d'équilibre déterminée par les isothermes de sorption.
 - X_{cri} : la teneur en eau critique marquant la transition entre la phase de séchage à vitesse constante (phase 1) et celle à vitesse décroissante (phase 2).
- ✓ **Vitesse de séchage normée $f(X^*)$:** Qui est la vitesse de séchage $(-\frac{dX}{dt})$ normée ou réduite par la vitesse de la première phase $(-\frac{dX}{dt})_0 = cste$, qui peut soit être déduite théoriquement ou mesurée sur la courbe expérimentale $-\frac{dX}{dt} = f(X)$. Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{-\frac{dX}{dt}}{(-\frac{dX}{dt})_0} = f(X^*) \quad (2.4)$$

La vitesse de séchage initiale, $(-\frac{dX}{dt})_0$, est déterminé par la corrélation de Fornell et Bimbenet (1980) [67]:

$$(-\frac{dX}{dt})_0 = \beta \alpha V^\beta (T_a - T_h) \quad (2.5)$$

Avec :

- α et β : deux constantes d'ajustement, qui sont fonction du produit et déterminée par exploitation des résultats expérimentaux.
- T_a et T_h : sont respectivement les températures sèches et humides de l'air de séchage.
- V : est la vitesse de l'air de séchage.

Dans un domaine raisonnable de conditions expérimentales (température, vitesse, humidité de l'air et dimensions du produit à sécher), la courbe caractéristique de séchage (CCS) peut être représentée par la forme polynomiale suivante :

$$F(X^*) = \sum_1^n a_n X_n \quad (2.6)$$

Et qui vérifie les propriétés suivantes :

$$\begin{cases} X^* = 0 \Rightarrow f(X^*) = 0 \\ 0 < X^* < 1 \Rightarrow 0 < f(X^*) < 1 \\ X^* \geq 1 \Rightarrow f(X^*) = 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

Ainsi, la détermination de la C.C.S revient à tracer la fonction $f(X^*)$ pour les différentes cinétiques expérimentales de séchage. mais, pour le traçage de cette courbe on doit connaitre des paramètres tels que : ' X_{eq} ', ' X_{cri} ' et $(-\frac{dX}{dt})_0$.

Notons que cette méthode est une approche semi-empirique fondée sur une analyse Simplifiée du procédé. Elle n'interprète pas les différents mécanismes par des équations phénoménologiques, mais s'appuie sur les résultats expérimentaux en les présentant sous une forme facilement exploitable.

Fornell et al, 1980 [1] ont proposé une autre corrélation, basée également sur le concept de la C.C.S. La démarche consiste à « normer » la vitesse de séchage $(-\frac{dX}{dt})$ en la division par le terme $(T_s - T_h) \cdot (V_a)^{0.5}$ ou T_s et T_h sont respectivement les températures sèche et humide de l'air de séchage et V_a sa vitesse. La C.C.S. est alors obtenue en traçant la courbe :

$$\frac{-\frac{dX}{dt}}{(T_s - T_h).Va^{0.5}} = f(X^*) \quad (2.8)$$

Le terme $(T_s - T_h).Va^{0.5}$ représente l'influence des propriétés de l'air sur l'allure du séchage.

2-2-3-3. Exemple de quelques courbes caractéristiques de séchage :

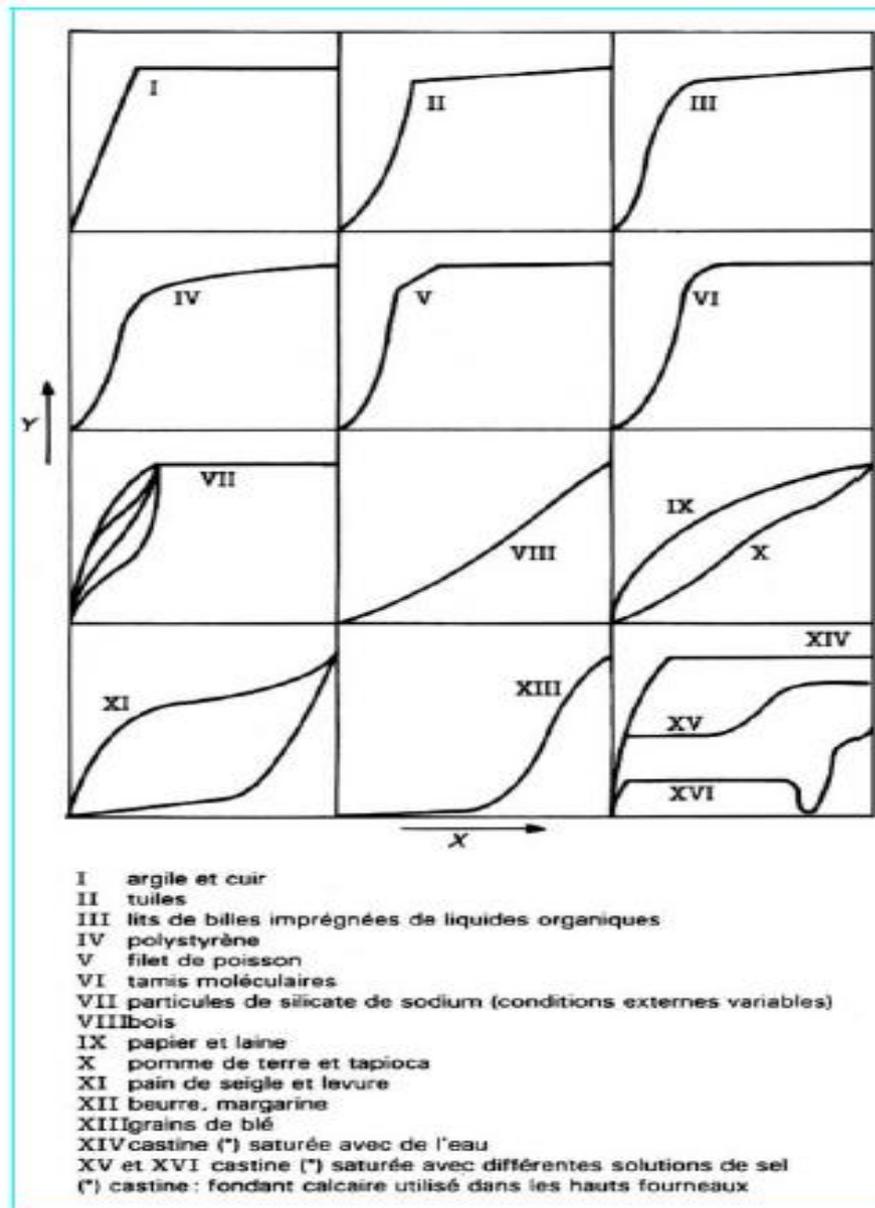


Fig. 2-1 Répertoire des différentes courbes caractéristiques (d'après Van Brakel) [55]

2-3 Présentation de quelques travaux récents sur le séchage :

La modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse dans les milieux poreux a été largement discutée dans la littérature. Nous présentons dans cette partie quelques travaux qu'on trouve nécessaire pour notre étude.

Le travail réalisé par A. Boulemtafes et D. Semmar [51], a pour objectif la conception et la réalisation d'un séchoir solaire indirect à vocation agricole, destiné au séchage des fruits et légumes. La partie expérimentale consistera à étudier les caractéristiques de l'air de séchage lorsqu'il arrive dans la boîte de séchage, c'est-à-dire sa température, son degré d'humidité, sa vitesse et son débit ainsi que leurs évolutions au cours d'une journée caractéristique. La connaissance de l'évolution de tous ces paramètres et leur interdépendance permet de sélectionner les types de produits susceptibles d'être séchés par ce séchoir. Enfin la mise en équation des phénomènes de transfert de chaleur et de masse ayant lieu pendant le séchage permet de comparer entre théorie et pratique.

Le dispositif expérimental utilisé est schématisé sur la figure 2-2. Il comprend :

- Un capteur solaire plan à air qui fait office d'insolateur et permet de chauffer l'air à la température désirée.
- Une boîte de séchage de forme parallélépipédique.

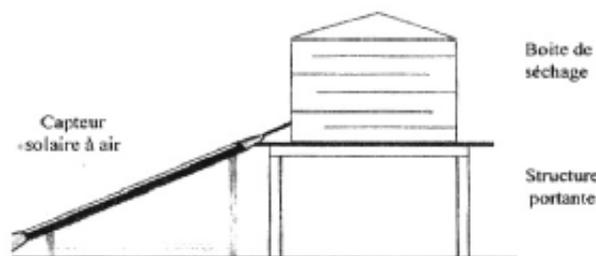


Fig. 1: Schéma descriptif du dispositif

Fig.2-2 : Schéma descriptif du dispositif expérimental [51]

Les résultats découlant de ce travail sont :

- L'établissement des courbes expérimentales $X=f(t)$, $dX/dt=g(t)$ et $X_r=h(t)$.
- La production des courbes caractéristiques de séchage de quelques produits agro-alimentaire tels que : abricots, pommes, tomates et peaux d'oranges.

Le second travail réalisé par Idlimam, A et al, ont traité la valorisation de trois plantes médicinales par séchage solaire [49].

L'objectif visé dans ce travail est l'étude expérimentale de la cinétique de séchage de trois plantes médicinales d'intérêt pharmaceutique, dont le Maroc est un grand producteur et exportateur, en l'occurrence la plante guérisseuse, le géranium et l'absinthe. Les trois plantes médicinales sont séchées en couches minces dans des conditions aérothermiques contrôlées. Les essais expérimentaux consistent à étudier l'influence séparée des diverses conditions de l'air asséchant (température, vitesse et humidité de l'air sec) sur la vitesse de séchage. La figure 2-3 représente le séchoir solaire utilisé. Les paramètres mesurés sont la vitesse de l'air, la masse humide et sèche du produit.

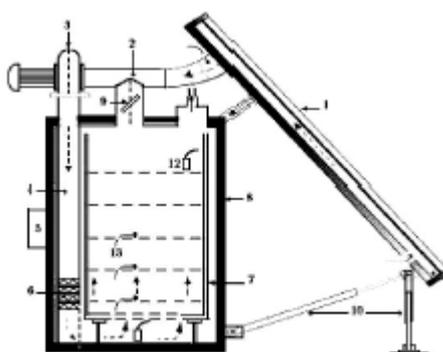


Fig.2-3: Coupe schématique du séchoir solaire indirect
(LESPAM, ENS Marrakech) [49]

Dans ce travail ils ont représentés les courbes de séchage de la plante guérisseuse, du géranium et de l'absinthe, et ils ont constaté que les conditions de l'air asséchant ont une influence déterminante sur l'allure de celles-ci, ils ont tiré trois constatations principales :

- la non-existence des phases 0 et 1, c'est-à-dire l'absence de la phase de mise en température du produit et de la phase de séchage à allure constante pour le géranium et l'absinthe et la présence unique de la phase 2 qui est la phase de séchage à allure décroissante ou phase de ralentissement.
- l'existence des trois phases de séchage pour la plante guérisseuse; plante aux rameux enchevêtrés et ayant des petites feuilles composées de deux folioles réserve d'eau et qui est saturée en eau.

- Pour les trois plantes, la teneur en eau suit une allure décroissante si la vitesse de l'air augmente. En revanche, la vitesse de séchage augmente d'autant plus que la vitesse de l'air asséchant augmente.

Et enfin, ils ont déterminé les courbes caractéristiques de séchage de ces trois plantes.

Mohamed AGHFIR et al (Laboratoire d'Energie Solaire et des Plantes Aromatiques et Médicinales, Ecole Normale Supérieure, Marrakech, Maroc), ont traité le séchage solaire convectif pour la conservation des feuilles de romarin [50].

Le but de ce travail est de contribuer à la valorisation du procédé de séchage et de stockage des plantes aromatiques et médicinales. Les expériences ont été réalisées dans un séchoir à couche mince partiellement solaire fonctionnant en convection forcée et muni d'une source auxiliaire d'énergie. Pour déterminer l'influence de la température et du débit de l'air asséchant sur la vitesse de séchage, ils ont réalisé six expériences (deux débits d'air (100 et 200 m³/heure) à trois températures (50, 55 et 60°C)).

Le système de séchage utilisé est un séchoir convectif indirect comportant une source de chaleur d'appoint et un ventilateur à débit d'air variable, ce système de séchage permet de contrôler la température et le débit d'air asséchant.

Ce travail a permis de déterminer :

- ✓ Les courbes expérimentales de séchage $X(t)$ et $(dX/dt)(t)$.
- ✓ L'absence de la phase 0 et I et la présence unique de la phase II.
- ✓ L'influence de la température sur la vitesse de séchage : la vitesse de séchage augmente quand la température de l'air asséchant croît et par conséquent la teneur en eau des feuilles du romarin diminue considérablement.
- ✓ La Courbe caractéristique de séchage (CCS) des feuilles de romarin ainsi que son équation sous forme polynomiale de degré 3.

$$f = 0,08168 + 0,42368 X^* + 1,32818 X^{*2} - 1,01452 X^{*3}$$

S. Youcef-Ali et N.Moumami, dans leur travail intitulé Etude expérimentale des séchoirs solaires à plusieurs claies [52]. Se sont intéressés à l'optimisation des performances des séchoirs solaires indirects qui est généralement basée sur l'étude des paramètres de l'air asséchant (extrinsèques) et ceux de la chaîne énergétique ou du produit à sécher.

Dans ce document, ils ont fait une étude expérimentale concernant uniquement l'armoire de séchage. Ils ont étudié l'influence de la quantité initiale du produit à sécher sur l'évolution des cinétiques de séchage.

Le dispositif expérimental est un séchoir solaire indirect, fonctionnant en convection forcée, relié à un capteur à air (Fig. 2-3). A partir de ce travail ils ont aboutit aux conclusions suivantes :

- ✓ Répartir le produit sur les quatre claies retarde le processus de séchage.
- ✓ Par contre, lorsque la pomme de terre est étalée sur les trois premières claies devrait augmenter le temps de séchage, mais cet effet négatif est compensé par une diminution des pertes à travers les parois du séchoir.
- ✓ Il est préférable d'étaler le produit sur les trois premières grilles plutôt que sur les quatre, afin d'avoir des temps de séchage les plus faibles possibles.

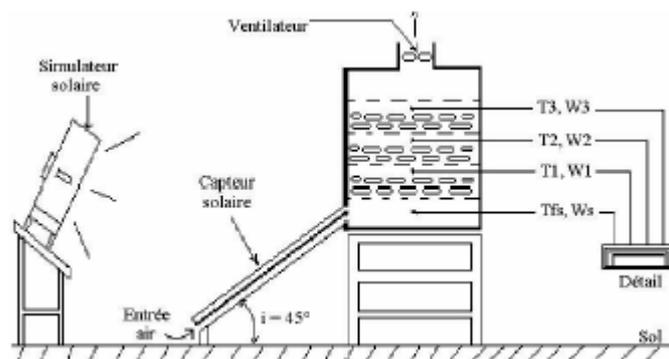


Fig. 2-4 : Schéma du dispositif expérimental [52]

A. Belghit et al, dans leur travail intitulé approche expérimentale de la cinétique de séchage de la verveine [48], proposent de contribuer à l'optimisation et au dimensionnement des séchoirs solaires pour plantes médicinales et la détermination expérimentale des isothermes de sorption de la verveine pour différentes températures. Ensuite, l'influence de la vitesse de l'air asséchant, de sa température et de son humidité sur la cinétique de séchage du produit dans un séchoir tunnel. Ils ont étudié la courbe caractéristique de séchage et par suite la corrélation exprimant la vitesse de séchage de la verveine.

Pour modéliser les courbes de sorption ils ont opté pour celui d'Henderson [48], la corrélation exprimant ce modèle s'écrit :

$$X_{eq}(T', HR) = \left[\frac{-\text{Ln}(1 - HR)}{k(1,8 T' + 492)} \right]^n \quad (2.1)$$

Les constantes k et n dépendent de la température et des caractéristiques du produit :

- pour $0 \leq HR \leq 0,35$, les valeurs de k et n sont : $k = 52 \cdot 10^{-6}$ et $n = 2,014$
- pour $0,35 \leq HR \leq 1$, les valeurs de k et n sont : $k = 345 \cdot 10^{-6}$ et $n = 0,97$

Le dispositif expérimental permettant l'étude de la cinétique de séchage consiste en une soufflerie à air humide (genre de séchoir tunnel) (Fig.2-5).

