

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ahmed Draïa - Adrar  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des sciences de la matière



Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de  
Master en Physique Énergétique et Énergies Renouvelables.

Thème :

ETUDE THEORIQUE DU SECHAGE SOLAIRE DIRECTE

Présenté par :

REKIA MESSAOUDI

HAYAT BAADI

Devant le jury:

Examineur: Pr. BENATILLAH Ali

UNIV. Adrar

Examinatrice: Dr. KAOUALAL Rabéa

UNIV. Adrar

Encadré par: Dr. MANAA Saadeddine

UNIV. Adrar

Année Universitaire: 2020/2021



## شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): مانع سعدالدين

المشرف على مذكرة الماستر.

الموسومة بـ: ÉTUDE THÉORIQUE DU SÉCHAGE SOLAIRE DIRECTE

من إنجاز الطالب(ة): REKIA MESSAOUDI

و الطالب(ة): HAYAT BAADI

كلية: FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

القسم: DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

التخصص: PHYSIQUE ÉNERGÉTIQUE ET ÉNERGIE RENOUVELABLE

تاريخ تقييم / مناقشة: 2021 / 06 / 24

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.  
ويامكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والايكترونية (PDF).

= امضاء المشرف

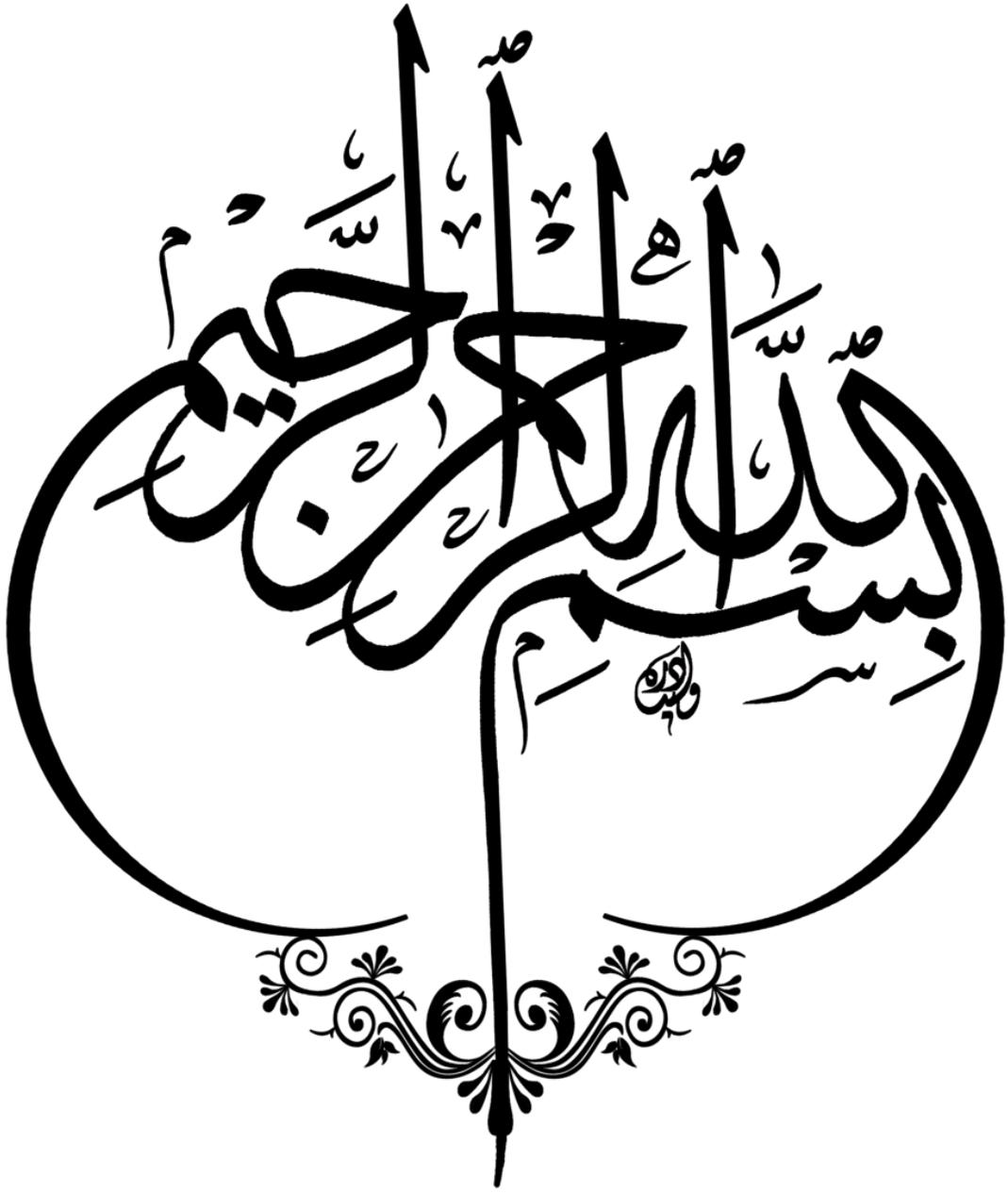
د. مانع سعدالدين

ادرار في: .....

مساعد رئيس القسم:-



مساعد رئيس قسم علوم المادة مكلف بالتدريس والتعليم في التدرج



# Remerciements

Nous remercions avant tout **ALLAH** le tout puissant pour la santé, la volonté, le courage et la patience qu'il nous a donnés durant ces années d'étude.

Nos vifs remerciements sont à adresser à notre encadreur **Dr. MANAA Saadeddine**, Maitre des conférences à l'Université d'Adrar- Algérie pour son encadrement, sa compréhension, ses conseils, ses observations, son aide et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements et notre reconnaissance aux professeurs, membres du comité de discussion, pour leurs efforts dans l'évaluation de ce modeste travail.

Nos profondes gratitude s'adressent à Monsieur, Chef de Département et à l'ensemble des enseignants du département des sciences de la matière pour toutes les connaissances qu'ils nous ont transmises.

En fin, nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce modeste projet.

# Dédicace

**Je dédie ce travail :**

**À qui était sa prière le secret de ma réussite et de son existence, je connaissais le sens de la vie au symbole de l'amour et de la mer de la tendresse, .... ma mère bien-aimée**

**A mon cher père, Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.**

**A mes frères, A ma chère sœur, Pour son soutien moral et ses conseils précieux tout au long de mes études.**

**A mon cher grand-père et ma grande mère qui je leurs souhaite une bonne santé.**

**A toute ma famille.**

**A ma chère binôme, pour son entente et sa sympathie, pour leurs indéfectibles soutiens et ces patiences infinies.**

**A mes chères amis, pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.**

**A mes professeurs qui ont eu le plus grand rôle à me soutenir et à me fournir des informations précieuses ....**

**Aussi, je n'oublie pas les professeurs avec lesquels j'ai étudié tout au long de ma carrière académique, surtout au professeur de physique "Dahmani", je lui souhaite une bonne santé et le bien-être.**

## REKIA



# Dédicace

**Je dédie le fruit de cet humble travail à : la source de la tendresse et  
la source de sécurité, ma chère mère \_ aicha \_**

**A la prunelle de mes yeux et à mon modèle dans la vie, Abi Al-Aziz  
\_Ramdan \_**

**A mes frères : Mohammed, Mebarek et Nassim**

**A mes sœurs : Zohra, Mebareka, Talia et Nora à la gentille famille**

**A tous les professeurs, en particulier au professeurs Manaa Saad al-  
Din**

**A mon collègue qui a vécu avec moi les jours les plus heureux et les  
plus difficiles pour terminer ce mémorandum, Messaoudi Rekia**

