

UNIVERSITE SAAD DAHLAB, BLIDA-1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES ÉNERGIES RENOUVELABLES



**Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER En Énergie Renouvelable
Option : Conversion thermique**

Thème :

**Etude paramétrique et dimensionnement d'une chambre de séchage
des produits agroalimentaires.**

Présenté par : **Mr SIDI MOUSSA SOFIANE**

Soutenu le 28 septembre 2021 devant le jury composé de :

Monsieur M. MERZOUK	Professeur	USDB	Président
Monsieur Dj . LAFRI	MCA	USDB	Examineur
Monsieur K. KACI	MCA	USDB	Examineur
Madame N.E KHELALFA	MCA	USDB	Encadreur

Septembre 2021

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة وتحجيم المجفف الشمسي غير المباشر للأغراض الزراعية، والمخصص لتجفيف الفواكه والخضروات. يهدف العمل الحالي إلى تصميم مجفف شمسي غير مباشر للمنتجات الزراعية في منطقة بسكرة. يجب أن يضمن هذا المجفف التجفيف المستمر ليلاً ونهاراً، في طقس صافٍ أو غائم. يتكون نظام التجفيف من حجرة تجفيف يتم إمدادها بالهواء الساخن عن طريق نظام تجميع الماء الساخن بالألواح الشمسية المتصل بخزان. هذا الأخير يجعل من الممكن تمديد تشغيل المجفف خارج الإشعاع الشمسي، مما يسمح لنا بالتجفيف المستمر.

يتألف العمل من دراسة خصائص هواء التجفيف أثناء تطوره أثناء عملية التجفيف، أي دراسة تأثير درجة حرارته، ودرجة رطوبته، وسرعته، وتدفعه. لهذا، تم تصميم برنامج MATLAB. تسمح لنا نتائج العمل التجريبي للبحث السابق بنمذجة المجفف الشمسي وبالتالي إجراء عمليات المحاكاة اللازمة لهذه الدراسة. إن معرفة تطور كل هذه المعلمات وتربطها يجعل من الممكن تحديد أنواع المنتجات التي من المحتمل أن يتم تجفيفها بواسطة هذا المجفف وظروف التجفيف المستمر. ركزت محاكاتها على المشمش، وهو منتج رئيسي في منطقة بسكرة والولايات المجاورة.

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي، مجفف غير مباشر، محاكاة، قياس الأبعاد، مشمش مجفف.

Résumé :

L'objet de ce présent travail est l'étude et le dimensionnement d'un séchoir solaire indirect à vocation agricole, destiné au séchage des fruits et légumes. Le présent travail a pour objectif de concevoir un séchoir solaire indirect pour les produits agricoles dans la région de Biskra. Ce séchoir doit assurer un séchage continu de jour et de nuit, en temps clair ou couvert. Le système de séchage est constitué d'une chambre de séchage qui est alimentée en air chaud par un système de captation à eau relie avec un ballon de stockage. Ce dernier permet de rallonger le fonctionnement du séchoir hors l'irradiation solaire ce qui nous permet ainsi d'avoir un séchage continu.

Le travail consistera à étudier les caractéristiques de l'air asséchant lors de leurs évolutions au cours l'opération de séchage, c'est-à-dire étudier l'influence de sa température, son degré d'humidité, sa vitesse et son débit. Pour cela, un programme MATLAB est conçu. Les résultats des travaux expérimentaux de recherches antérieurs nous permettent de modéliser le séchoir solaire et ainsi effectuer les simulations nécessaires à cette étude. La connaissance de l'évolution de tous ces paramètres et leur interdépendance permettent de sélectionner les types de produits susceptibles d'être séchés par ce séchoir et les conditions de séchage en continu. Notre simulation s'est portée sur l'abricot, produit phare de la Région de Biskra et des wilayas limitrophes.

Mots-clés : séchoir solaire, séchoir indirects, simulation, dimensionnement, abricot séché.

Abstract :

The object of this present work is the study and sizing of an indirect solar dryer for agricultural purposes, intended for drying fruits and vegetables. The present work aims to design an indirect solar dryer for agricultural products in the Biskra region. This dryer must ensure continuous drying day and night, in clear or cloudy weather. The drying system consists of a drying chamber which is supplied with hot air by a water collection system connected with a storage tank. The latter makes it possible to extend the operation of the dryer outside solar irradiation, which allows us to have continuous drying.

The work will consist in studying the characteristics of the drying air during their evolutions during the drying operation, studying the influence of its temperature, its degree of humidity, its speed, and its flow. For this, a MATLAB program is designed. The results of the experimental work of previous research allow us to model the solar dryer and thus perform the simulations necessary for this study. Knowledge of the evolution of all these parameters and their interdependence makes it possible to select the types of products likely to be dried by this dryer and the continuous drying conditions. Our simulation focused on apricot, a flagship product of the Biskra region and the neighboring wilayas.

Keywords: solar dryers, indirect dryers, dried apricots, drying program.

Remerciement

*Au terme de ce travail ma profonde gratitude et mes sincères remerciements vont à ma promotrice : Mme **KHELALFA .N** pour sa disponibilité, sa patience et sa compréhension et ses conseils pour la direction de ce travail qu'elle m'a accordée sa confiance pour la réalisation de ce travail.*

Mes profonds remerciements sont adressés aussi à :

*Je remercie Mr **MERZOUK .M** Notre Professeur de département de **ENR**, du fond du cœur pour ses précieux efforts, où il était le diligent dans le sens le plus large du mot.*

*Merci beaucoup à Mr **KACI .K** pour son aide et ses interventions tout au long de notre parcours d'étude.*

*Je remercie énormément Mr **EL MOKRETAJ .S** de Centre de Développement des Energies Renouvelables ainsi que Mr **SELLAMI .R** de Unité de Développement des Equipements Solaires qui n'ont ménagé aucun effort pour me donner le meilleur d'eux même et pour le temps qu'ils m'ont consacré .*

*Je voudrais exprimer toute ma gratitude à : **Mlle SMAILI .K** pour les orientations et les conseils ainsi ses aides.*

*Tous mes enseignants de département **ENR** de Blida-1 pour leurs aides, leurs encouragements et leurs conseils durant les 5 ans de ma formation.*

Enfin mes remerciements à toutes les autres personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail .

Dédicaces

Je dédie ce travail modeste comme un témoignage d'affection, de respect d'admiration

A ma Famille proche, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce qui je suis aujourd'hui.

A mon père, MOHAMED, pour son enseignement continu à m'inculquer les vraies valeurs de la vie, là où je suis arrivée aujourd'hui, c'est grâce à ton soutien et à tes encouragements.

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargnée aucun effort pour me rendre heureux: ma mère
Djalila*

A mes chères frères Rachid ,Amine , Djalal , Yassine et le petit Tarek

A mon âme sœur Ro qui ne m'a pas cessée de m'encourager, et me soutenir pendant les moments difficiles, que Dieu lui donne une longue et joyeuse vie

A tous mes amis avec qui j'ai partagé les plus beaux moments.

Sofiane SIDI MOUSSA

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE :	1
Chapitre 01 : Théorie de séchage.....	3
1 Théorie de séchage	4
1.1 Définition de séchage :	4
1.2 Propriétés des corps humides :	4
1.2.1 Teneur en eau :	4
1.2.1 Teneur en eau sur base sèche :	5
1.2.2 Teneur en eau sur base humide :	5
1.3 Équilibre d'humidité entre l'air et le produit :	5
1.3.1 L'activité de l'eau :	5
1.3.2 L'eau dans la matière :	6
1.4 Courbes d'équilibre (isothermes de sorption) :	7
1.5 L'air humide :	9
1.5.1 Diagramme de l'air humide,	10
1.5.2 Capacité d'Absorption et capacité d'évaporation de l'air	11
1.6 Comportement des solides humides dans l'air :	11
1.6.1 Condition de séchage :	11
1.6.2 L'eau extrait lors séchage :	12
1.6.3 Cinétique de séchage :	13
1.7 Les modèles empiriques de cinétique de séchage :	16
1.8 TECHNOLOGIES DE SÉCHAGE :	19
1.8.1 Les séchoirs solaires :	20
1.8.2 Les séchoirs naturels :	20
1.8.3 Les séchoirs solaires directs :	21
1.8.4 Les séchoirs mixtes :	22
1.8.5 Les séchoirs hybrides :	22
1.8.6 Les séchoirs solaires indirects :	22
1.9 Conclusion :	24
2 Etat de l'art :	25
2.1 Synthèse bibliographique sur le séchage :	25
2.1.1 Prétraitement :	25
2.1.2 Séchage direct, effet de cheminée :	26
2.1.3 Effet de serre	26
2.1.4 Effet de l'épissure :	26
2.1.5 Effet de température de séchage :	26

2.1.6	Effet de stockage de chaleur :.....	28
2.1.7	Effet de dessiccation :.....	28
2.2	Conclusion :.....	28
3	Chapitre 3 : Description et modélisation du séchoir	30
3.1	Introduction :.....	31
3.2	Description du système de séchage :	32
3.3	Fiche technique de la chambre de séchage :.....	33
3.4	Matière première à sécher :	33
3.4.1	Le choix de produit :	33
3.4.2	Caractéristique aérothermique de procédure de séchage :.....	34
3.4.3	Déroulement de séchage :.....	34
3.5	Modélisation du séchoir :	35
3.5.1	Hypothèses :.....	36
3.5.2	Mise en équation :.....	36
3.6	Modèle mathématique :.....	41
3.7	Conclusion :.....	41
4	Simulation numérique :	43
4.1	Choix de la méthode numérique :	45
4.2	Discretisation du modèle mathématique :	45
5	Résultats et discussions :	49
5.1	Élément de dimensionnement :	49
5.1.1	La quantité d'abricot a séché :.....	49
5.1.2	La quantité d'eau qui doit être enlevé du produit :.....	49
5.1.3	La vitesse d'enlèvement de l'eau du produit :.....	49
5.1.4	L'énergie et la puissance portée par l'air pour l'évaporation de l'eau:	50
5.1.5	L'énergie nécessaire est pour sa part:	50
5.2	Interprétation des résultats de la simulation :	50
5.2.1	Evolution de l'air asséchant :.....	50
5.2.2	Influence de la température de l'air de séchage :.....	53
5.2.3	L'influence de débit sur le séchage :.....	55
5.2.4	Influence de l'humidité de l'air de séchage :	56
5.2.5	Résultat de programme :.....	57
5.2.6	Conclusion :.....	58
6	Conclusion générale.....	59

Table des illustrations

Figure 1: Les différents types d'eau dans le matériau	7
Figure 2: Forme générale des isothermes	8
Figure 3: Diagramme de l'air	10
Figure 4: Isotherme de désorption.....	12
Figure 5: Fraction d'eau évaporée lors d'un séchage par entraînement.....	13
Figure 6: Courbes théoriques caractérisant un séchage par convection forcé.....	14
Figure 7: Différents types de séchoirs	20
Figure 8: Schéma Classification des séchoirs indirects	23
Figure 10: Représentation schématique du système solaire de séchage étudié.....	32
Figure 11: Schéma des transferts de chaleur et de masse pour une claie	35
Figure 12: Schéma d'une claie d'indice i	46
Figure 13: Organigramme de calcul	47
Figure 14: Evolution de la température des produits pendant le séchage	51
Figure 15: Evolution de l'humidité relative de l'air asséchant dans la direction de l'écoulement	52
Figure 16: Evolution de la Température de l'air asséchant dans la direction de l'écoulement pour chaque claie.....	52
Figure 17: Evolution de X en fonction du temps pour différentes Températures d'entrée du séchoir	53
Figure 18: Évolution de la teneur en eau (X) en fonction du temps t	54
Figure 19: Evolution de X en fonction du temps pour différentes valeurs du débit d'air de séchage	55
Figure 20: Evolution de vitesse de séchage en fonction du temps pour différentes valeurs du débit d'air	56
Figure 21: Evolution de X en fonction du temps pour différentes valeurs de l'humidité relative de l'air de séchage	57

Liste des tableaux :

Tableau 1: Modèles des isothermes de sorption.....	9
Tableau 2: Les modèles mathématiques pour décrire la cinétique de séchage.	19
Tableau 3: fiche technique de la chambre de séchage	33
Tableau 4: Les résultats obtenus pour le séchage de l'abricot étudiées.	57

NOMENCLATURE

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 : Capacité thermique à pression constante..... $(KJ/k.Kg \text{ d'air humide})$

C_{pa} : chaleur spécifique de l'air à pression constante.

C_{pf} : Chaleur massique de l'ai.....J/kgK

C_{pr} : Chaleur massique du produit humide..... J/kgK

C_{prs} : Chaleur massique du produit secJ/kgK

D_e : Diffusivité de l'eau dans le produit..... m^2/s

D_H : Diamètre hydrauliquem

d_m : Diamètre moyen des particules de produit à sécher..... m

D_v : Diffusivité de l'humidité dans l'air de séchage..... m^2/s

e : Épaisseur de la veine d'air mobile..... m

e_p : Épaisseur de la paroi de l'armoire de séchage..... m

E : énergie totale du systèmeJ

e_c : hauteur d'une claie..... m

e_l : Épaisseur r du lit de particules à l'instant tm

E_c : énergie cinétique du système.....J

E_p : énergie potentielle du système.....j

e_{p0} : Épaisseur initiale des rondelles du produit à sécher..... mm

H : est l'enthalpie de l'air..... kJ/kg_{air}

H_m : Coefficient de transfert de masse globalm/s

h_{me} : Coefficient de transfert de masse externem/s

h_p : coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air et la paroi interne. $W m^{-2} K^{-1}$

h_{pr} : coefficient de transfert de chaleur par convection entre l'air et le produit..... $W m^{-2} K^{-1}$

h_{vfpr} : Coefficient de transfert convectif entre le produit et l'air..... W/m^2K

L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau..... (KJ/Kg)

MOMENCLATURE

L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau.....	J/kg
M : Humidité absolue du produit à l'instant	kg eau/kg MS
M_0 : Humidité absolue du produit initiale	kg eau/kg MS
m_a : masse de l'air.....	kg
m_a : Débit d'air massique.....	Kg/s
M_e : Humidité absolue du produit à l'équilibre	kg eau/kg MS
m_e : Masse de l'eau du produit humide à l'instant t contenu dans une claie	kg
m_e : Débit d'eau évaporée du produit	kg eau/s
MH : Masse humide.....	kg
m_{pr} : Masse du produit humide à l'instant t contenu dans une claie.....	kg
m_{prf} : Masse finale du produit humide contenu dans une claie	kg
m_{pro} : Masse initiale du produit humide contenu dans une claie	kg
m_{prs} : Masse du produit sec contenu dans une claie	kg
MS : Masse sèche	kg
\dot{m}_a : est le débit massique de l'air.....	kg/s
\dot{m} : masse d'eau évaporée par unité de temps.....	kg/s
P_{ev} : Puissance totale d'évaporation	W
Ppm : Unité de mesure	particule par million
p_{sat} : Pression de vapeur saturante	kPa
P_{sat} : est la pression de saturation de l'air.....	Pa
p_v : Pression partielle de vapeur dans l'air	kPa
P_v : La pression de vapeur d'eau de l'air dans l'enceinte.....	Pa
p_{vp} : Pression de vapeur à la surface du produit	kPa
P_{vp} : La pression partielle de vapeur à la surface du corps humide.....	Pa
P_{VS} :La pression de vapeur saturante de l'air dans la couche limite au contact de la surface de l'eau.....	Pa

MOMENCLATURE

Q chaleurs reçus par le système

Q_{ev} : Quantité de chaleur d'évaporationW/m²

Q_s : Quantité de chaleur de séchage..... W/m²

S : surface de la claie.....m²

S_p : surface d'échange de la paroi interne entre deux claies.m²

S_{pr} : surface d'échange du produit.m²

T_a : température de l'air. °C

T_a : température de l'air. °C

T_a : température de l'air..... °C

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

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

T_h : température de l'air humide. °C

T_p : température de la paroi interne. °C

T_{pr} : température du produit. °C

U : énergie interne du système.....J

v : vitesse d'écoulement de l'air.....m/s

\bar{v} : la vitesse du systemem/s

\vec{V}_{pr} : vitesse du produit.....m/s

Wtr : travailJ

ΔE : la variation d'énergie totale du systèmeJ

Δz : représente l'épaisseur du lit de particules.....m

ρ_a : masse volumique de l'air qui est fonction de la température.....kg/m³

INTRODUCTION GENERALE :

Les techniques de conservation inadéquates et de mauvaises conditions de stockage dégradent la qualité des produits agricoles, surtout en Algérie, où les agriculteurs jettent leurs produits parce qu'ils ne peuvent ni les stocker ni les vendre dans certains cas. L'un des moyens de conservation les plus importants qui empêchent la dégradation des fruits et légumes frais est le séchage de ces produits.

Ce dernier a pour but de réduire leur teneur en humidité. La pourriture causée par la croissance et la multiplication des micro-organismes est empêchée par l'élimination de l'humidité, ce qui minimise bon nombre des effets de l'humidité

L'étude porte sur le dimensionnement d'un séchoir solaire de type indirect destiné au séchage de produits agricoles par air chaud à grand échelle. C'est un séchoir solaire industriel qui doit sécher des centaines de kilogramme dans une durée raisonnable. C'est la première opération de transformation de l'aliment avant son stockage ou son utilisation par l'industrie alimentaire. Le chauffage étant assuré par échangeur de chaleur air/eau, la chaleur est fournie par un champ de captation solaire à eau (capteur plan).