Ce travail a permis de déterminer:

- La variation de la teneur en eau et la vitesse de séchage en fonction du temps.
- L'influence de la température de séchage : Quant à la vitesse de séchage, elle augmente avec la température.
- L'influence de la vitesse de l'air asséchant : la teneur en eau a une allure décroissante au fur et à mesure que la vitesse augmente.
- La courbe caractéristique du séchage : Le lissage de la C.C.S leurs a permis de déterminer l'équation de cette dernière. Il s'agit d'un polynôme de degré 5 dont les coefficients sont les suivants :

$$\left(\frac{\dot{X}}{X_i} \right) = 0,1880 + 0,8315 X^* + 3,2493 X^{*2} - 9,7577 X^{*3} + 10,3257 X^{*4} - 3,8368 X^{*5} \quad (2.2)$$

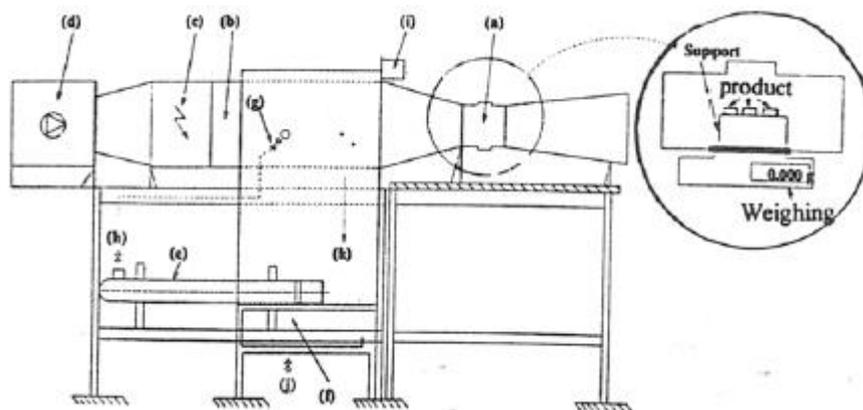


Fig. 2-5 : Schéma de la soufflerie aérothermique à atmosphère contrôlée[48]

Pour la détermination de \dot{X}_i , ils ont utilisé la corrélation proposée par Fornell [67] :

$$\dot{X}_i = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_i = \beta \alpha V^\beta (T_\infty - T_h) \quad (2.3)$$

L'exploitation des résultats leurs a permis l'identification des coefficients α et β :

$$\alpha = 9,0110^{-5} \quad \text{et} \quad \beta = 3,25$$

A partir de six points expérimentaux et en effectuant un lissage à l'aide d'un polynôme de troisième degré dont les coefficients sont :

$$X_{eq}(40^\circ\text{C}) = 0,0037 + 0,00215 \text{ HR} - 0,00006 \text{ HR}^2 + 5,8156 \cdot 10^{-7} \text{ HR}^3 \quad (2.4)$$

Chapitre. 3 :

Description et modélisation
du séchoir

3-1 Introduction :

Le séchage convectif à basse température est un phénomène complexe, où interviennent de nombreux autres phénomènes qui ressortent de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et des transferts de masse et de chaleur.

La description des phénomènes couplés de transferts de chaleur et de masse en milieu poreux est généralement effectuée à l'aide d'un système d'équations qui a été proposé il y a environ deux décennies par Luikov et Philip-de-Varies [65]. Une étude fondamentale de ces transferts a fait l'objet de plusieurs travaux, dans le séchage du bois, pour le séchage du riz-paddy et pour le séchage du maïs .

Ainsi, plusieurs modèles complexes traduisant mathématiquement les phénomènes physiques de séchage ont été proposés. Des corrélations empiriques ont été obtenues à partir des cinétiques de séchage expérimentales, en fonction des paramètres aérothermiques de l'air et des caractéristiques géométriques du produit.

Compte tenu des variétés de produits animaux et végétaux différentes l'une de l'autre, à partir de courbes qui lissent les points expérimentaux des cinétiques de séchage, on peut proposer des formules de celles-ci sous forme de polynôme ou autre.

Dans ce chapitre on va entamer la modélisation mathématique du phénomène du séchage en utilisant la méthode de la courbe caractéristique de séchage développée dans le chapitre précédent.

Vue le manque des moyens expérimentaux pour la détermination de quelques paramètres physiques du produit nécessaires pour la modélisation à partir des isothermes de sorption, on a utilisé les résultats des travaux réalisés par A. Belghit et al intitulé approche expérimentale de la cinétique de séchage de la verveine [48].

3-2 Description du système de séchage :

Nous disposons d'un séchoir solaire indirect, fonctionnant en convection forcée, relié à un capteur à air (Fig. 3.1), le système est sans stockage ni recyclage d'air.

Cette unité de séchage est alimentée par de l'air chauffé à travers un capteur solaire muni d'ailettes placées dans la veine d'air mobile. Ce fluide caloporteur est aspiré par un ventilateur fixé à la sortie du séchoir afin d'avoir une bonne distribution de l'air.

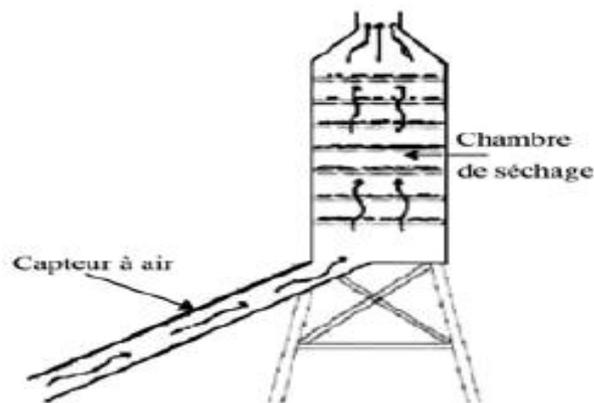


Fig. 3.1: Schéma descriptif du dispositif expérimental.

3-3 Matière première à sécher :

Notre étude de modélisation va portée en premier lieu sur le séchage des produits végétaux en feuilles puis par la suite en prendra comme cas particulier le séchage des feuilles de la verveine.

Le choix des feuilles de la verveine pour notre étude repose sur deux raisons :

- L'abondance de cette plante en Algérie, ainsi que sa grande consommation.
- La disponibilité des résultats des travaux expérimentaux sur cette plante, qui sont nécessaires pour notre modélisation.

3-4 Modélisation du séchoir :

Le produit à sécher est soumis à un écoulement forcé d'air chaud perpendiculaire à la surface horizontale de la claie sur laquelle le produit à sécher est disposé.

Le but du modèle est de déterminer la cinétique de séchage de la verveine en déterminant l'évolution de sa teneur en eau en fonction du temps et en tenant compte des

principaux paramètres aérothermiques (température, humidité relative et vitesse d'écoulement, ou débit de l'air asséchant).

Ce modèle est basé sur les bilans d'énergie dans l'air asséchant et dans le produit à sécher. Ces équations de bilans tiennent compte du modèle de la courbe caractéristique de séchage.

Une méthode pour modéliser un tel séchoir consiste à le découper en tranches successives égales de sections perpendiculaires à l'écoulement d'air, contenant chacune en son centre, un lit de produit à sécher (Fig. 3.2).

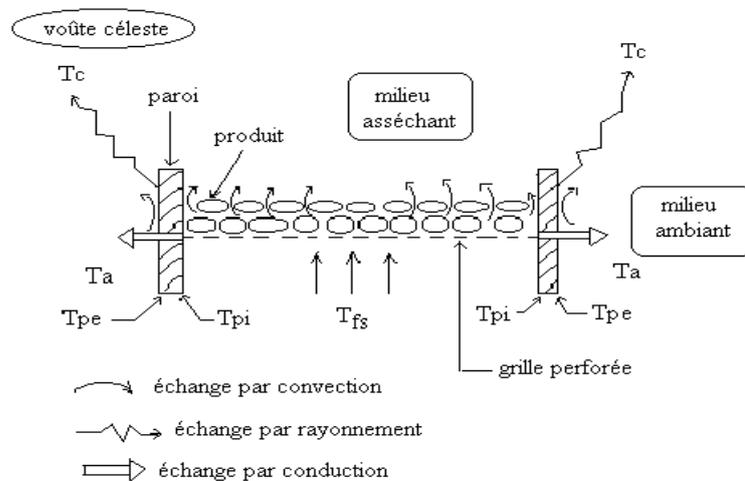


Fig 3.2 : Schéma des transferts de chaleur et de masse pour une claie

3-4-1 Hypothèses :

Le transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux est un problème très complexe ce qui nécessite l'utilisation de quelques hypothèses simplificatrices.

On suppose que :

- L'air et la vapeur d'eau sont considérés comme des gaz parfaits.
- L'écoulement de l'air à l'intérieure du séchoir est unidirectionnel et uniforme.
- Les parois du séchoir sont adiabatiques.
- Les échanges radiatifs et conductifs à l'intérieure du séchoir sont négligeables.
- La température et l'humidité du produit et de l'air dans le même lit sont uniformes.
- La pression de l'air dans le séchoir est très voisine de la pression atmosphérique.
- Le changement de volume pendant le séchage est négligeable.

Plusieurs travaux entamés sur le séchage des produits en feuilles ; C. Ahouannou, 2001 [71], S. Youcef Ali, 2001 [70], A. Kanmogne, 2002 [73], et L. Bennaoum, & A. Belhamri, 2002 et 2005) [74] ont montré que ces hypothèses sont réalistes et les simplifications n'ont pratiquement pas d'influence sur les résultats.

3-4-2 Mise en équation :

Ces équations de bilans tiennent compte du modèle de la courbe caractéristique de séchage, qui consiste à modéliser la vitesse de séchage pour passer de la complexité des phénomènes au niveau microscopique (au niveau des pores) à une certaine simplicité d'interprétation des résultats expérimentaux, niveau macroscopique.

En évaluant les gains et les pertes, ces bilans traduisent le principe de conservation de l'énergie appliqué à chaque élément du modèle.

Le premier principe de la thermodynamique exprime la conservation de l'énergie de l'ensemble (Système + milieu extérieur) pour un système fermé limité par une surface à travers laquelle peuvent s'effectuer des échanges énergétiques. Il s'écrit sous forme de bilan, où la variation d'énergie totale ΔE du système entre deux états t_1 et t_2 est égale à la somme des travaux W_{tr} et chaleurs Q reçus par le système pendant son évolution entre ces deux états :

$$\Delta E = W_{tr} + Q \quad \text{ou} \quad E_2 - E_1 = W_{tr_{1 \rightarrow 2}} + Q_{1 \rightarrow 2} \quad (3.1)$$

Sachant que :

$$E = U + E_c + E_p \quad (3.2)$$

avec :

- U : énergie interne du système.
- E_c : énergie cinétique du système.
- E_p : énergie potentielle du système.

Le premier principe s'écrit aussi sous la forme d'un bilan de puissances mécaniques et calorifiques en travaillant entre deux instants voisins t et $t+dt$:

$$\frac{DE}{Dt} = P_{méca} + P_{cal} \quad (3.3)$$

$\frac{DE}{Dt}$: est une différentielle totale, d'où :

$$\frac{DE}{Dt} = \frac{\partial E}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad}E \quad (3.4)$$

\vec{v} : est la vitesse du système.

3-4-2-1 Ecriture des bilans thermiques :

a) Bilan thermique de l'air :

L'écoulement de l'air est unidirectionnel (selon l'axe oz), du bas du séchoir vers le haut, avec une vitesse constante (débit constant). Et en tenant compte des hypothèses précédentes le bilan thermique de l'air s'écrit :

$$\frac{DE}{Dt} = \frac{D(U + E_c + E_p)}{Dt} = \frac{D(U + E_p)}{Dt} = \frac{DH}{Dt} \quad (3.5)$$

H : est l'enthalpie de l'air.

Selon la loi des gaz parfaits :

$$\frac{DH}{Dt} = m \cdot C_{pa} \cdot \frac{DT}{Dt} = m \cdot v \cdot C_{pa} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.6)$$

Avec :

- C_{pa} : chaleur spécifique de l'air à pression constante.
- m_a : masse de l'air.
- v : vitesse d'écoulement de l'air.
- T_a : température de l'air.

Le terme mv dans l'équation précédente peut s'écrire :

$$m_a v = m_a \frac{dz}{dt} = \dot{m}_a \quad (3.7)$$

\dot{m}_a : est le débit massique de l'air.

En passant par les différentes claies, l'air chaud cède une quantité de sa chaleur d'une part au produit à sécher (les feuilles de la verveine) et d'autre part aux parois du séchoir.

Ainsi l'équation du bilan thermique de l'air devient :

$$\dot{m}_a C_{pa} dz \frac{\partial T}{\partial z} = h_{pr} S_{pr} (T_{pr} - T_a) + h_p S_p (T_p - T_a) \quad (3.8)$$

Avec ;

- h_{pr} : coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air et le produit.
- h_p : coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air et la paroi interne.
- S_{pr} : surface d'échange du produit.
- S_p : surface d'échange de la paroi interne entre deux claies.
- T_{pr} : température du produit.
- T_p : température de la paroi interne.
- T_a : température de l'air.

En tenant compte de l'hypothèse précédente le seul échange de chaleur pris en compte est celui air-produit, ainsi l'équation (3.8), après simplification, devient :

$$\dot{m}_a C_{pa} (T_a - T_{ae}) = h_{pr} S_{pr} (T_{pr} - T_a) \quad (3.9)$$

Avec ;

- T_{ae} : est la température de l'air à l'entrée de la claie.

b) Bilan thermique du produit :

Le produit disposé sur les claies reçoit une partie de l'énergie cédée par l'air chaud. Cette énergie sert d'une part à augmenter la température du produit et d'autre part à évaporer l'eau qu'il contient.

La variation de l'enthalpie du produit au court du temps sera :

$$\frac{DH}{Dt} = m_{pr} \cdot C_{pr} \cdot \frac{DT_{pr}}{Dt} = m_{pr} \cdot C_{pr} \cdot \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} \quad (3.10)$$

Ainsi l'équation du bilan thermique du produit devient :

$$m_{pr} \cdot C_{pr} \cdot \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} = h_{pr} S_{pr} (T_a - T_{pr}) - L_v \cdot \dot{m} \quad (3.11)$$

Avec :

- L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau.
- \dot{m} : masse d'eau évaporée par unité de temps.

$$\dot{m} = m_{prs} \cdot \left(- \frac{dX}{dt} \right) \quad (3.12)$$

Avec :

- m_{prs} : masse du produit sec.

Dans le cas particulier de la disposition du produit en couche mince, et selon la littérature, la température du produit ne dépend presque pas du temps mais elle dépend de celle de l'air de séchage, par conséquent le terme de stockage $\frac{\partial T_{pr}}{\partial t}$ peut être négligé :

$$h_{pr} S_{pr} (T_a - T_{pr}) = L_v \cdot \dot{m} \quad (3.13)$$

Selon l'équation (3.9) on peut écrire :

$$\dot{m}_a C_{pa} (T_a - T_{ae}) = - L_v \cdot \dot{m} \quad (3.14)$$

Après l'évaporation et à la sortie de la claie la température de l'air devient :

$$T_a = T_{ae} + \frac{m_{prs} \cdot L_v}{\dot{m}_a C_{pa}} \cdot \left(\frac{dX}{dt} \right) \quad (3.15)$$

3-4-2-2 Ecriture des bilans massiques pour l'eau :

a) Au niveau du produit :

L'équation de la conservation de la masse pour le produit s'écrit :

$$\frac{\partial m_{pr}}{\partial t} + \text{div}(m_{pr} \vec{v}_p) = \sigma_{pr} \quad (3.16)$$

Avec :

- m_{pr} : masse du produit.
- \vec{v}_p : vitesse du produit qui est nulle dans notre cas.
- σ_{pr} : terme source pour le produit.

Le produit est immobile : $\vec{v}_p = 0$

Et comme :

$$X = \frac{m_{pr} - m_{prs}}{m_{prs}}$$

D'où :

$$m_{pr} = m_{prs} (1+X) \quad (3.17)$$

Alors l'équation (3.15) devient :

$$m_{prs} \frac{\partial X}{\partial t} = \sigma_{pr} \quad (3.18)$$

D'après l'équation (2.4) :

$$\frac{dX}{dt} = - \left(- \frac{dX}{dt} \right)_0 \cdot f(X^*) \quad (3.19)$$

b) Au niveau de l'air :

L'équation de la conservation de la masse pour l'air s'écrit :

$$\frac{\partial m_a}{\partial t} + \text{div} (m_a \vec{v}_a) = \sigma_a \quad (3.20)$$

Avec :

- m_a : masse de l'air.
- \vec{v}_a : vitesse de l'air qui n'est pas nulle.
- σ_a : terme source pour l'air.

Soit W la teneur en eau de l'air de séchage, on peut donc écrire :

$$W = \frac{m_a - m_{as}}{m_{as}} \quad (3.21)$$

D'où :

$$m_a = m_{as} (1+W) \quad (3.22)$$

Et comme l'écoulement est unidirectionnel suivant oz et la masse de l'air ne dépend que de cette direction alors on néglige le terme $\frac{\partial m_a}{\partial t}$.

Soit \dot{m}_a le débit massique de l'air :

$$\dot{m}_a \cdot \Delta z = V_a \cdot m_a$$

L'équation (3.22) devient :

$$\dot{m}_a \cdot \Delta z \cdot \frac{\partial W}{\partial z} = \sigma_a \quad (3.23)$$

L'air cède une quantité de sa chaleur au produit pour récupérer une quantité d'eau de celui-ci. Ainsi la même quantité d'eau perdue par le produit elle est récupérée par l'air.

$$\sigma_a = - \sigma_{pr} \quad (3.24)$$

De l'équation (3.18) et (3.24) on aura :

$$\frac{\partial W}{\partial z} = - \frac{m_{prs}}{\dot{m}_a \cdot \Delta z} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (3.25)$$

3-4-2-3 Modèle mathématique :

Enfin on aboutit à un système d'équation constitué par les trois équations différentielles (3.19), (3.25) et (3.15) :

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = - \left(- \frac{dx}{dt} \right)_0 \cdot f(x^*) \\ \frac{\partial W}{\partial z} = - \frac{m_{prs}}{\dot{m}_a \cdot \Delta z} \frac{\partial X}{\partial t} \\ T_a = T_{ae} + \frac{m_{prs} \cdot L_v}{\dot{m}_a \cdot C_{pa}} \frac{dX}{dt} \end{cases} \quad (3.26)$$

Ce système d'équation différentielle est notre modèle mathématique qui décrit l'évolution des principales variables d'état pendant le séchage des feuilles de plusieurs plantes comme la verveine, la menthe, le henné (el-henna)...etc.

Chapitre 4 :

Simulation numérique
et résultats

4-1 Introduction :

Une bonne compréhension du phénomène physique permet de développer un modèle mathématique plus représentatif et soluble, le résoudre est une deuxième étape à franchir.

Pour les modèles ayant des équations linéaires la résolution sera analytique par contre pour ceux ayant des équations non linéaires Il n'existe pas de méthodes purement mathématiques pour la résolution de tel système d'équation, seules des méthodes numériques, donnant des solutions approchées, peuvent être utilisées dans de tels cas.