**A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au succès de cette  
recherche**

**A tous les camarades de classe avec qui tu m'as réuni**

**A tous ceux que mon stylo a oublié et mon cœur n'a pas oublié**

**A tous les étudiants en physique de l'énergie 2020 -2021**



# BAADI HAYAT

### Résumé:

*La conservation des produits agroalimentaires nécessite l'utilisation d'une énergie adéquate et accessible pour réduire les pertes pendant les récoltes. Le procédé de séchage des fruits utilisant l'énergie solaire thermique est un moyen efficace pour leur conservation surtout dans les pays en voie de développement et plus utile dans les zones isolées comme le grand sud et les oasis qui n'ont pas les moyens nécessaires pour une commercialisation directe comme notre cas dans toute la région d'Adrar. Notre région est une productrice importante des fruits et légumes et regorge d'un gisement solaire très important dans l'Algérie et le monde, exploitable et accessible. Nous présentons dans ce mémoire les études sur un séchoir solaire de type direct comme solution pour sécher les produits agroalimentaires locaux.*

**Mots clés:** *séchage solaire – séchoir directe – cinétique du séchage – rendement thermique.*

### المخلص:

يتطلب الحفاظ على منتجات الأغذية الزراعية استخدام المياه المالحة والطاقة التي يمكن الوصول إليها لتقليل الفاقد أثناء الحصاد. تعتبر عملية تجفيف الفاكهة باستخدام الطاقة الحرارية الشمسية وسيلة فعالة للحفاظ عليها خاصة في الدول النامية وأكثر فائدة في المناطق المعزولة مثل الجنوب الكبير والواحات التي لا تملك الوسائل اللازمة لتوجيه التسويق مثل حالتنا في جميع أنحاء منطقة أدرار. تعتبر منطقتنا منتجًا مهمًا للفواكه والخضروات وتزخر بترسبات الطاقة الشمسية المهمة جدًا في الجزائر والعالم، وهي قابلة للاستغلال ويمكن الوصول إليها. في هذه الرسالة، نقدم دراسات حول مجفف شمسي من النوع المباشر كحل لتجفيف منتجات الأغذية الزراعية المحلية.

### الكلمات المفتاحية:

التجفيف الشمسي – المجفف المباشر – حركية التجفيف – الكفاءة الحرارية.

### **Abstract:**

*The conservation of agro-food products requires the use of adequate and accessible energy to reduce losses during harvest. The process of drying fruits using solar thermal energy is an effective means for their conservation especially in developing countries and more useful in isolated areas such as the great south and oases that do not have the necessary means to direct marketing like our case throughout the Adrar region. Our region is an important producer of fruits and vegetables and abounds in a very important solar deposit in Algeria and the world, exploitable and accessible. In this thesis, we present studies on a direct-type solar dryer as a solution for drying local agro-food products.*

*Key words: solar drying – direct dryer – drying kinetics – thermal efficiency.*

# Table de matières:

Remerciements

Dédicace

Résumé

ملخص

Abstract

Table de matières: .....	9
Nomenclature .....	12
La liste des figures: .....	14
La liste des tableaux:.....	15
Introduction générale .....	17

## **CHAPITRE I: APERÇU DE LA ZONE DE TOUAT**

I.1 Introduction: .....	21
I.2 Cadre géographique et physique général de la zone de Touat: .....	21
I.2.1 Situation géographique: .....	21
I.2.2 Caractéristique climatologique de la zone de Touat: .....	22
I.2.2.1 Températures : .....	22
I.2.2.2 les vents : .....	22
I.2.2.3 La pluviométrie : .....	23
I.2.3 Données climatiques de la wilaya d'Adrar: .....	23
I.2.4 L'agriculture dans la zone de Touat: .....	23
I.2.5 Le gisement solaire: .....	25
I.3 Conclusion: .....	25
Les références bibliographiques: .....	26

## **CHAPITRE II: LES DIFFERENTES METHODES DE STOCKAGE DE PRODUITS AGRICOLES**

II.1 Introduction: .....	28
II.2 Définition: .....	28
II.3 Les différentes méthodes de stockage: .....	28
II.3.1 La conservation par la chaleur: .....	28
II.3.1.1 Pasteurisation .....	29
II.3.1.2 L'Ultra Haute Température.....	29

II.3.1.3 L'appertisation:.....	29
II.3.1.4 Stérilisation .....	30
II.3.2 Technique de conservation par le froid: .....	30
II.3.2.1 Réfrigération: .....	30
II.3.2.2 Congélation: .....	31
II.3.2.3 La surgélation (congélation rapide): .....	31
II.3.3 Techniques de conservation par séparation et élimination d'eau (déshydratation):.....	32
II.3.3.1 La déshydratation:.....	32
II.3.3.2 Le séchage.....	32
II.3.3.3 La lyophilisation: .....	32
II.3.3.4 La concentration: .....	33
II.3.4 Les techniques chimiques de conservation:.....	33
II.3.4.1 Le sucrage: .....	33
II.3.4.2 Le salage: .....	33
II.3.4.3 Le fumage: .....	34
II.3.5 Autres techniques: .....	34
II.3.5.1 Fermentation: .....	34
II.3.5.2 Radiations ionisantes: .....	34
II.4 Conclusion:.....	34
Les références bibliographique: .....	35

### **CHAPITRE III: LES DIFFÉRENTES TYPES DES SÉCHOIRS SOLAIRES**

III.1 Introduction:.....	38
III.2 Définition: .....	38
III.3 Types des séchoirs solaires: .....	38
III.3.1 Le séchage naturel:.....	38
III.3.1.1 Le principe de séchage à l'air libre: .....	38
III.3.1.2 Les avantages et les inconvénients de séchage à l'air libre: .....	39
III.3.2 Le séchoir solaire indirect: .....	39
III.3.2.1 Le principe de fonctionnement: .....	40
III.3.2.2 Les type des séchoirs solaires indirects: .....	40
III.3.2.3 Les avantages et les inconvénients de séchoir solaire indirect.....	42
III.3.3 Les séchoirs solaires directs: .....	42
III.3.3.1 Le principe de fonctionnement: .....	43

III.3.3.2 Les types des séchoirs solaires directs:.....	44
III.3.3.3 Les avantages et les inconvénients de séchoir solaire direct .....	45
I.4. Conclusion : .....	47
Les références bibliographiques: .....	48

#### **CHAPITRE IV: ETUDE THEORIQUE DE SECHAGE SOLAIRE**

IV.1 Introduction: .....	50
IV.2 Les différents modes de transfert de chaleur et de masse au cours de séchage:..	50
IV.2.1 Les modes de transfert de chaleur .....	50
IV.2.1.1 Séchage par conduction:.....	50
IV.2.1.2 Séchage par convection [2, 3]: .....	51
IV.2.1.3 Séchage par rayonnement [3]:.....	52
IV.2.2 Transferts de matière [2] .....	52
IV.2.3 Transferts d'eau en séchage [3- 2] .....	53
IV.3 Caractéristiques de l'air de séchage :.....	54
IV.3.1 Humidité : .....	54
IV.3.1.1 Humidité absolue :.....	54
IV.3.1.2 Humidité relative :.....	54
IV.3.2 Température: .....	55
IV.3.2.1 Température sèche T: .....	55
IV.3.2.2 Température humide $T_H$ : .....	55
IV.3.3 Vitesse:.....	55
IV.4 Cinétique du séchage : .....	56
IV.4.1 Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide: .....	56
IV.4.1.1 Période de mise en température (phase 0):.....	57
IV.4.1.2 Période à vitesse de séchage constante (phase I) : .....	58
IV.4.1.3 Période de ralentissement : .....	58
IV.4.2 Différents modèles de la cinétique de séchage: .....	59
IV.4.2.1 Les modèles empiriques .....	59
IV.4.2.2 Les modèles diffusifs: (Modèle de Lewis (1921) ) .....	60
IV.4.2.3 Les modèles bases sur les transferts couplent de chaleur et de masse : ..	60
IV.5 Courbe caractéristique de séchage:.....	61
IV.6 Le rendement de séchoir solaire direct [8]: .....	62
IV.7 Conclusion .....	62