Notre travail se compose de trois chapitres, le premier se divise en deux parties : la 1^{ère} est une étude bibliographique portant sur des notions théoriques du 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.

La 2^{ème} partie est l'état de l'art dont laquelle nous présentons quelques travaux récents effectués en ce domaine. Ce qui nous a guidés à choisir la méthode à suivre pour aborder ce travail. Cette méthode, de la courbe caractéristique de séchage, sera bien développée et détaillé dans ce même chapitre.

Le champ de captation est relié à la chambre de séchage où se déroulent des transferts de chaleur et de masse, entre l'air et la paroi intérieure de la chambre, et l'air et le produit à sécher. La modélisation de ces transferts est l'objet du deuxième chapitre.

La mise en équation du bilan de conservation de chaleur et de masse au niveau de chaque claie du séchoir, nous a conduits 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 thermo physiques de l'air et du produit avec leurs températures et leurs humidités absolues.

Le troisième chapitre de notre mémoire comporte deux parties : la première précise 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.

Chapitre 01 : Théorie de séchage

1 Théorie de séchage

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

Cette partie est consacrée à quelques rappels sur les principes du séchage et à la présentation des principaux modèles de séchage.

1.1 Définition de séchage :

Le séchage désigné au but d'éliminer l'eau contenant dans le produit généralement par vaporisation, afin de le transformer en produit solide sec dont l'humidité résiduelle est très faible.

Le séchage par évaporation est un processus très complexe qui fait intervenir un double transfert, le premier est un transfert de chaleur destiné à réduire la teneur en eau dans le produit et le second est un transfert de masse qui implique un déplacement du fluide de l'intérieur du produit vers sa surface. Ces deux transferts exigent un apport de chaleur considérable, d'où l'intérêt d'utiliser une source de chaleur renouvelable. C'est le cas des séchoirs solaires. [1]

1.2 Propriétés des corps humides :

1.2.1 Teneur en eau :

La quantité d'eau est définie par rapport à une référence liée au produit, cette référence varie selon le milieu (produit ou air d'entraînement)

La première grandeur qui caractérise l'état d'hydratation d'un produit est sa teneur en eau (X), exprimée en kilogramme d'eau par kilogramme de matière sèche, qui mesure la quantité totale d'eau dans le matériau, aussi appelée humidité absolue du produit.

Dans la pratique toutefois, les industriels utilisent souvent une mesure de l'humidité du produit rapportée à la masse totale du produit : fraction massique X_w , souvent exprimée en pourcentage, aussi appelée « teneur en eau sur base humide » ou « humidité du produit ».

Pour faire des bilans et dimensionner les opérations de séchage, il est préférable de travailler sur la base de la matière sèche, constante lors du séchage.

Donc la teneur en eau mesure la quantité totale d'eau dans le matériau, aussi appelée humidité absolue du produit, [2]

1.2.1 Teneur en eau sur base sèche :

Où l'humidité absolue du produit est donnée par la relation suivante :

$$X = \frac{\text{masse totale} - \text{masse de la matière sèche}}{\text{masse de la matière sèche}} = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse de la matière sèche}} \quad (1.1)$$

1.2.2 Teneur en eau sur base humide :

Qui détermine l'humidité relative du produit est donnée par cette relation :

$$X_w = \frac{\text{masse totale} - \text{masse de la matière sèche}}{\text{masse totale}} = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse totale}} \times 100\% \quad (1.2)$$

Où :

X : Teneur en eau à base sèche, [kg eau / kg (MS)], ou par [%MS]

X_w : Teneur en eau à base Humide, [kg d'eau/kg de matière humide] ou par [%MH]

1.3 Équilibre d'humidité entre l'air et le produit :

Il existe un équilibre d'humidité entre les matériaux hygroscopiques (substances qui absorbent ou rejettent l'eau) et l'air ambiant. L'eau contenue dans un matériau hygroscopique a pour effet d'augmenter la pression de vapeur à la surface de ce matériau. Lorsque la pression de vapeur à la surface est égale à la pression de vapeur d'eau de l'air ambiant, on parle d'humidité d'équilibre (ou équilibre hygroscopique). Toute différence entre ces pressions entraîne un échange d'eau. Cet état d'équilibre est caractérisé par la notion d'activité de l'eau A_w , qui représente la capacité de l'aliment à retenir l'eau dans sa structure et à la maintenir pendant l'application de forces extérieures.

1.3.1 L'activité de l'eau :

Indique la disponibilité d'eau « libre » des produits alimentaires. Il ne s'agit donc pas de la teneur exacte en eau d'un aliment, mais seulement de l'eau susceptible d'intervenir dans des réactions chimiques, biochimiques ou microbiologiques [2] [3]

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (1.3)$$

- P_v la pression de vapeur d'eau de l'air dans l'enceinte
- P_{vs} la pression de vapeur saturante de l'air dans la couche limite au contact de la surface de l'eau
- P_{vp} la pression partielle de vapeur à la surface du corps humide.

Si le corps est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure, il n'y a plus d'échange d'eau et le gradient de pression partielle de vapeur entre le corps et l'air s'annule :

$$P_{vp} = P_v; \quad A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} = \Phi \quad (1.4)$$

On la définit par rapport à un état de référence qui est l'eau pure, donc sans aucun soluté.

La valeur de l' A_w varie entre 0 et 1. Elle est égale à 0 lorsque le produit est sec et que toute l'eau est liée à la matrice alimentaire (sans qualité réactive). Elle est égale à 1 dans le cas de l'eau pure.

L' A_w est une caractéristique importante des aliments, particulièrement dans un contexte d'innocuité. Les aliments ayant une activité de l'eau élevée sont favorables au développement de microorganismes et sont donc plus sensibles à la dégradation. Il est possible de contrôler l'activité de l'eau par des procédés comme le séchage ou l'ajoute d'humectant (sel, sucre...) qui vont lier les molécules d'eau.

Le développement des microorganismes d'altération ou pathogènes pourra ainsi être ralenti et la durée de conservation de l'aliment prolongée. Son innocuité pourra également être assurée. [2] [3]

1.3.2 L'eau dans la matière :

L'eau dans les aliments présente différentes propriétés physicochimiques selon ses états de liaison avec les macromolécules de l'aliment et avec les molécules d'eau entre elles. [3]

1.3.2.1 L'eau libre :

C'est l'eau retenue par effet capillaire dans les pores des aliments, l'eau liée par effet osmotique, l'eau d'hydratation des macromolécules et l'eau solvanté.

L'eau libre est mobile et conserve toutes les propriétés de l'eau pure. [2]

1.3.2.2 L'eau liée :

Elle forme une couche mono-moléculaire étroitement associée par divers types de liaisons aux protéines et aux glucides. Cette eau est fixe et elle possède la particularité de s'échapper à la congélation car les interactions eau-macromolécules sont plus fortes que celles des molécules d'eau cristallisées entre elles. Cette eau n'est pas disponible. [2]

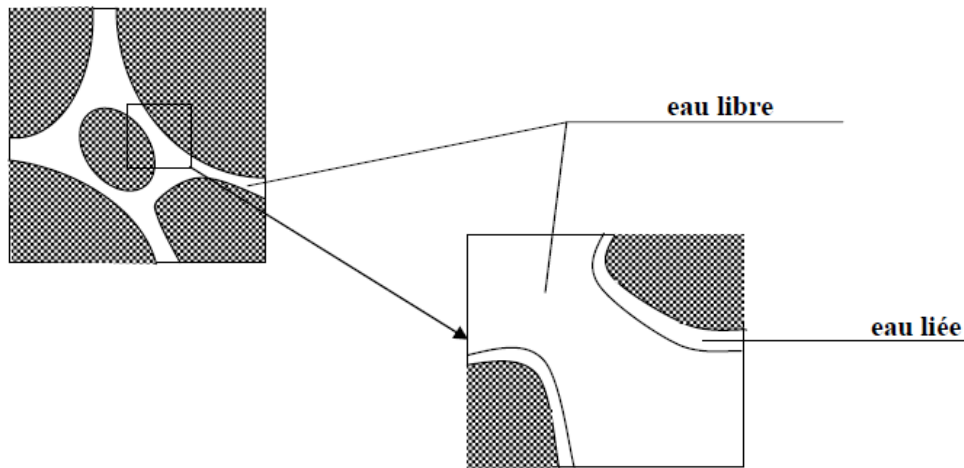


Figure 1: Les différents types d'eau dans le matériau [2]

1.4 Courbes d'équilibre (isothermes de sorption) :

Le transport de la vapeur est un phénomène qui se produit lors de tout procédé de séchage.

Le mouvement de la vapeur se fait soit par diffusion au sein du matériau même soit par échange au niveau de la surface entre le matériau et son environnement. Si un produit peu humide de nature hygroscopique se trouve en contact avec de la vapeur d'eau, il fixe celle-ci jusqu'à atteindre un état d'équilibre ; ce phénomène est connu sous le nom d'adsorption. Cependant lorsque le même produit est placé dans une atmosphère plus sèche, l'état d'équilibre s'établit par transfert d'humidité du produit vers l'extérieur ; ce phénomène est couramment appelé désorption. Les isothermes de sorption représentent la relation entre la teneur en liquide du produit et celle de la vapeur à la pression d'équilibre pour des températures données [5]

En état d'équilibre, la relation entre le pourcentage en eau et l'activité de l'eau d'un matériau hygroscopique peut être représentée sous forme graphique par une courbe (figure 2) :

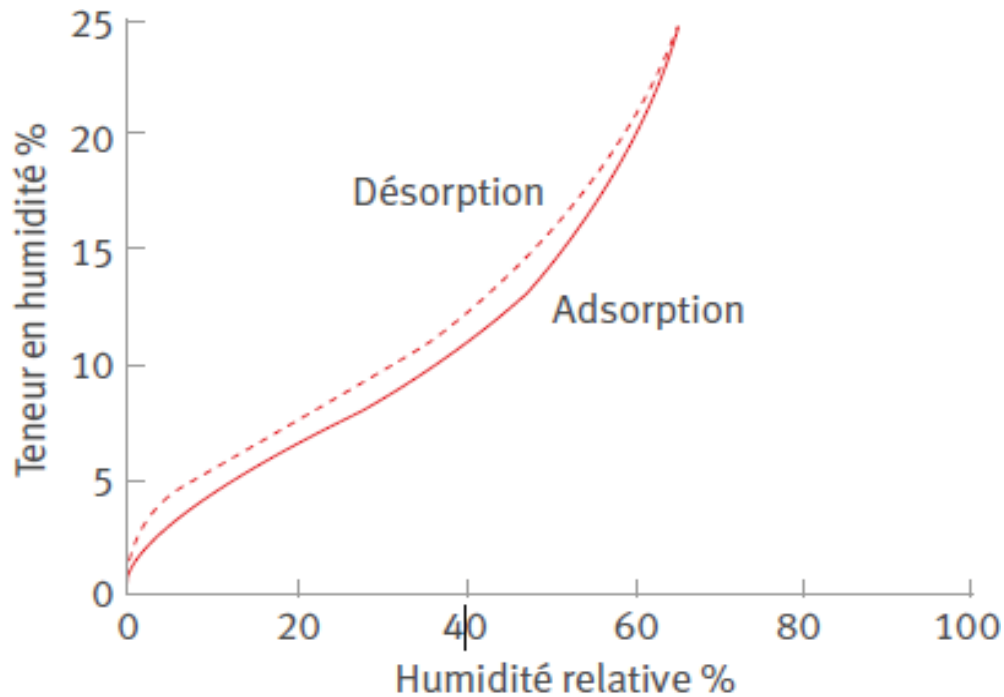


Figure 2: Forme générale des isothermes [5]

L'isotherme de sorption montre, pour chaque valeur d'activité de l'eau, la teneur en humidité correspondante pour une température constante donnée. Chaque produit dispose de sa propre isotherme de sorption. [5]

Les isothermes de sorption sont généralement obtenues expérimentalement. Par ailleurs, il existe plusieurs modèles empiriques, semi-empiriques ou théoriques qui ont été proposés pour représenter les courbes d'équilibre. Toutefois, deux modèles sont plus particulièrement utilisés par les chercheurs :

- le modèle de BET (Brunauer-Emmert-Teller) particulièrement intéressant pour l'étude de la partie des courbes relatives aux faibles teneurs en eau :

$$X = \frac{X_m \cdot C_{BET} \cdot A_w}{(1 - a_w) \cdot (1 + (C_{BET} - 1) \cdot A_w)} \quad (1.5)$$

Où X_m et C_{BET} sont des paramètres ajustables ;

- Le modèle GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), souvent considéré comme une extension du modèle de BET, permet de bien représenter les courbes de sorption jusqu'à une activité de 0.80 à 0.85 :

$$X = \frac{X_m \cdot C_{GAB} \cdot K_{GAB} \cdot A_w}{(1 - K_{GAB} A_w) \cdot (1 + (C_{GAB} - 1) K_{GAB} \cdot A_w)} \quad (1.6)$$

Avec X_m , C_{GAB} et K_{GAB} comme paramètres ajustables.

Le tableau suivant résume les travaux des auteurs de la modélisation des isothermes de sorption

Tableau 1: Modèles des isothermes de sorption

Auteurs	Modèle	Domaine
Langmuir	$W = W_{12} \frac{C \cdot HR}{1 + C \cdot HR}$	HR < 35%
Brunauer Emet Teller	$\frac{HR}{(1 - HR)W} = \frac{1}{C W_{12}} + \frac{C - 1}{C W_{12}} HR$	Courbe complète
Guggenheim Anderson Boer (GAB)	$W = \frac{W_{12} HR C K}{(1 - HR K)(1 + HR C K - HR K)}$	Courbe complète
Harkings	$HR = \exp\left(k - \frac{n}{W^2}\right)$	Courbe complète
Halsey	$HR = \exp[-\exp(A + BT)W^{-c}]$	Courbe complète
Henderson	$HR = 1 - \exp[A(T + B)W^{-c}]$	Courbe complète
Oswin	$HR = \left[1 + \left(\frac{A + BT}{W}\right)^c\right]^{-1}$	Courbe complète
Chung-Pfost	$HR = \exp\left[\left(\frac{A}{T + B}\right) \exp(-C W)\right]$	Courbe complète

La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit par entraînement : produit placé dans un courant d'air chaud et sec à T_a , HR_a . La connaissance de l'isotherme de désorption permet de calculer la teneur en eau d'équilibre X_{eq} du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau X du produit en fin de séchage. La valeur de X_{eq} est un paramètre qui apparaît en particulier dans les modèles permettant de prévoir l'évolution de la teneur en eau d'un produit au cours de son séchage.

1.5 L'air humide :

L'air n'est jamais totalement sec. Il contient une certaine quantité d'humidité sous forme de vapeur d'eau, de gouttelettes d'eau en suspension (brouillards) ou de cristallites de glace [1]

L'air est traité comme un mélange de deux gaz parfaits : l'air sec et la vapeur d'eau. La connaissance et la maîtrise des grandeurs thermo-physiques du mélange air-vapeur sont déterminantes lors d'une opération de séchage.

1.5.1 Diagramme de l'air humide,

Ce diagramme est établi à partir de 2 axes no cartésiens faisant entre eux un angle de 150°
- l'axe des ordonnées, vertical, comporte une graduation de l'enthalpie (h), ou chaleur totale du mélange de 1kg d'air sec et d'une quantité variable de vapeur d'eau.

L'axe des abscisses, oblique, comporte une graduation de la teneur en eau de l'aire (x), l'échelle de cette grandeur est représentée en projection sur un axe horizontal en haut du diagramme, toute la zone inférieure a une courbe dite "courbe de saturation" étant inutile.

