

**UNIVERSITE KASDI MARBAH OUARGLA**

**Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie des Procédés**



**Mémoire**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine Sciences et Techniques**

**Filière : Génie des Procédés**

**Spécialité : Génie Chimique**

**Présenté Par : DEGLA Adnane et SIOUED Rima**

**Thème**

# **Séchage Solaire des Dattes Deglet-Nour: Simulation Numérique**

**Soutenu le :06/06/2015**

**Devant le jury:**

Mr	M. LATI	M.A.B	Président
M <sup>me</sup>	S.CHOUICHA	M.A.A	Examineur
Mr	D. MENNOUCHE	M.A.A	Rapporteur

**ANNEE UNIVERSITAIRE : 2014/2015**

# *REMERCIEMENT*

*Nos remerciements vont tout premièrement à « Allah » tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné pour terminer ce travail.*

*Nous remercions notre promoteur M. Djamel*

*MENNOUCHE*

*pour sa collaboration et pour son orientation avec nous.*

*Nous adressons nos remerciements à tous les orienteurs, tous ceux qui d'une façon ou d'une autre ont fait part de leur aide.*

*Nous exprimons nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*Merci*

## *Dédicaces*

*A qui je dois tant, A ma mère.*

*A mon cher père.*

*A mon grand-parent El-chikh qu'il m'est tout donné sans rien en retour.*

*Que Dieu leur préserve longue vie et bonne santé.*

*A mes frères et mes sœurs surtout, les petits: Saber et Mosaab.*

*A toute ma famille.*

*A mes amis surtout Abla, Soad, Siham, Aicha, Hanane, Fatima, Salima, Fatiha.*

*A tous mes amis d'enfance et du parcours scolaire et universitaire.*

*Je dédie ce modeste travail.*

*Rima*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*A ma chère mère.*

*A l'esprit de mon père.*

*A mes frères Daredj, Otmane, Mouhssin et Meftah*

*A mes sœurs Aicha, Moufida, Yamina, Zineb et Safia*

*A ma grande famille.*

*A tous mes amis surtout : Ali, Sabri, Daoued*

*A tous mes amis du parcours scolaire et universitaire.*

*A tous mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université.*

*Adnane*

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Chapitre I : Etude théorique du séchage</b> .....	
I.1. Généralité sur le séchage.....	03
I.1.1. Définition.....	03
I.1.2. But de séchage.....	03
I.1.3. Caractéristiques de l'air de séchage.....	03
I.1.4. Caractéristiques des solides humides.....	04
I.1.5. Modes de séchage.....	09
I.1.6. Choix du procédé de séchage.....	10
I.1.7. Processus de séchage.....	10
I.1.8. Vitesse de séchage.....	11
I.1.9. Cinétique de séchage.....	11
I.1.10. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage.....	13
I.2. types de séchoirs solaires.....	14
I.2.1. Les séchoirs solaires directs.....	14
I.2.2. Les séchoirs solaires indirects.....	15
I.2.3. Les séchoirs mixtes.....	17
I.2.4. Les séchoirs hybrides.....	17
I.3. Les phénomènes de transfert.....	19
I.3.1. Transfert de chaleur.....	19
I.3.2. Transfert de masse.....	21
I.4. Généralité sur le produit à sécher : la datte « Deglet-Nour».....	21
I.4.1. Caractéristiques du fruit.....	21
I.4.2. Particularités.....	21
I.4.3. Composition.....	22
<b>Chapitre II : Description et formulation mathématique du problème</b> .....	
II .1. Définition de la problématique.....	24
II .2. Hypothèses simplificatrices.....	25
II .3. Equations de système.....	25
II .4. Les coefficients d'échange.....	26
II .4.1.Échanges thermiques.....	26
II .4.2. Puissance échangée par changement de phase.....	28
II .5. Résolution numérique.....	29

II .5.1. Discrétisation des équations.....	29
II .5.2. Méthode de résolution.....	29
<b>Chapitre III :Résultats et discussion.....</b>	
III .1. Présentation du séchoir étudié.....	32
III .2. Résultats de simulation.....	33
III .2.1. Cinétique de séchage.....	35
III .2.2. Influence de la température et la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage.....	36
III .2.2.1. Influence de la température de l'air sur la cinétique de séchage .....	36
III .2.2.2. Influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage.....	39
<b>Conclusion générale.....</b>	42
<b>Références bibliographiques.....</b>	43

## Liste des figures

Figure (I.1) : Volume de contrôle microscopique.....	5
Figure (I.2) : Volume de contrôle macroscopique.....	5
Figure (I.3): Description du solide humide.....	6
Figure (I.4): Allure de séchage en fonction du temps.....	12
Figure (I.5): Exemples des séchoirs solaires directs simples.....	15
Figure (I.6): Séchoir solaire indirect.....	16
Figure (I.7): Séchoir solaire mixte.....	17
Figure (I.8): Séchoir solaire hybride.....	18
Figure (II.1): Echange thermique dans une tranche de séchoir.....	24
Figure (III.1) : Schéma descriptif du séchoir solaire.....	33
Figure (III.2) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps.....	35
Figure (III.3) : Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps.....	36
Figure (III.4): Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes températures de l'air asséchant et pour $V_a = 1$ m/s.....	37
Figure (III.5): Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes températures de l'air asséchant et pour $V_a = 1.5$ m/s.....	38
Figure (III.6) : Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes températures de l'air asséchant et pour $V_a = 2$ m/s.....	38
Figure ( III .7) : Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes vitesses de l'air asséchant et pour $T_a = 50^\circ\text{C}$ .....	40
Figure ( III .8): Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes vitesses de l'air asséchant et pour $T_a = 60^\circ\text{C}$ .....	40
Figure ( III .9): Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes vitesses de l'air asséchant et pour $T_a = 65^\circ\text{C}$ .....	41

## Liste des tableaux

Tableau (I.1): composition de la pulpe de datte fraiche Deglet-Nour.....	23
Tableau(III.1):Conditions de simulation du séchage.....	34



## NOTATIONS

Symbols	Désignations	Unites
$H_a$	Humidité absolue de l'air	kg eau / kg as
$m_v$	Masse de vapeur d'eau	Kg
$m_{as}$	Masse de l'air sec	Kg
$H_r$	Humidité relative de l'air	%
$P_v$	Pression partielle de la vapeur d'eau	Pa
$P_s$	Pression de saturation	Pa
$H_{as}$	Humidité absolue de saturation	kg eau/ kg. As
$\Psi$	Degré de saturation	%
$T$	Température	°C
$T_h$	Température humide	°C
$T_r$	Température de rosée	°C
$T_{sa}$	Température de saturation adiabatique	°C
$\varepsilon$	Porosité volumique	
$X$	Teneur en eau à base sèche	kg eau / kg ms
$X_r$	Teneur en eau à base humide	kg eau / kg mh
$M_h$	Masse humide du produit	Kg
$M_s$	Masse de produit sec	Kg
$a_w$	Activité de l'eau	
$R$	Vitesse de séchage	Kg eau/(kg ms.s)
$\Phi$	Puissance transmise	W
$\lambda_c$	Conductivité thermique du matériau	W/ (m.K)
$S$	Surface de séchage	m <sup>2</sup>
$h_c$	Coefficient de convection thermique	W/ (m <sup>2</sup> .K)
$T_1$	Température la plus chaud	°C
$T_2$	Température la plus froide	°C
$q_r$	Quantité d'énergie rayonnée	W
$\sigma$	Constant de Stephan-Boltzmann	J / (s m <sup>2</sup> k <sup>4</sup> )
$\rho_f$	Masse volumique d'un fluide	kg/m <sup>3</sup>
$D_f$	Coefficient de diffusion d'un fluide	m <sup>2</sup> /s
$J$	Flux massique surfacique d'un fluide	Kg / (m <sup>2</sup> .s)
$C_m$	Fraction massique	

$K_f$	Perméabilité intrinsèque d'un fluide	$m^2$
$\mu_f$	Viscosité dynamique d'un fluide	pa.s
$\dot{m}_a$	Débit massique de l'air	kg /s
$C_p$	Chaleur spécifique	J/kg .K
$h_{cp}$	Coefficient d'échange thermique par convection l'air- produit	$m^2$
$S_{pr}$	Surface d'échange par convection air-produit	$m^2$
$h_{ci}$	Coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et la face interne de la paroi de l'armoire de séchage	$W/m^2.K$
$\Delta S_p$	Elément de surface de l'armoire de séchage	$m^2$
$T_a$	Température de l'air	K
$T_{pr}$	Température du produit	K
$T_{pi}$	Température de la paroi interne	K
$\Delta z$	Hauteur d'une tranche	M
$m_{pr}$	Masse du produit par claie	Kg
$C_{ppr}$	Capacité calorifique massique du produit	J/kg.K
$P_{ev}$	Puissance d'évaporation	W
$m_{pi}$	Masse d'une section i de la paroi interne de l'armoire de séchage	Kg
$C_{ppi}$	Capacité calorifique massique de la paroi interne	J/kg.K
$\lambda_d$	Coefficient d'échange thermique par conduction entre les parois de l'armoire de séchage	$W/m^2.K$
$T_{pe}$	Température de la paroi externe	K
$T_{ab}$	Température ambiant	K
$h_r$	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la face externe de la paroi de l'armoire de séchage et la voûte céleste	$W/m^2.K$
$T_c$	Température équivalente de la voûte céleste	K
$N_u$	Nombre de Nusselt	
$\lambda_a$	Conductivité thermique de l'air	W/m.K
$R_e$	Nombre de Reynolds	
$Pr$	Nombre de Prandtl	
$D_{pr}$	Diamètre moyen du produit	M
$\rho_a$	Masse volumique de l'air	$kg/m^3$

$V_a$	Vitesse de l'air	m/s
$\mu_a$	Viscosité dynamique de l'air	pascal. s
$\lambda_{pi}$	Conductivité thermique de la paroi interne	W/m.K
$e_{pi}$	Epaisseur de la paroi interne du séchoir	M
$\lambda_{pp}$	Conductivité thermique de l'isolant entre les parois	W/m.K
$e_{pp}$	Epaisseur de l'isolant entre les parois	M
$\lambda_{pe}$	Conductivité thermique de la paroi externe	W/m.K
$e_{pe}$	Epaisseur de la paroi externe du séchoir	M
$\epsilon_p$	L'émissivité de la paroi du séchoir	
$L_v$	Chaleur latente de vaporisation	J/kg

## **Indices**

A	Air
Ab	Air ambiant
H	Humide
S	Sec
Pr	Produit
Pi	Paroi intérieure
Pe	Paroi extérieure
P	Paroi
V	Vapeur d'eau

## **Introduction générale**

L'énergie solaire présente une source d'énergie non polluante, économique, inépuisable, et disponible en abondance dans la plupart endroits du monde [1].

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important surtout dans le sud. L'énergie de ce gisement est suffisante, particulièrement en été pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agroalimentaires [2].

Dans les pays développés, environ 12 à 25 % de la demande totale d'énergie primaire est consacrée au séchage [3]. Le séchage solaire est une technique très ancienne utilisée pour la conservation des produits agroalimentaires.

La perte de ces produits dans les pays en voie de développement due à une surproduction pendant la période des récoltes et au manque de moyen de stockage s'élève au environ de 30 à 40 % de la production globale [4].

A l'aide de l'opération de séchage, ces produits peuvent être conservés pendant plusieurs mois. En plus, un produit séché pèse environ 1/6 du produit alimentaire frais. Ils n'ont pas besoin d'équipement spécial pour le stockage et sont faciles à transporter [5].

Parmi les applications de séchage solaire on peut considérer l'opération de séchage du fruit dattier largement produit dans la région du sud algérien [6].

L'Algérie occupe le sixième rang mondial parmi les pays producteurs de dattes avec une production annuelle moyenne estimée à 440000 tonnes pour plus de douze millions de palmiers dattiers, et le premier rang dans la production de la variété Deglet-Nour. Cette datte est la plus appréciée par les consommateurs aussi bien sur le marché national qu'international [7].

La variété Deglet-Nour est un fruit climatique à maturation échelonnée sur le même régime de telle sorte qu'à la récolte on aura des dattes mûres et d'autres immatures; desséchées sur le palmier ce qui donne la catégorie Frezza. Cette variété nécessite un traitement post récolte afin de minimiser les pertes [8].

Ce travail présente une étude de simulation numérique du séchage solaire des dattes de variété Deglet-Nour. Cette simulation est réalisée par un programme en langage FORTRAN 95 pour le procédé de séchage s'est déroulée dans un prototype de séchoir solaire indirect à convection forcée. L'objectif de travail est d'étudier la cinétique de séchage de (Deglet-Nour) et déterminer les effets de la température et la vitesse de l'air asséchant sur cette cinétique de séchage.

Notre travail se compose de trois chapitres :

Le premier chapitre présente des notions générales sur le séchage solaire, des différents types de séchoirs solaires, ainsi nous décrivons dans ce chapitre les deux phénomènes de transfert (transfert de chaleur et de masse), et une généralité sur le produit à sécher.

Le deuxième chapitre est consacré à la formulation et à la mise en équations du problème, ainsi que la méthode numérique de résolution de ces équations, puis nous présentons l'organigramme de programme de simulation.

Le troisième chapitre aborde l'exposition et la discussion des différents résultats de nos simulations.

Enfin nous avons terminé ce travail par une conclusion qui englobe une interprétation générale des résultats de l'étude.

*Chapitre I:*  
*Etude théorique du*  
*séchage*

## I.1. Généralité sur le séchage:

### I.1.1. Définition :

Le séchage solaire est défini comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un produit humide. Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide [9]. Il s'agit d'une technique faisant intervenir des transferts simultanés de chaleur et de masse entre le produit et l'air environnant [10].

### I.1.2. But de séchage [11]:

Le but de séchage consiste à diminuer la teneur en eau des produits agroalimentaires jusqu'à une valeur résiduelle inhibant le développement de tous les micro-organismes. Cette valeur permet de stocker les produits dans les conditions ambiantes.

### I.1.3. Caractéristiques de l'air de séchage [9, 12,13]:

L'air sec peut être considéré comme un mélange de gaz dont la composition est couramment approchée à l'aide des 3 concentrations volumiques suivantes; O<sub>2</sub>: 0,210, N<sub>2</sub>: 0,781, Ar: 0,009

L'air humide peut être considéré comme un mélange d'air sec et de vapeur d'eau.