Les références bibliographiques: .....63  
Conclusion générale:.....65

# NOMENCLATURE

Caractère	Signification	Unités
$\lambda$	Conductivité thermique de la pellicule de produit	W/m.K
Q	la quantité de chaleur transférée par unité de temps	W
A	surface d'échange	m <sup>2</sup>
H	coefficient d'échange par convection	W /m <sup>2</sup> • K
T <sub>1</sub>	Température de la source émettrice	K
T <sub>2</sub>	Température du produit	K
A <sub>1</sub>	Surface de l'émetteur infrarouge	m <sup>2</sup>
A <sub>2</sub>	Surface du corps recevant le rayonnement	m <sup>2</sup>
H <sub>a</sub>	Humidité absolue	kg <sub>v</sub> . kg <sub>as</sub> <sup>-1</sup>
H <sub>r</sub>	Humidité relative.	%
P <sub>v</sub>	Pression partielle de la vapeur dans le mélange	"pascal (Pa)"
P <sub>s</sub>	Pression de saturation	"pascal (Pa)"
m <sub>v</sub>	Flux massique de vapeur	J/kg.K
m <sub>s</sub>	Masse du solide sec	"kg"
K	Constante de séchage.	
A	Constantes de séchage	
Φ	Facteur de forme	
ε <sub>1</sub>	Émissivité de l'émetteur	
ε <sub>2</sub>	Émissivité du produit	

## La liste des figures:

### CHAPITRE I

Figure I.1 La carte géographique de la wilaya d'Adrar [5] .....	22
---	----

### CHAPITRE II

Figure II.2: Fonctionnement d'un tunnel de surgélation [5] .....	31
Figure II.3 : Image de la déshydratation des aliments dans un séchoir [6] .....	32
Figure II.4: Exemple de séchage de tomate [7] .....	32
Figure II.5: Lyophilisation des aliments[5]. .....	33

### CHAPITRE III

Figure III.6: Séchoir solaire en mode direct à convection forcée [7]. .....	41
Figure III.7: Séchoir solaire de type direct[10] .....	43
Figure III.8: Principe de fonctionnement de séchoir solaire direct [2] .....	43
Figure III.9: Principe du séchoir solaire fonctionnant en mode direct de type passif [7] .....	44
Figure III.10: Exemples de séchoirs solaire direct passif: (a) boîte de séchage multiple ; (b) tente de séchage ; (c) boîte de séchage simple ; (d) séchoir en monture équatoriale.....	45

### CHAPITRE IV

Figure IV.11: Mode de transfert lors de séchage [1] .....	50
Figure IV.12: Représentation schématique d'un solide humide [2].....	54
Figure IV.3: Allure de séchage en fonction du temps [5].....	57
Figure IV.4: Évolution de la température du produit au cours du séchage [7].....	57

## La liste des tableaux:

# CHAPITRE I

Tableau I.1: Les données climatiques de la région d'Adrar [6] .....	23
Tableau I.2 : Les données statistiques des cultures dans la région de Touat [7] .....	25

# CHAPITRE II

Tableau3 II.1: Les différentes techniques de pasturisation [3].....	29
Tableau 4 II.2: Les différentes techniques de stérilisation [3].....	30

# CHAPITRE III

Tableau 5 III.1: Des différentes types de séchoir solaire[11] .....	46
---	----

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

# Introduction générale

Il existe de nombreuses sources d'énergie que l'homme possède, dont les plus importantes sont les énergies fossiles, qui sont (pétrole, gaz et charbon), mais elles sont peu nombreuses et coûteuses, ce qui a conduit l'homme à recourir au soleil comme source alternative d'énergie.

L'Algérie dispose d'un important ensoleillement durant la majeure partie de l'année. Elle bénéficie d'une durée annuelle moyenne d'ensoleillement de l'ordre de 2500 heures, et reçoit une énergie solaire moyenne quotidienne de 16.2 à 27 MJ/m<sup>2</sup> sur le plan horizontal [1].

Dans le sud algérien, où l'humidité relative de l'air est inférieure à 30% durant la plus grande partie de l'année, où la durée de l'ensoleillement est de 3600 heures/an et où le rayonnement solaire global annuel est en moyenne de 650W/m<sup>2</sup> [2].

L'augmentation de la production de certains produits agricoles s'est réalisée en un temps très court, les capacités de stockage par les chambres froides n'ont pas suivi le même rythme. Donc la question qui est posée: Quelles sont les techniques ou les procédés qui peuvent nous solutionner le problème?

Le séchage solaire des produits agricoles constituera une solution avantageuse pour la réduction des pertes après récolte.

Le séchage est l'une des anciennes méthodes largement utilisées pour conserver les aliments, et il est utilisé depuis l'Antiquité par les anciens Babyloniens, Égyptiens, Romains et Grecs dans la conservation de certains types de fruits et légumes et les cultures céréalières, car le séchage empêche la croissance des micro-organismes et des bactéries, ainsi que la fermentation qui se produit provoque la détérioration des aliments.

Le séchage naturel au soleil est l'une des plus anciennes méthodes utilisées pour sécher les aliments, où le produit est placé sur le sol et fluctue avec le temps pour s'assécher. Cependant, ce procédé présente de nombreux inconvénients, dont le plus important est l'exposition. Le produit est basé sur les insectes et les conditions météorologiques. Pour cette raison, des séchoirs industriels pour la conservation des aliments ont été inventés et séchez-le de manière propre et sûre.

Il existe différentes méthodes de séchage des denrées alimentaires à séchoirs automatiques qui dépendent des caractéristiques des denrées alimentaires et de leur degré de sensibilité à la chaleur. La chaleur est dirigée directement vers les denrées alimentaires humides ou la substance liquide par l'air chaud, et en même temps cet air transporte de l'humidité. Ou le système indirect dans lequel la chaleur est transférée de la vapeur ou des réseaux électriques ou thermiques à l'aliment par conduction ou rayonnement pour accomplir le processus de séchage. Ce système est

utilisé dans les équipements de séchage sous vide. Notre thème concerne le séchage solaire de type direct.

Ce travail se compose de quatre chapitres:

- Le premier chapitre présente un aperçu de la zone de Touat géographiquement et météorologique ainsi que les différents espèces des produits agricoles produits dans cette zone.
- Le deuxième chapitre présent un aperçu général sur les diverses méthodes de stockage possibles, dans le cas de la surproduction.
- Le troisième chapitre comporte une idée générale sur les différents types des séchoirs connus et utilisés dans le but de la conservation des produits alimentaires.
- Le dernier chapitre est consacré pour une étude sur les différents paramètres et modes des transferts et pertes thermiques dans un séchoir solaire fonctionnant en mode directe.

### Les références:

- [1] **Boussalia Amar**, Contribution a l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux, Mémoire de Magister en Génie Climatique Université mentouri – constantine, 2010
- [2] **BOUGHALI, Slimane**. Étude et optimisation du séchage solaire des Produits agro-alimentaires dans les zones Arides et désertiques. 2010. Ph D Thesis. Université de Batna 2

## ***CHAPITRE I: APERÇU DE LA ZONE DE TOUAT***

**I.1 Introduction:**

La connaissance du cadre géographique de n'importe quelle région est d'une grande importance, car parvenir à la déterminer avec précision nous met en face de données avec lesquelles nous pouvons connaître les différents éléments affectant sur l'étude. Dans ce chapitre, nous étudierons la situation géographique de la région du Touat et connaissons le climat qui règne dans cette zone, ainsi que les cultures agricoles qui y abondent