4-2 Les différentes étapes de la résolution du modèle mathématique:

Le modèle développé dans le chapitre précédent est un système d'équations différentielles non linéaires. Les non linéarités proviennent des termes en X^{*n} de $f(X^*)$.

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = - \left(- \frac{dx}{dt} \right)_0 \cdot f(x^*) \\ \frac{\partial W}{\partial z} = - \frac{m_{prs}}{\dot{m}_a \Delta z} \frac{\partial X}{\partial t} \\ T_a = T_{ae} + \frac{m_{prs} \cdot L_v}{\dot{m}_a \cdot C_{pa}} \frac{dX}{dt} \end{cases}$$

La résolution de ce système d'équations différentielles nous permet d'avoir à chaque instant et pour chaque claie les valeurs de :

- X : teneur en eau du produit.
- dX/dt : vitesse de séchage du produit.
- W : teneur en eau de l'air.
- T_a : température de l'air de séchage.

La deuxième et la troisième équation du système dépendent de la première, donc pour la résolution on commence par cette dernière ensuite on passe à la résolution de la deuxième équation et enfin la troisième.

Pour la première équation du système :

$$\frac{dX}{dt} = - \left(- \frac{dX}{dt} \right)_0 \cdot f(X^*)$$

On doit déterminer :

- A partir de l'équation (2.5) :

$$\left(- \frac{dX}{dt} \right)_0 = \beta \alpha V_a^\beta (T_a - T_h) \quad (4.1)$$

- α et β : deux constantes d'ajustement, qui sont fonction du produit et déterminées par exploitation des résultats expérimentaux.

Pour le cas de la verveine :

$$\alpha = 9.01 \cdot 10^{-5} \quad \text{et} \quad \beta = 3.25$$

- V_a : la vitesse d'écoulement de l'air

$$V_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \cdot S}$$

- S : surface de la claie.
- ρ_a : masse volumique de l'air qui est fonction de la température (voir annexe 1).
- T_h : température de l'air humide, pour sa détermination voir annexe 1.

A partir des travaux de A. Belghit et al [49] sur la verveine :

$$f(X^*) = 0.1880 + 0.8315X^* + 3.2493X^{*2} - 9.7577X^{*3} + 10.3257X^{*4} - 3.8368X^{*5} \quad (4.2)$$

Avec :

$$X^*(t) = X^*[X(t)] = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} \quad (4.3)$$

$$X_{eq}(T_a, HR) = \left[\frac{-\ln(1-HR)}{k(1.8T_a + 492)} \right]^{1/n} \quad (4.4)$$

- Pour $0 \leq HR \leq 0.35$ les valeurs de k et n sont : $k=52 \cdot 10^{-6}$ et $n=2.014$
- Pour $0.35 \leq HR \leq 1$ les valeurs de k et n sont : $k=345 \cdot 10^{-6}$ et $n=0.97$

Avec :

HR : étant l'humidité relative de l'air.

$$HR = \frac{P.W}{P_{sat}(0.622+W)} \quad (4.4)$$

- P_{sat} : est la pression de saturation de l'air (voir l'annexe 1).

Une fois la première équation de notre modèle est résolue en passe à la deuxième :

$$\frac{\partial W}{\partial z} = - \frac{m_{prs}}{\dot{m}_a \Delta z} \frac{\partial X}{\partial t}$$

Puis à la troisième équation :

$$T_a = T_{ae} + \frac{m_{prs} \cdot L_v}{\dot{m}_a \cdot C_{pa}} \cdot \frac{dX}{dt}$$

- L_v et C_{pa} sont calculés à partir des formules de l'annexe 1.

$$L_v = 4.18 (597 - 0.56 \cdot T_{pr}) 10^3 \quad (4.5)$$

On a vu qu'expérimentalement la première phase de mise en température n'existe pas et à cause de la disposition du produit en couche mince on peut considérer que la température du produit est égale à celle de l'air de séchage humide $T_{pr} = T_h$.

On aura donc :

$$L_v = 4.18(597 - 0.56T_h)10^3 \quad (4.6)$$

4-3 Choix de la méthode numérique :

Il existe plusieurs façons d'approcher discrètement un système d'équations différentielles non linéaires de la forme :

$$\frac{dy_q}{dt} = f_q(y_p, t).$$

Nous avons choisi la méthode des différences finies «régressives» (ou vers l'arrière) qui admet des pas de temps assez grands contrairement à la méthode des différences finies «progressives» et nécessite moins de temps de calcul que la méthode des différences centrées.

Les grandeurs y_q ci-dessus seront dans notre cas ; la température de l'air caloporteur, sa teneur en eau et celles du produit à sécher. Elles sont toutes fonctions du temps t et de la position (ou l'indice " i " numéro de la claie).

D'une manière générale, on exprime, en termes de différences finies régressives, les dérivées partielles premières par rapport au temps comme suit :

$$\frac{\partial y_q}{\partial t} = \frac{y_q(t,i) - y_q(t-\Delta t,i)}{\Delta t}$$

L'erreur commise est de l'ordre de Δt .

Et la dérivée partielle par rapport à l'abscisse z , par :

$$\frac{\partial y_q(z,t)}{\partial z} = \frac{y_q(z,t) - y_q(z-\Delta z,t)}{\Delta z}$$

- Δz : représente l'épaisseur du lit de particules e_i .

4-4 Discrétisation du modèle mathématique :

Nous repérons les claies par l'indice entier « i ». Nous n'utilisons que trois claies, la première est indiquée par ($i=1$), la seconde par ($i=2$) et la troisième par ($i=3$). Le temps présent est indiqué par « t » et le temps précédent par « $t-\Delta t$ ». Lorsqu'il s'agit de l'air asséchant, la température T_a et la teneur en humidité absolue W sont indicées par « $i-1$ » avant la claie d'indice i , et par « $i+1$ » après cette claie (Fig. 4.1)

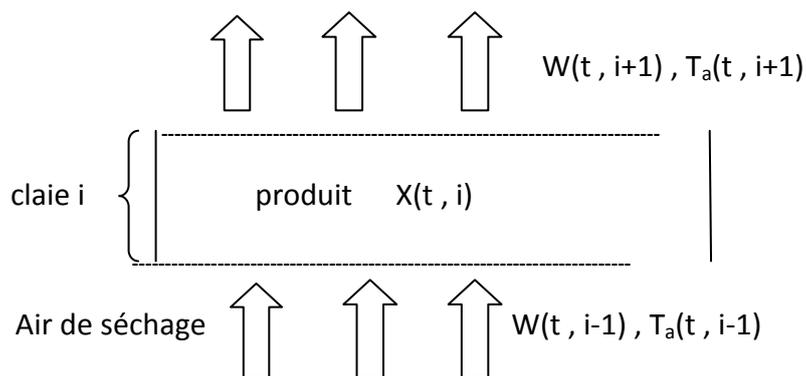


Fig. 4.1 : Schéma d'une claie d'indice i

Pour la claie d'indice i et à l'instant t les équations du paragraphe 4-2 s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X(t,i) - X(t-\Delta t,i)}{\Delta t} = - \left(- \frac{dX}{dt} \right)_0 \cdot f(X^*) \\ \\ \frac{\Delta W}{\Delta z} = \frac{W(t,i) - W(t,i-1)}{\Delta z} = - \frac{m_{prs}}{\dot{m}_a \cdot \Delta z} \frac{\Delta X}{\Delta t} \\ \\ T_a(t,i) = T_a(t,i-1) + \frac{m_{prs} \cdot L_v}{\dot{m}_a \cdot c_{pa}} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta t} \end{array} \right.$$

Après discrétisation notre modèle devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} X(t, i) = X(t-\Delta t, i) - \Delta t \cdot \left(- \frac{dX}{dt} \right)_{0(t-\Delta t, i)} \cdot f[X^*(t-\Delta t, i)] \\ \\ W(t, i) = W(t, i-1) - \frac{m_{prs}}{\dot{m}_a} \frac{\Delta X}{\Delta t} \\ \\ T_a(t, i) = T_a(t, i-1) + \frac{m_{prs} \cdot L_v}{\dot{m}_a \cdot c_{pa}} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta t} \end{array} \right.$$

Avec :

$$\left(- \frac{dX}{dt} \right)_{0(t-\Delta t, i)} = \beta \alpha V_a^\beta [T_a(t-\Delta t, i) - T_h(t-\Delta t, i)]$$

$$X^*(t-\Delta t, i) = \frac{X(t-\Delta t, i) - X_{eq}(t-\Delta t, i)}{X_{cri}(t-\Delta t, i) - X_{eq}(t-\Delta t, i)}$$

$$L_v = 4.18(597 - 0.56 T_h(t, i-1))10^3$$

4-5 Programmation numérique :

Pour résoudre ce système d'équations, nous avons élaboré un programme en fortran 90, en utilisant la méthode des différences finis régressive. Le listing de ce programme, nommé **SECHDJEB**, est donné en annexe 3.

Ce programme intègre les corrélations issues des données expérimentales des isothermes de sorption et de la cinétique de séchage des feuilles de la verveine (*Lippia Citriodora*) issus des travaux de A. Belghit et al [49].

Pour l'exécution du programme on a considéré deux cas :

1^{er} cas : Sans capteur solaire

Alors T_{sc} (température de sortie du capteur et au même temps celle d'entrée du séchoir) est constante, l'exécution du programme portera uniquement sur le calcul des paramètres du séchoir.

2^{ème} cas : Utilisation du capteur solaire

Dans ce cas la température T_{sc} est variable en fonction des heures de la journée, par conséquent l'exécution du programme portera sur le calcul des paramètres du capteur et ensuite sur celles du séchoir. Les différentes étapes du programme **SECHDJEB** sont schématisées par l'organigramme suivant :

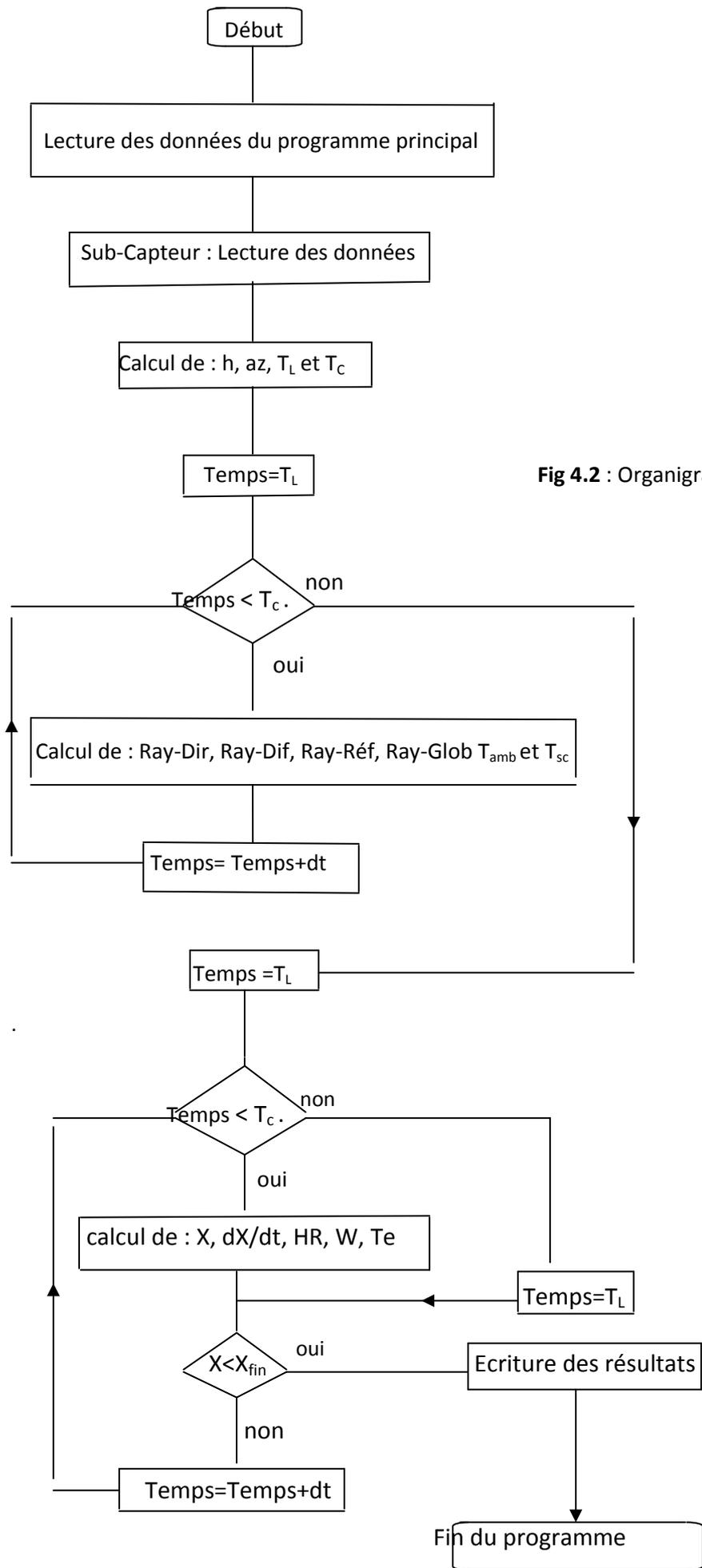


Fig 4.2 : Organigramme

Avec :

- h : angle hauteur du soleil
- az : angle azimut du soleil
- T_L : temps du levé du soleil
- T_c : Temps du couché du soleil
- Ray-Dir : rayonnement direct reçue par le capteur
- Ray-Dif : rayonnement diffus reçue par le capteur
- Ray-Réf : rayonnement réfléchi par le capteur
- Ray-Glob : rayonnement global sur le capteur
- T_{amb} : température ambiante
- T_{sc} : température de sortie du capteur
- X : teneur en eau du produit
- dX/dt : vitesse de séchage du produit
- HR : humidité relative de l'air
- W : teneur en eau de l'air
- T_e : température de l'air à l'intérieure du séchoir

4-6 Résultats et discussions :

Nous étudions dans ce qui suit l'influence des paramètres intrinsèques et extrinsèques de l'air sur les performances de la chaîne énergétique de séchage, en procédant au fur et à mesure à une étude comparative entre les résultats expérimentaux réalisés par A. Belghit et al [49] et ceux calculés par le modèle théorique.

Cette étude comporte deux volets, d'une part l'étude des performances du capteur plan à air et d'autre part, celle des performances énergétiques de l'unité de séchage.

4-6-1 Performances du capteur solaire :

Nous considérons ici un capteur solaire plan à air muni ou non d'ailettes ayant, pour la simplification des calculs, un rendement fixe $\eta=0.6$.

Pour tout ce qui suit, on a choisit la ville de Biskra comme lieu d'étude. Cette ville caractérisée par son climat saharien est située à une latitude de $34^{\circ}48'$ Nord et une longitude de $5^{\circ}44'$ Est, son altitude par rapport au niveau de la mer est de 85 m, la pression atmosphérique à cette altitude est de 1.004 Bar.

Et comme journée d'étude on a choisit le 22 mars avec des températures maximale et minimale respectivement de 35°C et 25°C et une humidité relative HR de 50%.

Résultats :

Après l'introduction de toutes ces données pendant l'exécution du programme **SECHDJEB** on aura les résultats suivants :

4-6-1-1 Intensité du rayonnement solaire :

La figure 4.3 illustre l'évolution théorique des composantes incidente, diffuse, réfléchi et globale du rayonnement solaire.

L'intensité lumineuse incidente (directe) augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur théorique maximale de 720 (w/m²) à 12 TSV (13h locales), puis chute jusqu'à atteindre une valeur nulle aux environs de 18h locale.

Pour ce qui est du rayonnement diffus, nous pouvons voir qu'il est régulièrement réparti autour de la valeur moyenne de 190 W/m². D'autre par le rayonnement réfléchi et très faible.

Etant le résultat de la somme des rayonnements diffus, direct et réfléchi, la distribution du rayonnement global atteint une valeur théorique maximale de 920 W/m².

Nous notons une similitude entre les courbes théoriques qu'on a obtenu et celles expérimentales rencontrées dans la littérature, notamment dans les travaux de *Ryad BENKHELFELLAH et al (2005)[10]*.

4-6-1-2 Température d'entré et de sortie du capteur :

En considère que la température d'entré du capteur est la température ambiante qui est représentée sur la fig 4.4.

Cette température varie au cours de la journée pour atteindre sa valeur maximale, de 35°C, à 13h environ et sa valeur minimale, de 25°C, au levé et couché du soleil.