#### I.1.3.1. Humidité absolue :

On définit l'humidité absolue  $H_a$  (kg<sub>v</sub> /kg<sub>as</sub>) comme la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air en kg par kg d'air sec. Cette humidité est donnée par la relation :

$$H_a = \frac{m_v}{m_{as}} \quad (I.1)$$

Où  $m_v$  et  $m_{as}$  sont les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume d'air humide.

#### I.1.3.2. Humidité relative:

La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur, si  $P_v < P_s(T)$ . On définit alors l'humidité relative  $H_r$  comme le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air et la pression de saturation de cette vapeur d'eau à la même température  $T$ . l'humidité relative est donnée par la relation :

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (I.2)$$



**I.1.3.3. Degré de saturation:**

Soit  $H_a$  la valeur de l'humidité absolue de l'air pour une certaine température et  $H_{as}$  la valeur de l'humidité absolue de l'air saturé pour la même température; on appelle degré de saturation de l'air, le rapport:

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (I.3)$$

**I.1.3.4. Températures caractéristiques de l'air humide :**

La chaleur à transférer au milieu à sécher est apportée par un gaz vecteur chaud qui assure aussi le transport des vapeurs hors de l'enceinte de séchage. On distingue classiquement quatre températures remarquables.

**I.1.3.4.1. Température sèche « Température de bulbe sec » :**

La température sèche ou La température de bulbe sec  $T$  est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec, le thermomètre étant placé dans l'air.

**I.1.3.4.2. Température humide « Température de bulbe humide »  $T_h$  :**

C'est La température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air. De façon pratique c'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un coton hydrophile humidifié, ce thermomètre est placé dans un flux d'air relativement rapide.

**I.1.3.4.3. Température de rosée  $T_r$ :**

C'est la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air humide, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas.

**I.1.3.4.4. Température de saturation adiabatique  $T_{sa}$ :**

La température de saturation adiabatique correspond à la température atteinte par le gaz vecteur sortant, saturé en vapeur du liquide, d'une enceinte adiabatique contenant le liquide à la température  $T$ .

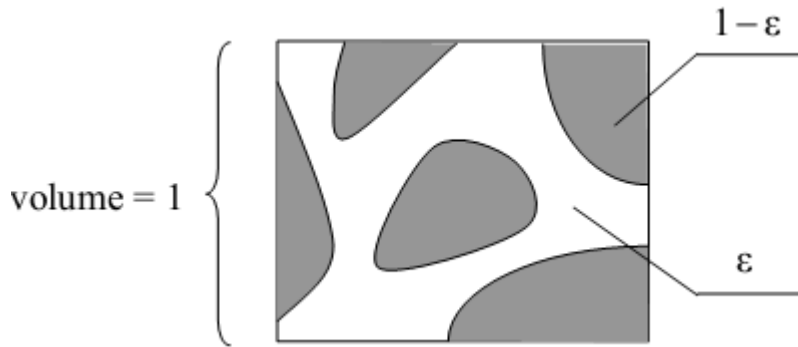
**I.1.4. Caractéristiques des solides humides:****I.1.4.1. Porosité volumique d'un produit :**

La porosité volumique  $\varepsilon$  (figure 1.1) est définie par :

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume des pores}}{\text{Volume apparent du produit}} \quad (I.4)$$

$$0 < \varepsilon < 1$$

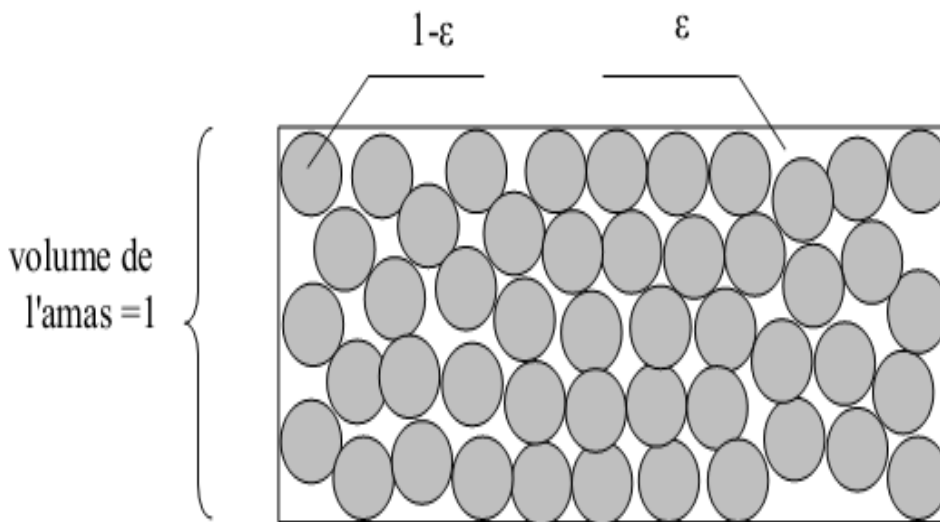
Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc  $1 - \epsilon$



**Figure (I.1) : Volume de contrôle microscopique**

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure 1.2). La définition est équivalente.

$$\epsilon = \frac{\text{Volumen de l'amas} - \text{Volumen du produit}}{\text{Volume de l'amas}} \tag{I.5}$$



**Figure (I.2) : Volume de contrôle macroscopique**

#### I.1.4.2. Description du solide humide:

Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles.

Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température [14].

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses.

Un solide humide peut se présenter schématiquement comme sur la figure 1.3.

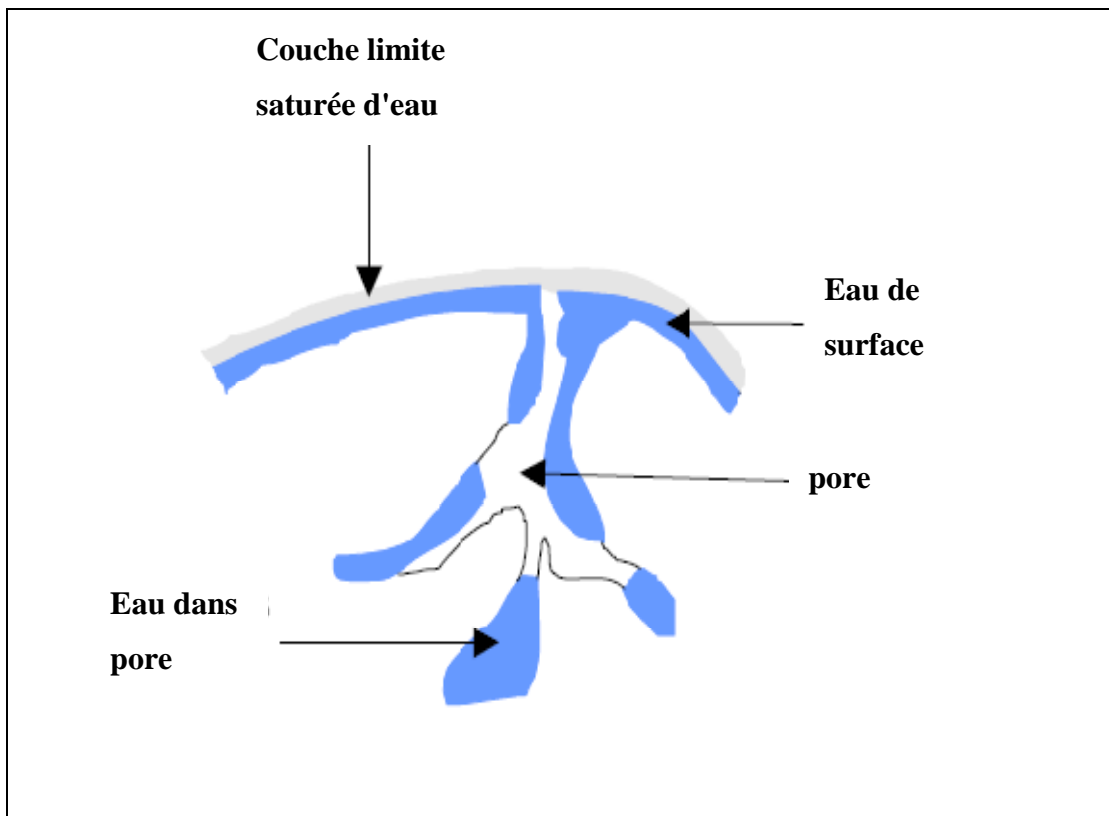


Figure (I.3): Description du solide humide

**I.1.4.3. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche):**

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, se définit comme la masse d'eau contenue dans le produit par rapport à la masse sèche de ce produit.

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (I.6)$$

**I.1.4.4. Humidité relative (teneur en eau à base humide):**

L'humidité relative d'un solide, appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide se définit comme la masse d'eau contenue dans le produit par rapport la masse humide de ce produit.

$$Xr = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (I.7)$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations [15] :

$$X = \frac{Xr}{1 - Xr} \quad (I.8)$$

$$Xr = \frac{X}{1 + X} \quad (I.9)$$

**I.1.4.5. Hygroscopicité:**

Un produit est dit hygroscopique lorsqu'il absorbe et retient facilement l'humidité de l'air et non hygroscopique lorsqu'il ne fixe pas naturellement les molécules d'eau présentes sous forme de vapeur dans l'air [16].

**I.1.5. Modes de séchage:**

On peut distinguer divers procédés de séchage [17]:

- Les procédés mécaniques (décantation et filtration, centrifugation, compression).
- Les procédés thermiques, par élévation de température et diminution de la pression de vapeur et de la phase gazeuse.
- Les procédés chimiques, par l'utilisation des produits déshydratants (acide sulfurique  $H_2SO_4$ , acide phosphorique  $H_3PO_4$ )

Selon le mode de chauffage de la matière à sécher, Il existe dans la pratique 3 types de séchage:

#### **I.1.5.1. Séchage par conduction [9]:**

Dans ce mode de séchage, L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée.

#### **I.1.5.2. Séchage par convection:**

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à un contact direct entre le solide humide et le gaz caloporteur.

#### **I.1.5.3. Séchage par rayonnement [18]:**

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement.

Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible.

#### **I.1.6. Choix du procédé de séchage :**

Les types des séchoirs utilisés pour sécher un produit donné sont basés sur le choix de l'appareil adéquat qui se fait alors en fonction de certain facteur [15] :

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale.
- Débit de produit exigé.
- Sensibilité de produit vis-à-vis de la chaleur.
- Sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité,...).

#### **I.1.7. Processus de séchage :**

Le séchage par convection à mettre en contact un gaz (généralement air chaud et de faible hygrométrie) en écoulement autour du corps à sécher. Ce courant gazeux assure à la fois l'apport de chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et l'enlèvement de la vapeur produite. Entre

l'entrée et la sortie du séchoir, le gaz se refroidit en même temps qu'il se charge d'humidité. Dans le cas du solide, on observe une diminution progressive de sa teneur en eau et une augmentation de sa température au cours du séchage [19].

### I.1.8. Vitesse de séchage:

On appelle la vitesse de séchage, la masse d'eau évaporée par unité de temps et par unité de surface d'évaporation du matériau. L'expression de la vitesse de séchage s'écrit alors :

$$R = \frac{-dM_v}{s \cdot dt} = \frac{M_s \cdot dx}{s \cdot dt} \quad (\text{I.10})$$

$$M_v = M_s \cdot dX \quad (\text{I.11})$$

$$dX = X_e - X_s \quad (\text{I.12})$$

$M_v$  : La masse d'eau évaporée.

$M_s$  : La masse de produit sec.

$dX$  : L'humidité de produit au début et à la fin de l'opération.

$S$  : La surface de séchage.

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont [20] :

-La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.

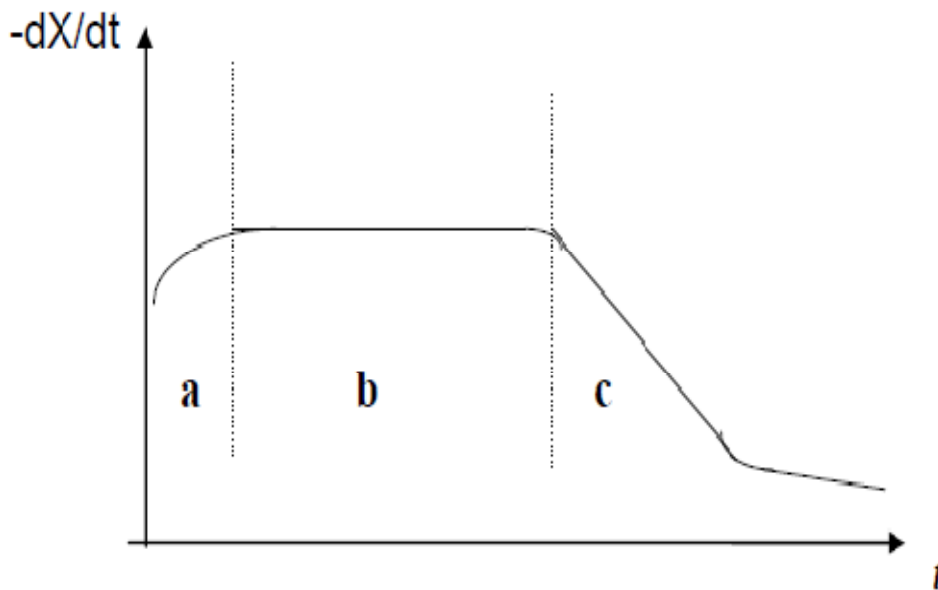
-La température, l'humidité et la vitesse de l'air sécheur.

### I.1.9. Cinétique de séchage:

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (température, hygrométrie, vitesse de l'air asséchant). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Tous les travaux de séchage montrent que les courbes de la vitesse de séchage en fonction du temps se distinguent suivant la nature du produit. Mais d'une manière générale, on remarque que l'allure de séchage décompose en trois périodes principales [20]:

- phase 0 : Période transitoire (a).
- phase I : Période à vitesse de séchage constante (b).
- Phase II: Période à vitesse de séchage décroissante(c).