**I.2 Cadre géographique et physique général de la zone de Touat:****I.2.1 Situation géographique:**

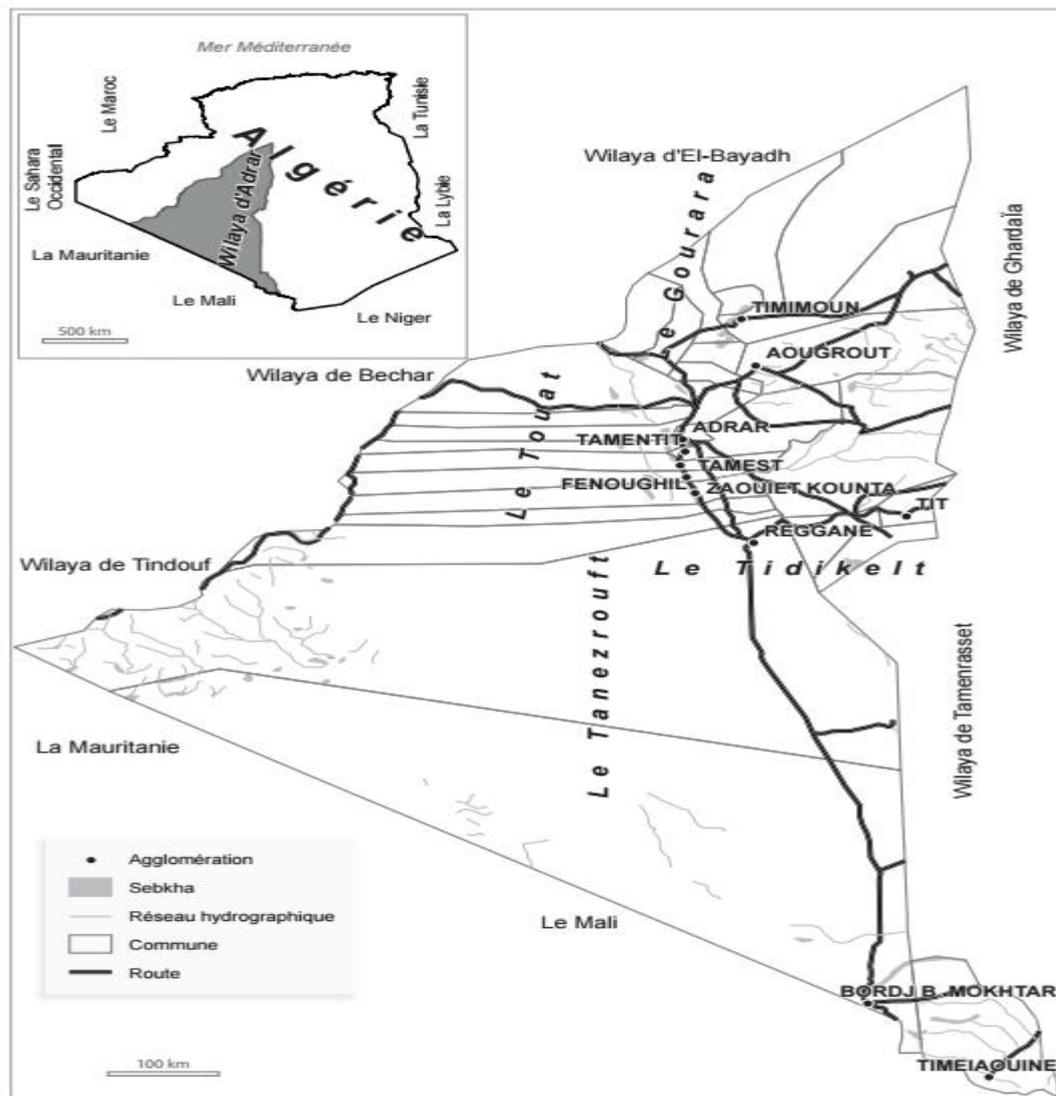
La région, formée de trois sous-ensembles, le Touat à proprement parler, le Gourara et le Tidikelt, est située au sud du grand Erg occidental [1].

La région du Touât occupe le centre de la wilaya d'Adrar, elle constitue une grande zone allongée dans le sens Nord-Sud, Elle est comprise entre latitude Nord  $Y = 26^{\circ}30'N$  et  $Y = 28^{\circ}30'N$  et les méridiens  $X = 0^{\circ}30'W$  et  $X = 0^{\circ}30'E$  [2]. Et sa hauteur au niveau de la mer est de 276 m.

Elle est limitée:

- Au Nord par le grand Erg Occidental.
- Au Sud par le plateau du Tanezrouft.
- A l'Est par le plateau du Tademaït.
- A l'Ouest par l'Erg Chech.

La wilaya d'Adrar, que la zone de Touat fait partie, est couvre une superficie globale de 427.968 km<sup>2</sup> soit 17,97% du territoire national, l'espace utile demeurant toute fois réduit. La wilaya d'Adrar comprend onze (11) Daïra et (28) vingt huit communes ; sa population est estimée à 441.800 habitants (selon les statistiques du bureau national en 2017[3]) soit 0,75% hab/km<sup>2</sup> répartie à travers un chapelet de 294 Ksours (localités) éparpillées au niveau de les trois régions: le Gourara (Timimoune), le Touat (Adrar) et le Tidikelt (Aoulef) [4].



**Figure I.1** La carte géographique de la wilaya d'Adrar [5]

### I.2.2 Caractéristique climatologique de la zone de Touat:

De type désertique continental, il est caractérisé par une pluviométrie très faible, d'une moyenne annuelle de 13 mm, des températures durant la période estivale atteignant un maximum de 45°C [6].

#### I.2.2.1 Températures :

Des écarts de températures considérables ; la température maximale est de plus 45°C en Juin, Juillet et en Août. En saison hivernale les températures sont souvent basses et peuvent atteindre 0°C en Décembre et Janvier.

#### I.2.2.2 les vents :

La fréquence des vents est très élevée durant toute l'année notamment le sirocco dont la vitesse peut atteindre les 100 km/h. C'est durant la période de printemps (Mars- Avril) que se manifestent le plus souvent les vents de sable.

**I.2.2.3 La pluviométrie :**

Elle se caractérise par sa faiblesse et son extrême irrégularité, le total annuel est souvent inférieur à 20 mm.

**I.2.3 Données climatiques de la wilaya d'Adrar:**

La région d'Adrar, à climat de type continental désertique, est caractérisée par un régime pluviométrique très faible avec des précipitations rares et irrégulières d'une année à une autre et par un régime thermique qui présente lui aussi de grandes variations avec des hivers rigoureusement froids et de étés très chaud (voir tableau 1 ci-dessous).

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembr	Octobre	Novembre	Ddécembr
Temp.max(c°)	20.5	23.2	27.7	33.2	37.2	43.2	46.0	44.3	40.5	33.2	25.5	15.5
Temp.min(c°)	3.8	6.6	10.5	15.5	25.5	27.7	26.6	23.8	17.1	10.5	5.5	5.5
Humidité (%)	46	40	32	25	23	20	23	29	39	48	50	50
Vent (m/s)	5.6	5.3	7.1	7.8	6.0	7.3	8.1	6.5	4.5	4.6	5.8	5.8

**Tableau I.1:** Les données climatiques de la région d'Adrar [6]

La photopériode atteint une moyenne de 11 heures par jour pour l'année avec un maximum estival de 12-13 heures.

La fréquence des vents est très grande durant toute l'année. Les vitesses sont très élevées puisque la fréquence des vents de vitesses supérieure à 5 m/s est de l'ordre de 20 à 40 %. Ainsi la région d'Adrar dispose d'un gisement solaire appréciable. L'exploitation de ces ressources énergétiques inépuisables peut répondre aux besoins en énergie des populations des régions rurales les plus enclavées.

**I.2.4 L'agriculture dans la zone de Touat:**

Le secteur agricole a connu une grande expansion dans les années 90, avec la subvention de l'état, des centaines de forages sont réalisés, des milliers d'hectares sont cultivés, dans le cadre de la mise en valeur des grands périmètres pour la production des céréales et autres cultures pour une autosuffisance de la région, les périmètres de mise en

valeur sont situées à l'Est de la zone d'étude en amont des foggaras, tout le long de l'axe reliant Adrar à Reggan.

A l'intérieur de la palmeraie, on trouve plusieurs variétés de cultures sont produites dont le rendement est très faible à cause, des faibles superficies et les méthodes d'irrigation traditionnelles utilisées, généralement ces cultures sont utilisées pour une autoconsommation.

La Superficie Agricole Totale (SAT) est de 337 650 HR, la Superficie Agricole Utilisée (SAU) couvre une superficie de 31 657 HR dont 24 675 HR de Superficie Agricole Utilisée Irriguée (SAUI) répartie comme suit :

- 19 303 HR irriguée par système gravitaire.
- 2 331 HR irriguée par système localisée.
- 3 041 HR irriguée sous pivots (irrigation par aspersion).