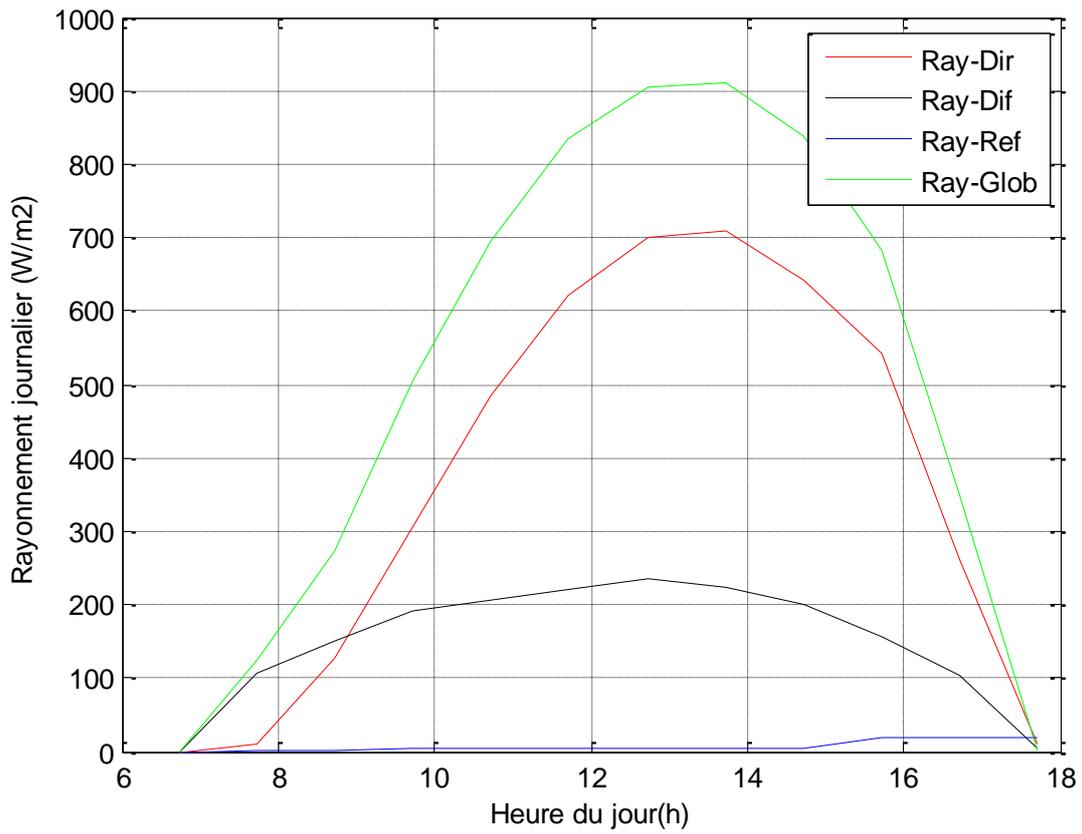


Fig4. 3 : Variation du rayonnement solaire au cours de la journée du 22 mars

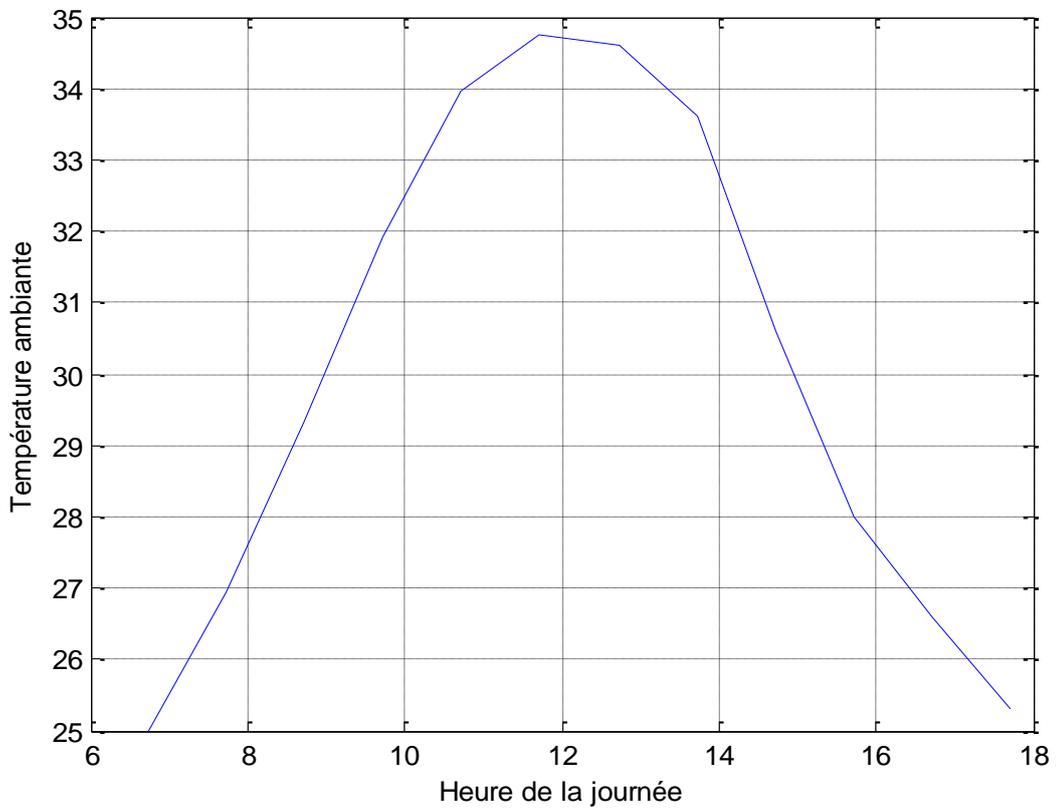


Fig4.4 : Variation de la température ambiante au cours de la journée du 22 mars

Pour la température de sortie du capteur T_{sc} elle prend les valeurs représentées par la fig 4.5. Elle atteint une valeur maximale jusqu'à 72°C à 13h environ et des valeurs minimales au levé et au couché du soleil.

En remarque aussi que cette température (T_{sc}) varie remarquablement avec le débit d'air passant dans la veine du capteur. Quand le débit augmente la température T_{sc} diminue jusqu'à atteindre une valeur maximale de 43°C pour un débit de $400\text{ m}^3/\text{h}$, tandis que pour un débit de $100\text{ m}^3/\text{h}$ elle atteint un maximum de 72°C .

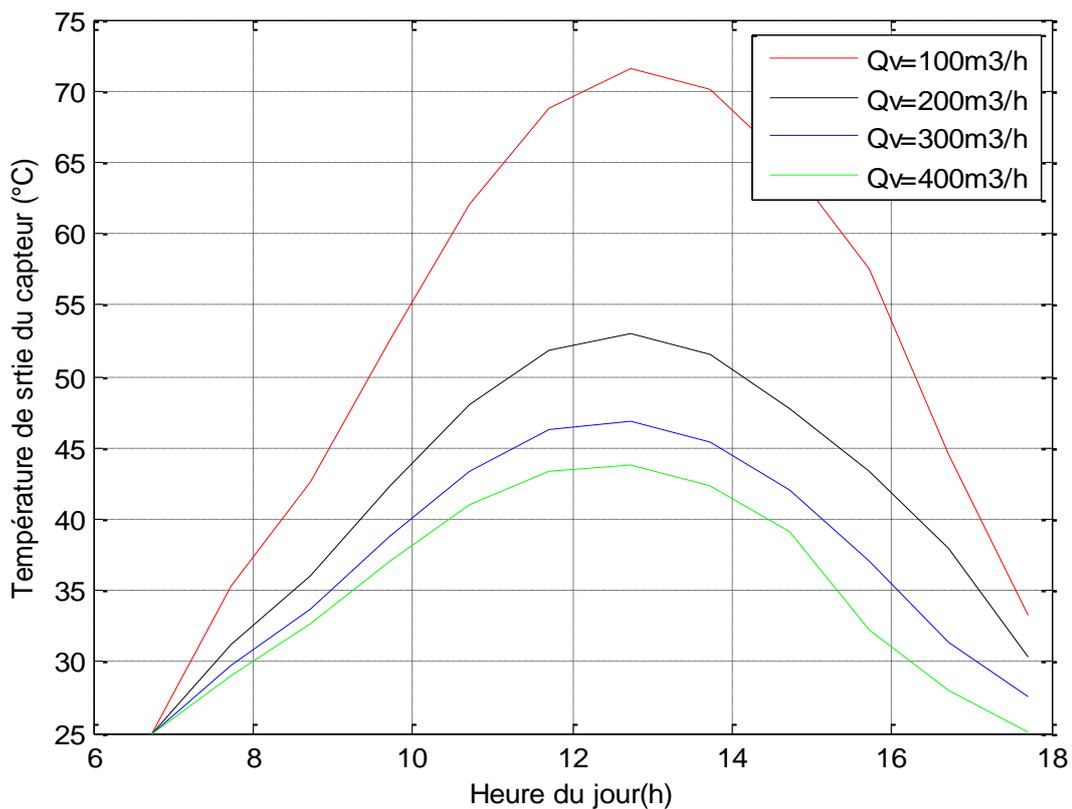


Fig4.5 : Variation de la température de sortie du capteur au cours de la journée du 22 mars pour différents débits d'air.

4-6-2 Performances du séchoir :

Le deuxième volet d'étude de la chaîne énergétique de séchage, concerne l'étude de l'influence des paramètres climatiques sur le processus de séchage et les performances de l'unité de séchage.

Notre enceinte de séchage est un parallépipède de section $1\text{m}\times 1.5\text{m}$ contenant N claies (dans notre étude en a pris $N=3$).

Dans cette partie on présentera les résultats du séchage selon les deux procédés déjà mentionnés :

4-6-2-1 1^{ier} cas : Sans capteur solaire :

➤ Validation du modèle théorique :

Pour validé notre modèle et avoir une idée sur sa fiabilité, on a procédé à une comparaison de ces résultats aux résultats expérimentaux, pour les mêmes conditions, obtenus à partir des travaux de A. Belghit et al [49].

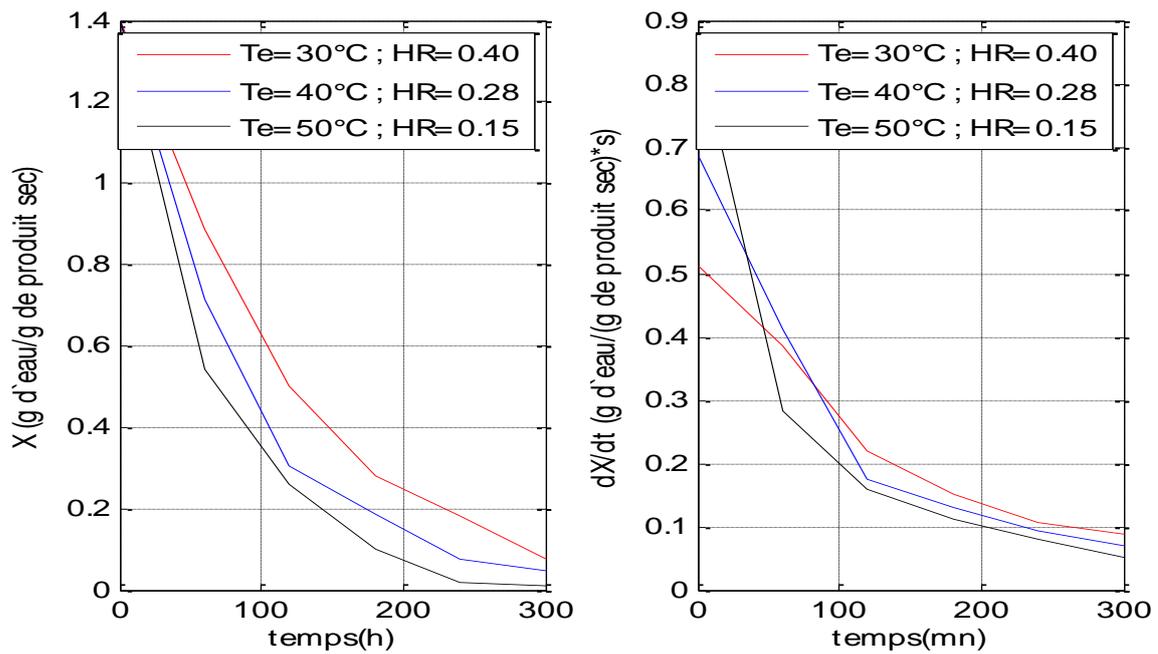


Fig4. 6 : Evolution théorique de X et dX/dt en fonction du temps
Pour différentes températures de l'air de séchage

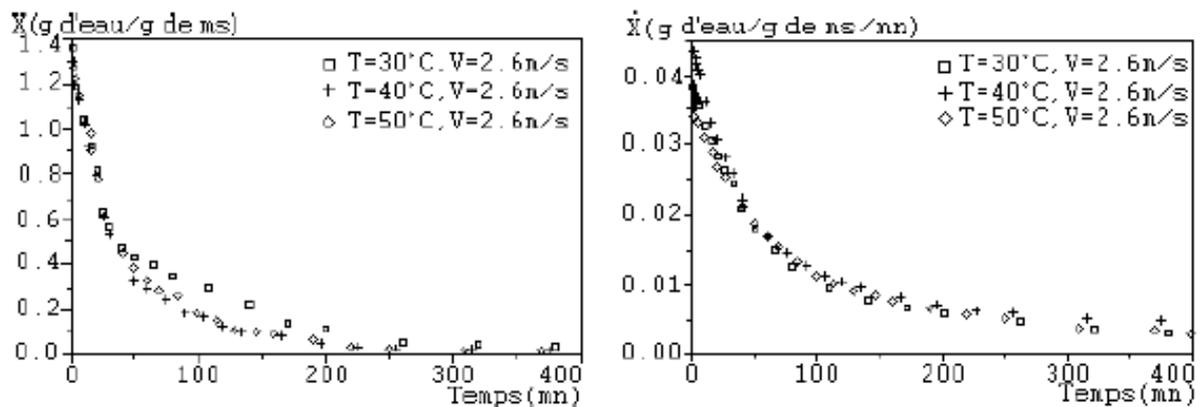


Fig. 4.7 : Evolution de X et de dX/dt selon les travaux expérimentaux
de A. Belghit et al (2005) [49]

Les figures 4.7 et 4.8 représentent respectivement les résultats calculés théoriquement (selon notre modèle) et ceux mesurés expérimentalement (A. Belghit et al (2005) [49]) de la teneur en eau du produit X et de la vitesse de séchage dX/dt pour différentes valeurs de la température et de l'humidité relative HR de l'air de séchage.

La lecture de ces figures nous montre une concordance acceptable entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques. Malgré l'apparition d'un léger écart entre les deux résultats, probablement dû aux conditions initiales imposées et à l'approche expérimentale utilisée.

Cette concordance entre ces résultats est une bonne validation pour notre modèle et nous rassurent que notre modèle numérique est fiable et qu'il décrit bien le phénomène de séchage.

➤ **Influence des paramètres climatiques de l'air asséchant sur le séchage :**

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats de modélisation obtenus concernant l'influence de ces paramètres : température, débit et humidité, et nous essayons de voir lequel de ces paramètres ayant une influence plus grande.

➤ **Influence de la température de l'air de séchage :**

Avant d'étudier l'influence de la température sur les performances de l'unité de séchage, on considère, en premier lieu, le produit disposé sur la première grille, traversé par de l'air à température, débit massique et humidité relative de l'air asséchant constants durant tout le processus. La figure 4.8 met en évidence l'influence de la température de l'air à l'entrée du séchoir sur l'évolution de la teneur en eau réduite de la verveine en fonction du temps, pour un débit d'air $Q_v = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ et $HR=0.5$.

Ces courbes montrent que la teneur en humidité absolue du produit est très sensible à la variation de la température de séchage, le temps de séchage est plus court quand cette température est élevée, ce qui s'explique par l'accroissement du potentiel d'échange entre l'air et le produit, favorisant ainsi l'évaporation de l'eau du produit. Pour une température $T_{sc}=25^\circ\text{C}$, 10 heures se sont écoulées pour sécher le produit de 1.4 g d'eau/g de produit sec à environ 0.03 g d'eau/g de produit sec, alors que le processus n'a duré que la moitié du temps pour atteindre la même valeur (0.03 g d'eau/g de produit sec) à la température de séchage de 55 °C.

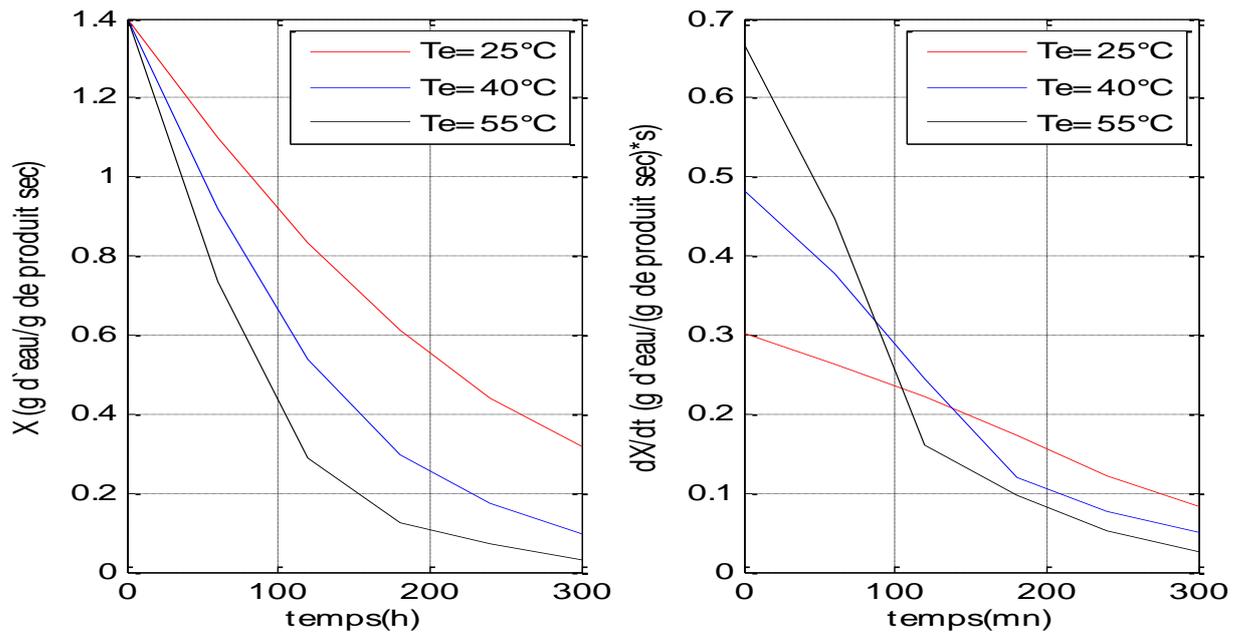


Fig 4.8 : Evolution de X et de dX/dt en fonction du temps pour différentes Températures d'entrée du séchoir T_e

Afin de mettre en évidence les différentes phases de séchage, nous avons tracé sur la même figure (4.8) les courbes de vitesse de séchage (dX/dt qui représente la pente de la cinétique de séchage) en fonction du temps. Nous constatons que la vitesse de séchage prend des valeurs maximales pour la température la plus élevée et décroît avec la diminution de cette température. En plus, on distingue seulement une phase de séchage qui est celle à vitesse de séchage décroissante.