**Figure (I.4): Allure de séchage en fonction du temps**

**Phase 0 :** Période de mise en température:

Dans cette période, L'humidité du produit varie mais pas sensiblement et leur température varie (croit ou décroît) jusqu'à la température humide [20].

**Phase I :** Période à vitesse de séchage constante:

Dans cette période, la vitesse de séchage reste à peu près constante pour la plupart des produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide principalement sous l'effet de la température de bulbe humide; l'activité de l'eau à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique.

Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit.

**Phase II:** Période à vitesse de séchage décroissante :

C'est la période à vitesse de séchage décroissante. Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants [10]:

**- Disparition de l'eau libre en surface du produit :**

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

**- L'épaisseur du produit :**

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

**- La diffusivité de l'eau dans le produit :**

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

**- La résistance mécanique de parois cellulaires intactes :**

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

**- Le croutage :**

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

**I.1.10. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage :**

On distingue plusieurs d'influence des paramètres de l'air :

**I.1.10.1. Influence de la température de l'air :**

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est aussi à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air élevée. Par conséquent, les conductivités de l'eau dans le produit deviennent importantes [10].



**I.1.10.2. Influence de la vitesse de l'air :**

La vitesse de l'air influe effectivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par le transport interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible [10].

**I.1.10.3. Influence de l'humidité de l'air:**

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits, il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente [10].

**I.2. Types de séchoirs solaires:**

Il y a plusieurs types de séchoirs solaires développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité.

Généralement, on peut classer les séchoirs solaires selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement [21] en séchoirs directs, séchoirs indirects, séchoirs mixtes et séchoirs hybrides.

**I.2.1. Les séchoirs solaires directs :**

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples. Ils sont conçus de façon à laisser pénétrer le rayonnement solaire directement dans l'armoire de séchage où il est converti en chaleur par le produit à sécher lui-même et les diverses parois qu'il rencontre.

Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement, ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur, du fait de la rusticité des modèles.

**➤ Avantages :**

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des poussières, des insectes, des animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifiée.
- Grandes possibilités de conception.

**➤ Inconvénients :**

- Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration [22].
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.

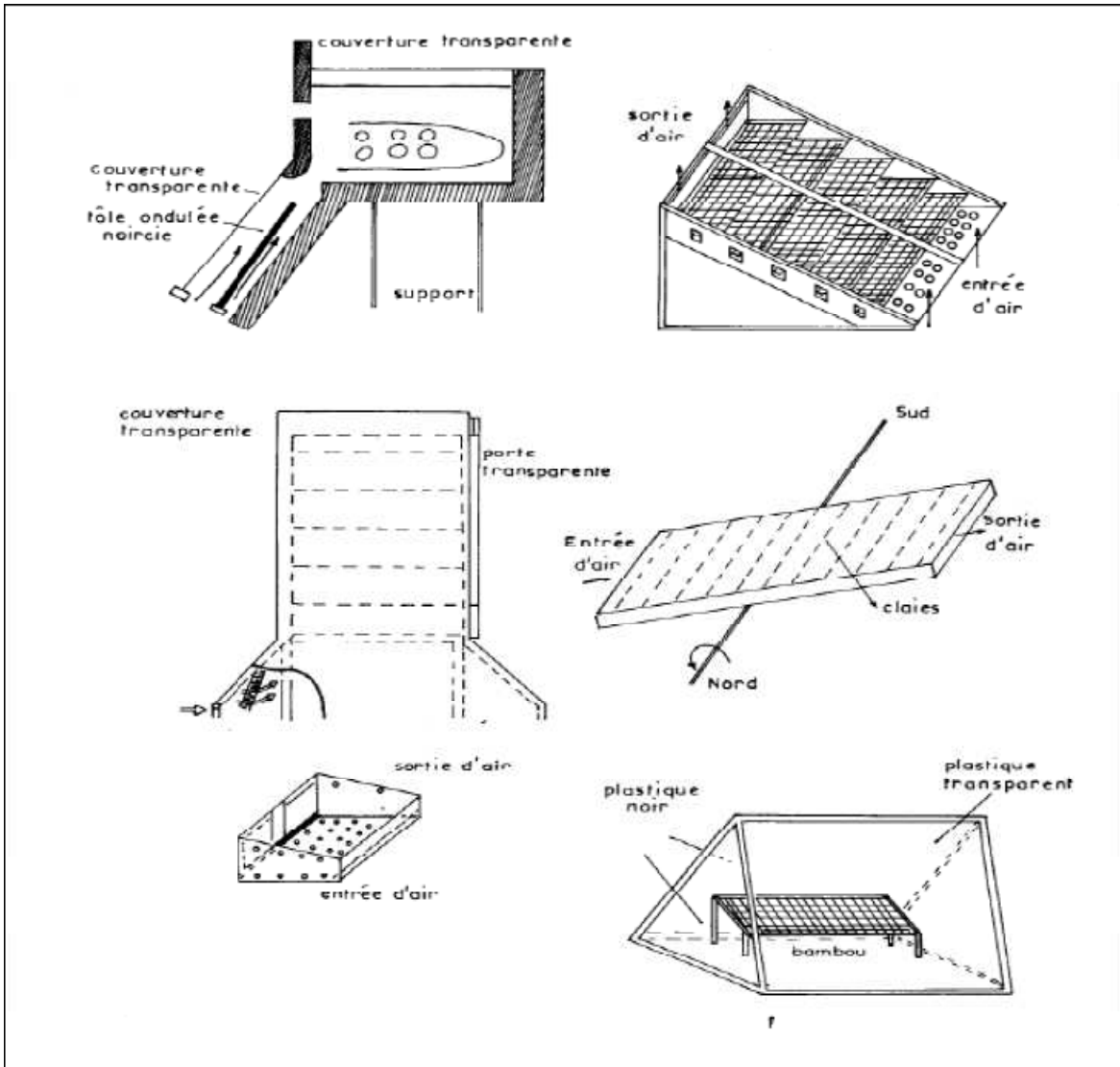


Figure (I.5): Exemples des séchoirs solaires directs simples

### I.2.2. Les séchoirs solaires indirects :

Ce type des séchoirs est souvent plus compliqué que le séchoir direct. Il se compose de deux parties: un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur et une chambre de séchage qui contient le produit. L'air pénètre dans le collecteur; il est chauffé sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques [23].

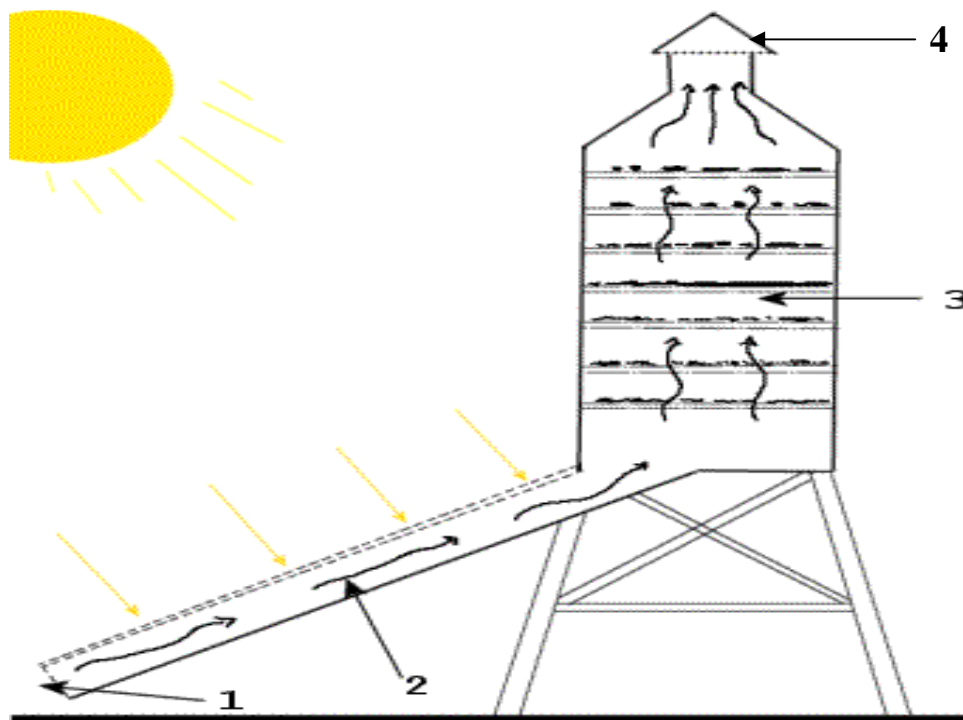
Ce type des séchoirs peut être réalisé à des échelles diverses et il est surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire.

➤ **Avantage :**

- Le produit est protégé contre radiation du soleil directe .Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).

➤ **Inconvénients :**

- Rapidité de séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- plus compliqué à réaliser.



**Figure (I.6): Séchoir solaire indirect**

1. Entrée d'air.
2. Partie exposée aux rayons du soleil, sous une vitre.
3. Claie.
4. Cheminée.

### I.2.3. Les séchoirs mixtes :

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. 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 [24].

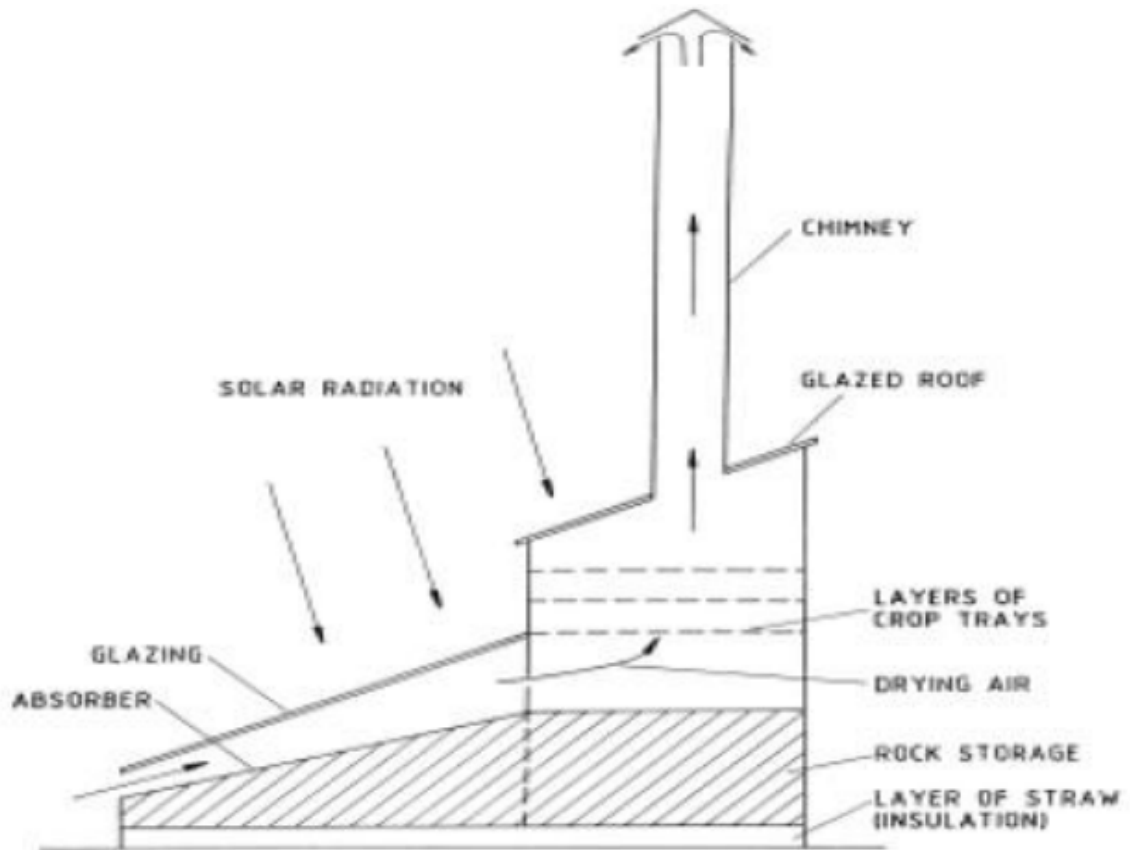


Figure (I.7):Séchoir solaire mixte

### I.2.4. Les séchoirs hybrides [23]:

Ces séchoirs utilisent une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation.

L'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir :

-Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet simplement de préchauffer l'air.

-Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

➤ **Avantages**

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage [25].
- Forte augmentation de la production par rapport aux autres types de séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

➤ **Inconvénients**

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz.
- Personnel qualifié pour la maintenance.

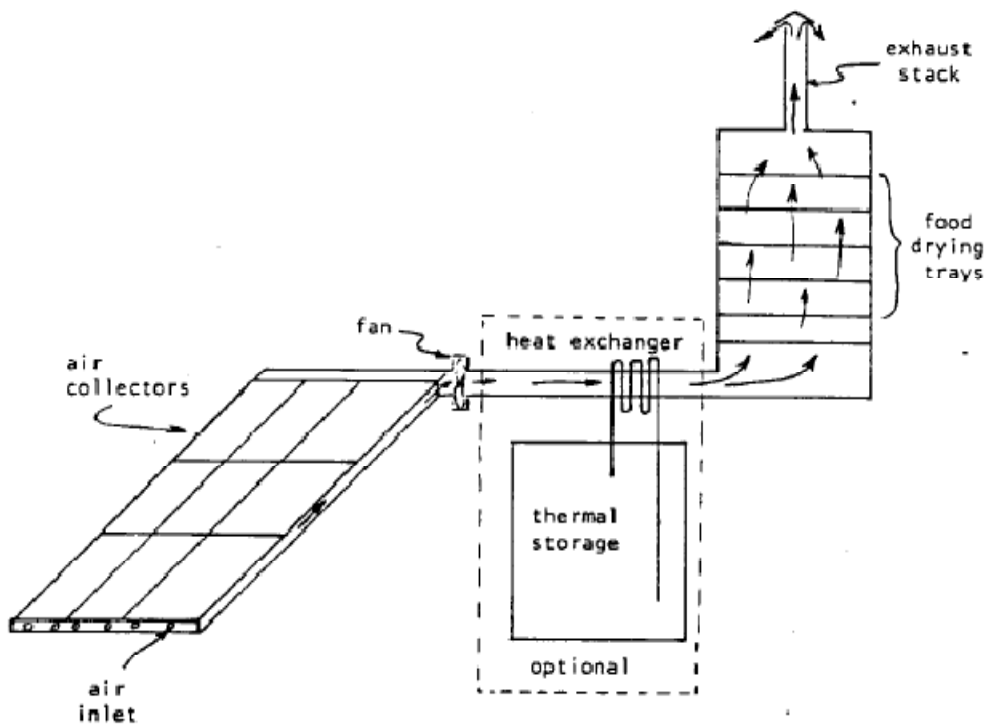


Figure (I.8): Séchoir solaire hybride

### I.3. Les phénomènes de transfert :

#### I.3.1. Transfert de chaleur:

Le transfert de chaleur peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température. Il est régi par une combinaison de lois physiques [26].