Le Nombre d'exploitations agricoles est de 23 467, le reboisement forestier est de 30 has [6].

		campagne 2017-2018	campagne 2018-2019		
<b><u>PALMIER DATTIER</u></b>					
<i>Superficie (ha)</i>		16 084	16 084		
<i>Nbre existant</i>		2 224 684	2 224 684		
<i>Nbre productif</i>		1 685 605	1 706 104		
<i>Produc. Qx</i>		526 029	523 929		
		<b>Sup. (ha)</b>	<b>Prod.(qx)</b>	<b>Sup. (ha)</b>	<b>Prod.(qx)</b>
Céréales		<b>11 349,0</b>	<b>651 383,0</b>	<b>11 349,0</b>	<b>651 383,0</b>
<b>Dont</b>	Blé dur	6 063,0	238 145,0	<b>6 063,0</b>	<b>238 145,0</b>
	Blé tendre	2 634,0	84 719,0	<b>2 634,0</b>	<b>84 719,0</b>
	Orge	879,0	21 127,0	<b>879,0</b>	<b>21 127,0</b>
	<b><u>Dont sous pivots</u></b>	<b>7 372,2</b>	<b>530 518,0</b>	<b>7 372,2</b>	<b>530 518,0</b>
<b>Dont</b>	Blé dur	5 868,0	<b>228 963,0</b>	<b>5 868,0</b>	<b>228 963,0</b>
	Blé tendre	-	-	-	-
		0	-	-	-
<b>Maraichage</b>		<b>2 462,0</b>	<b>306 111,5</b>	<b>2 462,0</b>	<b>306 111,5</b>
<b>Dont</b>	Tomate	98,1	25 822,0	<b>98,1</b>	<b>25 822,0</b>
	P. de terre	204,5	43550,0	<b>204,5</b>	<b>43550,0</b>

Oignon	385,0	46200,0	<b>385,0</b>	<b>6200,0</b>
<b>Dont sous serres</b>	<b>31,4</b>	<b>16818,6</b>	<b>31,4</b>	<b>16 818,6</b>
	-	-	-	-
Cult. Indust.	<b>1 995,0</b>	<b>701 860,2</b>	<b>1 995,0</b>	<b>701 860,2</b>
Tabac	532,5	17 622,5	<b>532,5</b>	<b>17 622,5</b>
Tomate Indus	1 326,0	682 338,3	<b>1 326,0</b>	<b>682 338,3</b>
Fourrage	<b>1 041,5</b>	<b>152 931,0</b>	<b>1 041,5</b>	<b>152 931,0</b>
Légumes secs	<b>82,5</b>	<b>474,1</b>	<b>82,5</b>	<b>474,1</b>
Autres	<b>112,2</b>	<b>924,9</b>	<b>112,2</b>	<b>924,9</b>

**Tableau I.2 :** Les données statistiques des cultures dans la région de Touat [7]

### I.2.5 Le gisement solaire:

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution de rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée [8].

La région d'Adrar dispose d'un gisement solaire très appréciable. L'exploitation de cette ressource énergétique inépuisable peut satisfaire les besoins en énergie de la population. La majorité des villages ou Ksars constituant la wilaya d'Adrar, pourraient être considérée comme des sites isolés en raison de l'immense superficie et leur éloignement les uns aux autres en plus des conditions climatologiques extrêmement difficiles [9].

### I.3 Conclusion:

Nous concluons de ce qui précède que la région de Touat a un emplacement stratégique, sa superficie est vaste et elle se caractérise par des terres fertiles, ce qui aide la population à pratiquer ses activités agricoles et cela se reflète positivement sur les cultures agricoles et permet une production abondante.

**Les références bibliographiques:**

- [1]: Le peuplement du Touat au XIVe -XVIe siècle : mémoire locale de lignages au sein d'un espace socio-culturel connecté <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02639313/document>
- [2]: **Mr BOUTADARA Yousef**; étude hydrogéologique des systèmes de captage traditionnels dans les oasis sahariennes cas des foggaras de la région du Touat (Adrar). Mémoire de magister. Université des Sciences et de la Technologies d'Oran Mohamed BOUDIAF. 2009.
- [3]:[https://m.marefa.org/%D9%88%D9%84%D8%A7%D9%8A%D8%A9\\_%D8%A3%D8%AF%D8%B1%D8%A7%D8%B1](https://m.marefa.org/%D9%88%D9%84%D8%A7%D9%8A%D8%A9_%D8%A3%D8%AF%D8%B1%D8%A7%D8%B1)
- [4]: <http://www.insid.dz/realisation/did/D3.pdf>, page consulté le 10/03/2021
- [5]: **Sid-Ahmed BELLAL, Mohamed HADEID, Tarik GHODBANI et Ouassini DARI.** Accès à l'eau souterraine et transformations de l'espace oasien: le cas d'Adrar (Sahara du sud-ouest algérien). Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers Département de Géographie et d'Aménagement du Territoire, Université d'Oran 2. 2017. <https://www.semanticscholar.org/paper/Acc%C3%A8s-%C3%A0-l'E2%80%99eau-souterraine-et-transformations-de-%3A-Bellal-Hadeid/95fbbc2cedfb9044425bd9657afd7ddfd6bb9bd9>
- [6]: l'eau, l'énergie & le vent a travers la région d'Adrar, Algérie K. MESSAITFA T. CHERGUI (URER/MS) BP 478 ADRAR 01000 [www.amistimimoun.org](http://www.amistimimoun.org) le 15/03/2021
- [7]: Direction de l'agriculture de la wilaya d'Adrar
- [8]: **Mr. OUDRANE Abdellatif**; contribution à la modélisation et au développement des systèmes de chauffage solaire à usage individuel, Thèse de Doctorat. École nationale polytechnique d'Oran- Maurice Audin,(05 Mars 2018)
- [9]: **Melle. Ouled Hammadi Selma Melle. Akabli Saliha** dégradation des modules PV dans un milieu de type saharien : wilaya d'Adrar exemple mémoire de master en physique énergétique université d'Adrar. juin 2013

***CHAPITRE II:***  
***LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE STOCKAGE***  
***DE PRODUITS AGRICOLES***

## **II.1 Introduction:**

La production agricole dans la région d'Adrar prend de courtes périodes, même si le nombre de consommateurs n'est pas égal à la quantité de production. Le surplus de production ne peut pas être transféré vers les marchés nationaux car la distance est éloignée et nécessite un coût de transport élevé. Le temps de production en été est chaud. Tout cela entraîne une baisse des prix et des mauvaises récoltes.

Pour conserver les produits agricoles, des techniques et des méthodes de stockage sont utilisées qui permettent aux citoyens de faire un usage prolongé des produits agricoles. Dans ce chapitre, nous étudierons les différentes manières dont les aliments sont conservés

## **II.2 Définition:**

Stocker un aliment c'est lui offrir les conditions nécessaires à la prolongation de sa durée d'utilisation sans son altération.

L'homme a mis au point diverses méthodes empiriques de conservation: séchage, fumage, salage...etc. Avec le développement des sciences expérimentales, l'homme a développé ses méthodes de conservation et a inventé de nouvelles, basées sur des principes scientifiques. Certaines sont complètement le fruit de l'innovation: réfrigération, lyophilisation, appertisation, ionisation, lumière pulsée... Les denrées stockées sont des produits regroupées durant la période de pléthore et stockés à l'abri des agressions. Ces denrées sont attaquées par divers ravageurs qui risquent d'altérer les produits stockés [1].

## **II.3 Les différentes méthodes de stockage:**

### **II.3.1 La conservation par la chaleur:**

Cette méthode de conservation consiste à détruire par la chaleur des micro-organismes contenus dans les denrées alimentaires, et à conditionner ces dernières dans un emballage étanche pour éviter les décontaminations microbiennes ultérieures.

### II.3.1.1 Pasteurisation

La pasteurisation a pour but de détruire les microorganismes pathogènes et d'altération. Elle a été inventée par Louis Pasteur en 1856 par lequel un aliment est chauffé à une température définie pendant une période de temps fixée avant d'être refroidis rapidement. Les températures de pasteurisation sont inférieures à 100°C puisqu'elles varient de 70°C à 85°C [2].