Ce diagramme permet à partir de la connaissance de deux paramètres, de déterminer toutes les autres caractéristiques du mélange. Le point figuratif d'un état donne de Lair s'appelle "point caractéristique"

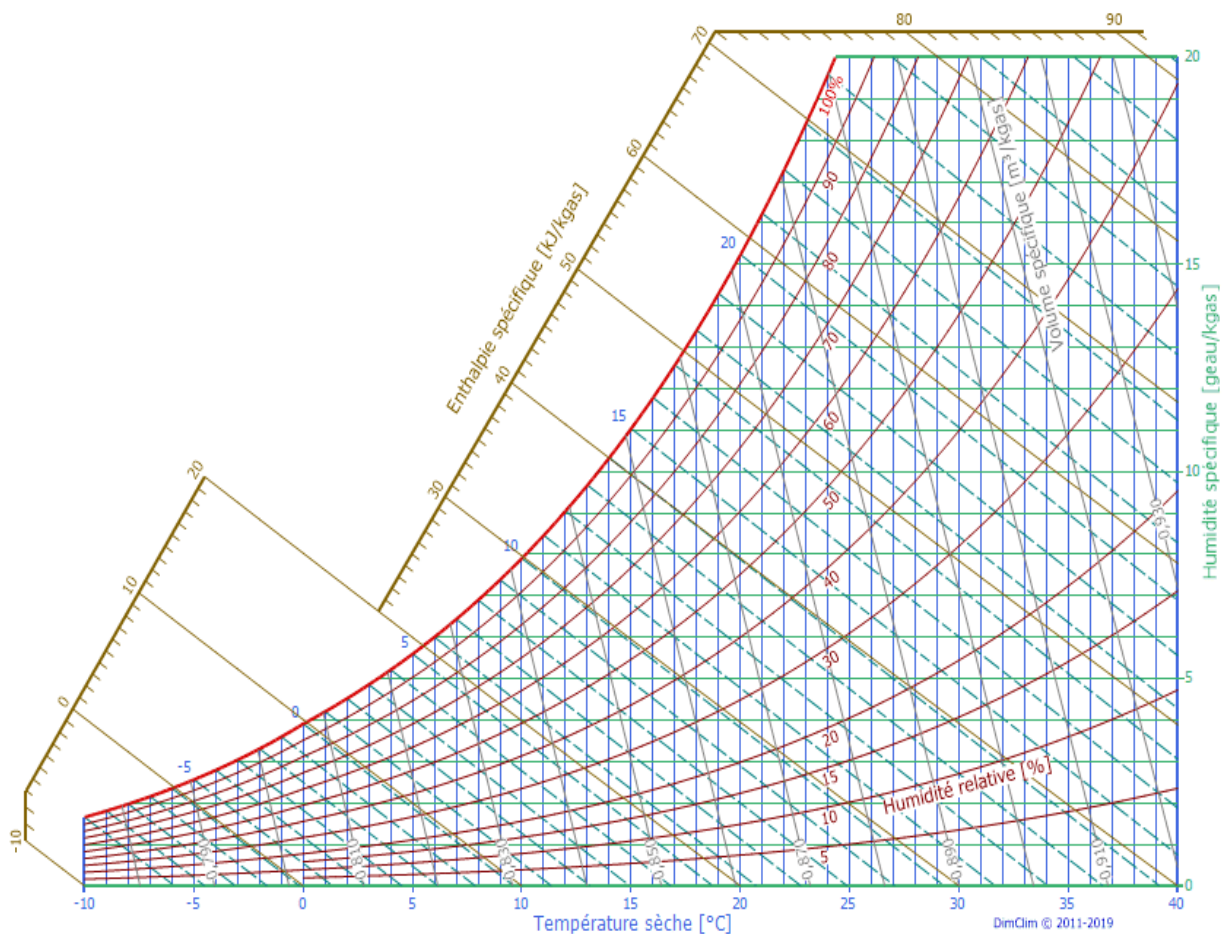


Figure 3: Diagramme de l'air [6]

1.5.2 Capacité d'Absorption et capacité d'évaporation de l'air

La capacité d'absorption est la quantité de vapeur d'eau que l'air peut absorber à température constante pour être saturé [3].

Le séchage s'effectue à enthalpie constante dans un séchoir à air chaud. En effet, si une fraction de l'enthalpie de l'air sert à vaporiser l'eau, elle lui est restituée par celle de la vapeur formée. Il s'ensuit que la température du produit reste constante et égale à la température humide, si les conditions de séchage et la vitesse d'évaporation sont constantes. Lorsque l'air s'écoule dans un empilement de produit, les conditions de séchage sont variables car il s'humidifie et refroidit à mesure qu'il progresse. La variation d'enthalpie peut alors s'écrire, entre deux points [6] :

$$H_2 - H_1 = C_{p_{\text{eau}}} \cdot T \cdot (W_2 - W_1) \quad (1.7)$$

Où T est la température du produit.

Cette grandeur renseigne sur la capacité d'absorption de l'air lors d'une opération de séchage. En effet, plus l'humidité relative de l'air est basse, plus sa capacité d'absorption de l'eau est importante.

1.6 Comportement des solides humides dans l'air :

1.6.1 Condition de séchage :

Les courbes de désorption montrent que pour une humidité relative $\phi = 1$ (figure 4),

Il existe une teneur en eau limite, appelée teneur en eau critique (X_c), au-dessus de laquelle l'activité A_w est toujours égale à 1. Autrement dit, lorsque la teneur en eau du produit est supérieure à une certaine valeur, la pression de vapeur émise par le produit est identique à celle émise par de l'eau libre [6]:

Si $X > X_c$, $A_w = 1$ et $P_{vs} = P_{vp}$

Cela signifie aussi que la fraction d'eau contenue dans le produit et désignée sous le vocable d'eau d'imprégnation qui se comporte comme de l'eau libre.

La teneur en eau critique X_c varie en fonction de la température.

Lorsque la teneur en eau du produit est inférieure à la teneur en eau critique, l'activité de l'eau est inférieure à 1 [6]:

Si $X < X_c$, $A_w < 1$ et $P_{vp} < P_{vs}$

En somme, la pression de vapeur émise par le produit P_{vp} est inférieure à la pression de vapeur saturante P_{vs} , le produit est entré dans le domaine de l'hygroscopicité et une partie de son eau, « L'eau libre », est fixée par la matière. Plus la teneur en eau du produit est faible, plus la tension de vapeur qu'il émet est réduite et plus l'activité de l'eau est basse.

Soit un solide d'humidité $X < X_c$ à laquelle correspond (pour une température donnée) une humidité relative de l'air à l'équilibre égale à Φ . Si nous plaçons ce solide dans des courants d'air d'humidités relatives Φ_1 et Φ_2 ; nous pouvons examiner, à travers l'isotherme de sorption de (la figure 04) les différents transferts d'eau possibles entre le solide et le courant d'air, et ce suivant les valeurs respectives de l'humidité relative de l'air et de l'humidité du solide. Ainsi, nous pouvons observer les deux comportements suivants :

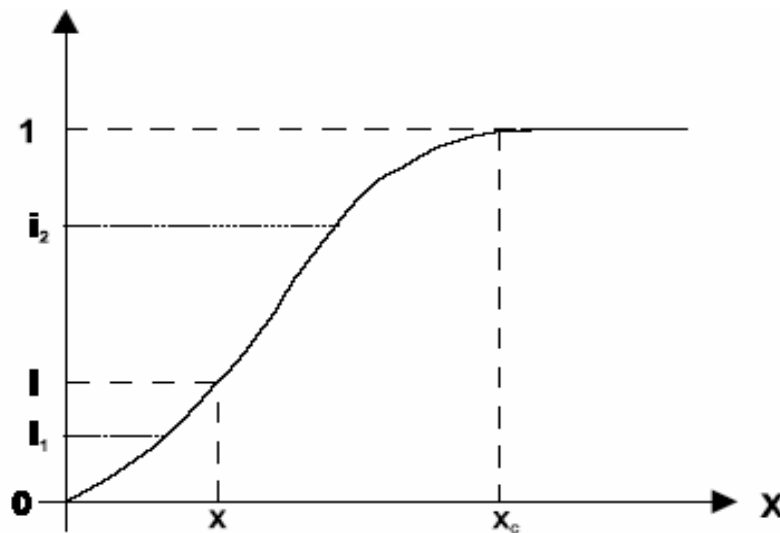


Figure 4: Isotherme de désorption [6]

- pour $\Phi_1 < \Phi$ \longrightarrow désorption de l'eau donc séchage
- pour $\Phi_2 > \Phi$ \longrightarrow adsorption de l'eau, donc mouillage du solide.

Pour qu'il y ait séchage, quel que soit le niveau de teneur en eau du produit et l'activité de l'eau, il faut donc que l'humidité relative de l'air soit constamment inférieure à l'activité de l'eau du produit ($\varphi < Aw$) de façon que $P_{vp} > P_v$. [6]

1.6.2 L'eau extrait lors séchage :

Sur la figure 5, nous pouvons voir que si un solide d'humidité $X' > X^*$ est soumis à un courant gazeux constant d'humidité relative φ , il perd de l'eau jusqu'à ce que son humidité devienne égale à X^* (humidité du solide correspondant à l'équilibre avec l'air). Même en prolongeant le passage du courant gazeux on ne peut sécher plus et descendre en dessous de X^* .

L'intervalle $[X' - X^*]$ correspond à l'humidité libre c'est à dire à l'humidité susceptible d'être enlevée au solide placé dans de l'air d'humidité relative φ et de température T.

On distingue l'humidité liée ($X < X_c$) et l'humidité non liée ($X > X_c$) : l'humidité liée correspond au domaine hygroscopique du solide.

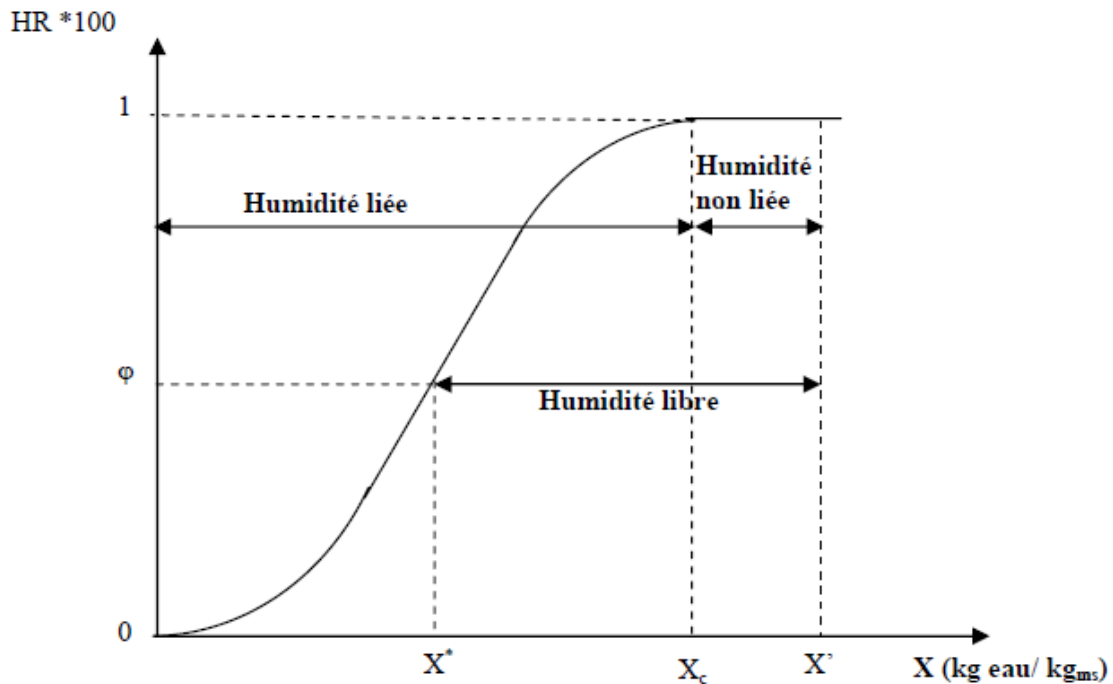


Figure 5: Fraction d'eau évaporée lors d'un séchage par entraînement [6]

1.6.3 Cinétique de séchage :

Au cours du séchage deux types de graph permettent de décrire l'évolution du produit :

-la teneur en eau a base sèche moyenne (X) du produit, en fonction du temps (t) obtenue directement à partir de l'enregistrement de la masse au cours du temps, connaissant la teneur en eau initiale du produit

- la vitesse de séchage qu'il est la dérive de la teneur en eau a base sèche par rapport au temps.

Les courbes théoriques, obtenues pour des produits non hygroscopiques et peu déformables comme la cellulose, permettent classiquement de distinguer trois périodes (Figure 6) :

La période 0 de mise en température du produit, qui disparaît pratiquement lorsque le produit se présente sous forme de particules ou de feuilles ;

Une période 1 de séchage à vitesse constante, qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, l' dans le produit en surface reste proche de 1, et le séchage est contrôlé par les transferts externes.

Pendant toute cette période, la température du produit est uniforme et égale (par définition) à la température du thermomètre humide () de l'air, c'est-à-dire la température de l'air de séchage. À la fin de cette période 1, la teneur en eau critique du produit peut être déterminée ;

Une période 2 de séchage à vitesse décroissante où la surface du produit passe sous la limite supérieure du domaine hygroscopique, l' en surface du produit est inférieure à 1 et les transferts internes de matière deviennent limitant. La température du produit augmente à partir de sa surface. La teneur en eau base sèche du produit diminue jusqu'à atteindre une valeur limite () qui dépend des conditions de l'air de séchage (température et humidité relative)

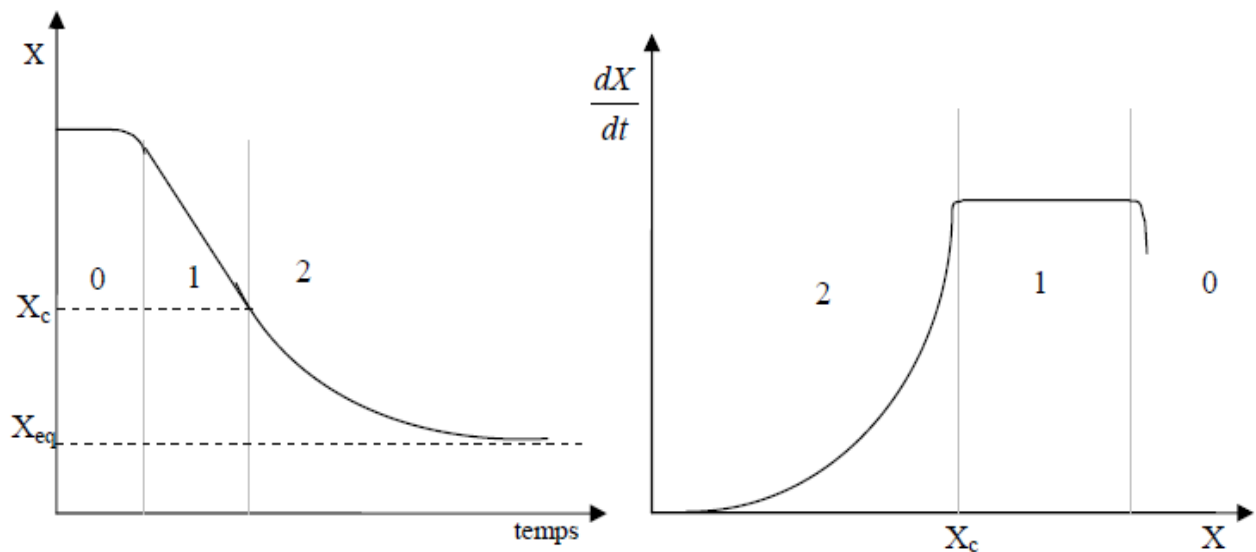


Figure 6: Courbes théoriques caractérisant un séchage par convection forcé [7]

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

1.6.3.1 Teneur en eau normée ou réduite [8]:

Pour comparer les différentes cinétiques de séchage il est souvent préférable d'utiliser des grandeurs réduites .

La teneur en eau réduite est donnée par cette relation

$$X^* = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} \quad (1.8)$$

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).

1.6.3.2 Vitesse de séchage normée $f(X^*)$:

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 $(-\frac{dX}{dt})_0 = \text{cste}$, qui peut soit être déduite théoriquement ou mesurée sur la courbe expérimentale $-\frac{dX}{dt} = f(X)$. Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{-\frac{dX}{dt}}{(-\frac{dX}{dt})_0} = F(X^*) \quad (1.8)$$

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

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_0 = \alpha \cdot \beta \cdot V_a^\beta \cdot (T_a - T_h) \quad (1.9)$$

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_a : est la vitesse de l'air de séchage.

1.7 Les modèles empiriques de cinétique de séchage [7] :

En général, le séchage en couche mince s'utilise pour sécher une couche des particules ou des tranches d'échantillon (Akpinar, 2006) [8]. Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire le phénomène de changement de la teneur en eau, du transfert de chaleur et de la masse dans le séchage.

Les équations peuvent être des modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques. Le premier d'entre eux ne comporte que la résistance interne au transfert de masse (Parti, 1993) [9], tandis que les autres considèrent la résistance externe au transfert de masse entre le produit et l'air (Özdemir & Onur Devres, 1999) [10]. Les modèles théoriques expliquent clairement les comportements du séchage du produit et peuvent être utilisés dans toutes les conditions du procédé, bien qu'ils comportent de nombreuses hypothèses provoquant des erreurs considérables. Les modèles théoriques les plus utilisés sont dérivés de la diffusion. De la même façon, les modèles semi-théoriques sont généralement issus de la deuxième loi de Fick et des modifications de ses formes simplifiées

Les modèles empiriques ont des caractéristiques similaires aux modèles semi-théoriques. Ils dépendent fortement des conditions expérimentales et donnent des informations limitées sur les comportements de séchage du produit (Keey, 1972) [11].

Parmi ceux-ci, les modèles les plus utilisés sont (Erbay & Icier, 2010) [12] listés ci-dessous.

1.7.1 Modèle de Lewis

Le modèle de Lewis est la solution générale de l'équation de Fick. Ce modèle ne considère que la diffusion basée sur la migration de l'eau. Le modèle simple de Lewis est exprimé comme suit [13]:

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \quad (1.10)$$

1.7.2 Modèle de Newton

La forme générale du modèle de Lewis prend la forme exponentielle suivante [14] :

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt) \quad (1.11)$$

Où : k est une constante de séchage, qui dépend de la température, l'humidité absolue et la vitesse de l'air ainsi du diamètre du produit utilisé. Ce modèle a été utilisé par Sacilik and Elicin (2006) et Doymaz (2004a) [14].