Il existe essentiellement trois modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

##### I.3.1.1. La conduction :

La conduction est la transmission de la chaleur dans le matériel par vibration moléculaire. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement [27].

➤ **Loi de Fourier:**

$$\Phi = -\lambda_c S \frac{dT}{dX} \quad (I.13)$$

Où :

$\Phi$ : Flux de chaleur.

$\lambda_c$ : Conductivité thermique.

##### I.3.1.2. La convection

Les phénomènes de convection interviennent dans la transmission de la chaleur chaque fois qu'un fluide se déplace par rapport à des éléments fixes. Lorsque se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre, si le mouvement du fluide est provoqué par une action mécanique (pompe, ventilateur, etc...), la convection est dite forcée [26].

Le transfert par convection est régi par la loi de Newton qui stipule que le flux de chaleur transmis est proportionnel à l'écart entre la température  $T_1$  du corps solide qui reçoit ou transmet de la chaleur et la température  $T_2$  du liquide ou du gaz qui transmet ou reçoit cette chaleur. Le coefficient de proportionnalité de la loi de Fourier est appelé coefficient de convection thermique est noté  $h_c$  [28].

Le flux calorifique (puissance) transmis par convection s'exprime alors par l'équation fondamentale suivant :

$$\Phi = h_c \cdot S (T_1 - T_2) \quad (\text{I.14})$$

Où:

$\Phi$  : Puissance transmise en W.

$h$  : Coefficient de transmission thermique par convection, ou coefficient de convection thermique en  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

$S$  : Surface d'échange considérée en  $\text{m}^2$ .

$T_1$ : Température la plus chaude (paroi ou fluide en K).

$T_2$ : Température la plus froide (fluide ou paroi en K).

#### Régime d'écoulement :

On distingue deux types de régime d'écoulement :

##### ➤ Régime laminaire :

L'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes. Entre deux filets fluides adjacents.

##### ➤ Régime turbulent :

L'écoulement n'est plus permanent. Il est toujours possible de définir des lignes de courant moyennes à partir du champ des vitesses moyennes.

#### I.3.1.3. Le rayonnement

Le rayonnement est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un milieu à haute température vers un autre à basse température lorsque ces milieux sont séparés dans l'espace. Ce mode de transfert ne nécessite pas de support matériel et peut donc s'effectuer dans le vide. En général, les sources de rayonnement sont des solides et le rayonnement se fait par la surface [26].

La quantité de chaleur est définie par la loi de Stephan Boltzmann(1884).

##### ➤ Loi de Stefan –Boltzmann :

$$q_r = \sigma S T_1^4 \quad (\text{I.15})$$

Où :

$q_r$ : la quantité d'énergie rayonnée en W.

$\sigma$ : constant de Stenphan-Boltzman  $\sigma = 5.66.10^{-8}$  en  $J/s m^2K^4$ .

### I.3.2. Transfert de masse:

#### I.3.2.1. Loi de Fick:

La loi de Fick caractérisée la diffusion moléculaire d'un fluide de masse volumique  $\rho_f$  dans un milieu, elle exprime un flux massique surfacique. Le paramètre pertinent du milieu est  $D_f$  le coefficient de diffusion moléculaire [24] :

$$J_c = -\rho_f D_f \frac{dC_m}{dX} \quad (I.16)$$

#### I.3.2.2. Loi de Darcy :

La loi de Darcy caractérisée la diffusion d'ensemble d'un fluide de masse volumique  $\rho_f$  et de viscosité dynamique  $\mu_f$  dans un milieu poreux, elle exprime un flux massique surfacique, le paramètre pertinent du milieu est  $k$  la perméabilité intrinsèque [24].

$$J_s = -\rho_f \frac{k_f}{\mu_f} \frac{dP}{dX} \quad (I.17)$$

## I.4. Généralité sur le produit à sécher : la datte « Deglet-Nour »

### I.4.1. Caractéristiques du fruit :

La datte Deglet-Nour est une variété largement produite dans les pays du Maghreb et particulièrement en Algérie où la production annuelle s'élève à plus de 789357 tonnes selon les données de la FAO en 2012. Cette fruit est caractérisée par une teneur en eau de l'ordre de 12%, équilibrée en saccharose et en glucose et fructose, de consistance demi-molle et de couleur claire et translucide.

Le fruit dattier de cette variété est géométriquement caractérisé par un poids d'environ 12 g, d'une longueur moyenne de 4 à 5 cm et d'un diamètre moyen d'environ 1,8cm.

### I.4.2. Particularités [29] :

La particularité essentielle de cette variété est sa maturité échelonnée sur un même régime, ce qui fait qu'à la récolte, on trouve des dattes à des différents stades de maturité.



De ce fait, la récolte est sous la dépendance des intempéries (pluies, sirocco) et les frais de récolte sont très affectés par ceux du triage. On distingue neuf catégories de tri qui sont les suivants :

- **Dattes extra 1<sup>er</sup> choix** généralement exportées.
- **Dattes marchandes 2<sup>ème</sup> choix** consommés localement et partiellement exportés.

Ces deux catégories ont une teneur en eau entre 25% et 30% en poids.

- **Bsers:** dattes immatures. Leur pourcentage est variable selon la température du milieu et on peut attendre en année froide jusqu'à 50 % de la récolte.

- **Martoubah:** fruit presque mur, sa teneur en eau dépasse 25% ce qui le rend sensible à l'altération. Par conséquent, elle nécessite un complément de maturation et un séchage pour la transformer en marchande.

- **Frezza ou 'saifi'** : datte sèche, sa teneur en eau est de 10 à 16 % et n'ayant pas atteint sa complète maturation. Elle nécessite une réhydratation et un complément de maturation pour la vendre en 'marchande'.

- **Dattes dite 'caoutchouc' ou 'mabrouma'** : C'est la 3<sup>ème</sup> qualité réservée aux marchés nationaux. Elle est formée de dattes plus ou moins déformées et plus ou moins élastiques.

- **Dattes noires** : groupe tout ce qui est détérioré, fermenté, parasité ou décoloré.

- **Achef:** dattes ratatinées.

- **Sich:** dattes non fécondées obtenues après un développement parthénocarpique.

#### **I.4.3. Composition [30] :**

La composition de la pulpe de datte fraîche Deglet-Nour est donnée dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.1: Composition de la pulpe de datte fraiche Deglet-Nour

Composition	(%) du poids à l'état frais
Eau	23
protéines	1.5
Sucres totaux	72
Saccharose	36.1
Glucose	10.4
fructose	9.6
Cellulose	7.2
Lipides	0.05

*Chapitre II:*  
*Description et*  
*formulation*  
*mathématique du*  
*problème*

## II .1. Définition de la problématique:

Dans l'opération de séchage solaire à convection forcée des produits agro-alimentaires , l'air chauffé dans le capteur plan est passé à travers des claies contenant des produits disposés en couches minces. Pour modéliser un tel séchoir, on utilise une méthode simple qui consiste à le découper dans le sens de l'écoulement de l'air en tranches fictives d'épaisseur  $dZ$ , représentées sur la figure II.1, dans lesquelles les températures et les humidités sont supposées constantes.

Ainsi, ces grandeurs varient suivant le mode pas à pas, d'une tranche à l'autre. Pour chaque tranche, on écrit les bilans thermiques et massiques dans les différents milieux en présence d'air, de produit, des parois...

Puis, on fait une étude de simulation qui est basée sur la résolution des équations de ces bilans en utilisant le langage de programmation FORTAN 95 pour étudier la cinétique de séchage et pour étudier l'influence des divers paramètres ( par exemple ; température de l'air asséchant, vitesse d'entrée de l'air asséchant ) sur cette cinétique de séchage.

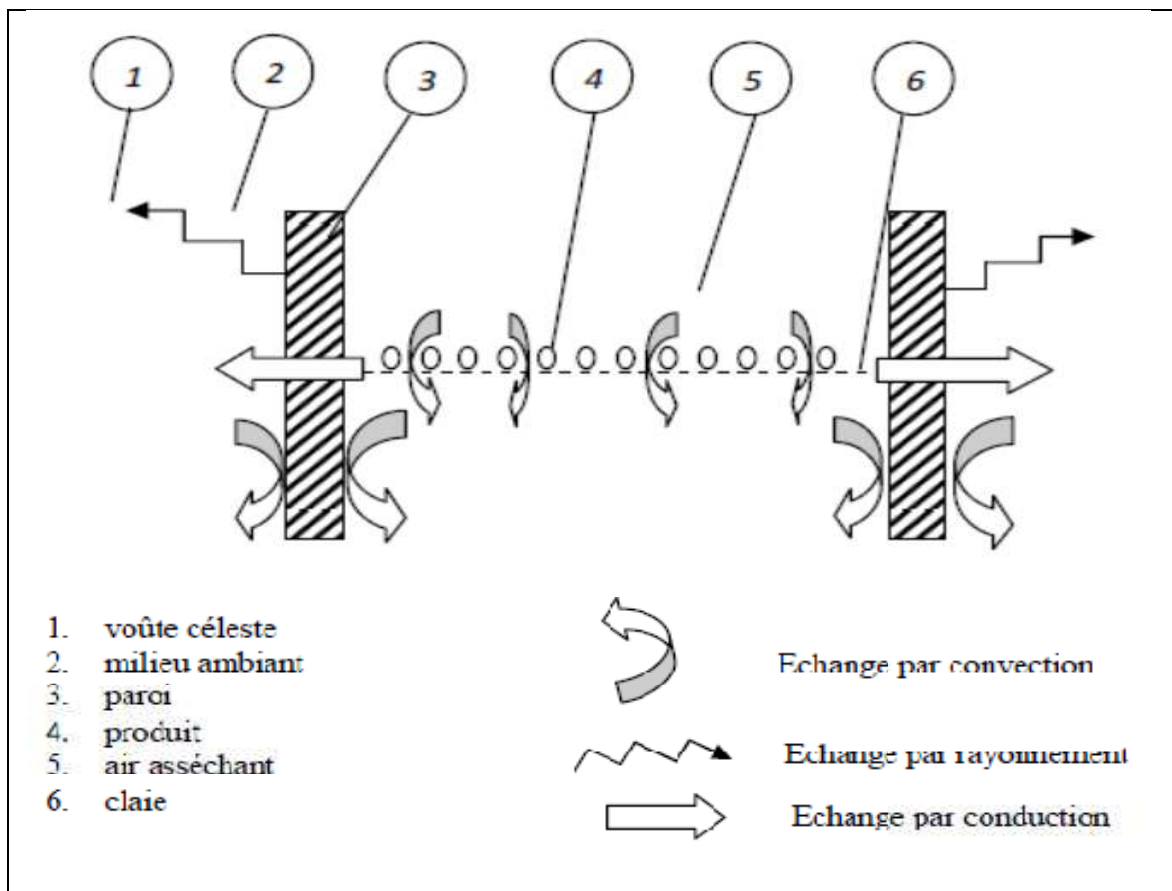


Figure (II.1): Echange thermique dans une tranche de séchoir

## II .2. Hypothèses simplificatrices [5]:

Pour simplifier l'étude des transferts de chaleur et de masse couplés dont le séchoir est le siège, on suppose les hypothèses suivantes :

1. Pour chaque claie, le problème est unidimensionnel dans la direction de l'écoulement de l'air asséchant.
2. Le système fonctionne avec une régulation de la température et du débit.
3. Les échanges radiatifs à l'intérieur de l'armoire de séchage sont négligés.
4. Les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligés.
5. La température et la teneur en eau à l'intérieur du produit sont supposées uniformes.
6. La conduction claie-produit est négligée.
7. Les produits séchés sont supposés sphériques.
8. La variation de volume des produits, au cours du séchage, est négligée.
9. Les propriétés physiques du produit sont constantes.

## II .3. Equations de système :

En appliquant le principe de conservation de l'énergie thermique déduit du premier principe de la thermodynamique;

Le bilan thermique au nœud i donne :

$$\frac{m_i c p_i}{s_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \varphi_{conduction} + \varphi_{convection} + \varphi_{rayonnement} \quad (\text{II.1})$$

➤ **Bilan au niveau de l'air caloporteur :**

$$\dot{m}_a \cdot C p_a \cdot \Delta z \cdot \frac{\partial T_a}{\partial z} = h_{cp} \cdot S_{pr} (T_a - T_{pr}) + h_{ci} \cdot \Delta S_p (T_a - T_{pi}) \quad (\text{II.2})$$

➤ **Bilan au niveau du produit à sécher :**

$$m_{pr} \cdot C p_{pr} \cdot \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} = h_{cp} \cdot S_{pr} (T_a - T_{pr}) - Pev \quad (\text{II.3})$$

- Bilan au niveau de la paroi isolante intérieure :

$$m_{pi} \cdot C_{ppi} \cdot \frac{\partial T_{pi}}{\partial t} = h_{ci} \cdot \Delta S_p \cdot (T_a - T_{pi}) - \lambda_d \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pi} - T_{pe}) \quad (\text{II.4})$$

- Bilan au niveau de la paroi isolante extérieure :

$$m_{pe} \cdot C_{ppe} \cdot \frac{\partial T_{pe}}{\partial t} = \lambda_d \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pi} - T_{pe}) - h_{ce} \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pe} - T_{ab}) - h_r \cdot \Delta S_p \cdot (T_{pe} - T_c) \quad (\text{II.5})$$

## II .4. Les coefficients d'échange :

### II .4.1. Échanges thermiques :

#### II .4.1.1. Par convection:

- Entre l'air ambiant et la face externe de la paroi de l'armoire de séchage [31] :

$$h_{ce} = 5,67 + 3,86V_v \quad (\text{II.6})$$

- Entre la face interne de la paroi de l'armoire de séchage et l'air asséchant :

$$h_{ci} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{\Delta Z} \quad (\text{II.7})$$

D'après la référence [32]:

Pour un écoulement turbulent:

$$Re > 5 \cdot 10^5 \text{ et } Pr \geq 0.5$$

$$Nu = 0,35 Re^{0,8} Pr^{0,333}$$

Pour un écoulement laminaire:

$$Re < 5 \cdot 10^5 \text{ et } 10 \geq Pr \geq 0.5$$

$$Nu = 0,628 Re^{0,5} Pr^{0,333}$$

Pr : nombre adimensionnel de Prandtl.