Nom de la technique de pasteurisation	Traitement		Exemple
	Température appliqué	Durée de traitement	Ovo produits, bière, soda.
Pasteurisation basse	63-65°C	Quelques minutes	Lait, jus de fruits, semi-conserves, potage.
Pasteurisation haute	70-75°C	Quelques secondes	Lait, jus de fruits.

**Tableau3 II.1:** Les différentes techniques de pasturisation [3]

### II.3.1.2 L'Ultra Haute Température

Le traitement à ultra haute température qui consiste à chauffer le produit à une température assez élevée, entre 135°C et 150°C, pendant un temps très court, entre 1 à 5 secondes. Ce processus est utilisé pour la stérilisation des produits liquides (lait, jus de fruits,...) ou de consistance plus épaisse (desserts lactés, crème, jus de tomates...) [3].

### II.3.1.3 L'appertisation:

Qui consiste à stériliser par la chaleur des denrées périssables dans des contenants hermétiques (boîtes métalliques, bocaux). L'appertisation ayant pour objet la conservation des aliments de longues périodes. Les aliments sont chauffés à +100°C en fonction de la nature des produits et du temps de chauffage. Les germes, spores et les enzymes sont détruits, pour une conservation de longue durée, à l'abri de l'air et de la lumière [3].

### II.3.1.4 Stérilisation

La stérilisation est une technique destinée à éliminer tous les micro-organismes pathogènes y compris les formes sporulées et la plupart des autres germes susceptibles de contaminer un produit alimentaire. Les aliments stérilisés se conservent donc à températures ambiantes tant que le récipient n'a pas été ouvert et bénéficient d'une date limite d'utilisation optimale (DLUO) [2].

Nom de la technique de stérilisation	Traitement		Exemples
	Température appliqué	Durée de traitement	
<b>Stérilisation classique</b>	110 à 115°C	Quelques minutes	Lait, viandes, légumes, poisson
<b>Stérilisation par ultra haute température ( UHT)</b>	140 à 150°C par injection de vapeur	Quelques secondes	Lait, crèmes fraiche liquide, potage, jus de fruit

**Tableau 4 II.2:** Les différentes techniques de stérilisation [3]

### II.3.2 Technique de conservation par le froid:

Le traitement par le froid permet de ralentir, voire arrêter, la prolifération et l'action de microorganismes, et de conserver l'aliment pendant une période plus ou moins longue [2].

#### II.3.2.1 Réfrigération:

La réfrigération correspond à une conservation par le froid positif pendant une durée limitée puisque les produits réfrigérés bénéficient d'une date limite de consommation (DLC). Généralement, la température de réfrigération se situe dans les alentours de 0 °C à 4 °C.

Exemple de la durée de conservation de certains aliments par la réfrigération [4]:

- Pommes : -1 à 5 °C ; 3 à 8 mois ;
- Abricot : 0 °C ; 1 à 2 semaines ;
- Haricot vert : 5 à 7°C ; 7 à 10 jours ;
- Melons : 0 à 10°C ; 5 jours à 6 semaines ;

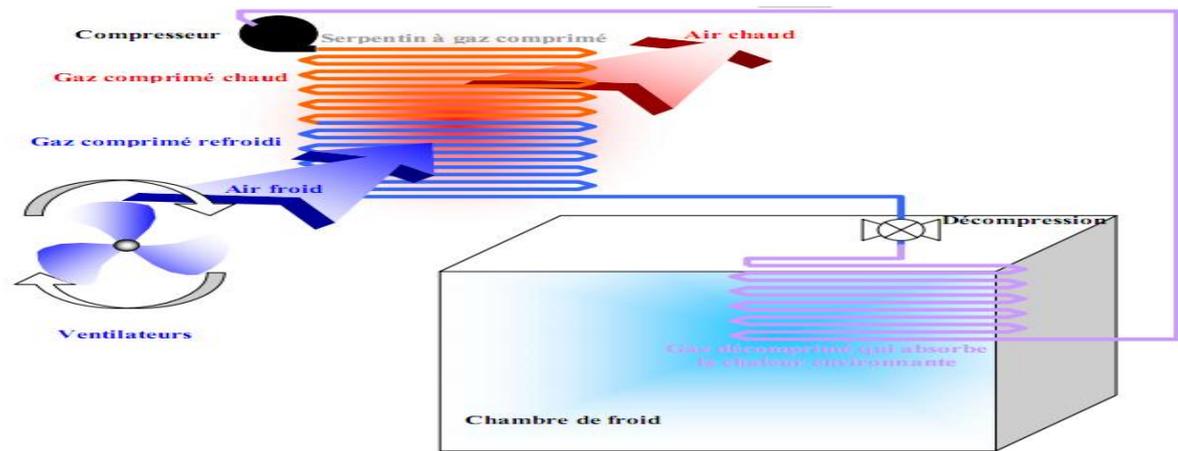


Figure II.1: Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur [5]

### II.3.2.2 Congélation:

Est le procédé de conservation qui transforme l'eau contenue dans une denrée alimentaire en glace, sous l'action du froid. Ce procédé doit permettre d'obtenir une température à cœur comprise, selon le produit, entre  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $-18^{\circ}\text{C}$  après stabilité thermique. La congélation permet la conservation des aliments à plus long terme que la réfrigération [3].

### II.3.2.3 La surgélation (congélation rapide):

C'est une technique qui permet d'exposer l'aliment à des températures plus basses que la congélation. La surgélation consiste à congeler rapidement une denrée saine et en parfait état de fraîcheur, en abaissant sa température très rapidement jusqu'à moins  $18^{\circ}\text{C}$  en tous points. Grâce à ce procédé, l'eau contenue dans les cellules se cristallise finement limitant ainsi la destruction cellulaire. Les produits ainsi traités conservent leur texture, leur saveur et peuvent être conservés plus longtemps [2].

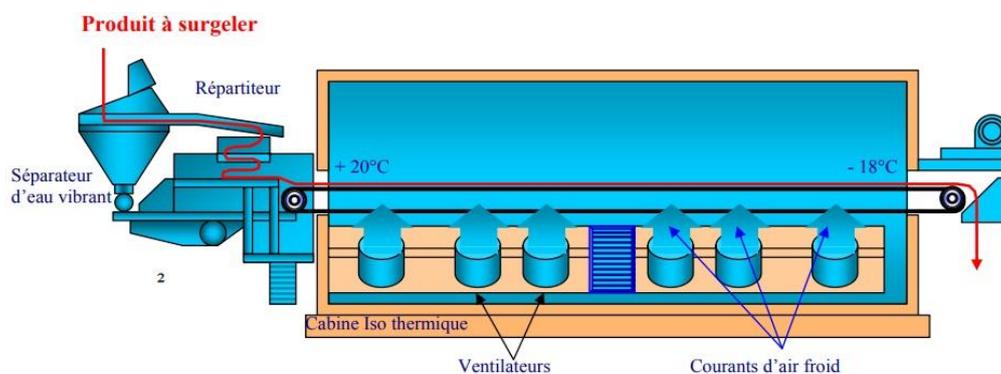


Figure II.2: Fonctionnement d'un tunnel de surgélation [5]

### II.3.3 Techniques de conservation par séparation et élimination d'eau (déshydratation):

#### II.3.3.1 La déshydratation:

La technique de déshydratation a pour but d'éliminer partiellement ou en quasi-totalité l'eau des aliments en vue d'y abaisser l'activité d'eau "Aw". De plus, l'élimination quasi-totale de l'eau permet une conservation encore plus longue [2].



**Figure II.3 :** Image de la déshydratation des aliments dans un séchoir [6]

#### II.3.3.2 Le séchage

Parmi les plus anciens procédés, le séchage est employé pour les fruits, les légumes, les viandes, les poissons... Il permet une longue conservation par l'absence de l'eau indispensable au développement des microbes qui altèrent l'aliment. Réalisé au soleil d'abord, il a ensuite été effectué au-dessus du feu, amenant une technique plus évoluée: le fumage [5].