➤ **Influence du débit de l'air de séchage :**

Dans cette partie nous étudierons l'influence du débit d'air sur le séchage de la verveine pour une température et une humidité relative d'entrée au séchoir fixes est égale respectivement à 40°C et 50 %.

Les courbes de cinétique de séchage Figure (4.9) montrent un raccourcissement des durées de séchage lorsque le débit augmente, elles passent de 7h à 4h lorsque le débit passe de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ à $400 \text{ m}^3/\text{h}$ pour atteindre une valeur de X égale à $0.07 \text{ g d'eau/g de produit sec}$. Ce qui rend l'influence du débit importante.

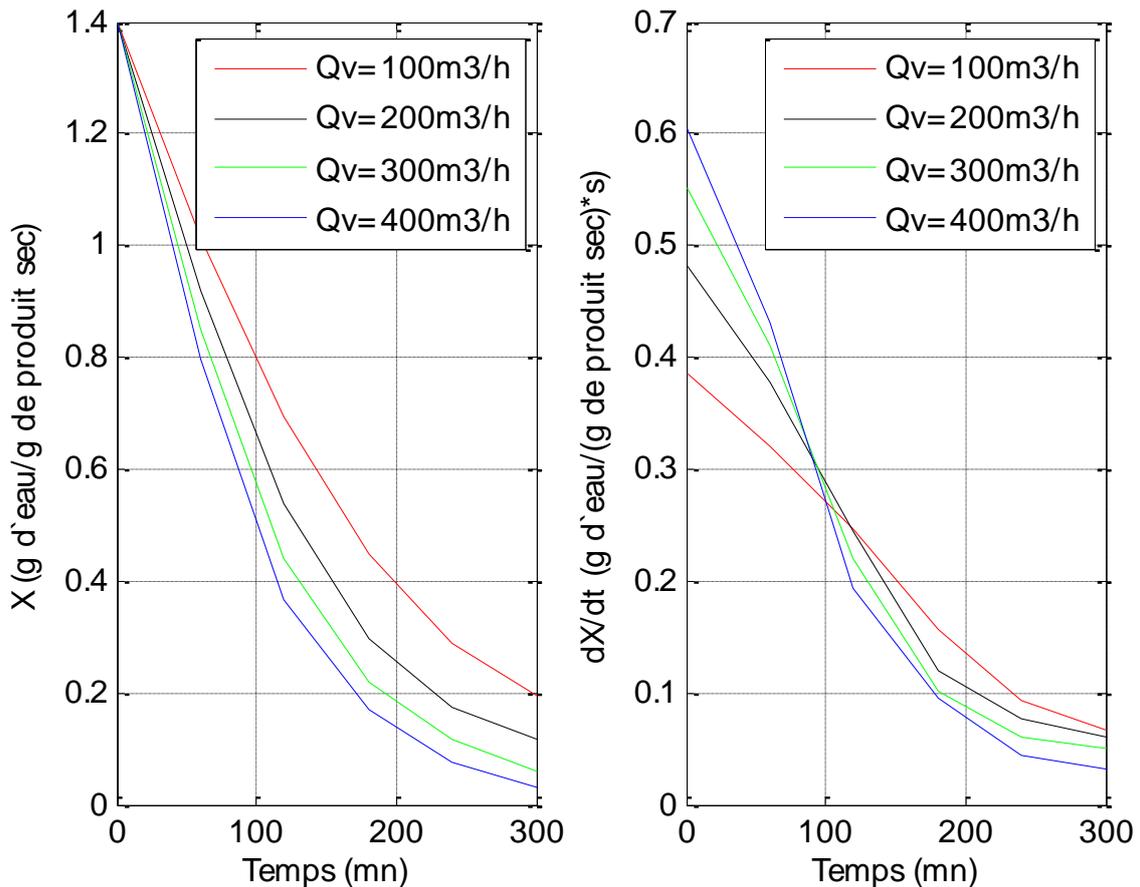


Fig 4.9 : Evolution de X et de dX/dt en fonction du temps pour différentes valeurs du débit d'air de séchage

L'augmentation du débit fait croître le coefficient d'échange de chaleur par convection h ce qui favorise les échanges convectifs en accélérant le processus de séchage.

Si en compare la figure (4.8), qui détermine l'influence de la température sur le processus de séchage, à la figure (4.9), qui détermine l'influence du débit, nous constatons que l'influence de la température est plus importante que celle du débit d'air de séchage.

➤ **Influence de l'hygrométrie de l'air de séchage :**

Pour en terminer avec l'influence des paramètres climatiques de l'air de séchage, nous présentons dans cette partie l'influence de l'humidité relative de cet air.

La figure (4.10) montre clairement que l'humidité relative de l'air de séchage influe dans le même sens que le temps de séchage c.-à-d. quand celle-ci augmente le temps de séchage augmente aussi, car l'augmentation de l'humidité relative de l'air de séchage accroît la pression partielle des vapeurs d'eau dans celui-ci, par conséquent diminue le potentiel d'échange entre l'air et le produit.

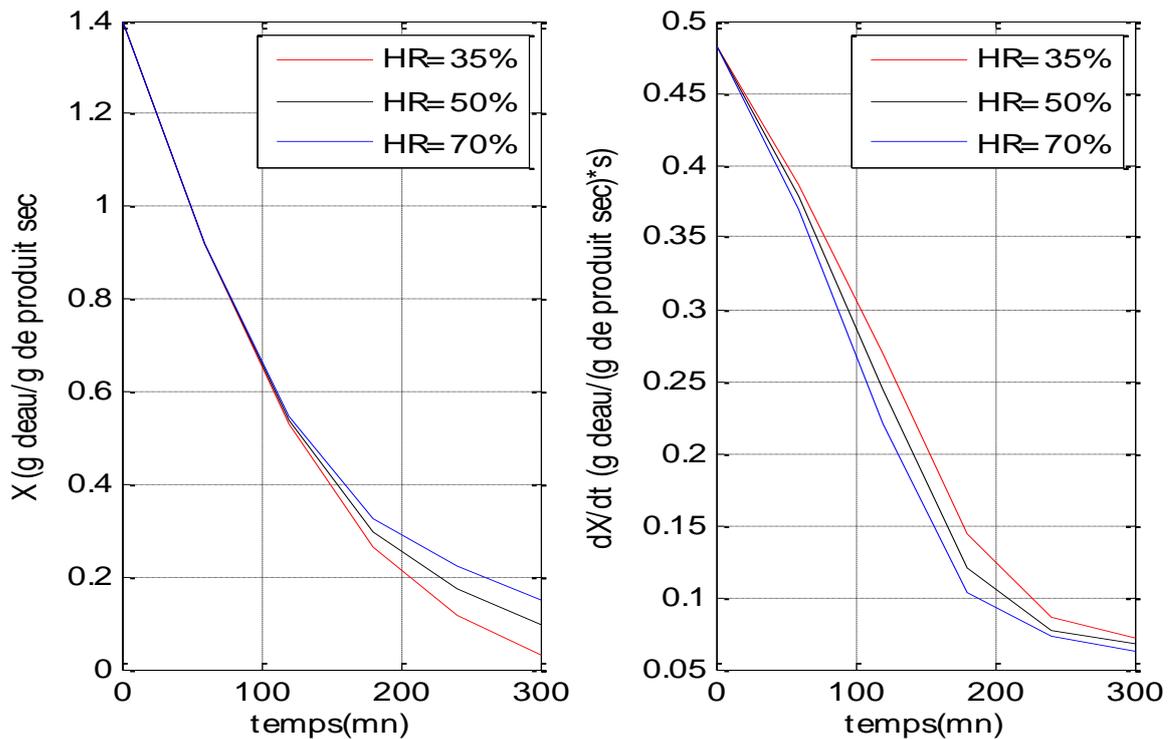


Fig 4. 10 : Evolution de X et de dX/dt en fonction du temps pour différentes valeurs de l'humidité relative de l'air de séchage

Cette figure montre que la teneur en humidité de l'air asséchant n'a qu'une faible influence sur le processus de séchage, car pendant les 5 premières heures de séchage, une variation de HR de 35 % à 70 % entraîne une variation de X de 0.03 g d'eau/g de produit sec à 0.15 g d'eau/ g de produit sec, ce qui fait une variation de 8 % qui est faible.

2^{ème} cas : Utilisation du capteur solaire :

➤ Influence du débit de l'air de séchage :

Comme on a déjà vu, les paramètres climatiques de l'air asséchant (température, vitesse et humidité) ont une influence sur le comportement du produit lors du séchage. Il est bien évident que plus l'air asséchant est sec, chaud et de débit élevé, plus le séchage de la totalité du produit sera rapide. Mais on n'est naturellement pas maître, en conditions réelles de fonctionnement, de certains de ces paramètres, l'hygrométrie variable dans le temps ainsi que la température, dépendent du climat de la région, de la saison etc. et l'on ne peut agir sur elles ; elles fixent, en moyenne, la qualité du séchage que l'on peut obtenir. Le seul paramètre sur lequel on peut agir étant le débit.

Le séchoir étant alimenté par un capteur solaire, on sait déjà d'après l'étude sur le capteur solaire, pour un flux solaire incident donné, plus le débit est faible et plus la

température d'entrée du séchoir sera élevée et vice-versa. On peut dès lors se demander ce qui est préférable : haute température et faible débit ou l'inverse ?

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats de modélisation concernant l'influence du débit de l'air de séchage sur le processus de séchage.

La figure (4.11) présente l'influence du débit de l'air de séchage, on remarque que pour ce cas d'utilisation du capteur solaire, l'influence de ce paramètre est moins importante que pour le premier cas (sans utilisation du capteur solaire) car l'augmentation du débit, qui accélère le processus du séchage, entraîne une diminution de la température de séchage, ce qui ralentit de son tour ce processus, c'est ainsi que l'effet du débit est presque neutralisé, et les quatre courbes de la figure (4.12) sont très proches.

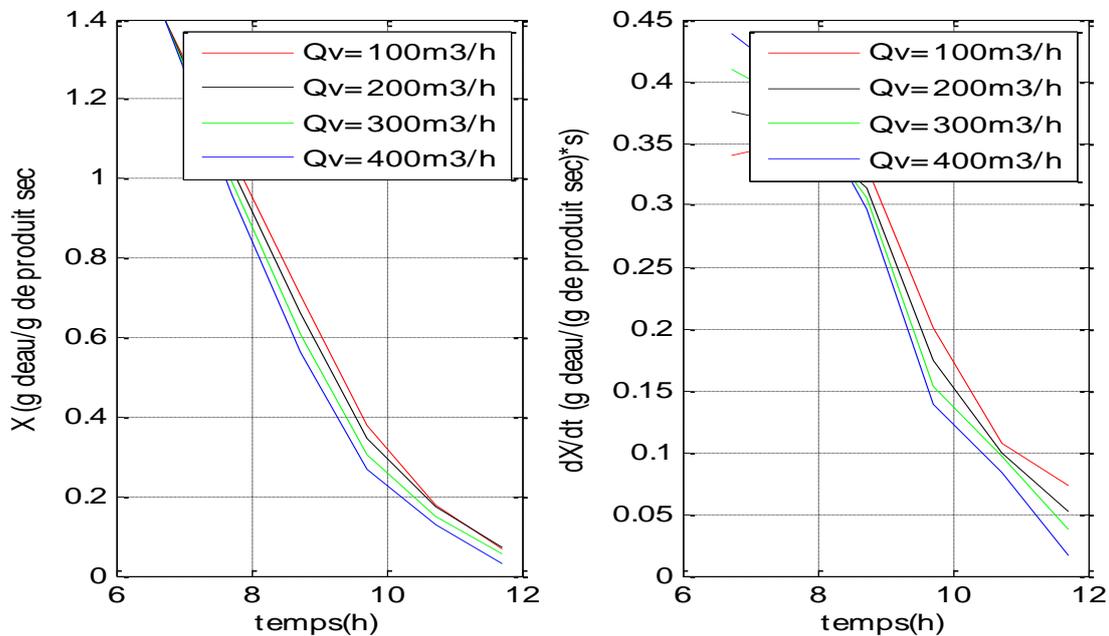


Fig 4. 11 : Influence du débit de l'air de séchage sur X et dX/dt pour différentes Valeurs de débit

Cinétiques de séchage de la verveine dans les trois claies :

Considérons maintenant la totalité du produit dans l'armoire de séchage. Nous avons représenté sur la figure (4.13), en fonction du temps, l'évolution des teneurs en humidité absolue de la verveine dans les trois claies.

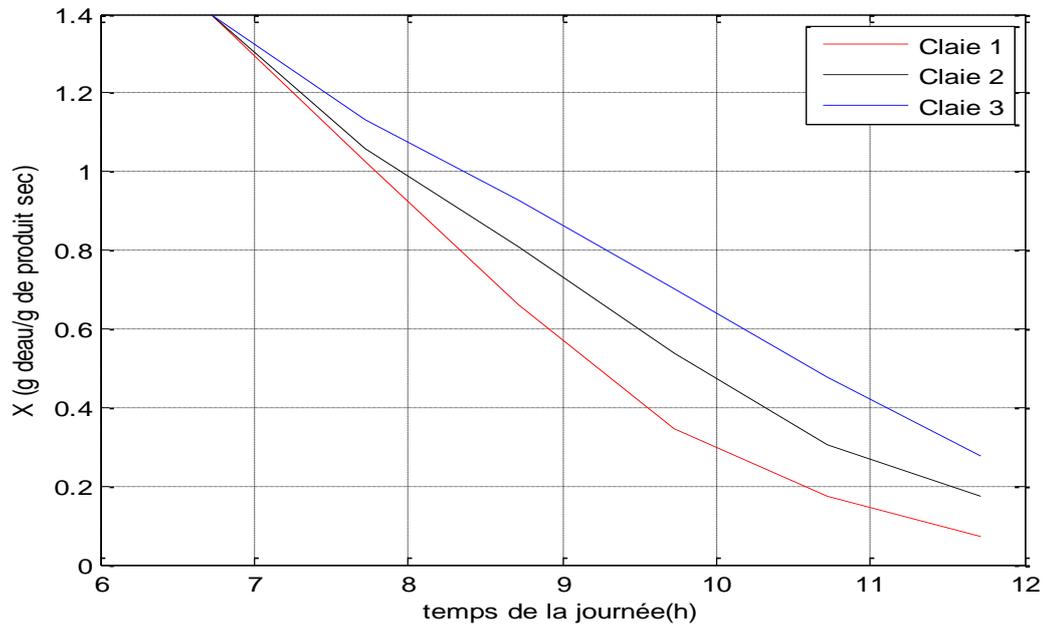


Fig 4.12 : Cinétiques de séchage de la verveine dans les trois claies

A partir de cette figure on remarque que le processus de séchage du produit dans les trois claies, et pour les mêmes conditions, se réalise à des temps différents. Pour la première claie 5 heures suffit pour atteindre la teneur en eau du produit la valeur de 0.06 g d'eau/g de produit sec, alors que pour la deuxième claie il nous faut 6 heures et pour la troisième presque 7 heures. Ce qui fait, le séchage de la première claie est plus rapide que celui de la deuxième qui est à son tour plus rapide que celui de la troisième.

Ces résultats coïncident avec la théorie, car d'une part, la température de séchage de la première claie est toujours plus élevée que celle de la deuxième qui est à son tour plus élevée que celle de la troisième claie, et d'autre part, l'humidité de la première claie est toujours plus faible que celle de la deuxième claie qui est à son tour plus faible que celle de la troisième claie.

Conclusion :

La modélisation numérique pour le séchage de la verveine nous a conduit au choix de la méthode des différences finies régressive (ou vers l'arrière) et l'élaboration du programme SECHDJEB en FORTRAN 90 pour la résolution de notre modèle établit au chapitre 3.

Pendant la résolution du modèle, on a essayé de présenter l'influence des paramètres climatiques de l'air de séchage, et pour ce faire, on a considéré deux cas.

Pour le cas du séchage sans utilisation du capteur solaire, on a constaté que le paramètre le plus influant sur ce processus est la température en premier lieu puis le débit en second, par contre l'hygrométrie de l'air de séchage a une influence minime.

On a vue, pour le cas du séchage avec utilisation du capteur solaire, que le seul paramètre sur lequel on peut agir est le débit de l'air asséchant. Et on a montré que l'influence de ce paramètre diminue considérablement pour ce cas à cause de la variation de la température dans le sens inverse que celui du débit.

Et enfin, on a montré que le temps de séchage pour la première claie est plus petit que celui de la deuxième claie qui est à son tour plus petit que celui de la troisième claie.

CHAPITRE 5

Validation expérimentale

5-1 Introduction:

Dans les pays en voie de développement ou l'on dispose souvent de gisement solaire important, l'utilisation des séchoirs solaires directs et indirects, pour préserver la conservation des fruits et végétaux avec de longues durées de stockage, est très rentable surtout de point de vue économique.

Dans ce chapitre, nous allons d'écrire le dispositif de séchage existant au laboratoire du département de génie mécanique de l'université Mohammed Khider de Biskra, réalisé par M^r Houhou Hatèm.

A cause du non disponibilité du matériel nécessaire et adéquat pour une étude expérimentale complète du phénomène du séchage, on se limitera seulement à la détermination de la courbe de cinétique de séchage des feuilles de la verveine.

5-2 Description du dispositif expérimental:

Notre dispositif expérimental, voir figure (5.1), est constitué de deux parties principales, la première partie est un capteur solaire plan à air, qui a pour rôle la transformation de l'énergie du rayonnement solaire en chaleur récupérée par le fluide caloporteur qui est dans notre cas de l'air, la deuxième partie est un séchoir convectif dans lequel l'air chaud provenant du capteur avec une température et une vitesse contrôlés serre au séchage du produit choisi.