$\Delta Z$  : hauteur d'une tranche (pas d'espace).

➤ Entre le produit et l'air asséchant [31]:

$$h_{cp} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{D_{pr}} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$D_r$  : diamètre moyen du produit (m).

$Nu$  : nombre de Nusselt.

$N_u = 0,37 R_e^{0,6}$  D'après la relation proposée par Charm 1963 [31]

$Re$  : nombre de Reynolds.

$$R_e = \frac{\rho_a V_a D_{pr}}{\mu_a}$$

$V_a$  : vitesse de l'air.

#### II .4.1.2. Par conduction:

➤ à travers les parois de l'armoire de séchage :

$$\lambda_d = \frac{1}{\frac{e_{pi}}{\lambda_{pi}} + \frac{e_{pp}}{\lambda_{pp}} + \frac{e_{pe}}{\lambda_{pe}}} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$\lambda_{pi}$  : conductivité thermique de la paroi interne.

$e_{pi}$  : épaisseur de la paroi interne du séchoir.

$\lambda_{pp}$  : conductivité thermique de l'isolant entre les parois.

$e_{pp}$  : épaisseur de l'isolant entre les parois.

$\lambda_{pe}$  : conductivité thermique de la paroi externe.

$e_{pe}$  : épaisseur de la paroi externe du séchoir

**II .4.1.3. Par rayonnement:**

➤ Entre la face externe de la paroi de l'armoire de séchage et la voûte céleste :

$$h_r = \sigma \cdot \varepsilon_p (T_{pe} + T_c) (T_{pe}^2 + T_c^2) \quad (\text{II.10})$$

Où  $\sigma$  est la constante de Stefan Boltzmann.

$\varepsilon_p$  est l'émissivité de la paroi du séchoir.

$T_c$  est la température équivalente de la voûte céleste donnée par la relation de Swinbank [31]:

$$T_c = 0,0552 \cdot T_{ab}^{1.5}$$

**II .4.2. Puissance échangée par changement de phase:**

C'est une puissance perdue par le produit. Elle est égale au taux de masse d'eau évaporée multipliée par la chaleur latente de vaporisation:

$$p_{ev} = L_v \cdot \frac{dm}{dt} \quad (\text{II.11})$$

$L_v$  est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, exprimée en  $J \cdot kg^{-1}$ , donnée par la relation suivante :

$$L_v = 4186,8(597 - 0,56T_{pr})$$

Avec  $T_{pr}$  : température de vaporisation prise égale à la température du produit.

$$\frac{dm}{dt} = m_{ps} \left( - \frac{dX}{dt} \right)$$

Où  $m_{ps}$  est la matière sèche dans le produit (kg)

$\left( - \frac{dX}{dt} \right)$ : Vitesse de séchage exprimée en (kg d'eau / kg matière sèche.min)



## II .5. Résolution numérique:

### II .5.1. Discrétisation des équations:

Pour déterminer les différentes températures (des parois du séchoir, de l'air et du produit au niveau de chaque claie) et les teneurs en eau du produit au niveau de chaque claie, nous avons discrétisé les équations précédentes par la méthode explicite [33]. Ceci conduit à un système de quatre équations à quatre inconnues que l'on peut mettre sous la forme condensée suivante:

$$[A]X^n = B^n$$

Où

[A]: matrice des coefficients.

X : vecteur des inconnues.

B: vecteur connu lié aux coefficients de l'équation initiale.

➤ **Au niveau de l'air asséchant Tai :**

$$\dot{m}_a C_{p_a} \cdot (T_a^t(i-1) - T_a^t(i)) = h_{cp} \cdot S_{pr} (T_a^t(i-1) - T_{pr}^t(i)) + h_{ci} \cdot \Delta S_p (T_a^t(i-1) - T_{pi}^t(i)) \quad (\text{II.12})$$

➤ **Au niveau du produit à sécher Tpr:**

$$m_{pr} \cdot C_{ppr} (T_{pr}^t(i) - T_{pr}^{t-\Delta t}(i)) = h_{cp} \cdot S_{pr} (T_a^t(i-1) - T_{pr}^t(i)) - L_v \cdot m_{ps} \cdot \frac{X^t(i) - X^{t-\Delta t}(i)}{\Delta t} \quad (\text{II.13})$$

➤ **Au niveau de la paroi isolante intérieure Tpi :**

$$m_{pi} \cdot C_{ppi} (T_{pi}^t(i) - T_{pi}^{t-\Delta t}(i)) = h_{ci} \cdot \Delta S_p (T_a^t(i-1) - T_{pi}^t(i)) - \lambda_d \cdot \Delta S_p (T_{pi}^t(i) - T_{pe}^t(i)) \quad (\text{II.14})$$

➤ **Au niveau de la paroi isolante extérieure Tpe :**

$$m_{pe} \cdot C_{ppe} (T_{pe}^t(i) - T_{pe}^{t-\Delta t}(i)) = \lambda_d \cdot \Delta S_p (T_{pi}^t(i) - T_{pe}^t(i)) - h_{ce} \cdot \Delta S_p (T_{pe}^t(i) - T_{ab}) - h_r \cdot \Delta S_p (T_{pe}^t(i) - T_c) \quad (\text{II.15})$$

### II .5.2. Méthode de résolution :

#### II .5.2.1. La méthode utilisée:

Pour la résolution numérique de ces systèmes d'équations, nous avons adopté la méthode itérative de Gauss Seidel, dont le principe consiste à :

- Choisir une distribution approximative initiale arbitraire  $U^{(0)}$  (U désignant T)

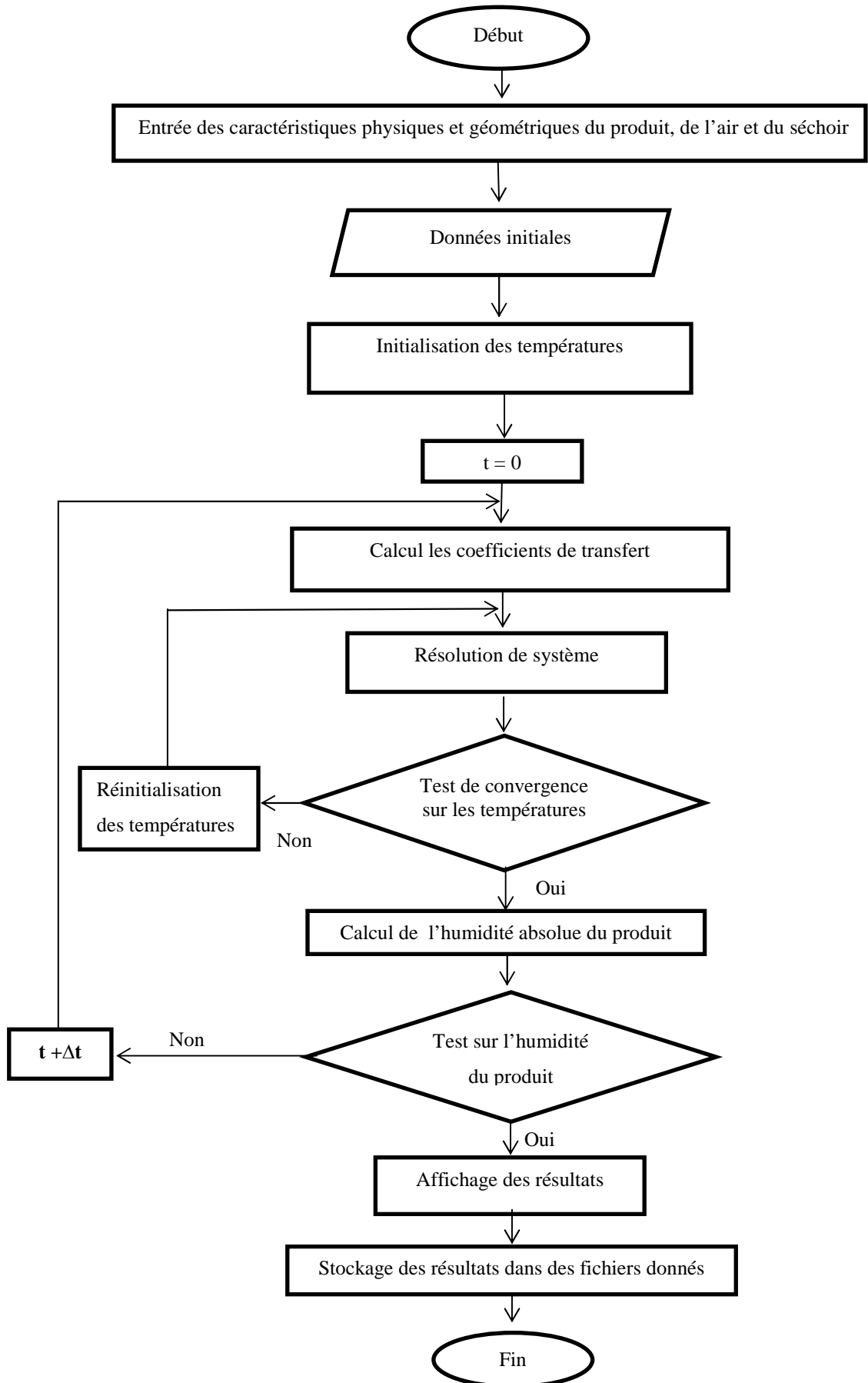
- Calculer une suite de solutions approchées  $U^{(p)}$ , en affinant progressivement la solution jusqu'à obtenir un champ approchant suffisamment la solution exacte  $U^*$

Il y'a convergence si

$$\lim U^{(p)} = U^*$$

- Arrêter enfin les itérations selon un critère défini ( $X = X_{\text{finale}}$ )

II .5.2.2. Organigramme:



# *Chapitre III:*

## *Résultats et discussion*

Ce chapitre présente les résultats de simulation de séchage solaire du produit étudié (Deglet-Nour) par un programme de langage FORTAN 95. Ces résultats obtenus pour les conditions de séchoir solaire indirect à convection forcée qui est installé au niveau du laboratoire des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA) à l'université d'Ouargla ainsi, pour un masse de 0.96 kg de produit à sécher de teneur en eau initiale de 0,5 kg eau/kg ms et pour un valeur constante d'humidité absolue de l'air asséchant de 0,01kg eau/kg d'air sec.

### **III .1.Présentation du séchoir étudié:**

Le système de séchage utilisé dans notre étude présente (figure III.1) un séchoir solaire indirect à convection forcée. Ce système est constitué des éléments suivants:

#### **Une unité de production d'air chaud:**

Elle est constituée d'un capteur solaire à air à simple circulation et à simple vitrage, de surface inclinée de 31° (l'altitude de la ville d'Ouargla) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. L'absorbeur en tôle galvanisée est peint en noir. L'isolation thermique est en polystyrène et le vitrage est en verre.

#### **Chambre de séchage:**

Elle est de hauteur 2,8 m, de longueur 1m, et de largeur 0,63 m les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polystyrène de 6 cm d'épaisseur. Cette chambre comporte 6 claies (étagères) sur lesquelles est posé le produit à sécher.

L'air chauffé pénètre à travers les claies pour sortir par un ventilateur d'aspiration dans un écoulement par convection forcée.

#### **Ventilateur:**

C'est un élément permet de créer un écoulement forcé. Il est de 20 cm de diamètre avec un débit d'air réglable à l'aide d'une vanne, (de vitesse 1400 tours/min, débit volumique 0,325 m<sup>3</sup>/s). Il est fixé à la sortie de la chambre de séchage pour évacuer vers l'extérieur l'air humidifié par l'évaporation de l'eau des produits.

### Une unité de production d'énergie d'appoint:

Elle est constituée de résistances électriques. Cette source de chaleur est placée à l'entrée de la chambre de séchage, cette unité assure un chauffage d'appoint en cas d'insuffisance de l'apport solaire.