1.7.3 Modèle de Page

Page (1949) [15] a modifié le modèle de Lewis pour obtenir un modèle plus précis en ajoutant une constante sans dimension empirique (n) et à appliquer cette approche au séchage des grains (Erbay & Icier, 2010) [12] :

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-kt^n) \quad (1.12)$$

Où : k et n sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et de la nature du produit.

1.7.4 Modèle de Henderson et Pabis

Henderson and Pabis (1962) [16] ont amélioré le modèle du séchage en utilisant la deuxième loi de Fick de la diffusion et en l'appliquant au séchage des grains :

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = A \cdot \exp(-kt^n) \quad (1.13)$$

Où : A et k sont des constantes de séchage

1.7.5 Modèle logarithmique

Chandra and Singh (1994) ont proposé un nouveau modèle dérivé du modèle de Henderson et Pabis avec l'addition d'un terme empirique :

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-kt^n) + c \quad (12)$$

Où: k, a et c sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et sa vitesse.

1.7.6 Modèle de Midilli

Midilli. (2002) [17] ont proposé un nouveau modèle avec l'ajout d'un terme supplémentaire empirique intégrant le temps t au modèle Henderson et Pabis. Ce nouveau modèle est la combinaison d'un terme exponentiel et d'un terme linéaire. Ils ont appliqué ce nouveau modèle pour le séchage du pollen, de champignons, et de pistache pour différentes méthodes de séchage.

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-kt^n) + b \quad (13)$$

Où: b est une constante empirique (s^{-1}).

1.7.7 Modèle modifié de Midilli

Ghazanfari et al. (2006) [18] ont souligné que le terme a du modèle de Midilli (Eq. 13) devait être 1 pour $t = 0$ et ont proposé la modification suivante :

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-kt^n) + b.t \quad (14)$$

Ce modèle n'a pas été appliqué à un produit alimentaire, mais a donné de bons résultats avec la fibre de lin.

1.7.8 Modèle de Demir et al.

Demir et al. (2007) [19] a proposé un nouveau modèle qui est semblable aux modèles d'Henderson et Pabis, modifié de Page-I, logarithmique, et de Midilli :

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-kt^n) + b \quad (15)$$

Ce modèle vient d'être proposé et appliqué au séchage d'olives vertes et a obtenu de bons résultats.

1.7.9 Modèle à deux paramètres

Henderson (1974) [16] a proposé d'utiliser les deux premiers termes de la série de solution générale de la deuxième loi de Fick pour corriger les lacunes du modèle Henderson et Pabis. Le nouveau modèle s'écrit comme suit :

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a \exp(-kt_1) + b \exp(-kt_2) \quad (16)$$

Où : a, b sont définis comme l'indication de la forme et généralement nommés tels que les constantes du modèle (sans dimension), et k_1, k_2 sont les constantes cinétiques du séchage (s^{-1}). Ces constantes sont obtenues à partir de données expérimentales et (Eq. 16) est généralement connue sous la dénomination de modèle à deux paramètres.

1.7.10 Modèle exponentiel à deux paramètres

Sharaf-Eldeen et al. (1980) [20] ont modifié le modèle à deux paramètres en réduisant le nombre de constantes (3 au lieu de 4) en supprimant la constante b. Ils ont souligné que b dans le modèle à deux paramètres (Eq.16) devait être égale à $(1 - a)$ pour $t = 0$ et $MR = 1$ et ont donc proposé la modification suivante :

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = a \exp(-kt) + (1 - a). \exp(-kat)$$

L'équation (Eq. I.21) est généralement connue comme le modèle exponentiel à deux paramètres.

Tableau 2: Les modelés mathématiques pour décrire la cinétique de séchage.

Modèle	Expression de la teneur en eau	Référence
Newton	$X = \exp(-kt)$	W. K. Lewis, 1921 [20]
Page modifié I	$X = \exp(-(kt)^n)$	D. D. Overhults & al., 1973 [22]
Two-term	$X = a.\exp(-k_0t) + b.e(-k_1t)$	S. M. Henderson, 1974 [26]
Two-term exponential	$X = a.\exp(-kt) + (1-a).\exp(-kat)$	Y. I Sharaf-Elden, & al., 1980 [27]
Approximation de la diffusion	$X = a.\exp(-kt) + (1-a).\exp(-kbt)$	A. S. Kassem, 1998 [29]
Henderson et Pabis modifié	$X = a.\exp(-kt) + b.\exp(-gt) + c.e(-ht)$	V. T. Karathanos, 1999 [30]
Verma et al.	$X = a.\exp(-kt) + (1-a).e(-gt)$	L. R. Verma, & al., 1985 [31]
Midilli-Kucuk	$X = a.\exp(-kt^n) + b.t$	A. Midilli, et al., 2002 [32]

1.8 TECHNOLOGIES DE SÉCHAGE :

Le séchage est une opération de transfert couplé de chaleur et de masse pour laquelle il est nécessaire de fournir de l'énergie. Plusieurs types de séchoirs et de méthodes de séchage, ont été adaptés à différentes situations.

D'utilisation facile et pratique, les paramètres opératoires des procédés classiques de séchage peuvent être aisément contrôlés. Ces procédés dits classiques sont le séchage au soleil, le séchage solaire et le séchage à l'air chaud. Ces les plus couramment utilisés pour les fruits et légumes (Mounir et al., 2014).

1.8.1 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] :

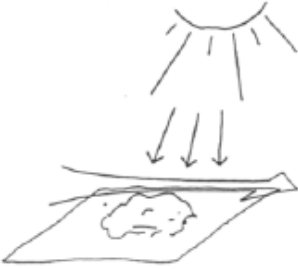
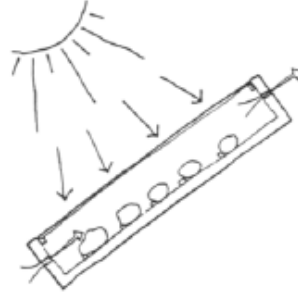
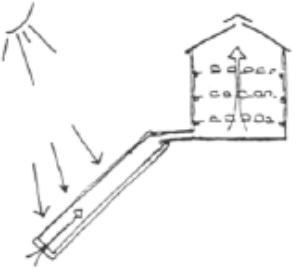
Fonctionnement schématique	Type de séchage	Caractéristiques
	<p>Séchage naturel ou au soleil</p>	<ul style="list-style-type: none"> - très faible coût - travail important - perte de produit
	<p>Séchage solaire direct</p>	<ul style="list-style-type: none"> - produit protégé - séchage rapide - une certaine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

Figure 7: Différents types de séchoirs

1.8.2 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.

1.8.3 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.

1.8.4 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.

1.8.5 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.

Nous pouvons classer les sécheurs solaires comme sécheurs solaires directs, indirects et hybrides, Selon le principe de fonctionnement c'est-à-dire la méthode de collecte de l'énergie solaire et de sa technique de conversion de l'énergie utile.

Puisque dans notre travail nous allons dimensionner un séchoir solaire indirect, on s'intéresse uniquement ce dernier.

1.8.6 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.

1.8.6.1 Classification des séchoirs indirects :

Deux méthodes du séchoir indirectes sont mentionnées dans la littérature, ce sont le type à convection naturelle et le type à convection forcée [22]. La figure 2 montre la classification supplémentaire des séchoirs solaires indirects.

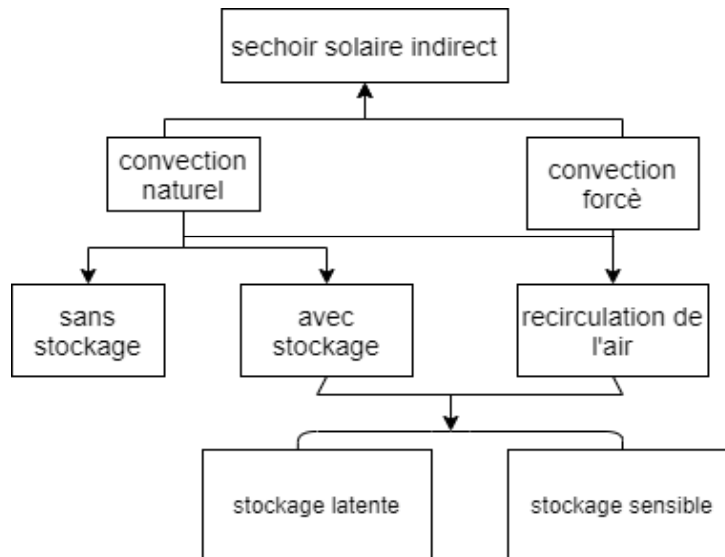


Figure 8:Schéma Classification des séchoirs indirects

1.8.6.2 Avantages

Le séchoir indirect est plus rapide. Les aliments peuvent être séchés dans une période plus courte. Les séchoirs solaires améliorent le temps de séchage par utilisation d'un trans lucide ou transparent dans la zone de collecte du rayonnement solaire qui emprisonne la chaleur à l'intérieur du séchoir, en élevant la température de l'air.

D'après une Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux (Nguyen 2015) et autre ils ont constaté que le séchoir indirect :

- Il est plus efficace : les aliments sont séchés plus rapidement et les risques de détérioration sont ainsi diminués.
- La qualité nutritionnelle est améliorée. Dans les conditions optimales, le séchage solaire permet de conserver la plupart de la valeur nutritive du produit telle que la vitamine C.
- Il reste bon marché. L'énergie solaire est disponible et gratuite.

1.8.6.3 Inconvénients :

Le séchage indirect a des inconvénients aussi, il est plus compliqué à réaliser, le coût est élevé, mais plusieurs études économiques publiées, indiquent que le séchoir solaire indirect a un revenu d'investissement intéressant.

1.9 Conclusion :

Parmi toutes les méthodes de conservation des aliments, le séchage reste une opération très avantageuse en raison de la durée de conservation longue, de la facilité de stockage à température ambiante et de la réduction de masse où est une opératoire importante dans le transport.

De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées dans le passé concernant l'amélioration des performances du séchage. Beaucoup de modèles proposés dans la littérature comportent des paramètres empiriques.

2 Etat de l'art :

L'importance du séchage au soleil a attiré de nombreux chercheurs dans le but d'améliorer son efficacité et d'étudier les facteurs d'influence

2.1 Synthèse bibliographique sur le séchage :

Dans cette partie, nous effectuons une synthèse bibliographique sur les travaux de séchage des produits agroalimentaire dans des séchoirs solaires. Ils sont divisés en deux 2 grandes branches : le séchoir direct et le séchoir indirect,

Nous passerons en revue les méthodes utilisées, les solutions technologiques, aussi voir les approches avec lesquelles sont abordées les problèmes de modélisation de l'opération de séchage. Classé par le paramètre d'influence et ordre chronologique.

2.1.1 Prétraitement :

Ferradji et al ont construit un séchoir à convection forcée pour sécher l'abricot et proposent d'étudier l'influence des prétraitements sur le taux d'évaporation de l'eau pendant le processus de séchage, le blanchiment et le sulfitage. Ils ont rapporté que pour la même durée de séchage, une minute de blanchiment, les échenillions ayant un poids moyen de $10,84 \text{ g} \pm 1,76$ et blanchis pendant une minute, perdent 50 % de leur poids initial. Tandis que les fruits blanchis pendant 3 minutes, perdent 68 % de leur poids initial.

De plus, le sulfitage préserve une couleur attrayante. [28]

Dans son travail, **Ibrahim Doymaz** a mené une étude expérimentale de séchage des prunes d'ente dans un séchoir de laboratoire à une température de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ et une vitesse de l'air de 1.2 m/s . Les échantillons de prunes ont été préalablement traités dans une solution alcaline contenant l'oléate éthylique. Les résultats expérimentaux ont montré que le prétraitement des prunes avec de l'oléate éthylique augmente les taux de séchage par convection forcée. Le temps de séchage des échantillons préalablement traités était 29.4 % plus court que celui des échantillons non traités. Pour le tracé de la courbe simulant la cinétique de séchage, Doymaz utilise six modèles, Les résultats obtenus ont été comparés. L'auteur conclut que les deux modèles les mieux adaptés pour prédire la cinétique de séchage sont : le modèle « two-exponential model » pour les prunes non traitées et le modèle de Wang et Singh pour les prunes préalablement traitées. [14]

2.1.2 Séchage direct, effet de cheminée :

MENNOUCH et al ont étudié un séchoir direct à effet de serre avec l'effet de cheminée solaire, réalisé pour sécher les dattes. Durant les tests, ils ont remarqué un phénomène de brunissement indésirable, Ils constatent le résultat que le séchage direct influence négativement sur la qualité des produits agricoles. Ils ont rapporté aussi que la cheminée accélère un peu plus le séchage par rapport une serre fermé. [29]

2.1.3 Effet de serre

BADAOUI et al ont conçu une serre pour le séchage des déchets de tomate. Une distribution en 54 claies, par couche de 25mm, et pour un séchoir de dimensions de 4 x 3 x 3.6 m, un mur teinté en noir pour être un absorbeur.

La température obtenue autour du produit atteint 56.6°C et 100 kg de déchets sont séchés pendant 5 h. C'est un résultat très motivant, car on a un gain économique, puisque le séchage réduit le volume, donc influe sur le cout de transport et de stockage. [30]

2.1.4 Effet de l'épaisseur :

HADI SAMIMI a développé un séchoir solaire indirect en convection forcé avec un système de poursuite pour le capteur a air, il a étudié l'influence d'épaisseur sur la cinétique de séchage 3,5,7mm dans différent vitesse de l'air, comme résultat, il a indiqué que Le suivie diminué le temps de séchage de 36,6% Pour les tranches de 5mm de 6,5h min à 4h, l'expérience montre que l'effet de l'épaisseur de la tranche sur la durée de séchage était plus important que la vitesse de l'air. [31]

DJEBLIA et al utilisent la même serre précédente (BADAOUI 2018), ils ajoutent un capteur à air, pour éliminer la différence de température entre le haut et le bas de la serre. La serre sert à sécher des tomates. Ces dernières sont coupées en tranche de 5,10,15 et 20 mm, et en morceaux, sur 2, 4,8, et 16. Les tranches de 5 mm séché à 5 h, 2 cm en 21 h, et celles qui étaient coupées en 2 furent détériorés. Celles qui étaient coupée en 8 ; dans 16h et ½, L'étude expérimentale confirme que la forme a un fort effet sur la durée de séchage. [32]

2.1.5 Effet de température de séchage :

CHEMKHI et al étudient la cinétique de séchage des cubes de pomme de terre. La perte d'eau par évaporation pendant le processus de séchage engendre des changements importants dans la taille des produits (diminution de volume). Cette rétraction du volume rend délicate l'analyse du transfert de chaleur et de masse. C'est pourquoi, les auteurs proposent un modèle de transfert simultané de chaleur et de masse, couplé à un modèle traduisant le comportement élastique du

produit au cours du séchage. la résolution numérique du modèle basé sur la loi de Fick ainsi établi a permis de déterminer la cinétique de séchage des cubes de pomme de terre pour différentes conditions de température, d'humidité relative et de vitesse d'air de séchage. Le modèle permet, par ailleurs, de mettre en évidence l'influence directe de l'épaisseur sur le temps de séchage global. Ce temps est d'autant plus court que le produit est mince.

Pour vérifier la validité du modèle mathématique, des expériences de séchage ont été effectuées sur une installation expérimentale de laboratoire. Les conditions expérimentales étaient comme suit : les températures de séchage 38, 42 et 47 °C, les humidités relatives 14, 20 et 23 % et les vitesses de l'air 1.5, 3 et 4.5 m/s. la comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux témoigne d'un accord satisfaisant. [33]

M. TOUATI a testé l'effet de la vitesse de l'air asséchant et la température de séchage par un séchoir solaire à convection forcée destiné à sécher les feuilles de menthe. Il a fixé la vitesse 0.5 ,1 ,1.5 ,2 m/s et les températures à 25,30 ,35 °C, Il constate que la vitesse de séchage augmente avec l'augmentation de la Température, L'influence du débit d'air, est moins importante que celle de la température de séchage. [34]

OUAABOU et al ont étudié l'impact du procédé de séchage solaire sur la cinétique de séchage, et sur le profil bioactif de la cerise douce marocaine, un montage de champ de captation solaire a air liée à la chambre de séchage avec un système d'appoint électrique, en utilisant le modèle de Midilli-kucuk ainsi qu'une étude expérimentale du processus de déshydratation des cerises pour plusieurs températures T air asséchant 60,70,80 °c et a permis aux auteurs de valider le modèle proposé.

Ils ont trouvé une augmentation de l'activité de l'antioxydant, Les échantillons ont été surveillés pendant 3 ;6 ;12 mois et passé les tests . les auteurs disent que juste 5% d'utilisation de l'énergie de l'appoint durant toute la durée de séchage. [35]

A. BELGHIT s'est intéressé à l'étude d'un séchoir solaire indirect fonctionnant en convection forcée. Il s'agit d'un système sans stockage ni recyclage d'air dont les éléments constitutifs sont , un générateur d'air chaud (insolateur à air ayant une configuration parallélépipédique), une unité de séchage (armoires à claies) et des ventilateurs alimentés par des photopiles, qui permettent d'assurer le fonctionnement autonome du système.