Fig. 5.2 : dispositif expérimental de séchage

Pour plus de détail, notre dispositif expérimental comporte par ordre les éléments :

- Compresseur : de marque AB , de type MPF-803 et de débit maximal 120 m³/h.
- Conduite de refoulement aéraulique : de section circulaire reliant le compresseur au capteur solaire.
- Capteur solaire : c'est un capteur solaire plan à air sans chicanes et a simple circulation d'air de dimension 2X1 m². Ce capteur est incliné de 31° par rapport à l'horizontale et orienté de 10° vers l'ouest par rapport au sud. La couverture est en verre ordinaire, tandis que l'absorbeur est en tôle galvanisé noirci.
- Conduite : cette deuxième conduite, relie le capteur solaire au séchoir.
- Chambre de séchage : de forme parallélépipédique, de dimension 53X53X150 cm², dont les parois sont parfaitement calorifugés.
- Instruments de mesure : au cours de l'expérience, l'évolution des paramètres de l'air asséchant et du produit, est donnée par les instruments suivants :
- Sonde thermo-hygrométrique : de marque KIMO de type HD100, de précision 0.1 °C pour la température et de 0.1 % pour l'humidité relative. Cette sonde est utilisée pour la mesure de la température ambiante de l'air ainsi que son humidité relative.
- Thermomètre : de marque Astonia, de type M890 +C de précision 1 °C, et cela pour la mesure de la température de l'air à la sortie du capteur Tsc .
- Sonde : de precision 0.1 °C, utilisée pour la mesure de la température de l'air à la sortie de la chambre de séchage Ts .
- Pyranomètre : de marque KYPP & ZONEN reliée à un intégrateur de type solarimèter-Integrator CC2 de marque EPPLEY(USA), utilisé pour la mesure de l'éclairement solaire par unité de surface G (W/m²).
- Balance électronique : à affichage numérique, de marque KERN 440 53N et de précision 1g. Pour mesurer la masse du produit Mpr (g).

5-3 Fonctionnement du dispositif expérimental :

On dispose d'un séchoir indirect, fonctionnant en convection forcée, relié à un capteur solaire plan à air sans chicanes. Cette unité de séchage est alimentée par de l'air ambiant qui est aspiré par le compresseur et refoulé, avec un débit déterminé, grâce à une conduite de paroi isolante vers le capteur solaire, celui-ci transforme l'énergie transportée par le rayonnement solaire en énergie calorifique au niveau de son absorbeur, à son tour l'absorbeur cède, par convection, la grande partie de l'énergie qu'il a récupérée à l'air.

Ensuite, l'air chauffé, à température et débit déterminés, est dirigé vers la chambre de séchage où aura lieu le phénomène de transfert de chaleur et de masse avec le produit à sécher, qui est, pour notre cas, la verveine.

5-4 Protocole expérimental:

L'ensemble de l'appareillage doit fonctionner au moins une demi-heure avant d'introduire le produit dans la chambre de séchage.

Les feuilles vertes de la verveine humide, c.-à-d. à l'état initial, sont dégarnies des tiges, puis réparties régulièrement et uniformément sur la seule claie. Les échantillons préparés sont pesés avant de commencer l'expérience et à chaque instant t (mn) durant l'expérience afin de déterminer leur masse $M_{pr}(t)$.

Pour avoir la masse sèche du produit M_s , celui-ci est placé, après la fin de chaque expérience, dans une enceinte portée à $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant une heure, pour une déshydratation totale, puis celui-ci est pesé.

On procède, à l'aide des instruments de mesure, et pour des intervalles de temps de 10 mn aux relevés des valeurs des grandeurs suivantes :

- Température de l'air ambiant $T_{amb}(t)$ ainsi que son humidité relative $HR(t)$.
- Eclairement solaire $G(t)$.
- Température de l'air à la sortie du capteur $T_{s-cap}(t)$.
- Température de l'air à la sortie du séchoir $T_{s-séch}(t)$.
- Masse humide du produit $M_{pr}(t)$

L'expérience de séchage est arrêtée lorsque trois mesures successives de la masse du produit affichent une différence n'excédant pas 1g.

Les figures (5.2) et (5.3) montrent les photos de la verveine avant et après l'expérience de séchage :



Fig.5.2 : Photo de la verveine avant séchage.



Fig.5.3 : Photo de la verveine après séchage.

5-5 Résultats et discussions:

Les expériences ont été réalisées le 06 juillet 2011 au sein du laboratoire du département de génie-mécanique de l'université Mohamed khider à Biskra et sous la direction du D^r MOUMMI ABDELHAFID.

Selon les moyens disponibles, nous avons effectué seulement deux essais, pour deux intervalles de température d'air ambiant différents et de débit d'air constant ($100 \text{ m}^3/\text{h}$), et

pour une masse du produit initiale de 130 g, afin d'avoir l'allure de la courbe de la cinétique de séchage.

Les tableaux suivants donnent les résultats obtenus pendant les deux essais :

Essai 1 :

t	HR(%)	T _{amb} (°C)	G(w/m ²)	T _{s-cap} (°C)	T _{s-séch} (°C)	M _{pr} (g)
9h 20mn	32.5	34	740	47	45	130
9h 30mn	31	35	740	50	47	110
9h 40mn	29.5	35	743	52	50	97
9h 50mn	33	34	755	54	53	85
10h00mn	34	35	767	57	55	75
10h10mn	32	36	772	59	57	68
10h20mn	31	37	839	61	60	63
10h30mn	32	37	850	64	63	60
10h40mn	31	38	875	65	63	59

Tab. 5.1 : Variations des principaux paramètres pendant le premier essai de séchage.

Essai 2 :

t	HR(%)	T _{amb} (°C)	G(w/m ²)	T _{s-cap} (°C)	T _{s-séch} (°C)	M _{pr} (g)
13h40mn	27.5	39	837	62	60	130
13h50mn	25.5	40	829	62	59	105
14h00mn	24.3	40	827	63	60	87
14h10mn	24	41	821	62	61	75
14h20mn	24.5	41	807	61	60	63
14h30mn	23	40	805	61	59	59
14h40mn	22.8	40	791	60	58	58
14h50mn	21	41	765	59	57	58
15h00mn	20.5	40	755	58	56	58

Tab. 2 : Variations des principaux paramètres pendant le deuxième essai de séchage.

Après chaque essai et après chauffage du produit pendant une demi-heure à une température de 110 °C, celui-ci est pesé pour avoir sa masse sèche M_s = 54 g.

La teneur en eau $X(t)$ du produit est déduite de la formule :

$$X(t) = \frac{M_{pr} - M_s}{M_s}$$

A partir de cette formule on peut avoir la teneur en eau du produit à chaque instant.

Soit $X_{initiale}$ la teneur en eau initiale du produit :

$$X_{initiale} = \frac{M_{pr}(t=0) - M_s}{M_s} = 1.4 \text{ g d'eau/g du produit sec}$$

5.6. Courbes de la cinétique de séchage de la verveine :

Les courbes suivantes, déduites des tableaux précédents, représentent les courbes de la cinétique de séchage de la verveine pour deux périodes de la journée du 06 juillet 2011 :

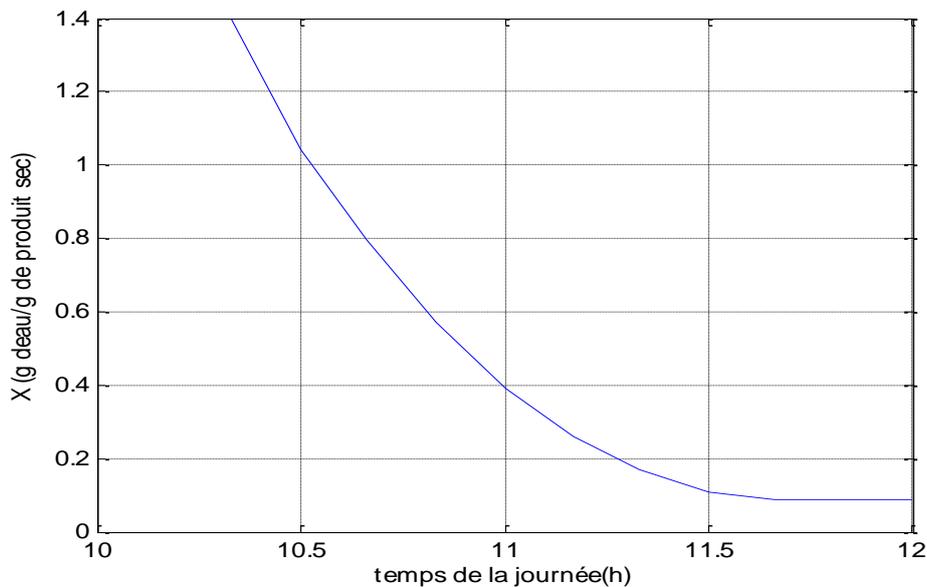


Fig.5.4 : variation de la teneur en eau de la verveine en fonction du temps pour le premier essai de séchage.

Les figures (5.4) et (5.5) représentent l'évolution expérimentale de la teneur en eau de la verveine disposée sur la seule claie du séchoir en fonction du temps.

On remarque, d'après l'allure des deux courbes obtenues expérimentalement, une chute très rapide de la teneur en eau du produit pendant les premiers instants du séchage, ce qui implique une grande vitesse de séchage durant cette période.

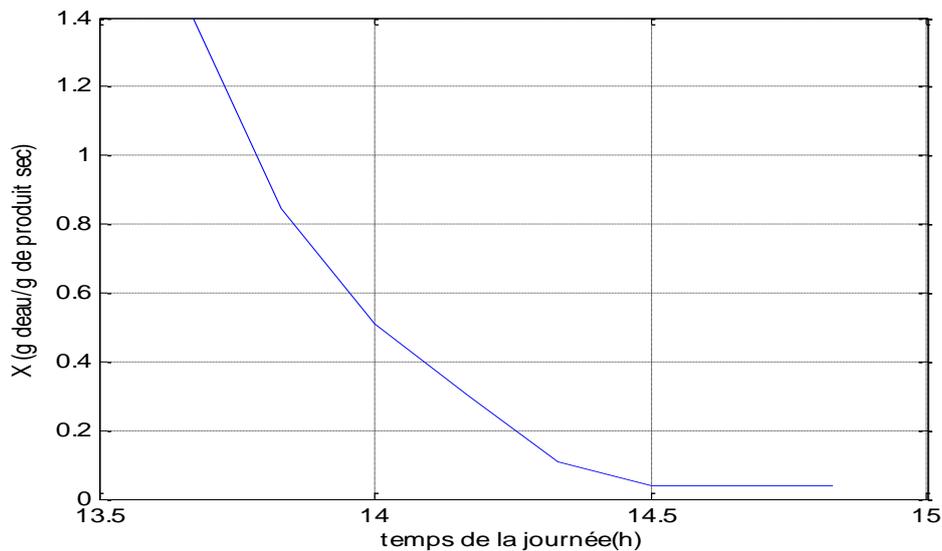


Fig.5.5 : variation de la teneur en eau de la verveine en fonction du temps pour le deuxième essai de séchage.

Ces deux essais sont réalisés pour deux périodes de la journée distincts. Le premier essai est réalisé le matin entre 9h et 11h c.-à-d. pour des températures relativement basses de l'ordre de 35 °C, tandis que le deuxième essai est réalisé l'après midi pour des températures ambiantes de l'ordre de 40 °C.

A partir de l'allure de ces deux courbes, on remarque que la température influence remarquablement sur le processus de séchage. Ainsi, l'augmentation de la température entraîne une accélération du processus du séchage.

5-7 Conclusion :

Malgré le manque des moyens expérimentaux, on a pu avoir l'allure approximative des courbes expérimentales de la cinétique de séchage de la verveine $X=f(t)$ pour deux températures de l'air ambiant différentes, comme on a pu aussi remarquer la non-existence des phases 0 et 1, c'est-à-dire l'absence de la phase de mise en température du produit et de la phase de séchage à allure constante pour la verveine, et la présence unique de la phase 2 qui est la phase de séchage à allure décroissante ou phase de ralentissement.

D'autre part, on a déterminé l'influence de la température sur le processus de séchage, en montrant que l'augmentation de cette température entraîne une diminution du temps de séchage.

Conclusion générale

Le séchage est un processus très complexe qui fait intervenir deux types de transfert: un transfert de chaleur destiné à réduire la teneur en eau dans le produit et un transfert de masse qui implique un déplacement du fluide de l'intérieur du produit vers sa surface.

L'étude théorique que nous avons menée sur le séchoir indirect en convection forcée, a consisté à l'étude de deux grands axes, à savoir une partie rayonnement solaire au niveau du capteur pendant laquelle nous avons pu estimer l'énergie utile reçue par le capteur ainsi que celle réellement utilisée pour le séchage, et déterminé l'évolution de la température ambiante ainsi que celle à la sortie du capteur, au cours du temps, et une partie séchage, pendant laquelle nous avons présenté les résultats de l'analyse énergétique et thermique du processus de séchage de la verveine dans un séchoir solaire indirect fonctionnant en convection forcée et de façon discontinue (uniquement le jour).

Dans ce travail, la modélisation numérique du séchage solaire convectif en couche mince des feuilles de la verveine a permis, grâce à l'application du modèle simplifié de la courbe caractéristique de séchage C.C.S, et pour des températures, des débits et des humidités relatives d'air asséchant différents, de mettre en évidence l'influence des différents paramètres aérothermiques sur le processus de séchage

Pour cela nous avons développé un code de calcul, en Fortran 90, qui permet de simuler le comportement de la chaîne énergétique (capteur-séchoir) fonctionnant en convection forcée. Le capteur solaire plan à air pris de rendement constant, pour la simplification des calculs, relié à une armoire de séchage. Quant au séchoir, il dispose de trois claies perforées où le produit, destiné à être séché, est étalé en couches minces. Les résultats obtenus à travers ce programme de simulation numérique (comportant deux sous-programmes essentiels) nous fournissent simultanément les profils suivants :

- La teneur en humidité absolue moyenne du produit des différents lits de particules dans l'armoire de séchage ainsi que la perte de masse relative.
- La vitesse de séchage du produit au cours du temps.

- Les températures et les teneurs en humidité relatives et absolues de l'air asséchant à travers la chaîne énergétique.

Les courbes obtenues, à partir de l'outil Matlab, ont montré une allure de séchage décroissante. Le principal facteur qui influe la cinétique de séchage est la température de l'air asséchant en premier lieu suivi du débit en deuxième, tandis que l'influence de l'humidité relative est faible.

Les résultats obtenus, pendant ce travail, et pour validé notre code de calcul et avoir une idée sur sa fiabilité, sont comparées aux travaux d'autres auteurs, notamment celui de A. Belghit, M. Kouhila et B. C. Boutaleb (2005), ce qui nous semblent que ces résultats sont acceptables et en accord avec ces travaux.

Et enfin, et selon les moyens expérimentaux disponibles, on a essayé d'avoir une idée sur l'allure des courbes de la cinétique de séchage de la verveine locale obtenues expérimentalement, et on a montré que cette allure coïncide parfaitement avec celle déterminée théoriquement, comme on a remarqué l'absence des phases de séchage 0 et 1 et l'existence que de la phase de séchage 2 ainsi que l'influence de la température sur le processus de séchage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **TOUATI .B**, Etudes théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la MENTHE VERTE (*Mentha viridis*), thèse de doctorat, université de Tlemcen et INSA de Lyon, **2008**.
- [2] **AFZAL T. M. and ABE T.**, Diffusion in Potato During Far Infrared Radiation Drying, *J. Food Eng.* 37, pp. 253-365, **1998**.
- [3] **AHMED-ZAID A.**, Optimisation des capteurs solaires plans à air, application au séchage de produits agricoles et de la pêche, thèse doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, **1999**,
- [4] **AHMED-ZAID A., MESSAOUDI H., ABENE A., LE RAY M., DESMONS J. Y. et ABED B.**, Experimental Study of Thermal Performance Improvement of a Solar Air Flat Plate Collector Through the use of Obstacles: Application for the Drying of 'Yellow Onion', *Int. J. Energy Res.* 23, pp.1083-1099, **1999**.
- [5] **ALI A. H. H., KISHINAMI K., HANAOKA Y. et SUZUKI J.**, Numerical study on laminar flow forced-convection heat transfer for air in a channel with offset plates heated by radiation heat flux, *Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow* 8, pp. 539-558, **1997**.
- [6] **ALI A. H. H., KISHINAMI K., HANAOKA Y. et SUZUKI J.**, Experimental study of laminar flow forced convection heat transfer in air flowing through offset plates heated by radiation heat flux, *Int. Comm. Heat Mass Transfer* 25, pp. 297-308, **1998**.
- [7] **ALTFELD K., LEINER W. and FIEBIG M.**, Second law optimization of flat-plate solar air heaters, *Solar Energy* 41, pp. 127-132, **1988**.
- [8] **AMIR H., LE PALEC G. et DAGUENET M.**, Séchage superficiel d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud : Couplage entre les équations de transfert dans le matériau et celles de la couche limite, *Int. J. Heat Mass Transfer* 30, pp. 1149-1158, **1987**.
- [9] **ANDREIEFF DE NOTBECK G.**, Manuel du conditionnement d'air, Tome II, Pyc-Edition-Desforges, **1978**.
- [10] **BECKMAN W. A., KLEIN S. A. et DUFFIE J. A.**, Solar Heating Design (by the f-chart method), A Wiley-Interscience publication, **1977**.
- [11] **BEJAN A.**, Entropy generation through heat and fluid flow, New York: Wiley, **1982**.