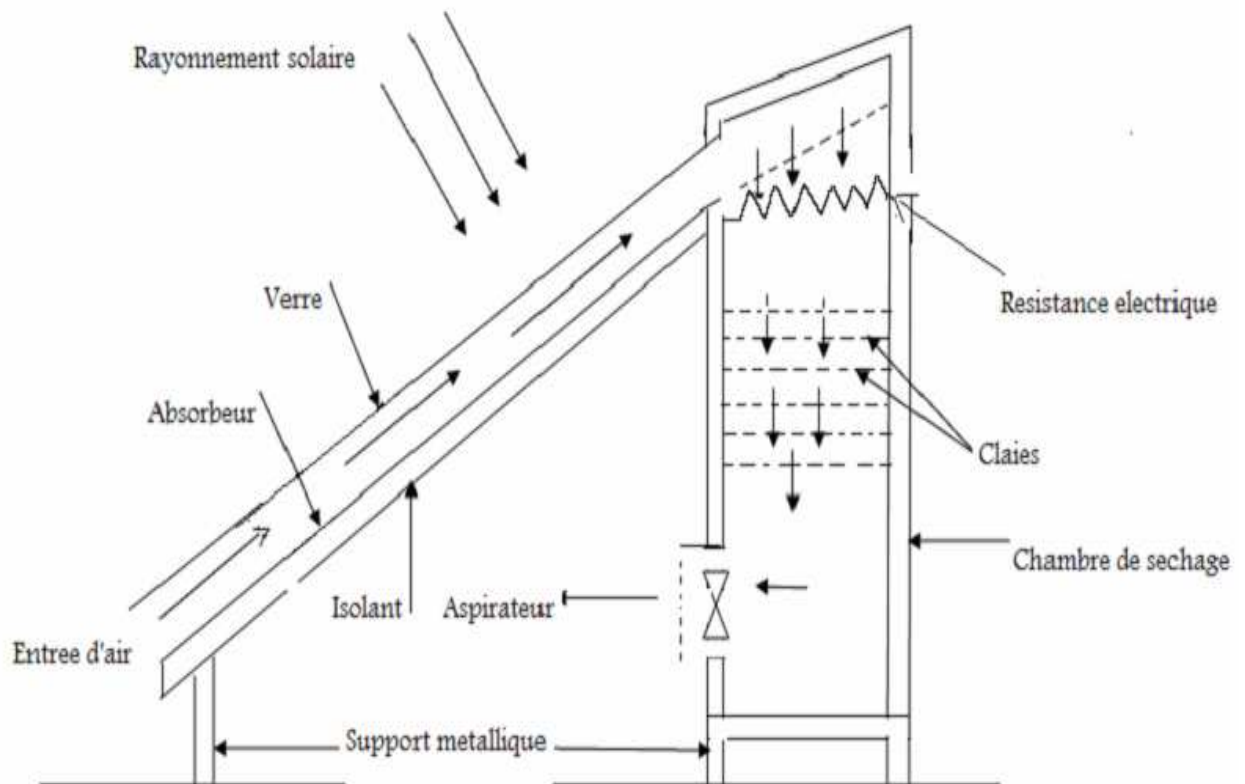


Figure (III.1) : Schéma descriptif du séchoir solaire

### III .2. Résultats de simulation:

Les objectifs de cette partie sont :

1. L'étude de la cinétique de séchage de datte (variété Deglet-Nour).
2. L'étude de l'influence de la température et de la vitesse de l'air asséchant sur la durée de séchage.

On a réalisé – par le programme – l'étude de l'influence de ces derniers pour trois valeurs de température de l'air asséchant : 50°C, 60°C et 65 °C et pour trois valeurs de vitesse de l'air : 1m/s, 1.5m/s et 2 m/s.

Les différentes conditions sont présentées dans le tableau (III.1)

**Tableau III.1:** Conditions de simulation du séchage

<b>N° d'étape de simulation</b>	<b>Température de l'air asséchant (°C)</b>	<b>Vitesse de l'air asséchant (m/s)</b>	<b>Temps de séchage (h)</b>
<b>1</b>	<b>50</b>	<b>1</b>	<b>6,5</b>
<b>2</b>	<b>50</b>	<b>1.5</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>50</b>	<b>2</b>	<b>5,5</b>
<b>4</b>	<b>60</b>	<b>1</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>60</b>	<b>1.5</b>	<b>4,5</b>
<b>6</b>	<b>60</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
<b>7</b>	<b>65</b>	<b>1</b>	<b>4,5</b>
<b>8</b>	<b>65</b>	<b>1.5</b>	<b>4</b>
<b>9</b>	<b>65</b>	<b>2</b>	<b>3,5</b>

Les résultats sont effectués chaque 1800 s (30 min).

On utilise le logiciel ORIGINE 6.0 pour traiter tous les résultats.

### III .2.1. Cinétique de séchage:

La figure (III.2) représente la variation de la teneur en eau en fonction du temps pour la température de l'air de 60°C et pour la vitesse de 1m/s. On remarque que la durée de séchage des dattes (variété Deglet-Nour) pour avoir une teneur en eau commerciale de 0.35 kg eau/kg ms est de 18000 s (5 heures).

Nous pouvons voir aussi sur la figure ci- dessous que à partir de début de l'opération de séchage jusqu'à 3.5h, la teneur en eau présente une diminution importante (de 0.5 jusqu'à 0.38 kg eau/kg ms), ceci est expliquer par la diffusion d'une grande quantité de vapeur d'eau dans l'air asséchant. Pour le reste du temps de séchage la diminution de la teneur en eau est moins importante et tend vers une valeur finale de 0.35 kg eau/kg ms.

La figure (III.3) présente la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps. On remarque sur cette figure la présence de la phase à allure décroissante et l'absence de la phase de mis en température du produit et de la phase à allure constante. Ceci s'explique par le fait qu'au début du séchage, l'évaporation de l'eau se trouvant à la surface du produit ne demande pas beaucoup de temps, par contre la diffusion de l'eau de la partie intérieure du produit vers la surface nécessite beaucoup d'énergie donc, il nécessite beaucoup de temps.

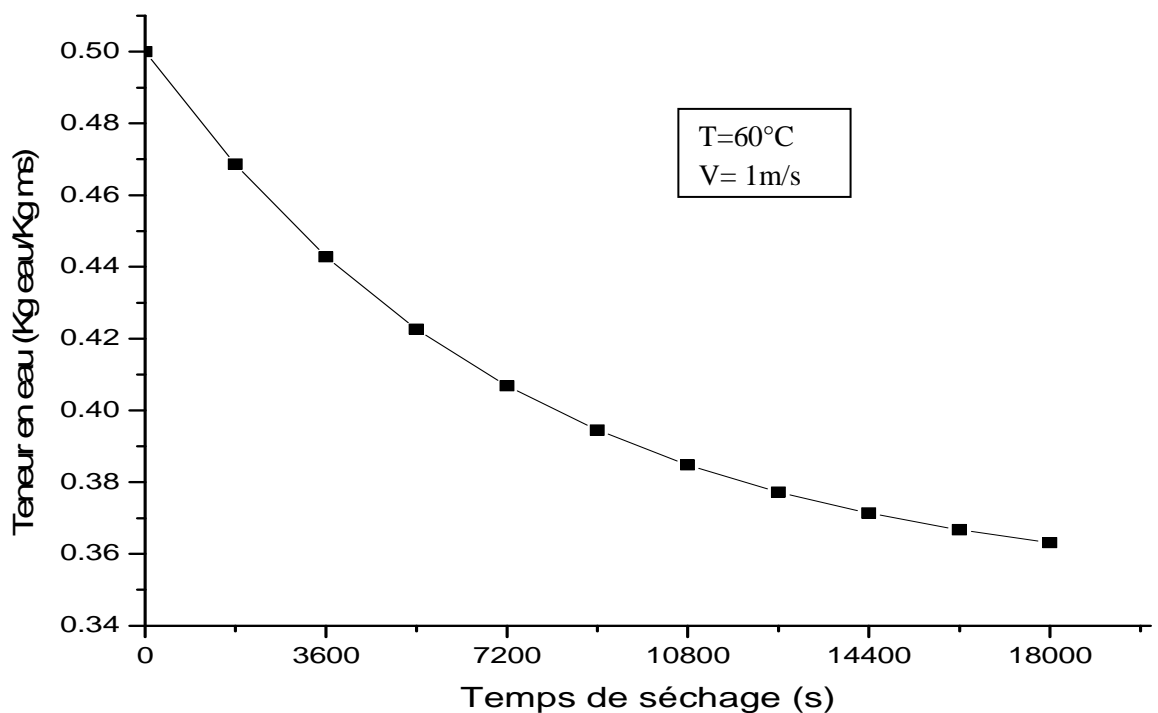


Figure (III.2) : Variation de la teneur en eau en fonction du temps



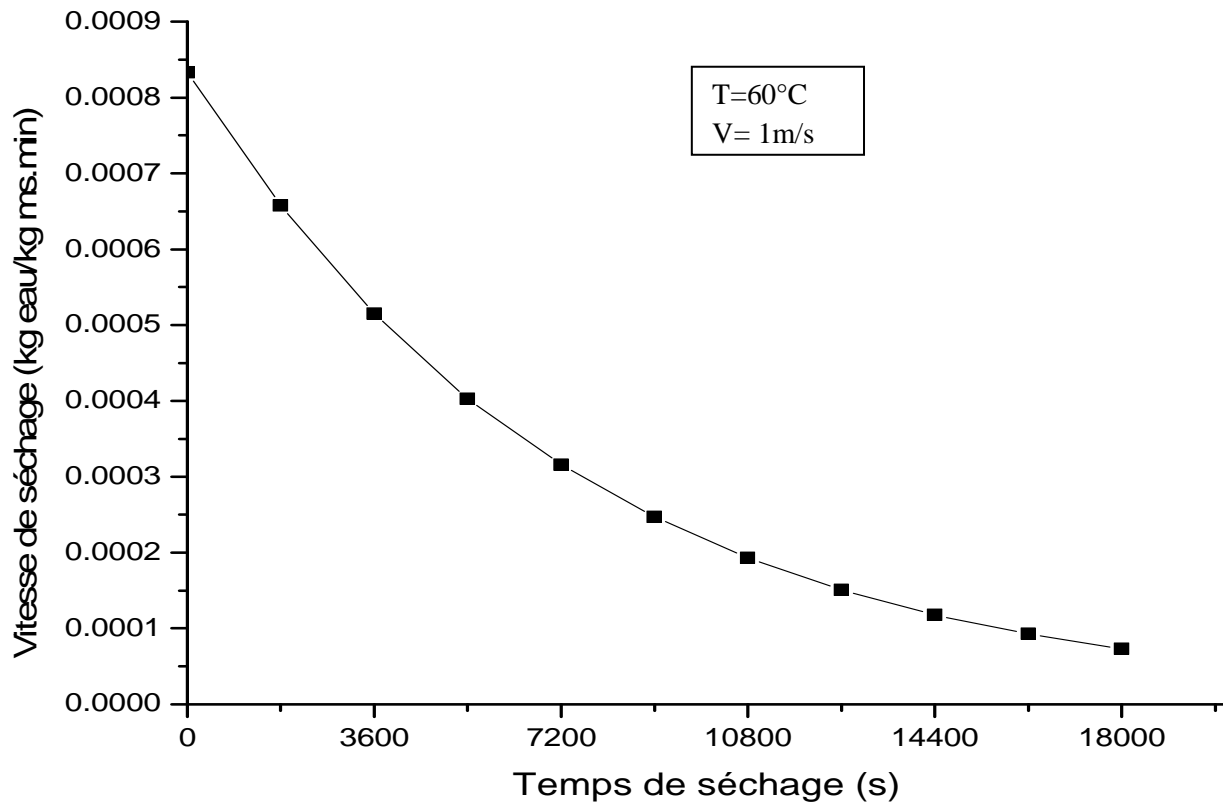


Figure (III. 3) : Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps

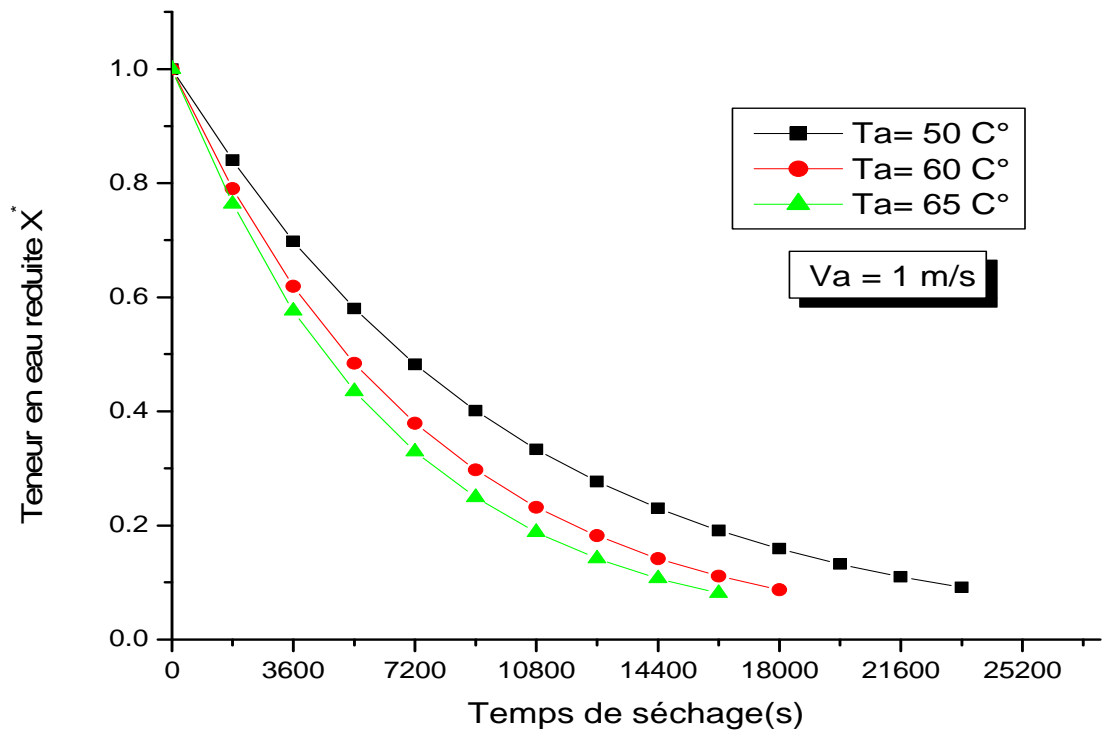
### III .2.2. Influence de la température et la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage:

#### III .2.2.1. Influence de la température de l'air sur la cinétique de séchage:

Les figures (III.4), (III.5) et (III.6) présentent les variations de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes température (50°C, 60°C, 65°C) et pour différents vitesse de l'air (1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s). On remarque que l'influence de la température de l'air apparaît clairement sur les figures précédentes.

La figure (III.4) montre que pour une vitesse de l'air de 1 m/s, les durées de séchage pour avoir une teneur en eau réduite de l'ordre de 0.08 (équivalent à 0.35 kg eau/kg ms) sont de 4.5 h, 5h et 6.5 h respectivement pour les températures 65°C, 60°C et 50°C. La figure (III.5), montre aussi que pour une vitesse de 1.5 m/s, les durées de séchage sont 4 h, 4.5 h et 6h respectivement pour les températures précédentes. Et en fin pour la figure (III.6), les durées de séchage, pour les mêmes conditions de température et une vitesse de l'air de 2 m/s, sont de 3.5 h, 4 h et 5.5 h.

La diminution du temps de séchage sous l'effet de l'augmentation de la température est peut être justifié par une l'augmentation de la diffusivité hydrique du produit qui accélère la migration interne de l'eau [5].