Le travail a consisté à modéliser le système solaire considéré.

La configuration de l'enceinte de séchage où les claies sont superposées suivant la direction de l'air qui les traverse a permis de considérer que les échanges se font uni directionnellement suivant l'écoulement de l'air.

L'auteur propose des équations traduisant le bilan d'énergie de chacun des éléments constituant la chambre de séchage à savoir : les faces intérieure et extérieure de la paroi, le lit de séchage (fruit) et le fluide caloporteur (air). Le système d'équation ainsi établi a été résolu par la méthode des différences finies implicite.

Les résultats obtenus montrent l'influence de la température sur le taux de masse d'eau évaporée. Plus la température est grande plus le temps de séchage est court. L'effet de la vitesse de l'air sur le temps de séchage est moins important. [36]

2.1.6 Effet de stockage de chaleur :

Arun et al construisent séchoir solaire, un capteur à air muni un stockage par paraffine (température changement de phase 58-60°C), pour sécher les bananes. Les chercheurs ont intéressé à l'effet des différentes distances entre les claies [5 ;10 ; 15] cm, ainsi que plusieurs débits d'air et diffère épaisseurs. L'étude expérimentale que les auteurs ont menée montre que la distance entre les claies à un fort influence sur la durée de séchage et aussi une amélioration du rendement (42,5% pour 15cm ; 38% pour 10cm). De point de vue énergétique, les paraffines stocker 9.16 kW pour un débit d'air de 0,03kg/s. alors il faut un espacement optimal entre les claies. [37]

2.1.7 Effet de dessiccation :

Merlin et al utilisé un séchoir solaire mixte (direct et indirect) convection naturelle avec un stockage et dessiccation par le sel « NaCl » destinée à sécher le piment rouge, l'humidité de l'air asséchant diminue de 45% à 19,91% après l'avoir traversé le dessiccateur, ils ont obtenu un gain de deux heures de fonctionnement hors ensoleillement, ils ont rapporté qu'en peut utiliser Le NaCl comme une matière de stockage de chaleur et un dessiccateur. [38]

2.2 Conclusion :

Le séchoir solaire indirect est un outil important pour éviter les pertes après la récolte des produits agro-alimentaires. Un séchoir indirect bien conçu est nécessaire pour un processus de séchage efficace, de meilleures performances avec un coût d'exploitation et de maintenance minimum. En outre, il est préférable que le système puisse fonctionner après une heure de démarrage d'ensoleillement, de sorte que les aliments puissent être séchés en continu et que le gaspillage puisse donc être réduit. Parmi les différents types de séchoirs, il est recommandé

d'utiliser la convection forcée, avec un système de stockage sensible ou Latente pour accélérer et assurer le processus de séchage pendant les périodes de faible ensoleillement. Il exclut également la dépendance des sources de chaleur auxiliaires.

Le système de stockage latent a la capacité de fournir une chaleur constante pendant le séchage, par conséquent, il est plus préférable que le stockage Sensible. Il est recommandé d'effectuer une analyse numérique avant de développer le séchoir solaire pour des applications industrielles et à grande échelle.

Les dimensions du système et d'autres paramètres de conception peuvent être optimisés en résolvant des problèmes numériques. L'analyse numérique permet d'analyser les performances à court et à long terme de séchoir.

Sur la base des paramètres d'influence, les principaux éléments requis pour le dimensionnement sont :

- le rythme de la production de produit sec
- le temps que le produit frais peut passer sans se dégrader en stockage amont
- le rythme d'enlèvement de l'eau du produit,
- la température de l'air asséchant
- le débit d'air circulant dans le séchoir
- la puissance du ventilateur requis
- la puissance thermique nécessaire pour extraire l'eau du produit au rythme envisagé
- le dimensionnement de champs de captation qui transmettent la puissance solaire à l'air
- la puissance thermique de l'appoint, le cas échéant.

3 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 des abricots, et autre.

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 en va entamer la modélisation mathématique du phénomène du séchage en utilisant la méthode de la courbe caractéristique de séchage développée dans le chapitre précédent. 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 l'abricot [48].

Pour faire un séchage correct, nous allons avoir besoin de la quantité de chaleur et de l'énergie suffisons qui dépendent de plusieurs facteurs, la teneur en humidité, du système de séchage utilisé, de la température de séchage, de la quantité et des caractéristiques spécifiques du produit agricole concerné, l'épaisseur de la couche superficielle, dimensions du produit, vitesse de l'air.

3.2 Description du système de séchage :

Nous disposons d'un séchoir solaire indirect, fonctionnant en convection forcée, relié à un champ de captation N°1 (Fig. 7), le système est lié avec ballon de stockage d'eau chaude N°2 .

Une chambre de séchage N°3 (Fig. 7), de forme parallélépipédique réalisée entièrement en tôle galvanisée isolé. Sur sa face avant, La porte à double battant permet l'entrée et la sortie des chariots transportant des claies de produits. Ceux-ci sont disposés sur des claies en grillage permettant le passage de l'air.

Cette unité de séchage est alimentée par de l'air chauffé à travers un échangeur air/eau N°5 . Ce fluide caloporteur est soufflé par un ventilateur fixé à l'entrée du séchoir afin d'avoir une bonne distribution de l'air.

Le système a deux appoints fournit éventuellement de l'énergie supplémentaire quand la température de l'air à l'entrée de la chambre de séchage ne satisfait pas les besoins du produit pour le séché.

L'équipement comprend aussi des appareils de contrôles et de régulation, des soupapes de sécurité de pression, des vannes, des pompes et des tuyaux.

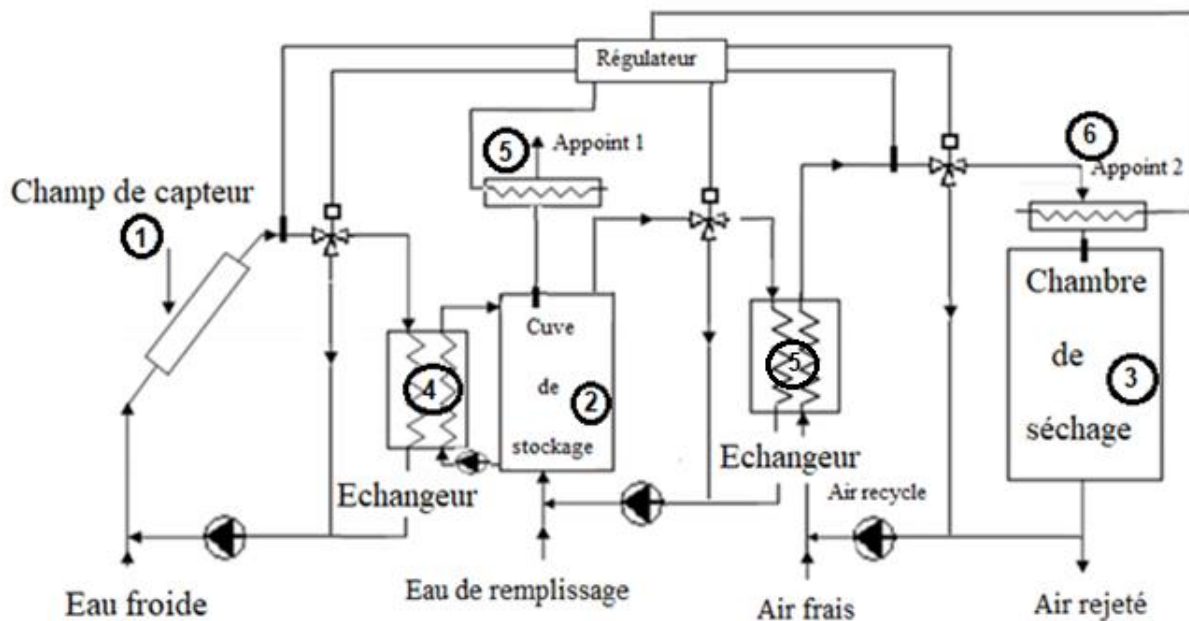


Figure 9: Représentation schématique du système solaire de séchage étudié.

3.3 Fiche technique de la chambre de séchage :

Le choix de matériau est selon plusieurs critères comme la rigidité, la dilatation et l'oxydation. Le tableau suivant représente une fiche technique fournissant des caractéristiques de la chambre de séchage.

Tableau 3: fiche technique de la chambre de séchage

Matériau	ACIE INOX 304
Dimensions de la chambre Hauteur - Largeur – Profondeur	1.8 m * 1.2 m * 1.2 m
Isolation	Mousse polyuréthane
Nombre de niveau et dimensions de chariot	25 claies 1.64 x 0.95 x 0.6 m
Capacité de séchage:	100 kg/chariot
Surface de séchage	23 m ²
chargement	Porte à double battant située sur la face avant de la chambre de séchage

3.4 Matière première à sécher :

3.4.1 Le choix de produit :

Notre étude de modélisation va porter en premier lieu sur le séchage des produits végétaux en différentes épaisseurs, puis par la suite en prendra comme cas particulier le séchage de l'abricot.

Le choix des abricots pour notre étude repose sur plusieurs raisons :

- L'abondance de ce fruit en Algérie, ainsi que sa grande consommation.
- La surproduction, la disponibilité, le coût d'investissement et le retour, le marché visé.
- La disponibilité des résultats des travaux expérimentaux sur cette plante, qui sont nécessaires pour notre modélisation.

L'abricot est un fruit riche en vitamines et en fibres. Plusieurs variétés cultivées sont très adaptées et très productives, une partie du surplus de production est transformé en abricot sec.

L'abricot, fruit ou drupe de l'abricotier, est caractérisé par une peau veloutée, une chair charnue, peu juteuse, sucrée, parfumée, de couleur jaune orangé. Il se sépare aisément en suivant le sillon médian. Le noyau s'enlève facilement de la chair. Fruit fragile, sensible aux manipulations et aux transports. Le degré de maturité de l'abricot est apprécié par le parfum et la souplesse du fruit. La couleur n'est pas un critère fiable, car certaines variétés "rougissent" bien avant d'être mûres. Le fruit pour la consommation en frais est très fragile et doit être cueilli deux à quatre

jours avant maturité et très tôt le matin ou le soir. Le fruit supporte une vingtaine de jours de conservation à - 0,5 °C et 85 % d'humidité [revue 2008 Msila] D'après (**M. LAHBARI**) le une teneur en eau de 84% ou 0.84 kg d'eau/kg de produit pour le Rosé.

3.4.2 Caractéristique aérothermique de procédure de séchage :

Selon les normes européens (**NORME CEE/ONU DF-15**) le séchage des abricots doit être selon les conditions suivantes :

- Ne température de 70°C (+1°C) sous une pression ne dépassant pas 100 mm de mercure.
- Ne doit pas être supérieure à 22 %.
- Une couleur sensiblement uniforme ou légers défauts de coloration.
- L'anhydride sulfureux (SO₂) est considéré comme un agent de conservation ne doit pas dépasse le 2000 ppm.

3.4.3 Déroulement de séchage :

3.4.3.1 Lavage des abricots frais

Un lavage va permettre d'enlever les poussières et les insectes. Ceci doit garantir une hygiène constante pour limiter tout développement de micro-organismes.

Le lavage consiste à plonger les abricots dans un bain d'eau chlorée à raison de 100 ppm [12], et les frotter délicatement, puis les rincer soigneusement à l'eau claire.

Déposition des abricots dans deux barils ayant chacun une capacité de 50 L à raison de 25 kg d'abricot frais et de 2,5 g de chlore dissout en pastille par baril, puis compléter le baril avec de l'eau.

3.4.3.2 Soufrage

Les prés traitements sont utilisés pour modifier la structure du produit en vue de faciliter le séchage et d'éviter la contamination microbienne et les dégradations biochimiques (réaction enzymatiques, brunissement...). Une étape de sulfitage est pratiquée afin de garantir une meilleure hygiène. Le principe consiste à brûler du soufre solide (en poudre) dont les fumées vont imprégner les surfaces des produits à sécher.

3.4.3.3 Tri après séchage

Le tri s'effectue manuellement. Il consiste à éliminer les produits hors normes, notamment au niveau de la couleur, la texture et la forme. Par suite de cette étape, le conditionnement des abricots doit rapidement suivre afin d'éviter toute ré humidification possible des abricots secs dans de grands récipients.

3.4.3.4 Conditionnement

Différentes possibilités d'emballages existent telles que : barquettes en bois, barquettes en polystyrène, barquette en carton, sachet en plastique ou en papier.

3.5 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 l'abricot 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).

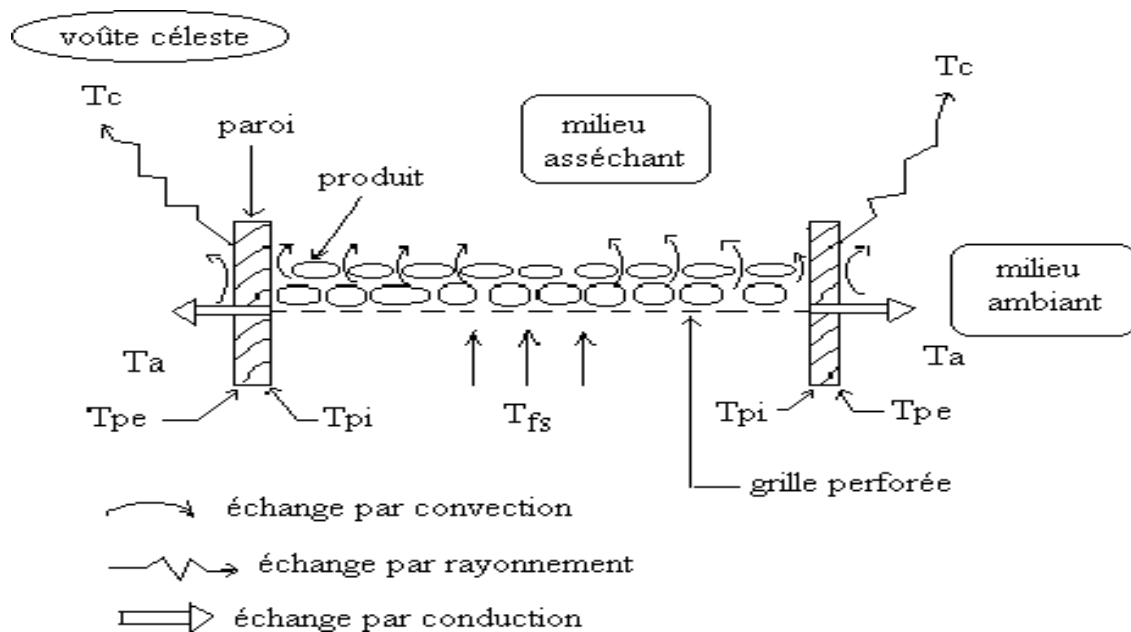


Figure 10:Schéma des transferts de chaleur et de masse pour une claie

3.5.1 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 suivantes.

- 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 couche épaisse ; Audibert et J. Lichou, 1989 [39] J.M. Legave 2006 [40] F. Bahlouli et al 2008 [41] , A. Kanmogne, 2002 [42] et L. Bennaoum, & A. Belhamri, 2002 et 2005) [43] ont montré que ces hypothèses sont réalistes et les simplifications n'ont pratiquement pas d'influence sur les résultats.

3.5.2 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

$$\Delta E = W_{tr} + Q \quad \text{ou} \quad E_2 - E_1 = W_{tr_{1 \rightarrow 2}} + Q_{1 \rightarrow 2} \quad (2.1)$$

Sachant que :

$$E = U + E_c + E_p \quad (2.2)$$

Avec :- E : Energie totale du système

- U : Energie interne du système.

Chapitre 03 : Description et modélisation du séchoir

- E_c : Energie cinétique du système.
- E_p : Energie 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 $t+dt$:

$$\frac{DE}{Dt} = P_{\text{méca}} + P_{\text{cal}} \quad (2.3)$$

$$\text{Avec : } \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial E}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad}(E) \quad (2.4)$$

Ou \vec{v} : La vitesse du système.

3.5.2.1 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 :

$$\frac{DE}{Dt} = \frac{D(U+E_c+E_p)}{Dt} = \frac{D(U+E_p)}{Dt} = \frac{DH}{Dt} \quad (2.5)$$

$$\frac{DE_c}{Dt} = \frac{\partial E_c}{\partial t} + \frac{\partial E_c}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial t} = 0$$

H : L'enthalpie de l'air. Selon la loi des gaz parfaits et avec les hypothèses :

$$\frac{DH}{Dt} = m_a \cdot C_{pa} \cdot \frac{DT}{Dt} = m_a \cdot C_{pa} \frac{\partial Z}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (2.6)$$

$$\frac{DH}{Dt} = m \cdot v \cdot C_{pa} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (2.7)$$

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 :

$$m_a \cdot v = m_a \frac{dz}{dt} = \dot{m}_a \quad (2.7)$$

\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 (l'abricot) et d'autre part aux parois du séchoir.