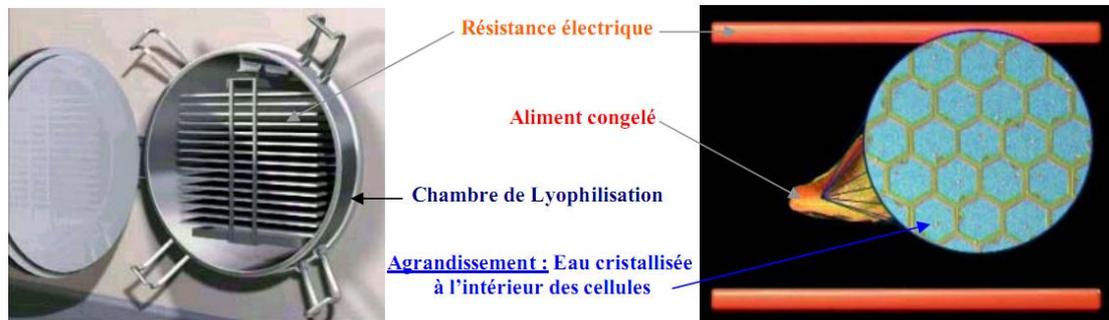


**Figure II.4:** Exemple de séchage de tomate [7]

#### II.3.3.3 La lyophilisation:

La lyophilisation est un processus de déshydratation qui consiste en l'élimination de l'eau par sublimation. Le principal avantage de cette technique est la qualité supérieure du produit fini. Toutefois, vu le coût du procédé, la lyophilisation

reste généralement réservée aux produits à haute valeur ajoutée tels que les produits pharmaceutiques, aliments pour bébés et certains fruits et épices [8].



**Figure II.5:** Lyophilisation des aliments[5].

#### II.3.3.4 La concentration:

La concentration consiste à augmenter la masse d'un produit par unité de volume et peut être réalisée par déshydratation partielle.

L'élimination de l'eau peut être réalisée:

- Par voie mécanique (centrifugation, égouttage, pressurage, ultrafiltration)
- Par voie thermique (évaporateur, séchoir, tour de séchage) [3].

#### II.3.4 Les techniques chimiques de conservation:

##### II.3.4.1 Le sucrage:

Le sucrage est un excellent conservateur grâce à sa grande avidité pour l'eau. Les microbes n'ayant plus assez d'eau libre ne peuvent se développer dans des milieux trop sucrés. Le rôle du sucre ressemble à celui du sel sauf qu'il n'est efficace qu'à de très fortes concentrations (65-67 %). On emploie ce procédé pour les gelées, les marinades, les confitures [5].

##### II.3.4.2 Le salage:

Le salage consiste à soumettre l'aliment à l'action du sel, soit en le recouvrant directement de sel (salage à sec), soit en le plongeant dans une solution salée (saumurage). C'est une technique surtout utilisée pour la conservation de la charcuterie et des poissons [9].

En diminuant l'activité de l'eau du produit, ce procédé permet de freiner ou de bloquer le développement microbien [3].

### **II.3.4.3 Le fumage:**

Le fumage ou la fumaison consiste à soumettre une denrée alimentaire à l'action des composés gazeux qui se dégagent lors de la combustion de végétaux. Le fumage joue le rôle d'aromatisation et/ou de coloration. Il s'applique principalement aux produits carnés pour lesquels le séchage suivi du fumage permet de conserver les viandes et poissons grâce à l'action combinée de la déshydratation et des antiseptiques contenus dans la fumée [10].

La fumaison peut se faire à froid (12-25°C) ou à chaud (50-85°C). Lorsqu'elle est réalisée à chaud, elle est associée à une dénaturation des protéines et une destruction des microorganismes [11].

### **II.3.5 Autres techniques:**

#### **II.3.5.1 Fermentation:**

La fermentation est définie comme l'utilisation contrôlée de microorganismes sélectionnés dans le but de préserver les aliments par production d'acides (pour la fermentation lactique) ou de modifier leurs caractéristiques d'alcool (pour la fermentation alcoolique), et organoleptiques [11].

#### **II.3.5.2 Radiations ionisantes:**

Les radiations ionisantes sont appliquées aux aliments dont le but d'améliorer leur conservation. Les aliments ayant subi un traitement aux radiations ionisantes sont dites « irradiés » mais ils ne sont nullement « radioactifs ». L'irradiation des denrées alimentaires peut être réalisée par trois types de rayonnements ionisants : Rayons X, Électrons accélérés et Rayons  $\gamma$ . La norme générale Codex pour les denrées alimentaires irradiées précise que la dose maximale absorbée pour une denrée alimentaire ne doit pas être supérieure à 10 kGy [11].

### **II.4 Conclusion:**

Nous concluons de notre étude dans ce chapitre que ces technologies, en contrôlant la croissance des microorganismes, permettent de ralentir la dégradation des aliments prolonge ainsi sa durée de vie. Ce qui conduit à une consommation facile par la population à tout moment de besoin.

**Références bibliographique:**

- [1]: **Faiza Taibi, Collectif, Mahieddine Boumendjel**, Conservation Et Stockage Des Denrées Alimentaires, **éditeur:** Omniscryptum Gmbh & Company Kg, 2015, **ISBN:** 3841741517, 9783841741516
- [2]: **EMILIE F.**, 2009. Connaissance des aliments. Bases alimentaires et notionnelles de la diététique. 2<sup>ème</sup> Edition Lavoisier. ISBN : 978-7430-1156-7
- [3]: **Melle TAAZIBT Djamila, elle YAKOUB Dyhia** Une nouvelle méthode de conservation des sardines communes (*Sardina pilchardus*) de la région de BOUHAROUN Mémoire de fin d'étude université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Soutenu le : 04/07/2017
- [4]: <https://genie-alimentaire.com/spip.php?article10>
- [5]: **BOUMENDJEL**, (2005). Conservation des denrées alimentaires. Centre Universitaire d'El-Tarf.]
- [6]: [https://www.biomag-nature-vitalite.com/wp-content/uploads/2015/06/.OP-Dehydraters\\_\\_cont\\_\\_117\\_copy\\_m.jpg](https://www.biomag-nature-vitalite.com/wp-content/uploads/2015/06/.OP-Dehydraters__cont__117_copy_m.jpg)
- [7]: <https://www.agricultureaucameroun.net/conservation-et-technique-de-sechage-de-la-tomate/>
- [8]: **Mahacine Amrani1\*** , **Amin Laglaoui2** apport du procédé de lyophilisation sur la qualité des fraises marocaines contribution of freeze-drying process on moroccan strawberries quality scientific study & research ♦ vol. viii (3) ♦ 2007 ♦ Issn 1582-540x 297
- [9]: **Frédéric BORGES**. Pages bibliographiques: Sécurité sanitaire des aliments Année 2013-2014. BURTIN Hélène, CHERUEL Anthony, COLLU Emilie, DUDOGNON Emilia, MOUREAU Clément, SCHMITT Caroline, PACE Hélène, PLESSIS Manon
- [10]: <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Publications/Vie-pratique/Fiches-pratiques/Conservation-des-aliments>

[11]: **Dr: Cheroual E A**; Méthode de conservation des aliments et emballage alimentaire Faculté de Médecine-Université Ferhat Abbas Sétif-1 Année universitaire 2019-2020

---

**CHAPITRE III:  
LES DIFFÉRENTES TYPES DES  
SÉCHOIRS SOLAIRES**

**III.1 Introduction:**

Le séchage est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour conserver les produits agricoles (légumes et fruits).

Le séchage est une opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau [1].

Le processus de séchage est réalisé par des séchoirs solaires qui remplissent le but requis dans un court laps de temps. Dans ce chapitre, nous étudierons les différents types des séchoirs solaires.

**III.2 Définition:**

Le séchoir solaire est un appareil qui permet le séchage des produits agricoles pour la conservation et le stockage pendant une période plus longue.