**Figure (III.4):** Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes températures de l'air asséchant et pour  $V_a = 1\text{ m/s}$

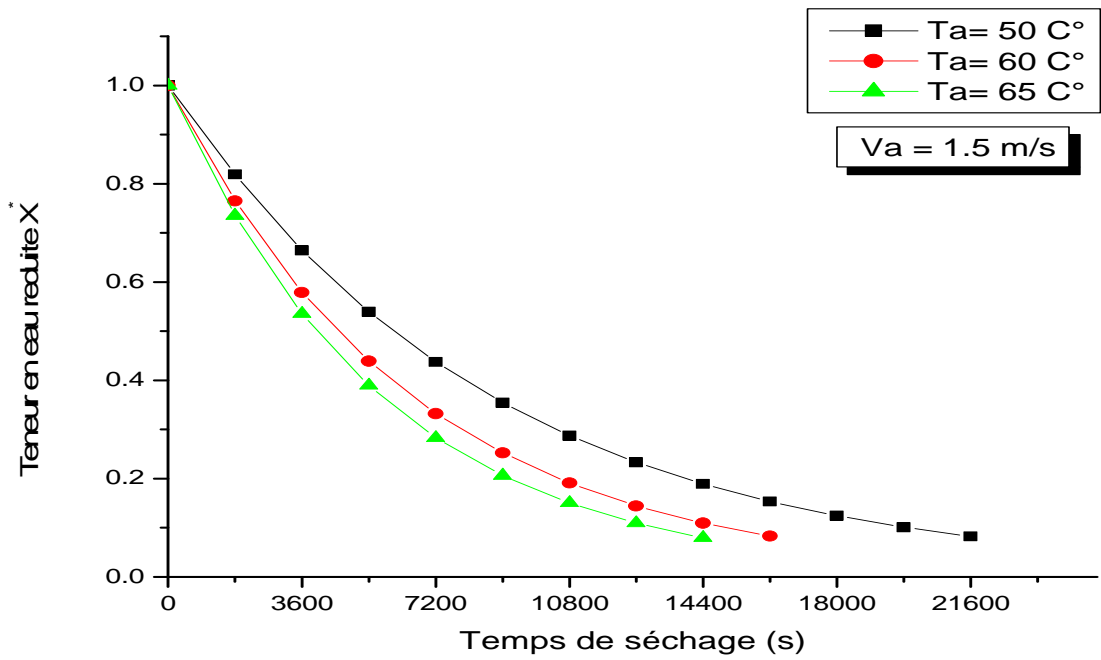


Figure (III.5): Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes températures de l'air asséchant et pour  $V_a = 1.5 \text{ m/s}$

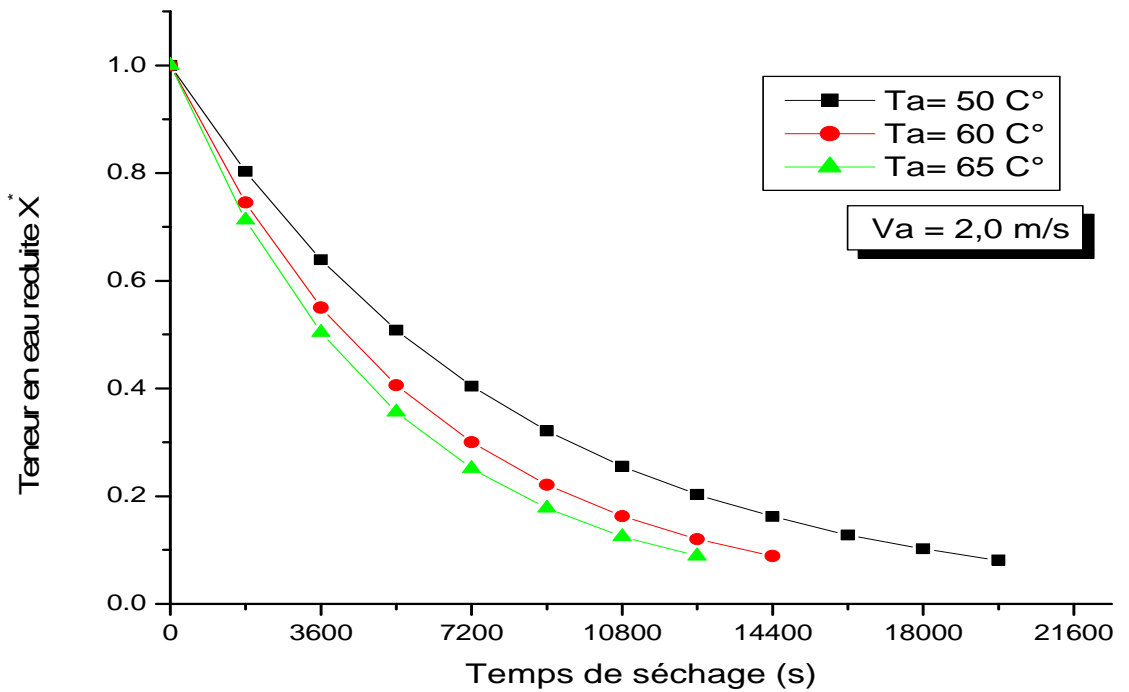


Figure (III.6): Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes températures de l'air asséchant et pour  $V_a = 2 \text{ m/s}$

**III .2.2.2. Influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage:**

Les figures (III.7), (III.8) et (III.9) présentent les variations de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différents vitesses de l'air (1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s) et pour différentes température (50°C, 60°C, 65°C).

La figure (III.7) montre que pour une température de 50°C, les durées de séchage pour avoir une teneur en eau réduite de l'ordre de 0.08 (équivalent à 0.35 kg eau/kg ms) sont de 5.5 h, 6h et 6.5 h pour les vitesses de 1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s respectivement. La figure (III.8), montre aussi que pour une température de 60°C, les durées de séchage sont 4 h, 4.5h et 5h pour les mêmes vitesses précédentes. Et en fin pour la figure (III.9), les durées de séchage, pour les mêmes conditions de vitesse et une température de 65°C sont de 3.5 h, 4 h et 4.5h.

La diminution du temps de séchage sous l'effet de l'augmentation de la vitesse de l'air est peut être justifié par l'augmentation du coefficient de transfert de chaleur entre le produit et l'air asséchant qui augmente avec la vitesse de l'air asséchant.

La comparaison de ces figures avec les figures de l'effet de la température précédentes, montre que l'influence de la vitesse de l'air est moindre que celle de la température. Donc la température présente le facteur le plus influant sur la cinétique de séchage.

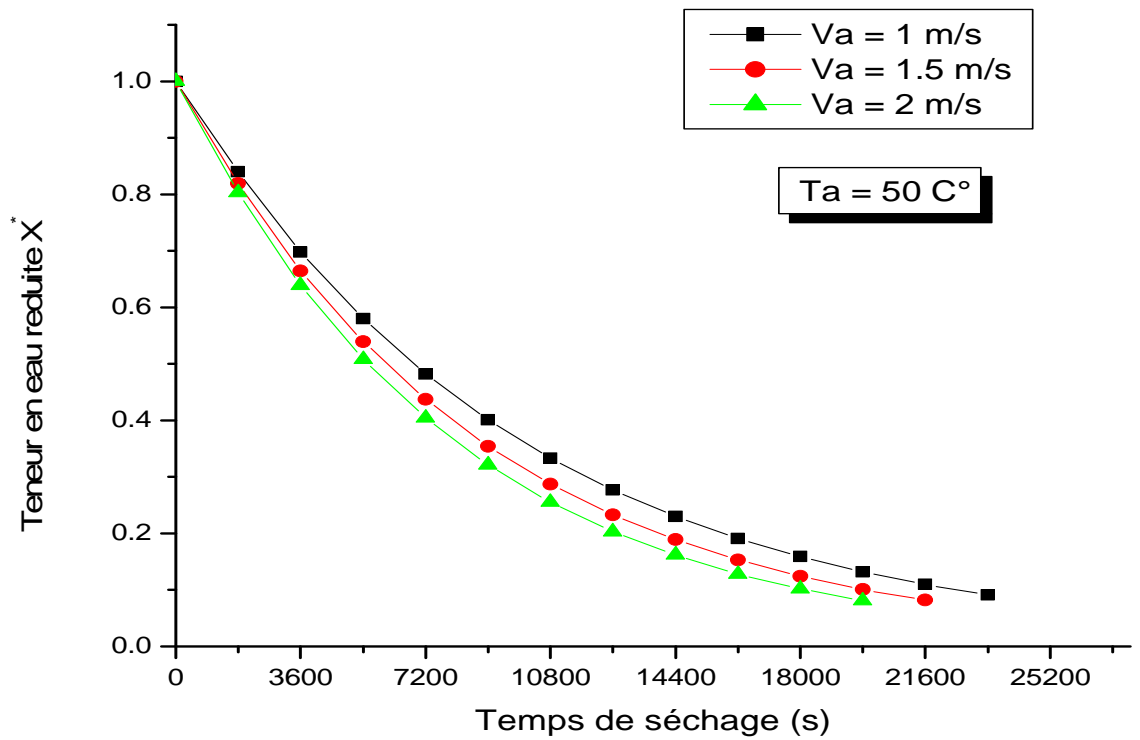


Figure (III.7) : Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes vitesses de l'air asséchant et pour  $T_a = 50^\circ\text{C}$

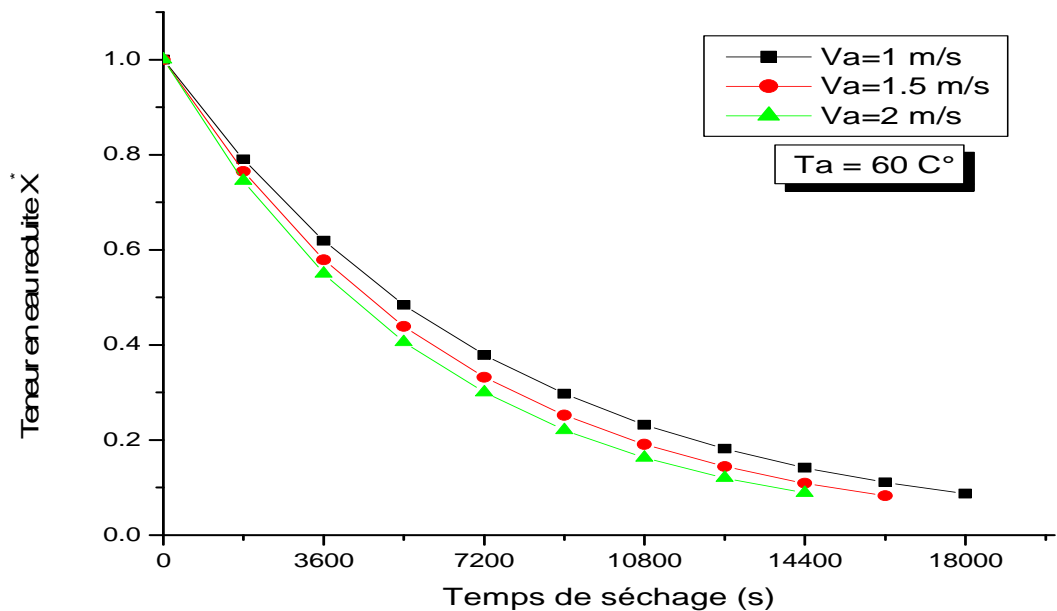
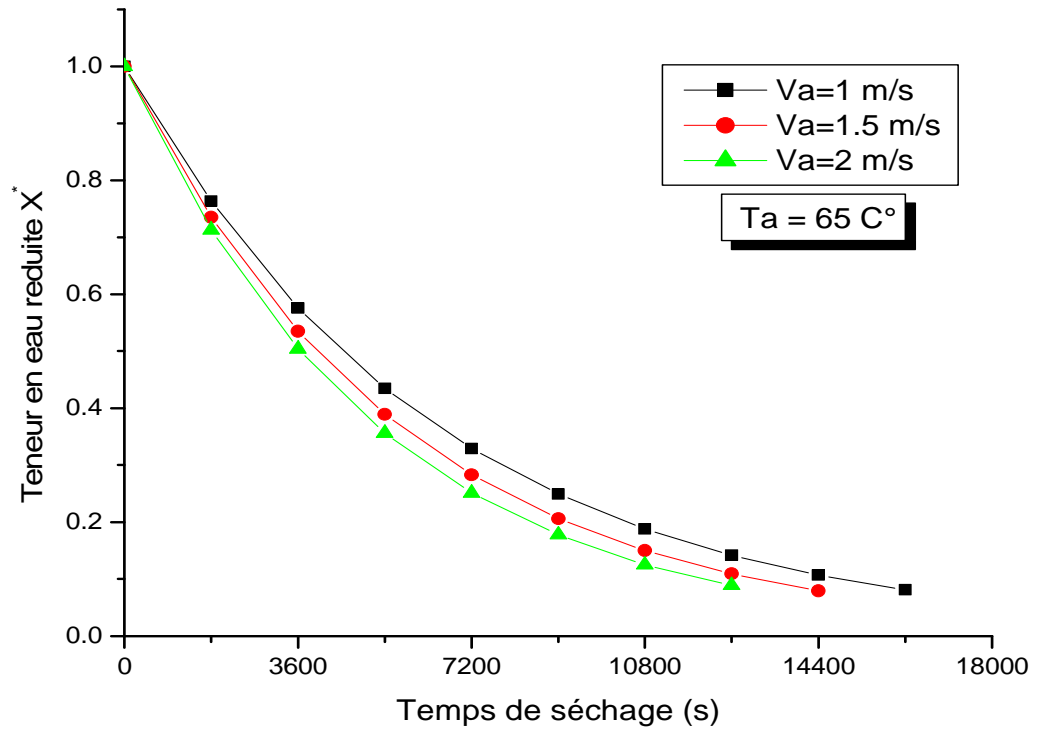


Figure (III.8): Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes vitesses de l'air asséchant et pour  $T_a = 60^\circ\text{C}$



**Figure (III.9):** Variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour différentes vitesses de l'air asséchant et pour  $T_a = 65^\circ\text{C}$

## **Conclusion générale**

Cette étude est une contribution à l'amélioration du procédé du séchage solaire des dattes de variété Deglet-Nour par une étude de simulation numérique d'un prototype de séchoir solaire indirect à convection forcée.