Chapitre 03 : Description et modélisation du séchoir

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

$$\dot{m}_a C_{pa} dz \frac{\partial T}{\partial z} = h_{pr} S_{pr}(T_{pr} - T_a) + h_p S_p (T_p - T_a) \quad (2.8)$$

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 , les parois du séchoir sont adiabatiques et Les échanges radiatifs et conductifs à l'intérieure du séchoir sont négligeables.

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

$$\dot{m}_a C_{pa} (T_a - T_{ae}) = h_{pr} S_{pr}(T_{pr} - T_a) \quad (2.9)$$

Avec :

- T_{ae} : 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 évaporé l'eau qu'il contient. La variation de l'enthalpie du produit au cours du temps sera :

$$\frac{DH}{DT} = m_{pr} \cdot C_{pr} \cdot \frac{DT_{pr}}{Dt} = m_{pr} \cdot C_{pr} \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} \quad (2.10)$$

Ainsi l'équation du bilan thermique du produit devient :

$$m_{pr} \cdot C_{pr} \frac{\partial T_{pr}}{\partial t} = h_{pr} S_{pr}(T_a - T_{pr}) - L_v \cdot \dot{m} \quad (2.11)$$

Avec :

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

$$\dot{m} = m_{prs} \cdot \left(-\frac{dx}{dt} \right) \quad (2.12)$$

Avec :

Chapitre 03 : Description et modélisation du séchoir

- m_{prs} : Masse du produit sec.

Dans le cas particulier de la disposition du produit en forme hémisphérique, Selon la littérature [3] [8], 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 :

$$h_{pr} S_{pr} (T_a - T_{pr}) = L_v \cdot \dot{m} \quad (2.13)$$

Selon l'équation (3.9) on peut écrire :

$$\dot{m}_a C_{pa} (T_a - T_{ae}) = -L_v \cdot \dot{m} \quad (2.14)$$

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

$$T_a = T_{ae} + \frac{m_{prs} \cdot L_v}{\dot{m}_a \cdot C_{pa}} \left(\frac{dX}{dt} \right) \quad (2.15)$$

C) 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 :

$$\frac{\partial T_{pr}}{\partial t} + \text{div}(m_{pr} \cdot \vec{v}_p) = \sigma_{pr} \quad (2.16)$$

m_{pr} : Masse du produit.

\vec{V}_{pr} : Vitesse du produit qui est nulle dans notre cas.

σ_{pr} : Terme source pour le produit.

Et comme :

$$X = \frac{m_{pr} - m_{prs}}{m_{prs}} \quad (2.17)$$

D'ou

$$m_{pr} = m_{prs} (1 + X) \quad (2.18)$$

Donc l'équation (2.15) devient :

$$m_{prs} = \frac{\partial X}{\partial t} = \sigma_{pr} \quad (2.19)$$

D'après l'équation (2.4)

$$\frac{dX}{dt} = - \left(- \frac{dX}{dT} \right)_0 f(X^*) \quad (2.20)$$

B) Au niveau de l'air :

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

$$\frac{\partial m_a}{\partial t} + \text{div}(m_a \vec{v}_a) = \sigma_a \quad (2.21)$$

- 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 :

$$X = \frac{m_a - m_{as}}{m_{as}} \quad (2.22)$$

D'où

$$m_a = m_{as}(1 + X) \quad (2.23)$$

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 :

$$\dot{m}_a \Delta Z = V_a m_a$$

L'équation (3.21) devient :

$$\dot{m}_a \Delta Z \cdot \frac{\partial W}{\partial Z} = \sigma_a \quad (2.24)$$

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.

$$\sigma_a = - \sigma_{pr} \quad (2.25)$$

De l'équation (2.18) et (2.25) on aura :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = - \frac{m_{prs}}{\dot{m}_a \Delta Z} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2.26)$$

3.6 Modèle mathématique :

Enfin on aboutit à un système d'équation constitué par trois les équations différentielles (2.20), (2.26) et (2.15) :

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

$f(X^*)$: Vitesse de séchage normée (voir le titre 1.6.3.1)

X^* : Humidité du solide correspondant à l'équilibre avec l'air.

$\left(-\frac{dX}{dT} \right)_0$: Vitesse de séchage initial

3.7 Conclusion :

Ce chapitre y compris une description du séchage utilisé qui se traduit par un schéma et à une méthode de simulation d'un système d'équation différentielle , notre modèle mathématique décrit l'évolution des principales variables d'état pendant le séchage de l'abricot.

Chapitre 4 :

Simulation numérique

4 Simulation numérique :

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 $f(X^*)$.

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

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.
- $\frac{dX}{dt}$: Vitesse de séchage du produit.
- W : Teneur en eau de l'air.
- Ta : 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 :

$$\frac{dX}{dt} = - \left(-\frac{dX}{dT} \right)_0 f(X^*) \quad (3.1)$$

On doit déterminer :

- A partir de l'équation (2.9)

$$\left(-\frac{dX}{dT} \right)_0 = \alpha \cdot \beta \cdot V_a^\beta \cdot (T_a - T_h) \quad (3.2)$$

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

Pour le cas de l'abricot :

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

V_a : La vitesse d'écoulement de l'air.

$$v_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a S} \quad (3.3)$$

S : Surface de la claie.

ρ_a : Masse volumique de l'air qui est fonction de la température

T_h : Température de l'air humide.

A partir des travaux de A. Ferradji et A. Malek [49] sur l'abricot :

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

Avec :

$$X^* = X^*[X(t)] = \frac{X(t) - X_{eq}}{X_{cri} - X_{eq}} \quad (3.4)$$

$$X_{eq}(T_a, HR) = \left[\frac{-\ln(1 - HR)}{k(1.8 \cdot T_a + 492)} \right]^{1/n} \quad (3.5)$$

• 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 : Etant l'humidité relative de l'air

$$HR = \frac{P \cdot W}{P_{sat}(0.622 + W)} \quad (3.6)$$

P_{sat} : Est la pression de saturation de l'air (Pa)

$$P_{sat} = 52.567 - \frac{6790.5}{273 + T} - 5.0281 \ln(T + 273) \quad (3.7)$$

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

$$\frac{\partial W}{\partial t} = - \frac{\dot{m}_{prs}}{\dot{m}_a \Delta Z} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (3.8)$$

Puis à la troisième équation :

$$T_a = T_{ae} + \frac{\dot{m}_{prs} \cdot L_v}{\dot{m}_a C_{pa}} \left(\frac{dX}{dt} \right) \quad (3.9)$$

C_p : Capacité thermique à pression constante ($KJ/k.Kg$ d'air humide) :

$$C_p = \frac{1.006 + 1.827W}{1 + W} \quad (3.10)$$

L_v : Chaleur latente de vaporisation (KJ/Kg)

$$L_v = 4.18 (597 - 0.56 \cdot T_{pr}) \cdot 10^3 \quad (3.12)$$

4.1 Choix de la méthode numérique :

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

$$\frac{dy_q}{dt} = f_q(y_p, t). \quad (3.11)$$

Nous avons choisi la méthode des différences finies régressives

Les grandeurs y_q ci-dessus seront dans notre cas ; la température de l'air asséchant, 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 :

$$\frac{dy_q}{dt} = \frac{y_q(t,i) - y_q(t-\Delta t,i)}{\Delta t} \quad (3.12)$$

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

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

$$\frac{dy_q(z,t)}{dz} = \frac{y_q(z,t) - y_q(z-\Delta z,t)}{\Delta z} \quad (3.13)$$

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

4.2 Discrétisation du modèle mathématique :

Nous repérons les claies par l'indice entier « i ». Nous n'utilisons que dix claies, la première est indiquée par ($i=1$), la seconde par ($i=2$) et dixième par ($i=10$). 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 (Fig10)

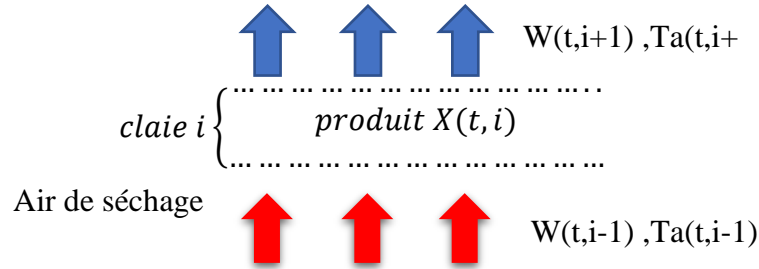


Figure 11: Schéma d'une claie d'indice i

Pour la claie d'indice i et à l'instant t les équations s'écrivent :

$$\begin{cases} \frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{X(t, i) - X(t - \Delta t, i)}{\Delta t} = - \left(-\frac{dX}{dT} \right)_0 f(X^*) \\ \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{W(t, i) - W(t, i - 1)}{\Delta Z} = - \frac{m_{\text{prs}}}{\dot{m}_a \Delta Z} \frac{\Delta X}{\Delta t} \\ T_a(t, i) = T_{\text{ae}}(t, i - 1) + \frac{m_{\text{prs}} L_v}{\dot{m}_a C_{\text{pa}}} \left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right) \end{cases}$$

Après discrétisation notre modèle devient :

$$\begin{cases} X(t, i) = X(t - \Delta t, i) - \Delta t \cdot \left(-\frac{dX}{dT} \right)_0 (t - \Delta t, i) \cdot f[X^*(t - \Delta t, i)] \\ W(t, i) = W(t, i - 1) - \frac{m_{\text{prs}}}{\dot{m}_a \Delta Z} \frac{\Delta X}{\Delta t} \\ T_a(t, i) = T_{\text{ae}}(t, i - 1) + \frac{m_{\text{prs}} \cdot L_v}{\dot{m}_a C_{\text{pa}}} \left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right) \end{cases}$$

Avec :

$$\left(-\frac{dX}{dT} \right)_0 (t - \Delta t, i) = \alpha \cdot \beta \cdot V_a^\beta [T_a(t - \Delta t, i) - T_h(t - \Delta t, i)]$$

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

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

Pour résoudre ce système d'équations, nous avons élaboré un programme en MATLAB, en utilisant la méthode des différences finis régressive.

Ce programme intègre les corrélations issues des données expérimentales des isothermes de sorption et de la cinétique de séchage De l'abricot.

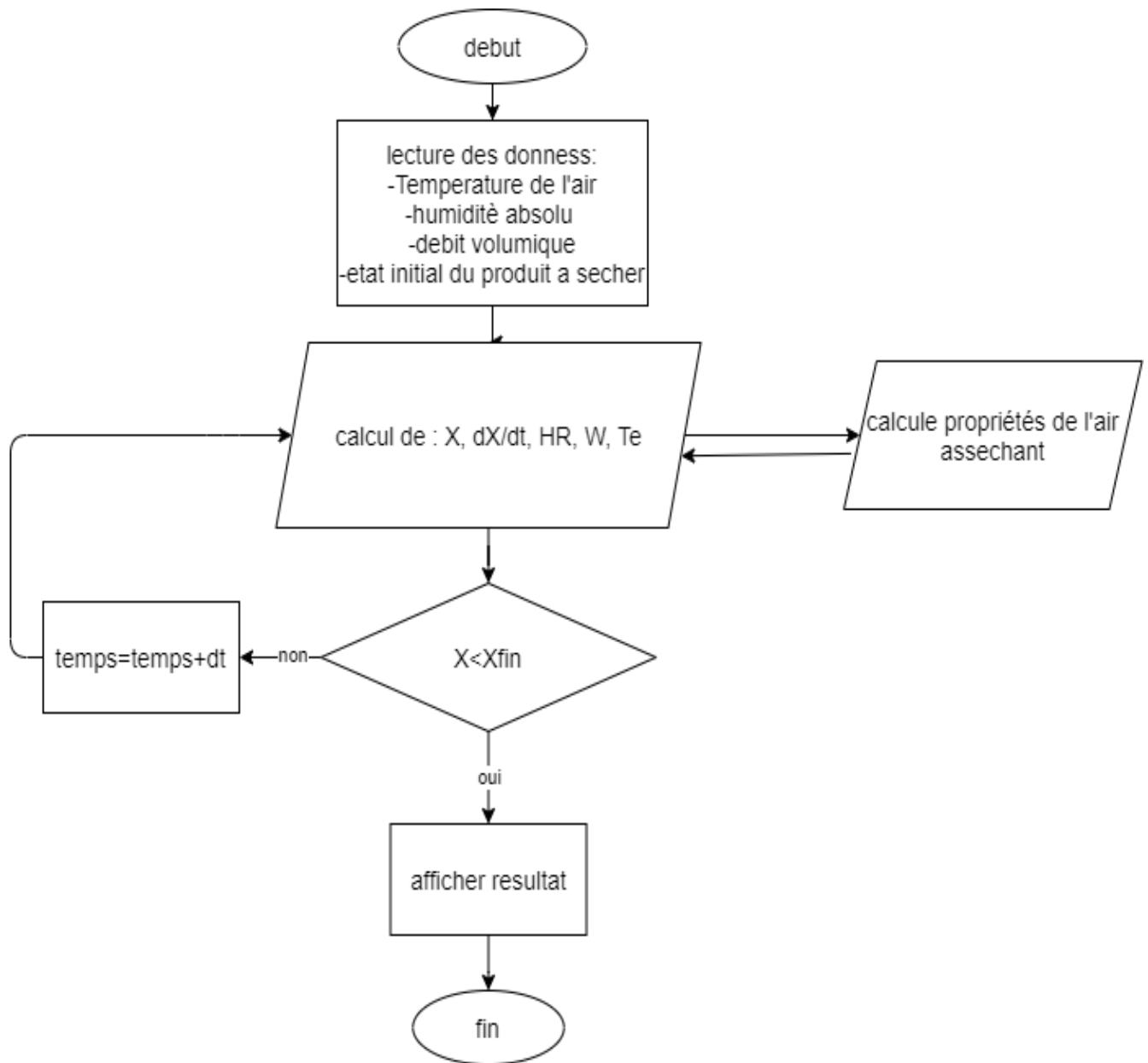


Figure 12: Organigramme de calcul

Avec :

- 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

Chapitre 05 :

Résultats et discussions

5 Résultats et discussions :

Les chapitres précédents ont permis d'étudier le phénomène du séchage et aussi de la modéliser. Le chapitre présent nous permettra d'analyser les résultats de la simulation de notre séchoir, et de les confronter aux valeurs expérimentales rencontrées dans la littérature.

5.1 Élément de dimensionnement :

Pour la simulation du séchage d'une journée, nous avons considéré la température ambiante maximale de la journée, l'humidité relative minimale et la température fixe de l'air asséchant.

Pour pouvoir dimensionner un séchoir, nous avons besoin de déterminer plusieurs paramètres qui seront ainsi calculé dans ce qui suivra.

5.1.1 La quantité d'abricot a séché :

La quantité d'abricot à séché pour laquelle le dimensionnement est basé est de : 100 kg /jour

5.1.2 La quantité d'eau qui doit être enlevé du produit [44] est :

$$M_e = \frac{(m_i - m_f) \cdot M_i}{100 - m_f}$$

M_e : kg d'eau par kg de produit frais à sécher

avec:

- m_i : teneur en eau initiale du produit frais (en %)
- m_f : teneur en eau finale du produit séché (en %)
- M_e : quantité d'eau à extraire du produit (en kg)
- M_i quantité à sécher de produit frais après parage (en kg), le parage étant l'opération initiale de retrait de la peau et des déchets du produit frais.

$$M_e = \frac{(81 - 19.83) \cdot 100}{100 - 19.83} = 76.4 \text{ kg}$$

5.1.3 La vitesse d'enlèvement de l'eau du produit [44] :

$$V_{em} = \frac{M_e}{T_s}$$

V_{em} : vitesse d'enlèvement de l'eau (en kg/h)

- M_e : masse d'eau à extraire (en kg)
- T_s : durée idéale du séchage pour le produit considéré (en heures).

$$v_{em} = \frac{76.4}{12} = 6.36 \text{ kg/h}$$

5.1.4 L'énergie et la puissance portée par l'air pour l'évaporation de l'eau [44] :

$$P_n = \rho_{air} \times c_{p_{air}} \times (T_2 - T_1) \times \frac{D_s}{3600}$$

P_n : puissance portée par l'air (en kW)

- $c_{p_{air}}$: chaleur massique de l'air (en J/kg/°C)

- T_2 : température de séchage (à l'arrivée sur le produit) (en °C)

- T_1 : température de l'air utilisé pour le séchage, avant son chauffage (en °C)

- D_s : débit d'air (en m³/h).

$$P_n = 4,120 \text{ kW}$$

5.1.5 L'énergie nécessaire est pour sa part [44] :

$$E_n = P_n \cdot t_s$$

P_n : puissance nécessaire en kW

T_s durée du séchage en heure :10h

- E_n : énergie nécessaire en kWh

$$E_n = 41,2 \text{ kWh}$$

5.2 Interprétation des résultats de la simulation :

5.2.1 Evolution de l'air asséchant :

Au cours du séchage, l'air asséchant passant uni-directionnellement vers le haut, les propriétés du produit de la claie inférieure peuvent exercer une influence sur le séchage des produits sur les claies supérieures. Cette réalité est montrée dans nos résultats.

Après l'exécution du programme MATLAB et à partir de la matrice de la température pour chaque claie, on obtient l'évolution de la température des produits sur les claies 1, 2, 3 et 4, (fig 13).