- [12] **BELGHIT A., BELHAMIDI M., BENNIS A., BOUTALEB B. C. et BENET S.**, Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée, *Revue Générale de Thermique* 36, pp. 837-850, **1997**.
- [13] **BELHAMIDI E., BELGHIT A., MRANI A., MIR A. et KAOUA M.**, Approche expérimentale de la cinétique de séchage des produits agro-alimentaires, Application aux peaux d'oranges et à la pulpe de betterave, *Revue Générale de Thermique* 380-381, pp. 444-453, **1993**.
- [14] **BIONDI P., CICALA L. et FARINA G.**, Performance Analysis of Solar Air Heaters of Convective Design, *Solar Energy* 41, pp. 101-107, **1988**.
- [15] **BOWSER T. J. et WILHELM L. R.**, Modeling Simultaneous Shrinkage and Heat and Mass Transfer of a thin, Nonporous Film During Drying, *J. Food Science* 60, pp. 753-757, **1995**.
- [16] **CHARREAU A. et CAVAILLE R.**, Séchage (théorie et calculs), technique de l'ingénieur, J2480, pp. 1-23,
- [17] **CHAUHAN P. M., CHOUDHURY C. et GARG H. P.**, Comparative Performance of Coriander Dryer Coupled to Solar Air Heater and Solar Air-Heater-Cum-Rockbed Storage, *Applied Thermal Engineering* 16, pp. 475-486, **1996**.
- [18] **CHEN P. et PEI D. C. T.**, A mathematical model of drying processes, *Int. J. Heat Mass Transfer* 32, pp. 297-310, **1989**.
- [19] **CHEN Y., BARTHAKUR N. N. et ARNOLD N. P.**, Electrohydrodynamic (EHD) Drying of Potato Slabs, *J. Food Eng.* 23, pp. 107-119, **1994**.
- [20] **CHIRARATTANANON S., CHINPORNCHAROENPONG C. et CHIRARATTANANON R.**, A Steady-State Model for the Forced Convection Solar Cabinet Dryer, *Solar Energy* 41, pp. 349-360, **1988**.
- [21] **CHOUDHURY C., ANDERSEN S. L. et REKSTAD J.**, A Solar Air Heater for Low Temperature Applications, *Solar Energy* 40, pp. 335-343, **1988**.
- [22] **COMBES C.**, Modélisation informatique d'un système de séchage solaire pour fruits et légumes, thèse doctorat, Université de Paris VII, **1981**.
- [23] **CRAUSSE P., BACON G. et BORIS S.**, Etude fondamentale des transferts couplés Chaleur-Masse en milieu poreux, *Int. J. Heat Mass Transfer* 24, pp. 991-1004, **1981**.
- [24] **DAGUENET M.**, Les Séchoirs Solaires : théorie et pratique, Unesco, **1985**.
- [25] **DEJONG N. C., ZHANG L. W., JACOBI A. M., BALACHANDAR S. et TAFTI D. K.**, A Complementary Experimental and Numerical Study of the Flow and Heat Transfer in Offset Strip-Fin Heat Exchangers, *J. Heat Transfer* 120, ASME, pp. 690-698, **1998**.
- [26] **DIAMANTE L. M. and MUNRO P. A.**, Mathematical modeling of hot air drying of sweet Potato slices, *Int. J. Food Science Tech.*, pp. 99-109, **1993**.

- [27] **DIAMANTE L. M.** and **MUNRO P. A.**, Mathematical modeling of the thin layer Solar Drying of sweet Potato slices, *Solar Energy* 51, pp. 271-276, **1991**.
- [28] **DU PEUTY-CHARBONNIER M. A.**, Etude des transferts de chaleur et de masse en milieu granulaire : Application au séchage du Riz Paddy, thèse doctorat, Université de Poitiers, **1995**.
- [29] **GARG H. P.** et **ADHICARI R. S.**, Performance evaluation of a single solar air heater with N-subcollectors connected in different combinations, *Int. J. Energy Res.* 23, pp. 403-414, **1999**.
- [30] **GBAHA P.**, Etude et optimisation des échanges thermiques et des performances des capteurs solaires plans à deux veines d'air, thèse doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, **1989**.
- [31] **GEKAS V.** et **LAMBERG I.**, Determination of Diffusion Coefficients in Volume-Changing Systems – Application in the Case of Potato Drying, *J. Food. Eng.* 14, pp. 317-326, **1991**.
- [32] **GRUPP M.**, **BERGLER H.**, **BERTRAND J. P.**, **KROMER B.** et **CIESLOK J.**, « CONVECTIVE » Flat plate collectors and their applications, *Solar Energy* 55, pp. 195-207, **1995**.
- [33] **GUPTA D.**, **SOLANKI S. C.** et **SAINI J. S.**, Thermohydraulic performance of solar air heaters with roughened absorber plates, *Solar Energy* 61, pp. 33-42, **1997**.
- [34] **HACHEMI A.**, Theoretical and experimental study of efficiency factor, heat transfer and thermal heat loss coefficients in solar air collectors with selective and nonselective absorbers, *International Journal of Energy Research* 23, pp. 675-682, **1999**.
- [35] **HACHEMI A.**, **ABED B.** et **ASNOUN A.**, Theoretical and experimental study of solar dryer, *Renewable Energy* 13, pp. 439-451, **1998**.
- [36] **HACHEMI A.**, Contribution à l'optimisation des performances thermiques des insolateurs plans à air, à lit garni de rangées d'obstacles aux pas serrés. Amélioration du rendement par interaction entre le rayonnement et la convection. Applications, thèse doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, **1992**.
- [37] **HAROUNA I.**, Simulation de séchage du Maïs. Etude des consommations spécifiques en énergie électrique commerciale. Intérêt du séchage à basse température. Utilisation des toitures solaires, thèse doctorat, Université de Toulouse 3, **1992**.
- [38] **HAWLADER M. N. A.**, **UDDIN M. S.**, **HO J. C.** et **TENG A. B. W.**, Drying Characteristics of Tomatoes, *J. Food. Eng.* 14, pp. 259-268, **1991**.
- [39] **ISELT P.** et **ARNDT U.**, Manuel de l'humidification de l'air. Avec de nombreux exemples d'applications, Pyc-Edition-Livres, **1997**.
- [40] **JANNOT Y.** et **COULIBALY Y.**, The « Evaporative Capacity » as a Performance Index for a Solar-Drier Air Heater, *Solar Energy* 63, pp. 387-391, **1998**.

- [41] **JOUDI K. A. et MOHAMMED A. I.**, Experimental performance of a solar air heater with a « V » corrugated absorber, *Energy Convers Mgmt.* 26, pp. 193-200, **1986**.
- [42] **KHATTAB N. M.**, Development of an Efficient Family Size Solar Dryer, *Energy Sources* 18, pp. 85-93, **1996**.
- [43] **KIRANOUDIS C. T., MAROULIS Z. B., TSAMI E. et MARINOS-KOURIS D.**, Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of some vegetables, *J. Food. Eng.* 20, pp. 55-74, **1993**.
- [44] **LALLEMAND A.**, Convection forcée interne, technique de l'ingénieur, A1541, pp. 5-11, **1991**.
- [45] **LAVIALLE/PRELOIS E.**, Du séchage d'une noix aux procédures de gestion d'un séchoir : Analyse en terme de qualité et d'énergie, thèse doctorat, Université de Bordeaux 1, **1993**.
- [46] **LE RAY M. et AHMED-ZAID A.**, Amélioration des performances des capteurs solaires à air par introduction des chicane dans la veine d'écoulement d'air et son application au séchage des produits agricoles et de la pêche, Cévennes (France), 29-30 novembre **1997**.
- [47] **LOVEDAY D. L.**, Thermal Performance of Air Heating Solar Collectors with Thick, Poorly Conducting Absorber Plates, *Solar Energy* 41, pp. 593-602, **1988**.
- [48] **MAROULIS Z. B., KIRANOUDIS C. T. et MARINOS-KOURIS D.**, Heat and Mass Transfer Modeling in Air Drying of Foods, *J. Food Eng.* 26, pp. 113-130, **1995**.
- [49] **A. BELGHIT, M. KOUHILA ET B. C. BOUTALEB**, Approche expérimentale de la cinétique de séchage de la verveine (*Lippia Citriodora*), *Rev. Energ. Ren.* Vol.2, **1999**.
- [50] **A. IDLIMAM, A. LAMHARRAR, C. S. E. KANE, S. AKKAD ET M. KOUHILA**, Valorisation de trios plantes médicinales par séchage solaire convective en couche minces, *Rev. Energ. Ren. SMSTS'08 Alger*, **2008**.
- [51] **M. AGHRIR, M. KOUHILA, A. JAMALI ET L. AIT MOHAMED**, Séchage solaire convectif pour la conservation des feuilles de romarin, *JITH 2007, Albi: France 2007*.
- [52] **A. BOULEMTAFES ET D. SEMMAR**, Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect, *Rev. Energ. Ren. : Valorisation* **1999**.
- [53] **S. YUCEF ALI ET N. MOUMMI**, Etude expérimentale des séchoires solaires à plusieurs clais, *Rev. Energ. Ren. SMST Alger*, **2008**.
- [54] **MULET A.**, Drying Modeling and Water Diffusivity in Carrots and Potatoes, *J. Food Eng.* 22, pp. 329-348, **1994**,
- [55] **VAN BRAKEL (J.)**. – *Mass transfer in convective drying*. Advances in drying, vol. 1, 217 p.(1980).

- [56] **SMOLLEN M.**, 'Evaluation of municipal sludge drying and dewatering with respect to sludge volume reduction', *Wat. Sc. Tech.* , 22, 153-161 , (1990).
- [57] **TSANG K. R. ET VESILIND P. A.** , ' Moisture distribution in sludges ', *Wat. Sc. Tech.* , (1990).
- [58] **VESILIND P. A. ET MARTEL C. J.** , 'Freezing of water and wastewater sludges', *J. Environ. Eng. –ASCE*, (1986).
- [59] **HERNANDEZ J. M.** , ' Séchage du chaïne: caractérisation, procédés convectifs et sous vide', Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, (1991).
- [60] **HAMED A.** , 'Séchage d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud', Thèse de doctorat , université de Perpignan (1985).
- [61] **LEWIS W. K.**, ' The rate of drying of solid materiels ', *The journal of industrial and engineering chemistry*, (1921).
- [62] **SHERWOOD T. K.** , 'The drying of solid' , *Ind. Eng. Chem.*, (1929).
- [63] **FISCHER E. A.** , ' Some fundamental principals of drying' , , *Ind. Eng. Chem.*, London (1935).
- [64] **KRISHER O. ET KAST W.**, 'Die wissenschaftlichen grundlayen der trocknungstechnik', Springer: Berlin (1978).
- [65] **LUIKOV** , ' Heat and mass transfer in capillary-porous bodies', Pergamon Press: Oxford (1966).
- [66] **TOUHAMI A.**, ' Etude de séchage d'un cylindre annulaire poreux humide sous l'action d'un courant d'air force et chaud', Thèse de doctorat (1990), Université de Perpignan.
- [67] **FORNELL et AL.**, 'Experimental study and modelisation for air drying of vegetables products', *Leb. Wiss. And Technol.* , (1980).
- [68] **DOYMAZ I.** , ' The kinetics of foked convective air-drying of pumpkin slices', *J. Food. Engng.* , (2007).
- [69] **AIT MOHAMED L. et AL.**, 'Single layer solar drying behaviour of Citrus aurantium Leaves under forced convection', *Energy conversion and management*, (2005).
- [70] **S. YUCEF ALI**, ' *Étude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à Convection forcée : Application à la pomme de terre*', Thèse de doctorat 2001.
- [71] **AHOUANNOU C.** , ' Etude du séchage des produits agro-alimentaires tropicaux : cas du manioc, gingembre, du gamboet du piment', Thèse de doctorat Université du Bénin, 2001.

[72] **M. KOUHILA et AL** , 'Approche expérimentale des courbes de sorption de la menthe en vue d'un séchage par solaire', Rev. Energ. Ren (1999).

[73] **A. KANMOGNE**, 'Contribution à l'étude du séchage du cacao au Cameroun' , Thèse de doctorat, Université de Yaoundé (2002).

[74] **L. Bennaoum et A. Belhamri** , ' Design and simulation of a solar dryer for agriculture products', Journal of food engineering, article in press, (2002).

Annexes

Annexe 1 :

Propriétés et grandeurs de l'air humide :

Il est bien évident que les propriétés physiques et thermiques de l'air dépendent de la température, de l'humidité et de la pression.

Et, à cause de l'utilité de ces grandeurs pour la modélisation, on a trouvé nécessaire de présenter quelques unes :

A-1-1 Pression de saturation P_{sat} (Pa) :

La pression de vapeur d'eau saturante dans l'air est donnée par la relation de Brooker (1967) en fonction de la température sèche du fluide :

$$P_{sat} = \exp \left[52.576 - \frac{6790.5}{273+T} - 5.0281 \ln (T + 273) \right]$$

avec : T (°C)

A-1-2 Humidité spécifique de saturation W_{sat} ($\frac{kg \text{ d'eau}}{kg \text{ d'air sec}}$) :

$$W_{sat} = 0.622 \frac{P_{sat}}{P - P_{sat}}$$

avec P : pression atmosphérique

A-1-3 Capacité thermique à pression constante C_p (KJ/Kg d'air humide.K) :

$$C_p = \frac{1.006 + 1.827W}{1+W}$$

A-1-4 Chaleur latente de vaporisation L_v (KJ/Kg) :

$$L_v = 2500 - 2.344T_h$$

A-1-5 Température de l'air humide T_h :

$$T_h = T - \frac{L_v}{C_p} (W_{sat} - W)$$

A-1-6 Masse volumique ρ (kg/m^3) :

$$\rho = \frac{P}{T} \left[\frac{1+W}{461.51(0.622+W)} \right]$$

Annexe 2 :

Notions sur les capteurs solaires

A-2-1 Principe :

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air,...).

A-2-2 Rayonnement solaire sur un capteur :

Soit un capteur plan incliné d'un angle i par rapport à l'horizontale et orienté vers une direction faisant un angle γ avec la direction sud. Le rayonnement global $G^*(i,\gamma)$ reçu par cette surface est la somme de trois termes :

$$G^*(i,\gamma) = S^*(i,\gamma) + D^*(i,\gamma) + R^*(i,\gamma)$$

Chacun des 3 termes se calculant de la façon suivante :

a - Rayonnement direct $S^*(i,\gamma)$:

$$S^*(i,\gamma) = \frac{S^*}{\sin(h)} [\cos(h) \sin(i) \cos(a-\gamma) + \sin(h) \cos(i)]$$

$$S^* = I^* \sin(h)$$

$$I^* = 1370 \exp \left[\frac{-FTL}{0.9+9.4 \sin(h)} \right]$$

S^* : est le rayonnement solaire direct sur un plan horizontal.

I^* : est le rayonnement solaire direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement Solaire.

h : est la hauteur du soleil.

a : est l'azimut du soleil.

FTL : est le facteur de trouble de Linke calculé par.

$$FTL = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1+2\beta)\ln(P_v)$$

P_v : pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mmHg.

β : coefficient de trouble atmosphérique qui est pour une zone rurale égale 0.05.

b – Rayonnement diffus $D^*(i,\gamma)$:

$$D^*(i,\gamma) = \frac{D^*}{2} [1 + \cos(i)]$$

D^* : rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal

$$D^* = 54.8 \sqrt{\sin(h)} [FTL - 0.5 - \sqrt{\sin(h)}]$$

c – Rayonnement réfléchi :

$$R^*(i,\gamma) = \frac{G^*}{2} \text{ alb } [1 - \cos(i)]$$

alb : facteur de réflexion du sol appelé aussi albédo. Sa valeur est définie selon le type du sol.

A-2-3 Température de sortie d'un capteur :

La température de sortie d'un capteur est donnée par la formule suivante :

$$T_{sc} = T_e + \frac{\eta \cdot S_c}{C_{pa} \cdot Q_m} G^*(i,\gamma)$$

T_e : Température d'entrée du capteur.

η : rendement du capteur.

S_c : surface du capteur.

C_{pa} : capacité thermique à pression constante de l'air.

Q_m : débit massique de l'air.

T_e peut être prise égale à la température ambiante.

$$T_e = T_{amb} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{\Delta t}\right)$$

T_{max} : température maximale de la journée.

T_{min} : température minimale de la journée.

Δt : longueur du jour.