Pour réaliser cette simulation, nous avons présenté dans ce travail les différentes équations du système étudié. En utilisant la méthode de Gauss Seidel pour résoudre ces équations.

Dans ce travail nous avons étudié la cinétique de séchage de notre produit (Deglet-Nour) et les effets de la température et la vitesse de l'air asséchant sur cette cinétique sachant que, la valeur finale de la teneur en eau de ce produit est 35%. Cette valeur est la valeur commerciale des dattes de variété Deglet-Nour.

Les résultats de simulation nous amènent aux conclusions suivantes :

- La présence unique de la phase de ralentissement, et l'absence de la phase de mise en température du produit et la phase à allure constante.
- La durée de séchage, pour avoir une teneur en eau finale du produit (0,35 kg eau/kg ms) varie de 3 h 30 min jusqu'à 6 h 30 min pour les températures de 50°C, 60°C et 65°C et les vitesses de 1 m/s, 1.5 m/s et 2 m/s.
- La température de l'air asséchant présente le facteur le plus influant sur la cinétique de séchage.

Finalement, on souhaite que, cette étude comme une addition positive dans le domaine de séchage des dattes.

## **Références bibliographiques**

- [1] P. Lal Singh. "Silk cocoon drying in forced convection type solar dryer. Journal of Applied Energy", 88, 1720-1726. V.P.S., (2006).
- [2] A. Farhat, S. Kooli, C. Kerkeni, M. Maalej, A. Fadhel, A. Belghith, "Validation of a pepper drying model in a polyethylene tunnel greenhouse." *International Journal of Thermal Science* **43**: 53-58 (2004).
- [3] J.P Nadeau, Puiggali J.R., "Séchage: des processus physiques aux procédés industriels". Tec & Doc- Lavoisier, (1995).
- [4] J.Bimbenet. 2002. Génie des procédés alimentaires RIA édition Dunod, Paris.
- [5] W. Belachi. "Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires", Mémoire de Magister, Université de Ouargla, (2009).
- [6] A. Boubekri, H. Benmoussa, D.Menouche. Solar drying kinetics of date palm fruits assuming a step-wise air temperature change. Journal of Engineering Science and Technology., Vol. 4, No. 3 (2009) 292 - 304
- [7] H. Libert, C. Iaam. Produits du terroir méditerranéen : conditions d'émergence, d'efficacité et modes de gouvernance. Rapport. Institut de la méditerranée. Juin 2005
- [8] S, Hamdi, M,Hamdi. Maturation artificielle et séchage des dattes DegletNour. Fruits, 465,587-592. 1991
- [9] A. Charreau, R. Cavalle, Séchage : Théorie et calculs, Technique de l'ingénieur, J 2480 ,1-23, (1991).
- [10] B. Touati, Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe, Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie (2001).
- [11] M. Mogharbi, D. Halassa, Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air, Mémoire de Master, Université de Ouargla, (2006).



- [12] F. Vachet, Séchage dans l'industrie chimique, Technique de l'ingénieur, J 2483, (1-19),(1993).
- [13] J. Castaing-Lavignottes, Air humide : propriétés thermodynamiques, opérations unitaires et technologie associées à son emploi, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France, (2003).
- [14] W. L. McCabe, J. C. Smith, et P. Harriott, "Unit operation of chemical engineering ", Hill Book Company (1985).
- [15] Y. Jannot, Isothermes de sorption : Modèles et détermination, LEPT-ENSAM, (1-5),(2003).
- [16] S. Ben Ramdane, "étude expérimentale du procédé de séchage sur les produits agro-alimentaires (tomates) dans un séchoir solaire direct à convection naturelle", mémoire de Master, Universitaire de Ouargla, (2011).
- [17] D.Schnell ,Technique de séchage, Traduit de l'allemand, GMBH, Eschborn,(1983)
- [18] N. Chalal, Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect, soutenu le 16/12/2007 Université Mentouri- Constantine
- [19] M. Daguinet, "Les séchoirs solaires : théorie et pratique ", Publication de l'UNESCO, Paris, France (1985).
- [20] A. Mouafki, Modélisation et Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, (2004).
- [21] M. Sodani, étude théorique d'un capteur cylindro-parabolique, mémoire d'ingénieur d'état Université de Ouargla, juin 2008.
- [22] A. Madhlope, S. A. Jones, and J. D. KalengaSaka "A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration ", Renewable Energy, 27 (27 - 37) - (2001).
- [23] P. Duzdez, Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés, Edition du Greth, France (1999).

- [24] D. Mennouche, Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, (2006).
- [25] D. R. Pangavhanc, R. L. Sawhcy and P. N. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of new natural convection", Energy 27(579-590) (2002).
- [26] A. Haddad, Transfertsthermiques, EditionDar -EI- Djazairia, Alger, (2001).
- [27] B. Eyglunent, "Manuel de thermique : théorie et pratique", Hermes science publication, Paris, France, (1997).
- [28] W. Maake, H. J. Echert, et J. L. Cauchepin, "Manuel technique du froid", Tome I, PYC Edition, Alamand (2001).
- [29] M. Belguedj. Les ressources génétique du palmier dattier. Caractérisation des Cultivars de Dattiers dans les palmerraies du Sud-Est Alegé rien., revue de INRAA. 2000
- [30] A .Chehma, HF. Longo. Valorisation des Sous-Produits du Palmier Dattier en Vue de leur Utilisation en Alimentation du Bétail. Biomasse, (2001) 59-64
- [31] M. Kouhila, A. Belghit, M. Daguenet, "Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et la cinétique de séchage de la menthe verte", (2001) Entropie, n° 233, (20-31).
- [32] J-F. Saccadura ,1978, Initiation aux transferts thermiques, CAST INSA de Lyon, Technique et Documentation Lavoisier, Paris, (1980).
- [33] N. Benaouda, A. Boulemtafes, M. Belhamel, Etude du comportement thermique et dynamique d'un séchoir solaire, 12èmes journées internationales de thermique, 2005, Maroc,165-170
- [34] Si. Youcef Youcef, L'analyse numérique en langage 'C', Edition El Maarifa, (2001).

## ANNEXE

**1. Propriétés physiques de l'air asséchant et du produit à sécher:**

Propriétés physiques de l'air de séchage:

On a pu approcher quelques propriétés physiques de l'air asséchant en fonction de la température de séchage de la manière suivante pour la température de l'air entre 0°C et 100°C.

La masse volumique : Elle s'exprime en (kg/m<sup>3</sup>):

$$\rho = \frac{353}{T + 273}$$

Capacité calorifique: Elle s'exprime en (J/kg C°)

$$1008 = C_p$$

Conductivité Thermique : Elle s'exprime en (W/mC°)

$$\lambda = 7,57 \cdot 10^{-5} T + 0,0242$$

Viscosité dynamique : Elle s'exprime en (pascal. s)

$$\mu = 10^{-5} \cdot (0,0046T + 1,7176)$$

Nombre de Prandtl:

$$Pr = -2,54 \cdot 10^{-4} T + 0,7147$$

Propriétés physiques du produit à sécher:

Capacité calorifique:

$$C_p = 1,424m_{\text{carbohydrates}} + 1,549m_{\text{proteins}} + 1,675m_{\text{fat}} + 0,837m_{\text{autres}} + 4,187m_{\text{eau}}$$

**Humidité absolue initiale (teneur en eau à base sèche) : La teneur en eau à base sèche initiale du produit à sécher est 0.5 kg eau / kg ms**

**Humidité relative initiale (teneur en eau à base humide): La teneur en eau à base humide du produit à sécher  $X_r$  est liée à La teneur en eau à base sèche  $X$  par la relation:**

$$X_r = \frac{X}{1 + X}$$

## 2. Aperçu général de la méthode de Gauss – Seidel [34]:

Soit le système suivant;

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} & a_{1,5} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} & a_{2,5} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} & a_{3,5} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} & a_{4,4} & a_{4,5} \\ a_{5,1} & a_{5,2} & a_{5,3} & a_{5,4} & a_{5,5} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \end{bmatrix}$$

**Mettre le système sous la forme de  $X = F(x)$ . Résoudre pour cela chaque équation ‘i’ par rapport à  $X_i$  nous obtenons:**

$$X_1 = [Y_1 - (a_{1,2}X_2 + a_{1,3}X_3 + a_{1,4}X_4 + a_{1,5}X_5)] / a_{1,1}$$

$$X_2 = [Y_2 - (a_{2,1}X_1 + a_{2,3}X_3 + a_{2,4}X_4 + a_{2,5}X_5)] / a_{2,2}$$

$$X_3 = [Y_3 - (a_{3,1}X_1 + a_{3,2}X_2 + a_{3,4}X_4 + a_{3,5}X_5)] / a_{3,3}$$

$$X_4 = [Y_4 - (a_{4,1}X_1 + a_{4,2}X_2 + a_{4,3}X_3 + a_{4,5}X_5)] / a_{4,4}$$

$$X_5 = [Y_5 - (a_{5,1}X_1 + a_{5,2}X_2 + a_{5,3}X_3 + a_{5,4}X_4)] / a_{5,5}$$

Choisir arbitrairement un vecteur initial  $\mathbf{X}^0$  tel que:

$$\mathbf{X}^0 = \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_1^0 \\ \mathbf{X}_2^0 \\ \mathbf{X}_3^0 \\ \mathbf{X}_4^0 \\ \mathbf{X}_5^0 \end{Bmatrix}$$

Méthode du calcul:

$$\mathbf{X}_1^1 = \left[ \mathbf{Y}_1 - (a_{1,2}\mathbf{X}_2^0 + a_{1,3}\mathbf{X}_3^0 + a_{1,4}\mathbf{X}_4^0 + a_{1,5}\mathbf{X}_5^0) \right] / a_{1,1}$$

$$\mathbf{X}_2^1 = \left[ \mathbf{Y}_2 - (a_{2,1}\mathbf{X}_1^1 + a_{2,3}\mathbf{X}_3^0 + a_{2,4}\mathbf{X}_4^0 + a_{2,5}\mathbf{X}_5^0) \right] / a_{2,2}$$

$$\mathbf{X}_3^1 = \left[ \mathbf{Y}_3 - (a_{3,1}\mathbf{X}_1^1 + a_{3,2}\mathbf{X}_2^1 + a_{3,4}\mathbf{X}_4^0 + a_{3,5}\mathbf{X}_5^0) \right] / a_{3,3}$$

$$\mathbf{X}_4^1 = \left[ \mathbf{Y}_4 - (a_{4,1}\mathbf{X}_1^1 + a_{4,2}\mathbf{X}_2^1 + a_{4,3}\mathbf{X}_3^1 + a_{4,5}\mathbf{X}_5^0) \right] / a_{4,4}$$

$$\mathbf{X}_5^1 = \left[ \mathbf{Y}_5 - (a_{5,1}\mathbf{X}_1^1 + a_{5,2}\mathbf{X}_2^1 + a_{5,3}\mathbf{X}_3^1 + a_{5,4}\mathbf{X}_4^1) \right] / a_{5,5}$$

Un second vecteur  $\mathbf{X}^1$  est ainsi généré qui a la forme suivante:

$$\mathbf{X}^1 = \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_1^1 \\ \mathbf{X}_2^1 \\ \mathbf{X}_3^1 \\ \mathbf{X}_4^1 \\ \mathbf{X}_5^1 \end{Bmatrix}$$

Les composantes de ce nouveau vecteur serviront à calculer un autre vecteur  $\mathbf{X}^2$ .

Le processus sera répété jusqu'à ce que la différence entre 2 vecteurs successifs  $\mathbf{X}^i$  et  $\mathbf{X}^{i-1}$  soit inférieure à la précision tolérée ' $\epsilon$ ' et à ce moment nous dirons que le processus a convergé vers la solution  $\mathbf{X}^i$ .

## Résumé :

Ce travail est une contribution à l'amélioration du procédé du séchage solaire des produits agro-alimentaires. Il présente une étude de simulation numérique du séchage des dattes de variété Deglet-Nour par un programme en langage FORTRAN 95 dont le l'objectif est d'étudier la cinétique de séchage du produit de Deglet-Nour et déterminer les effets de la température et la vitesse de l'air asséchant sur cette cinétique de séchage.

Les résultats de simulation montrent que la présence unique de la phase de ralentissement de l'allure de la cinétique de séchage et ils montrent aussi la température de l'air asséchant et sa vitesse ont une influence sur cette cinétique de séchage. Donc, Pour maîtriser une opération de séchage d'un produits agro-alimentaire, il faut pouvoir maîtriser bien les facteurs de l'air asséchant.

**Mots clés:** Séchage solaire, Simulation, Convection forcée, Dattes, Daglet-Nour

---

## Abstract :

This work is a contribution to improving the process of solar drying of agricultural and food products. It presents a numerical simulation study of drying variety of Deglet-Nour dates by a program in FORTRAN 95 whose objective is to study the drying kinetics of Deglet-Nour product and to know the effects of temperature and air velocity on drying the drying kinetics.

Simulation results show that the single presence of the deceleration phase of the course of the drying kinetics and they also show the air temperature and drying speed has an influence on the drying kinetics. So to control a drying operation of a food product must be able to control many factors air drying.

**Keywords:** Solar Drying, Simulation, Forced convection, Dates, Daglet-Nour

---

## ملخص:

يعتبر هذا العمل مساهمة في تحسين عملية التجفيف الشمسي للمنتجات الزراعية والغذائية. إذ يقدم دراسة محاكاة رقمية للتجفيف الشمسي للتمر من نوع دقلة نور بواسطة برنامج بلغة الفورتران 95. و نهدف من خلال هذا العمل إلى دراسة حركية التجفيف لمنتج دقلة نور و معرفة تأثير درجة حرارة و سرعة الهواء الساخن على حركية تجفيف هذا المنتج.

تظهر نتائج المحاكاة وجود طور التباطؤ فقط في منحنى حركية التجفيف. كما تظهر هذه النتائج أيضا أن لدرجة حرارة و سرعة الهواء الساخن تأثير على حركية التجفيف.

نستخلص إذن أنه من اجل التحكم في عملية التجفيف الشمسي لمنتج زراعي ما يجب أن نتحكم جيدا في عوامل

الهواء الساخن.

الكلمات المفتاحية: التجفيف الشمسي، المحاكاة، الحمل القسري، التمر، دقلة نور