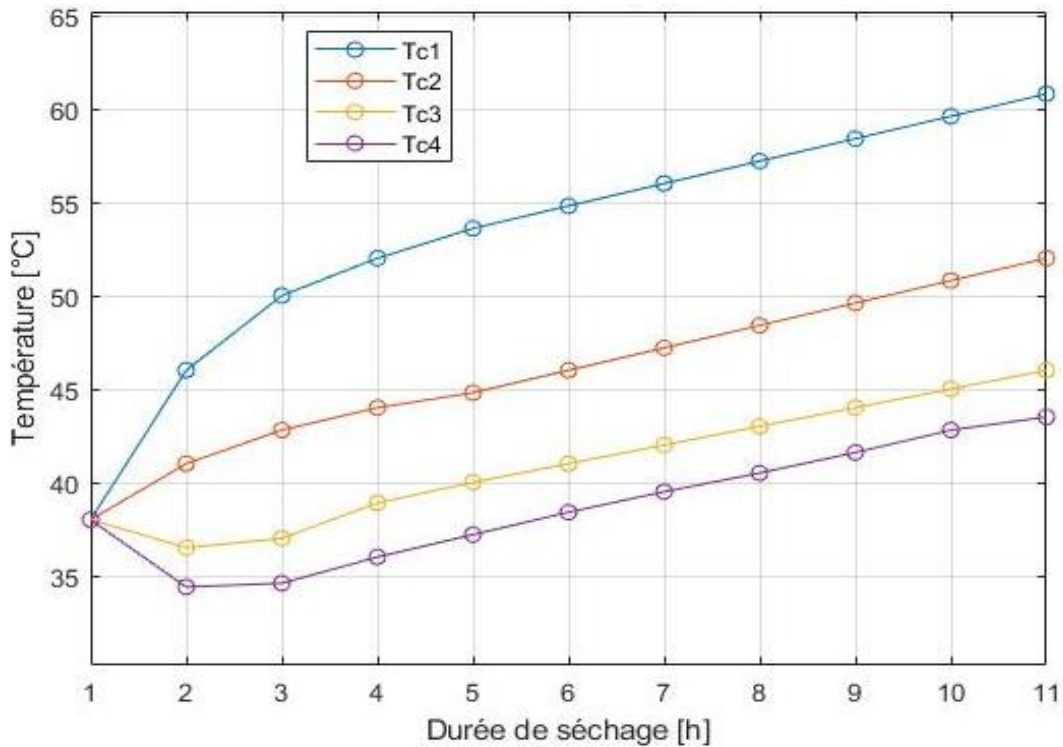


Figure 13: Evolution de la température des produits pendant le séchage

On remarque que les courbes de la température des produits sur la première et de la deuxième claie sont croissantes depuis le début du séchage. Les températures des produits sur la troisième claie et la quatrième diminuent au début du séchage et deviennent croissantes après la première heure et de la deuxième heure.

L'allure croissant des courbes de la première et la deuxième claie s'explique par le fait que ces deux premières claies sont plus proches de l'entrée de l'air chaud et sec.

La chaleur transportée par l'air asséchant provoque la perte d'eau et l'accroissement de la température du produit. L'air asséchant à la claie 3 est celui provenant de la claie 2. Cet air a cédé une partie de sa chaleur aux produits sur les claies 1 et 2, et s'est chargé de l'humidité prise de ces produits.

Au début du séchage, les produits étant froids et assez humides, l'air asséchant après avoir traversé les deux premières claies, devient plus humide et moins chaud. Sur la (Figure 11), on peut remarquer l'évolution croissante de l'humidité relative de l'air dans le séchoir au niveau de chaque claie. (La Figure 14) traduit la diminution de la température de l'air le long du séchoir.

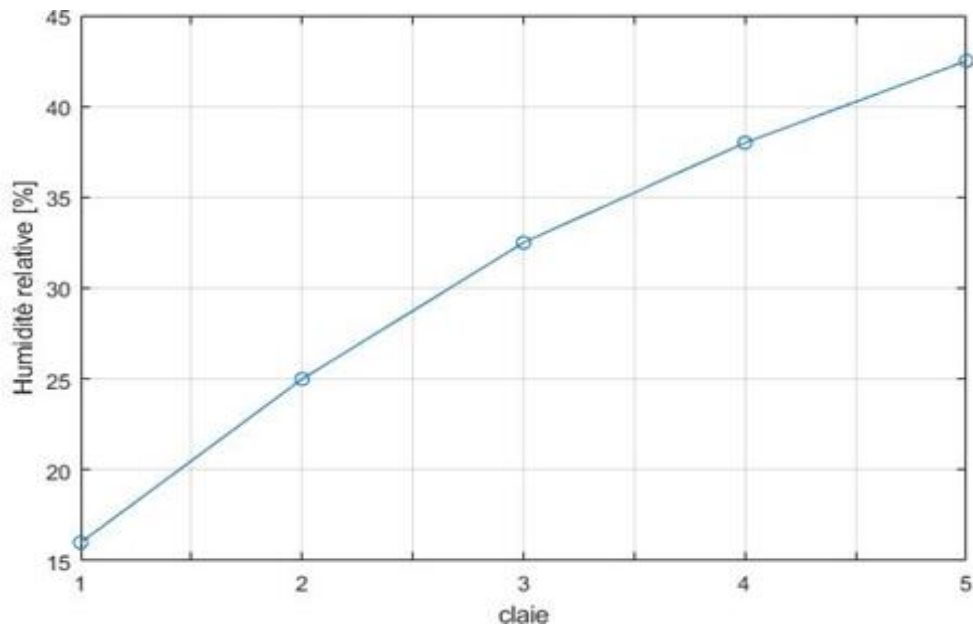


Figure 14: Evolution de l'humidité relative de l'air asséchant dans la direction de l'écoulement

La présentation des résultats de l'humidité (figure 14) , dans les premières heures, cet air, plus humide et moins chaud ne contient plus assez de chaleur pour provoquer l'échauffement du produit à la claie 3 et 4. Mais, vu que le produit perd de l'eau et donc de l'énergie par évaporation, sa température diminue. Après les 2 premières heures, l'air asséchant à la claie 3 et 4 devient plus chaud (voir figure13), et la température du produit commence par croître.

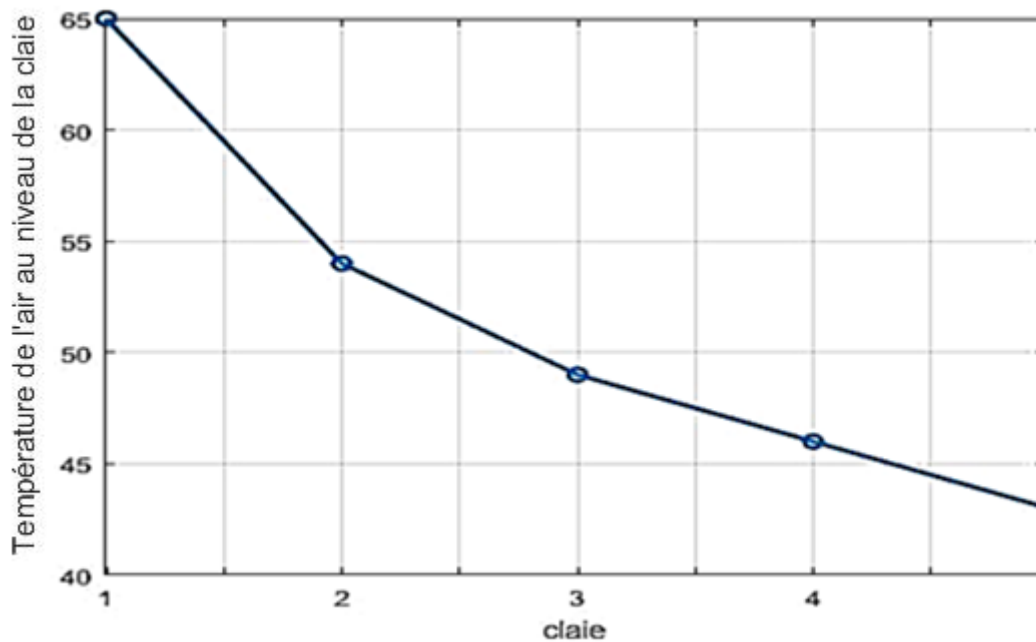


Figure 15: Evolution de la Température de l'air asséchant dans la direction de l'écoulement pour chaque claie.

5.2.2 Influence de la température de l'air de séchage :

Avant d'étudier l'influence de la température sur les performances de la chambre de séchage, on considère, 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.

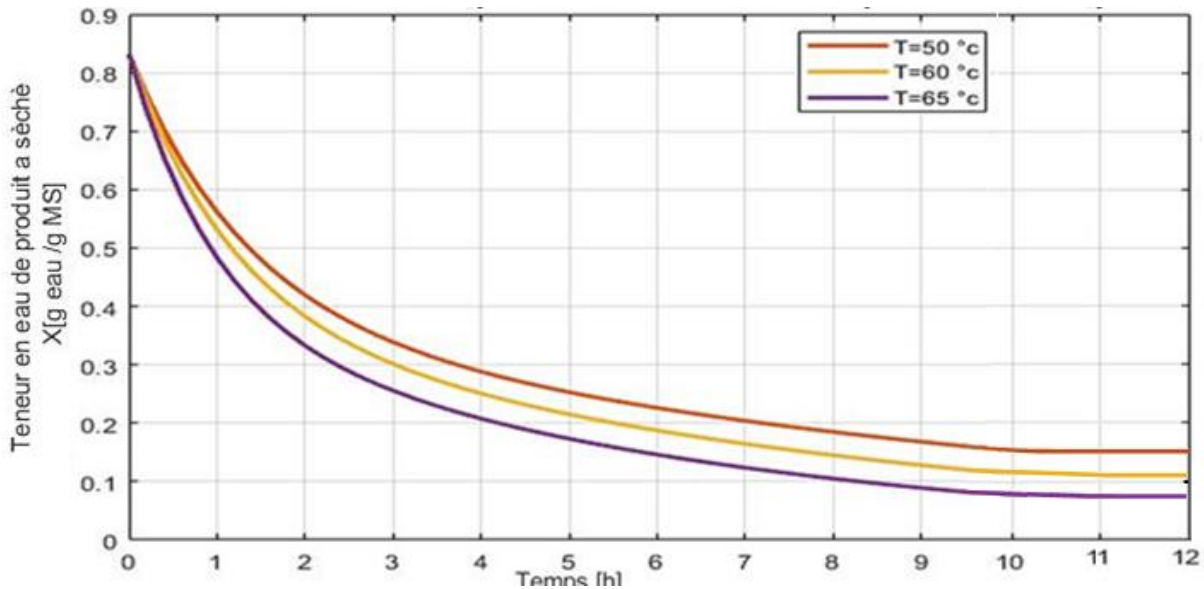


Figure 16: Evolution de X en fonction du temps pour différentes Températures d'entrée du séchoir

La simulation par le programme établi donne des résultats qui sont présents dans la figure 16, met en évidence l'influence de la température de l'air à l'entrée du séchoir par rapport à l'évolution de la teneur en eau réduite de fruits séchés (notre cas l'abricot) en fonction du temps, pour un débit d'air de $300\text{ m}^3/\text{h}$ Humidité relative de 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 $T=50\text{ °C}$, 12 heures se sont écoulées pour sécher le produit de 4,1 g d'eau/g de produit sec à environ 0,08 g d'eau/g de produit sec, alors que le processus n'a duré que 10 heures du temps pour atteindre la même valeur (0,08 g d'eau/g de produit sec) à la température de séchage de 65 °C .

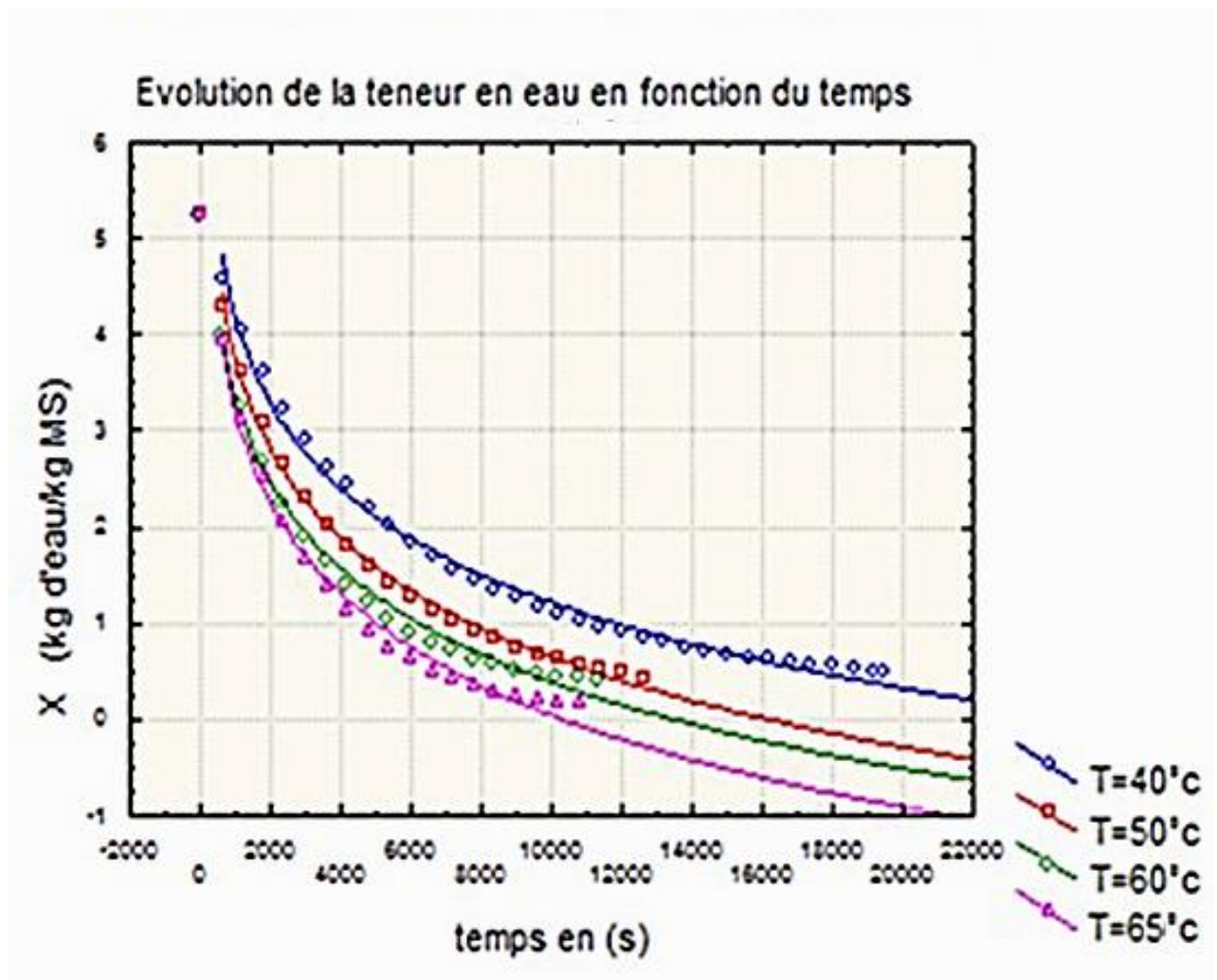


Figure 17: Évolution de la teneur en eau (X) en fonction du temps t (M. LAHBARI 2015)

Les figures 16 et 17 représentent respectivement les résultats calculés théoriquement (selon notre modèle) et ceux mesurés expérimentalement (M. LAHBARI (2015) [40]) de la teneur en eau du produit X pour différentes valeurs de la température 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 soit fiable et qu'il décrit bien le phénomène de séchage.

5.2.3 L'influence de débit sur le séchage :

Dans cette partie nous étudierons l'influence du débit d'air sur le séchage de l'abricot pour une température et une humidité relative d'entrée au séchoir fixes est égale respectivement à 65°C et 50 %.