Annexe 3 :

Listing du programme SECHDJEB

Program SECHDJEB

```
c      *****Programme Principal*****

integer N,K,J
real dt,Qv,Temp,Tc,Tl,X,NJ
c      Dimension Tsc(60),Te(60,60),HR(60,60),Vsech(60,60),W(60,60)
c      Dimension X(60,60)
common/CAP/NJ,Qv,dt
c      common/CAPT/Tsc
c      common/SECH/T,N
c      common/SECHE/X,Vsech,HR,Te,K,J
write (*,*) "  Veuillez introduire les donnees suivants : "
write(*,*)"Donné le numéro du jour NJ="
read(*,*) NJ
write(*,*)"Donné le pas du temps dt="
read(*,*) dt
write(*,*)"Donné le débit volumique Qv="
read(*,*) Qv
N=3
write (*,*) "NJ=",NJ
Call CAPTEUR(Tsc)
Call SECHOIR(Tsc)
c      Do 1 j=1,N+1
c          Do 2 k=tl,tc,dt
c              write(*,*)j
c              write(*,10)"t(h)","X","V.sech","HR","Te(°C)"
c10         Format(A5,2X,A8,4X,A8,4X,A6,4X,A6)
c              write(*,20) k,X(k,j),VSECH(k,j),HR(k,j),Te(k,j)
c20         Format(F4.2,2X,F6.4,2X,F6.4,2X,F4.3,2X,F4.2)
c2          continue
c1          continue
Stop
End  program
```

c *****Sous-programme Capteur*****

Subroutine Capteur(Tsc)

Dimension G(60),Tamb(60),Tsc(60),RGL(60)

integer De,AI

Real Cpair,Rho,Scap,Et,Fi,Tmax,Tmin,Lon,Rendc,Hrcc

Real Qm,Iet,Delta,Ang1,Ang2,Costeta,Rayj,Lgj,Gst

real Or,Az,Haut,Past,Pv,FTL,Hrc,Ist,Sh,Rdir,Ref

real Dif,Rdif,RGL,Angh,Sinh,Sinaz,Tam,Q,HH,RR,alb

Real Temp,AA,BB,CC,TL,Tc,Ai,NJ,PPP,FF,DD,EE,QQ

c common/CAPT/Tsc

common/NADA/Hrc,Tmin

common/CAP/NJ,Qv,dt

common/SOL/TL,Tc

common/SOLEIL/ANG2,Lgj,QQ

c Et=-0.083

c De=1

c Fi=34.8000

c Lon=5.7300

c AI=85

c Ai=25.0000

c Tmax=22.0000

c Tmin=12.0000

c Scap=2.0000

c Rendc=0.5000

write(*,*)" Donnees pour le CAPTEUR :"

write(*,*)"Equation du temps: Et="

read(*,*)Et

write(*,*)"Décalage horaire: De="

read(*,*)De

write(*,*)"Latittude du lieu: Fi="

read(*,*)Fi

write(*,*)"Longitude: Lon="

read(*,*)Lon

write(*,*)"Altitude: AI="

read(*,*)AI

write(*,*)"Angle d'inclinaison du capteur: Ai="

read(*,*)Ai

write(*,*)"Donnez l'orientation du capteur: Or="

read(*,*)Or

write(*,*)"Temperture max du jour: Tmax="

read(*,*)Tmax

write(*,*)"Température min du jour:Tmin="

read(*,*)Tmin

write(*,*)"Humidite relative: Hrc="

read(*,*)Hrc

write(*,*)"Surface du capteur: Scap="

read(*,*)Scap

write(*,*)"Rendement du capteur: Rendc="

```

read(*,*)Rendc
alb=0.15
Hrcc=Hrc/100.0
Fii=Fi*3.1416/180
Lonn=Lon*3.1416/180
Aii=Ai*3.1416/180
Orr=Or*3.1416/180
Cpair=1008
Rho=1.06
Qm=Rho*Qv/3600.00
HH=Rendc*Scap/(Qm*Cpair)
c write(*,*)"HH=",HH
EE=(Tmax+Tmin)/2.00
FF=(Tmax-Tmin)/2.00
RR=alb*(1-cos(Aii))/2
write(*,*)"RR=",RR
QQ=12.00+De-Et-Lon/15
write(*,*)"QQ=",QQ
c write(*,*)"EE=",EE,"    ", "FF=",FF
write(*,*)"NJ=",NJ
c PPP=(360*3.1416*NJ)/(365.25*180)
c write(*,*)"PPP=",PPP
c let=1375.00*(1+0.034*cos(PPP))
c write(*,*)"let =",let
Delta=23.45*(sin(0.986*(284+NJ)*3.1416/180))*3.1416/180
c write(*,*)"Delta=",Delta
CosA1=-(Tan(Fii))*(Tan(Delta))
write(*,*)"CosAng1=",CosA1
Ang1=(acos(CosA1))
write(*,*)"Ang1=",Ang1
Ang2=-Ang1
write(*,*)"Ang2=",Ang2
c AA=sin(delta)*sin(Fi-Ai)*(Ang2-Ang1)*3.1416/180
c BB=cos(delta)*cos(Fi-Ai)*(sin(ang2*3.142/15)-sin(ang1*3.142/180))
c Costeta=-(AA+BB)
c
c Rayj=(24.360/(2*3.14))*(let*costeta)
c write(*,*)"Rayj=",Rayj
Lgj=2*Ang1*180/(3.1416*15)
write(*,*)" Lgj = ",Lgj
Call Tempslc(T)
Temp=TI+dt
c write(*,*)"TI2=",TI
    Do 555 while (Temp.LT.Tc)
Angh=15*(Temp+Et+(Lonn*180/(15*3.1416))-De-12)*3.1416/180
write(*,*)"Angh=",Angh
Sinh=(cos(Fii))*(cos(Delta))*(cos(Angh))+(sin(Fii))*(sin(Delta))
write(*,*)"sinh=",sinh
Q=Sinh

```

```

Haut=asin(Q)
write(*,*)"Haut=",Haut
Sinaz=cos(Delta)*sin(Angh)/cos(Haut)
write(*,*)"sinaz=",sinaz
Az=asin(Sinaz)
write(*,*)"Az=",Az
write(*,*)"Temp=",Temp
DD=6.2832*Temp/Lgj
write(*,*)"DD=",DD
CC=cos(DD)
write(*,*)"CC=",CC
Tamb(Temp)=EE+FF*CC
write(*,*)"Tamb(",Temp,")=",Tamb(Temp)
Tam=Tamb(Temp)
Past=10**(2.7877+7.625*(Tam)/(241.0+(Tam)))
c Past=10**(52.576-6790.5/(Tam+273.00)-5.0281*log(Tam+273.00))
write(*,*)"Past=",Past
Pv=Hrc*Past/100
write(*,*)"Hrcc=",Hrcc
FTL=3.86+0.48*log(Pv)
write(*,*)"FTL=",FTL

c ***** Calcul du rayonnement direct *****

Ist=1370*exp(-FTL/(0.9+9.4*sin(Haut)))
write(*,*)"Ist=",Ist
Sh=abs(Ist*sin(Haut))
write(*,*)"Ai=",Aii," Or=",Orr
WW=sin(Haut)*cos(Aii)
Rdir=abs(Sh*(cos(Haut)*sin(Aii)*cos(Az-Orr)+WW)/sin(Haut))
write(*,*)"Sh=",Sh," Rdir=",Rdir

c ***** Calcul du rayonnement diffus *****

Dif=54.8*((sin(Haut))**(1/2))*(FTL-0.5-(sin(Haut))**(1/2))
Rdif=abs(Dif*(1+cos(Aii))/2)
write(*,*)"Dif=",Dif," Rdif=",Rdif

c ***** Calcul du rayonnement Réfléchi *****

Gst=Sh+Dif
write(*,*)"Gst=",Gst
Ref=abs(Gst*RR)
write(*,*)"Ref=",Ref

c ***** Calcul du rayonnement global *****

RGL(Temp)=abs(Rdir+Rdif+Ref)
write(*,*)"RGL(",Temp,")=",RGL(Temp)

```

```

c      * ***** Température de sortie du capteur *****
c
c      G(Temp)=(3.14*Rayj/(2*Lgj*3600))*cos(3.1416*3.1416*Temp/(Lgj*180))
c      write(*,*)"G(temp)=",G(Temp)
c      CC=cos(2*180*Temp*3.1416/(180*Lgj))
c      write(*,*)"CC=",CC
c      Tamb(Temp)=((Tmax+Tmin)/2)+((Tmax-Tmin)/2)*CC
c
c      Tsc(Temp)=Tamb(Temp)+HH*RGL(Temp)
c      Tsc(Temp)=40.00
c      write(*,*)"Temperture de sortie du Capteur: Tsc=",Tsc(Temp)
c      Temp=Temp+dt
c      write(*,*)"Temp=",Temp
555  Enddo
      Return
      End

```

```

c      ***** calcul du temps de levé et de couché *****
c      ***** du soleil *****

```

Subroutine Tempslc(T)

```

      Real Tsvl,Tsml,Tu,Tl,Tc      ,Lgj,QQ
      common/SOLEIL/ANG2,Lgj,QQ
      common/SOL/Tl,Tc
      write(*,*)"QQ=",QQ," Ang2=",Ang2
      Tl=(Ang2)*180/(15*3.1416)+QQ
c      Tsvl=12+Ang2*180/(3.1416*15)
c      Tsml=Tsvl-Et
c      Tu=Tsml-Lon*180/15*3.1416
c      Tl=Tu+De
      Tc=Tl+Lgj
      write(*,*)"Temps du leve: Tl=",Tl
      write(*,*)"Temps du couche: Tc=",Tc
c
      Return
      End

```

```
c ***** LE SECHOIR *****
c *****
```

```
Subroutine SECHOIR(Tsc)
```

```
integer N,J,F
```

```
real Long, Large, X0, HR0, P, Alpha, Beta, Xfin, Mps, Tee, HR, W, dt
```

```
real Psat, A, B, Xeq, t, XR, Vin, Vs, Mvp, Th, V, FXR, Cp, Lv, X, Tl, Tc
```

```
real Hrc, Temp, Psatt, Dm, LL, K, ZA, Mvol, Tcc, Gn, TTH, TT, HRR
```

```
Dimension X(60,60), Te(60,60), W(60,60), Tsc(60), HR(60,60)
```

```
Dimension Vsech(60,60)
```

```
common/NADA/Hrc, Tmin
```

```
common/CAP/NJ, Qv, dt
```

```
common/SOL/Tl, Tc
```

```
c common/SECHE/X, Vsech, HR, Te, K, J
```

```
common/AIRHUM/Th, Psat, Dm, Mvol
```

```
Long=1.5
```

```
Large=1.
```

```
X0=1.40
```

```
Xfin=0.05
```

```
P=100400.
```

```
Alpha=0.901E-4
```

```
Beta=0.325
```

```
N=3
```

```
Mps=0.1
```

```
HR0=Hrc
```

```
TT=0
```

```
V=Qv/(Long*Large*3600)
```

```
ZA=Alpha*Beta*(V**Beta)
```

```
c ***** Conditions initiales *****
```

```
Do J=1, N+1, 1
```

```
  X(Tl, J)=X0
```

```
  write(*, *) "X(", Tl, J, ")=", X(Tl, J)
```

```
Enddo
```

```
c ***** Conditions aux limites *****
```

```
Temp=Tl
```

```
HR=HR0
```

```
Tsc(Tl)=Tmin
```

```
Tsc(Tc)=Tmin
```

```
Do 4 while(Temp.LE.Tc)
```

```
  Te(Temp, 1)=Tsc(Temp)
```

```
  write(*, *) "Te(", Temp, ", 1)=", Te(Temp, 1)
```

```
  Psatt=10**(2.7877+7.625*Te(Temp, 1)/(241.0+Te(Temp, 1)))
```

```

c    LL=Log(Te(Temp,1)+273.00)
c    Psatt=10**(52.576-6790.5/(Te(Temp,1)+273.0)-5.0281*LL)
write(*,*)"Psatt=",Psatt
    W(Temp,1)=(0.622*Psatt*HR0)/(P-Psatt*HR0)
    HR(Temp,1)=HR0
write(*,*)"HR(",Temp," 1)=",HR(Temp,1)
write(*,*)"W(",Temp," ,1)=",W(Temp,1)
    Temp=Temp+dt
4   enddo

c    *****

    T=TI+dt
X(T,4)=X0
write(*,*)"X(TL,4)=",X(T,4)
c    Do 999 While (X(T,4).GE.Xfin)
40   T=TI
    K=TI
    TT=TI
c    write(*,*)"K=",K
    Tcc=Tc-dt
    Do while (T.LE.Tcc)
c    Th=Tsc(T)-8
    TTH=(0.4501*Tsc(T)-2.5987)
    Th=(-0.4911*Tsc(T))*HR0**2+(1.0248*Tsc(T)-5.25)*HR0+TTH+2
write(*,*)"Th=",Th
    Tee=Tsc(T+dt)
    W=W(T,1)
write(*,*)"Tsc(T)=",Tsc(T),"    Tee=",Tee
c    Do JJ=1,N+1,1
c    HR(K,JJ)=HR(T,1)
c    End do
write(*,*)"W(",T," ,1)=",W(T,1)

    Do J=2,N+1,1
write(*,*)"J=",J
If(X(K,2).LT.Xfin) Then
GoTo 30
Endif
HRR=HR(T,1)
c    HRR=HR0

    Call PROPAIR(Tee,W,Cp,Lv,V)

write(*,*)"Lv=",Lv,"    Th=",Th,"    Mvol=",Mvol
c    If(HR.LT.0.35) Then
c    A=52.*10**(-6)

```

```

c      B=2.014
c      Else
      B=345.E-6
      A=0.97
c      End if

      XX=-log(1-HRR)
      write(*,*)"XX=",XX
      Pause
      YY=B*(1.8*Te(T,J-1)+492)
      write(*,*)"YY=",YY
      ZZ=1/A
      write(*,*)"ZZ=",ZZ
      Xeq=(XX/YY)**ZZ
      write(*,*)"Xeq=",Xeq,"  X(",T,J,")=",X(T,J)
c      Xeq=((-alog(1-HR))/(B*(1.8*Te(T,J-1)+492)))**(1/A)
      Xeq=0.0037+0.00215*HRR-0.00006*(HRR**2)
      XR=(X(T,J)-Xeq)/(X0-Xeq)
      write(*,*)"XR=",XR
      Gn=10.3257*XR**4-3.8368*XR**5
      FXR=abs(0.1880+0.8315*XR+3.2493*XR**2-9.7577*XR**3+Gn)

      Vin=ZA*(Tee-Th)
c      Vin=Alpha*Beta*(Te(T,J-1)-Th)*V**Beta
      Vs=Vin*FXR
      write(*,*)"FXR=",FXR,"  VIN=",VIN,"  Vs=",Vs

      K=T+dt

      X(K,J)=X(T,J)-3600*dt*Vs
      Vsech(K,J)=Vs
      Mvp=Mps*Vsech(K,J)
      Te(K,J)=Te(k,J-1)-(Mvp*Lv)/(Dm*Cp)
      write(*,*)"Te(",K,J-1,")=",Te(K,J-1),"  Te(",K,J,")=",Te(K,J)
      write(*,*)"Dm=",Dm,"  Psat=",Psat
      write(*,*)"X(",K," , ",J,")=",X(K,J)
      W(K,J)=W(K,J-1)+Mvp/Dm
      HR(K,J)=(P*W(K,J))/(Psat*(0.622+W(K,J)))
      write(*,*)"HR(",K,J,")=",HR(K,J),"  W(",K,J,")=",W(K,J)
      Tee=Te(K,J)
      W=W(K,J)
      HRR=HR(K,J)
c      If(X(K,2).LT.Xfin) Then
c      GoTo 30
c      Else
c      GoTo 35
c      Endif
35     N=N
c      GoTo 30

```

```

c      Endif
      End do
      TT=TT+1
33    T=K
      write(*,*)"TT=",TT
      End do
      Do F=2,N+1
        X(TI,F)=X(Tcc,F)
      End do
c999  End do

30    Do 8 J=1,N+1,1
      write (*,*)" Noeud numéro: J=",J
      write (*,11)"Temps(h)", "X", "Vsech", "HR", "Temp-sortie-air "
11    Format(A10,4X,A10,4X,A10,4X,A10,4X,A17)

      T=TI
      Do while (T.LE.TT)

          Vsech(T,J)=Vsech(T,J)*3600

          write(*,22)T,X(T,J),Vsech(T,J),HR(T,J),Te(T,J)
22    Format(F10.2,4X,F10.5,4X,F10.5,4X,F10.5,4X,F10.5)
          T=T+dt
      End do
8    End do
      Return
      End

```

c ***** Propriétés physiques de l'air *****

Subroutine PROPAIR(Tee,W,Cp,Lv,V)

```
real Wsat,Mvol,V,Lv,Dm,Th,Cp,Psat,Tee,P,W,Qv,Large,Long
common/AIRHUM/Th,Psat,Dm,Mvol
common/CAP/NJ,Qv,dt
P=100400.
Large=1.
Long=1.5
write(*,*)"Tee=",Tee
Psat=10**(2.7877+7.625*Tee/(241.0+Tee))
c Psat=10**(52.576-6790.5/(Tee+273.0)-5.0281*log(Tee+273.0))
Wsat=0.622*Psat/(P-Psat)
Cp=((1.006+1.827*W)/(1+W))*10**3
write(*,*)"Cp=",Cp," Wsat=",Wsat," W=",W
Lv=4.18*(597.-0.56*Th)*(10**3)
Th=(2*Tee/3)+(Tee-Lv*(Wsat-W))/(3*1000*(Cp+1.826*Wsat))
c Th=Tee-Lv*(Wsat-W)/Cp
Mvol=1.1774-0.00359*(Tee-27)
c Mvol=P*(1+W)/(461.51*Tee*(0.622+W))
write(*,*)"Mvol=",Mvol
Dm=Mvol*Qv/3600
write(*,*)"V=",V," Th=",Th

Return

End
```

Résumé: ce travail consiste en une étude théorique et expérimentale du processus de séchage qui se déroule dans une chambre parallélépipédique alimentée par de l'air chaud provenant d'un capteur solaire plan à air. Pendant l'étude théorique nous avons développé un code de calcul permettant d'avoir, pour toutes valeurs des paramètres climatiques de l'air, une courbe de l'évolution de la teneur en eau du produit à séché en fonction du temps, et de déterminer l'influence de chacun de ces paramètres sur le processus de séchage. D'autre part l'étude expérimentale nous a permis d'avoir l'allure de la courbe de la cinétique de séchage de la verveine pour une éventuelle comparaison avec celle déterminée théoriquement.

ملخص: هذا العمل عبارة على دراسة نظرية و تطبيقية لعملية التجفيف التي تجرى في وعاء متوازي المستطيلات اللذي يتلقى الهواء الساخن من محول حراري هوائي سطحي, خلال الدراسة النظرية اعددنا برنامج حسابي للحصول, من أجل كل قيمة عددية للخواص المناخية للهواء, على منحنى تغير كمية الماء الموجود في المادة المهيئة للتجفيف بدلالة الزمن و كذلك اضهار مدى تأثير هذه الخواص على ظاهرة التجفيف. أما بالنسبة للدراسة التطبيقية فقد سمحت لنا برسم المنحنى التطبيقي للتجفيف و هذا من أجل مقارنة بسيطة مع نتائج الدراسة النظرية.