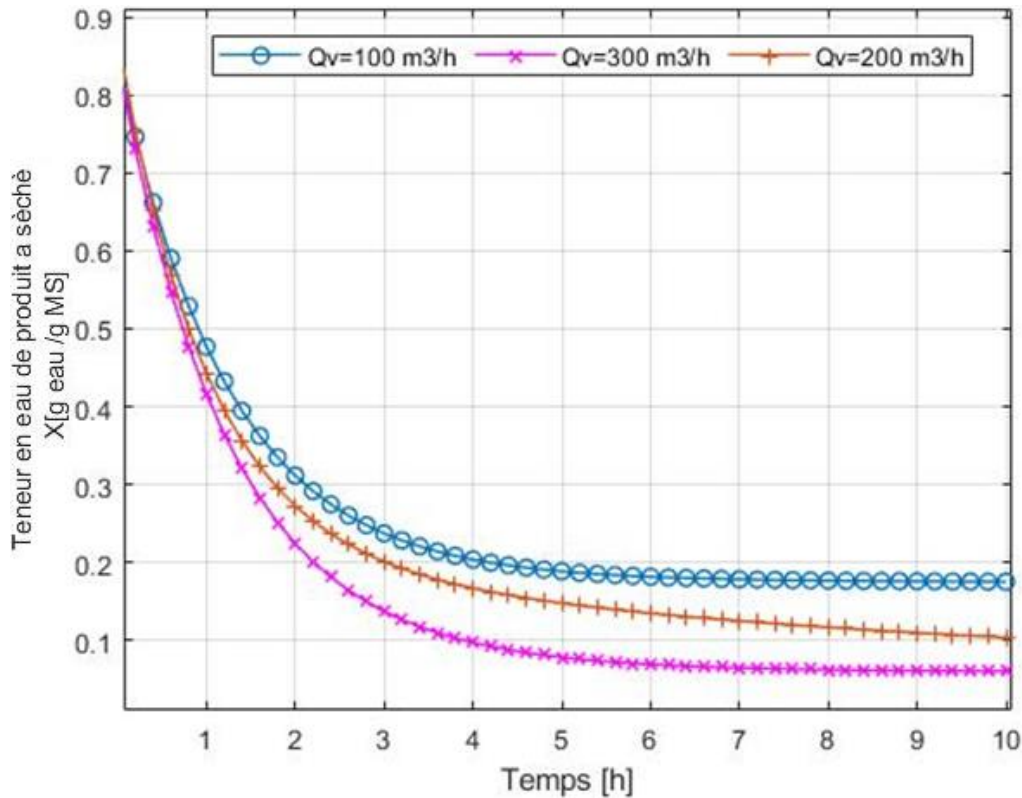


Figure 18: Evolution de X en fonction du temps pour différentes valeurs du débit d'air de séchage

Les courbes de la Figure (18) montrent une diminution des durées de séchage lorsque le débit augmente, elles passent de 10h à 8h lorsque le débit passe de 100 m³/h à 300 m³/h pour atteindre une valeur de X égale à 0.08 g d'eau/g de produit sec. Ce qui rend l'influence du débit importante.

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.

La lecture des résultats de la figure (16), qui détermine l'influence de la température sur le processus de séchage, et ceux de la figure (18), 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.

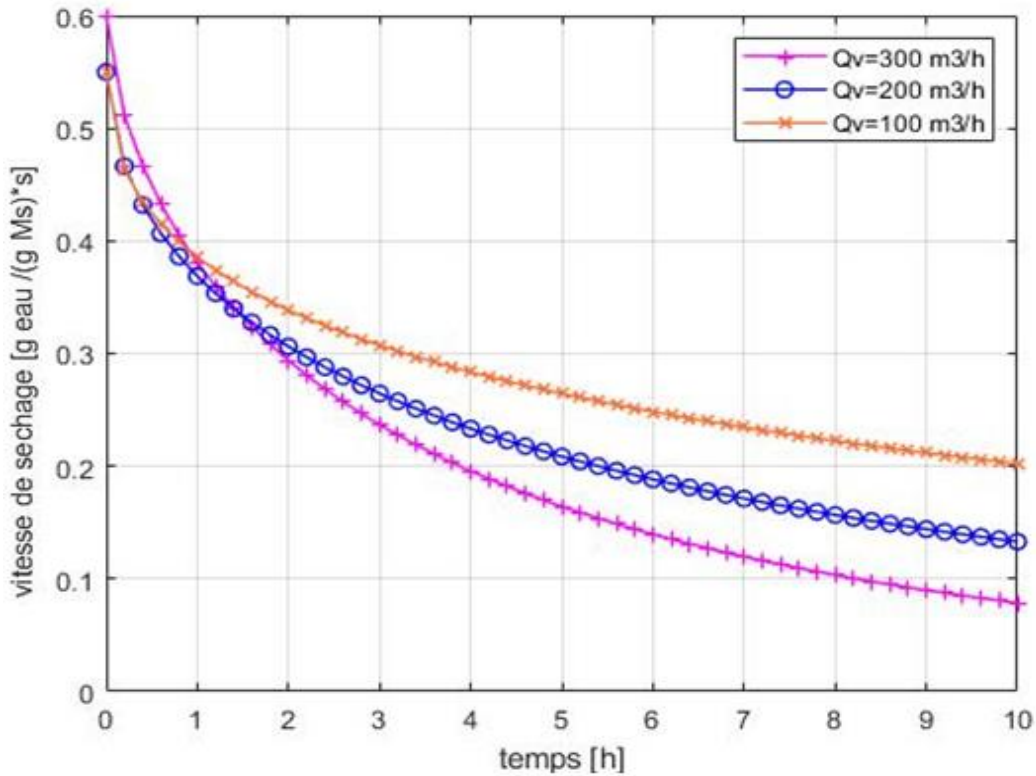


Figure 19: Evolution de vitesse de séchage en fonction du temps pour différentes valeurs du débit d'air

5.2.4 Influence de l'humidité de l'air de séchage :

Nous présentons dans cette partie l'influence de l'humidité relative de cet air.

La figure (20) 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. Autrement dit, l'air de séchage atteint la saturation en vapeur d'eau.

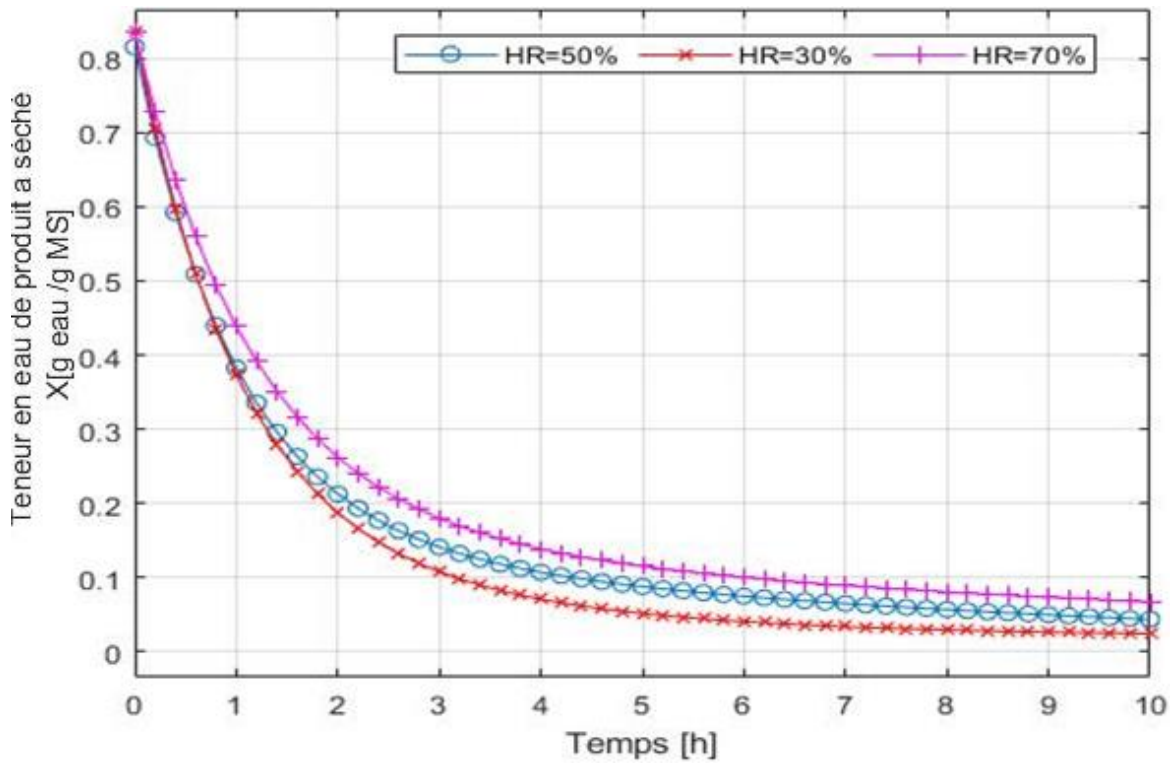


Figure 20: Evolution de X en fonction du temps pour différentes valeurs de l'humidité relative de l'air de séchage

5.2.5 Résultat de programme :

Pour l'abricots « le Rosé » on a : une teneur en eau de 84% ou 0.84 kg d'eau/kg, et une teneur en eau en base sèche de 5.25 kg eau/kg MS,

Le résultat obtenu à partir de notre modélisation a conduit au tableau.

Tableau 4:Les résultats obtenus pour le séchage de l'abricot étudiées.

Produit a séché	T [°C]	Humidité relative finale % [Kg eau/kg Masse Produit]	Humidité absolue finale [Kg eau/kg Masse Sèche]
L'abricot Rosé	50	19.830	0.2951
	60	17.967	0.2678
	65	15.560	0.2104

À partir de notre programme on a obtenu les résultats suivants : avec un débit de 300 m³/h et une température de 65 C°, on arrive à une humidité absolue de 0,21 kg eau par kg mass sèche.

5.2.6 Conclusion :

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

Des simulations ont été réalisées pour présenter l'influence des paramètres climatiques de l'air de séchage, on a constaté que le paramètre le plus influant sur ce processus est la température en premier lieu puis le débit en second, cependant l'hygrométrie de l'air de séchage exerce une influence minimale.

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.

6 Conclusion générale

Le séchage est l'un des processus fondamentaux qui permette d'allonger efficacement le temps de stockage des aliments. Il consiste à diminuer la teneur en eau des produits agroalimentaires jusqu'à des valeurs résiduelles inhibant le développement de tout micro-organisme et permettant ainsi leur stockage dans des conditions ambiantes.

L'étude théorique que nous avons menée sur le séchoir indirect en convection forcée, la modélisation numérique du séchage solaire convectif des abricots en moitiés , a permis, grâce à l'application du modèle simplifié de la courbe caractéristique de séchage , 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 programme de calcul, en MATLAB, qui permet de simuler le comportement de la chambre de séchage fonctionnant en convection forcée, ce programme nous fournissent 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 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.

La comparaison de nos résultats de simulation , nous montre une concordance acceptable avec les résultats des autres auteurs , bien que l'apparition d'un léger écart , et cela indique que nous sommes sur la bonne voie .

Les avantages de ce type de séchage sont :

- Baisse des pertes des cultures pendant les périodes des fortes productions.
- Evites l'utilisation des chambres froides pour certains produits et donc baisse de la facture énergétique.
- Baisse la facture des importations.

Les perspectives de ce travail sera la réalisation de ce système et de passé a modélisé d'autres produit.

Références

- [1] A. Boulemtafes, «Le séchage solaire des produits agricoles,» 2011.
- [2] J. BIMBENET et al, Génie des Procédés alimentaires. Des bases aux applications., Paris: Dunod, 2002.
- [3] M, DAGUENET. Les séchoirs solaires : théorie et pratique, UNESCO, 1985.
- [4] J. P. NADEAU et J. R. PUIGGALI, Séchage : des processus physiques aux procédés industriels., Lavoisier, Technique et documentation, 1995.
- [5] P. MAFART, Génie industriel alimentaire. Tome 1 ; Les procédés physiques de conservation, 2eme édition, éd., Lavoisier, 1996.
- [6] G. Arditti, Technologie chimique industrielle, tome III, France: Edition Eyrolles, 1972.
- [7] S. MOKRETAR, Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir solaire de type serre. Application à la détermination de la cinétique de séchage des prunes., USTHB, 2009.
- [8] M. Sharaf-Eldeen et al, «A model for ear corn drying,» *Transactions of the ASAE*, 1980.
- [9] T. H. Nguyen., «Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux,» chez *Génie des procédés.*, Université de Bretagne Sud, 2015.
- [10] D. Akpinar, «Moisture transfer models for slabs drying,» *International Communications in Heat and Mass Transfer*, pp. 80-93, 2005.
- [11] M. Parti, «Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers,» *Journal of Agricultural Engineering Research*, n° %154, p. 339, 1993.
- [12] Y. Özdemir, «The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting,» *Journal of Food Engineering*, pp. 225-233, 1999.
- [13] B. Keey, «Drying principles and practice,» chez *Pergamon Press*, Oxford, p. 402.
- [14] F. Erbay et al, «A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results,» *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, pp. 441-464., 2010.
- [15] W.LEWIS. «The rate of drying of solid materiels,» *The journal of industrial and engineering chemistry*, 1921.
- [16] I. DOYMAZ, «Effect of dipping treatment on air drying of plums,» *Journal of Food Engineering*, 2006.
- [17] G. Page, «Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers,» *Purdue University, Indiana.*, 1949.

- [18] S. Henderson, «Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation,» *Transactions of the ASAE*, pp. 1167-1168, 1974.
- [19] A. Midilli, «A new model for single-layer drying,» *Drying technology*, 2002.
- [20] A. E. Ghazanfari, «Thin-layer drying of flax fiber: II. Modeling drying process using semi-theoretical and empirical models,» *Drying Technology*, 2006.
- [21] . A. Demir et al, «Mathematical modelling of convection drying of green table olives,» *Biosystems Engineering*, n° %198, pp. 47-53.
- [22] A. Ferradji et A. Malek, Isothermes d'Adsorption des Abricots Secs, Alger , 2005.
- [23] B. Mennouche et al, «Valorization of rehydrated Deglet-Nour dates by an experimental,» *Energy Conversion and Management*, 2014.
- [24] O.Badaoui et al , «Experimental and modeling study of tomato pomace waste drying in a new solar,» *Renewable Energy*, 2018.
- [25] A. Hadi Samimi-Akhijahani, «Accelerating drying process of tomato slices in a PV-assisted solar dryer using a sun tracking system,» *Renewable Energy*, 2018.
- [26] .A Djebli et al, «A new approach to the thermodynamics study of drying tomatoes in mixed solar drayer,» *Solar Energy*, 2019.
- [27] S. Chemkhi et al, «MODELLING AND SIMULATION OF DRYING PHENOMENA WITH RHEOLOGICAL BEHAVIOUR,» *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2005.
- [28] M, TOUATI. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte, Université de tlemcen, 2008.
- [29] ROuaabou et al , «Impact of solar drying process on drying kinetics, and on bioactive profile of Moroccan sweet cherry,» *Renewable Energy*, 2019.
- [30] H. BELGHIT, «Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée,» *Revue générale de thermique*, 1997.
- [31] .R. Arun et al «Active drying of unripened bananas (Musa Nendra) in a multi-tray mixed mode solar cabinet dryer with backup energy storage,» *Solar Energy*, 2019.
- [32] M.Simo-Tagne et all, «NUMERICAL ANALYSIS AND VALIDATION OF A NATURAL CONVECTION MIX-MODE SOLAR DRYER FOR DRYING RED CHILLI UNDER VARIABLE CONDITIONS,» *Renewable Energy*, 2009.
- [33] J. Lichou, L'abricotier, Paris: Ed. J. Granier, C.T.I.F.L, 1989., p. 368 .
- [34] J.M. Legave and J.C.Richard, Inheritance of Floral Abortion in Progenies of 'Stark Early Orange' Apricot', *Proceedings Apricot Culture.*, vol. 1, 2006, p. 127.

- [35] Bahlouli ,F.Slamani,. Tiaiba A., «Etude des différentes méthodes de séchage d'abricot, point sur les méthodes de séchage traditionnelles dans la région du Hodna, wilaya de M'Sila.,» *Revue des Energies Renouvelables*, pp. 61 - 66, 2008.
- [36] A. KANMOGNE, Contribution à l'étude du séchage du cacao au Cameroun, Université de Yaoundé: Thèse de doctorat, 2002.
- [37] L. Belhamri, «Design and simulation of a solar dryer for agriculture products,» *Journal of food engineering*, *article in press*,, 2002.
- [38] GRET, Sécher des produits alimentaires.Techniques, procédés, équipements,, 1995.
- [39] Maisonneuve et Larose, Le stockage des produits vivriers et semenciers Tome 1, Maisonneuve et Larose, 1985.
- [40] M. LAHBARI, ETUDE ET SIMULATION DU SECHAGE DE L'ABRICOT : APPLICATION A QUELQUES VARIETES DE LA REGION DES AURES, UNIVERSITE BATNA , 2015.
- [41] J. P. NADEAU et J. R. PUIGGALI, Séchage : des processus physiques aux procédés industriels, Lavoisier, 1995.
- [42] D. Devries, «The theory of heat and moisture transfer in porous media.,» *Journal of Heat and Moisture Transfer* , n° %17, pp. 1343-1350, 1987.
- [43] D. MAROULIS et al. «Heat and Mass Transfer Modeling in Air Drying of Foods,» *Journal of Food Engineering*, pp. 113-130, 1995.
- [44] A, HAMED, *Séchage d'un matériau poreux humide par convection forcée d'air chaud*, université de Perpignan: Thèse de doctorat , 1985.
- [45] W, KRISHER O. KAST «La base scientifique de la technologie de séchage,» *Springer*, 1978.
- [46] LUIKOV, Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [47] TOUHAMI.A, Etude de séchage d'un cylindre annulaire poreux humide sous l'action d'un courant d'air force et chaud, Université de Perpignan: Thèse de doctorat, 1990.
- [48] K, SHERWOOD. «The drying of solid,» *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1929.
- [49] A, FISCHER «Some fundamental principals of drying,» *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1935.
- [50] M, HERNANDEZ, Séchage du chaîne: caractérisation, procédés convectifs et sous vide, Université de Bordeaux: Thèse de doctorat, 1991.
- [51] M.Gonzalo et al, «Détermination des isothermes de sorption de l'eau des abricots et raisins,» *Revue de Génie Industriel*, 2011.