**III.3 Types des séchoirs solaires:****III.3.1 Le séchage naturel:**

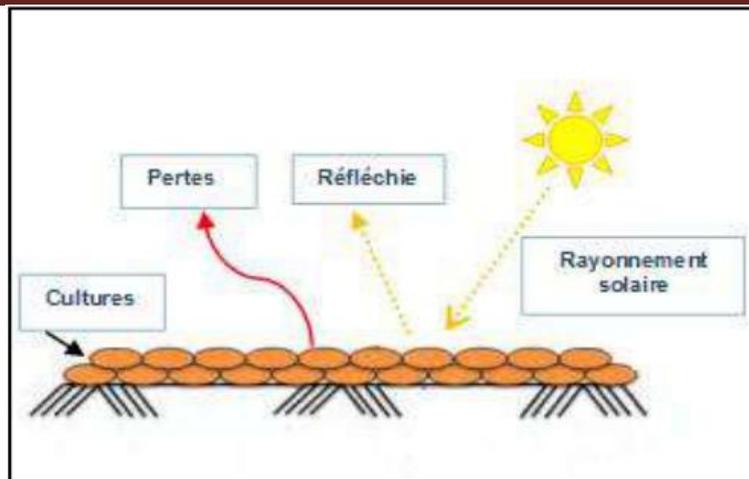
Ce type de séchage est traditionnel, il est également appelé le séchage à l'air libre. C'est l'une des méthodes de conservation des aliments les plus fréquentes et les plus longues dans un grand nombre de pays en raison de sa simplicité et de l'abondance du rayonnement solaire.



**Figure III.1:** Séchage solaire direct des abricots sur une surface extérieure de béton [2]

**III.3.1.1 Le principe de séchage à l'air libre:**

Le principe de séchage à l'air libre est simple, le rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchiée vers l'environnement. L'énergie absorbée par la surface des cultures est convertie en énergie thermique et augmente la température de la culture [2].



**Figure III.2:** Principe de séchage à l'air libre [2]

### III.3.1.2 Les avantages et les inconvénients de séchage à l'air libre:

#### a) Les avantages:

- \* N'exige ni matériel ni main d'œuvre qualifiée
- \* Procédé simple et non coûteux
- \* Source d'énergie solaire gratuite et non polluante
- \* Pas de dépense d'énergie
- \* Séchage doux grâce à l'alternance jour et nuit

#### b) Les inconvénients:

- \* Une longue durée de séchage (possibilité de moisissure).
- \* Altération de la qualité du produit par le rayonnement solaire.
- \* l'efficacité du processus est faible compte tenu des nombreux aléas (météorologie, constituants du produit sensibles au rayonnement ultra violet, insectes, rongeurs, perte de vitamine...etc.).

### III.3.2 Le séchoir solaire indirect:

C'est un séchoir qui utilise l'énergie de la chaleur indirectement, à l'intermédiaire d'un fluide caloporteur

Il est constitué [3]:

- D'une chambre de séchage : caisson isolant où seront disposés les aliments à déshydrater.
- D'un capteur solaire: une boîte munie d'une surface vitrée contenant une tôle métallique noircie permettant de transformer l'énergie solaire en chaleur.



Figure III.3: Séchoir solaire de type indirect [4]

### III.3.2.1 Le principe de fonctionnement:

L'air frais provenant de l'extérieur est préalablement chauffé dans le capteur solaire, le contact air absorbeur, et le transfert convectif ainsi que les chicanes permet d'élever la température de l'air. Ce dernier arrive à l'entrée de la chambre de séchage et avant de traverser la claie, l'air est chauffé par une source d'appoint thermique qui fournit, en cas de besoin, de l'énergie supplémentaire permettant d'assurer une température de séchage élevée. L'aspirateur aspire l'air de séchage qui traverse la claie, et l'évacue vers l'extérieur [5].

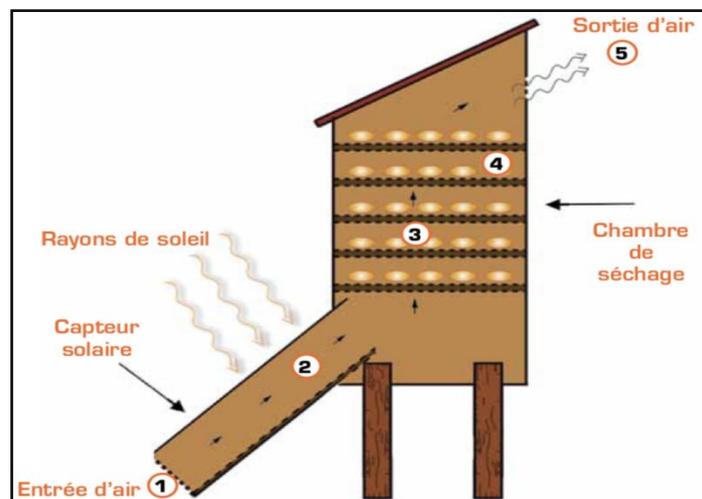


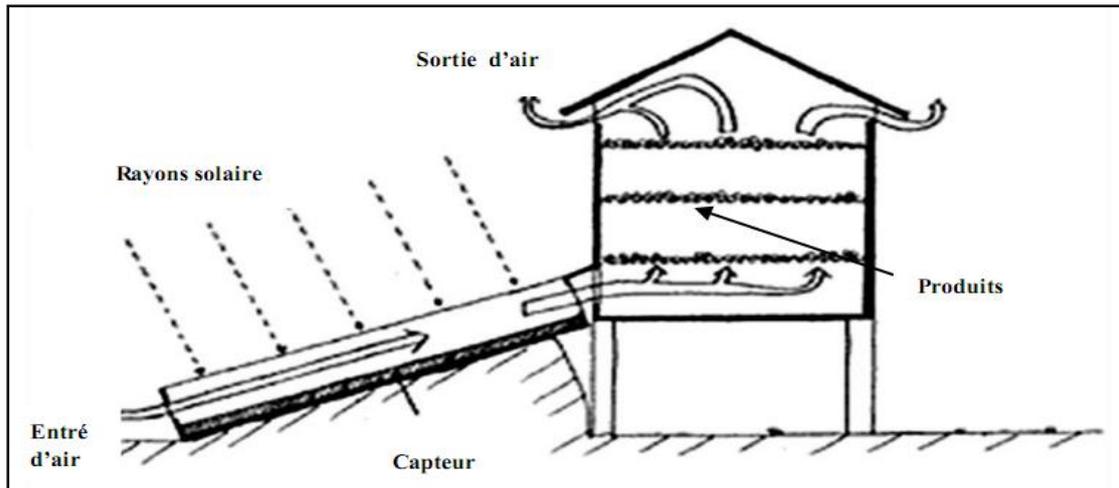
Figure III.4: Principe de fonctionnement de séchoir solaire indirect [3].

### III.3.2.2 Les type des séchoirs solaires indirects:

#### ✚ Séchoirs solaires passifs

Ce type de séchoir est composé d'insolateur et d'une armoire de séchage. L'air asséchant est préchauffé dans l'insolateur puis s'écoule par convection naturelle dans l'armoire de séchage. Les transferts dans l'armoire de séchage et l'insolateur peuvent

être intensifiés par l'effet cheminé d'un conduit surmontant l'armoire de séchage. Il est caractérisé par sa simplicité de construction et donc un faible coût.



**Figure III.5:** Séchoir solaire indirect passif [6]

#### ✚ Séchoirs solaires actifs

Ils sont généralement composés d'un insolateur à air pour préchauffer l'air asséchant, d'une armoire de séchage et d'un ventilateur pour envoyer l'air chaud dans l'armoire de séchage. Hegde (2015) a proposé un dispositif intégré illustré sur la figure I-16 : l'armoire de séchage est connectée à un insolateur plan à air. L'air circule dans l'armoire de séchage sous l'action d'un ventilateur fixé sur sa partie supérieure. Hegde a utilisé ce séchoir pour le séchage de bananes à Bengaluru en Inde et à analyser l'influence de la vitesse de l'air asséchant sur les performances thermiques de ce séchoir. Les résultats présentés montrent qu'une vitesse de l'air égale à 1 m/s est adaptée au séchage d'une couche de banane d'épaisseur égale à 5 mm. Pour cette vitesse et cette épaisseur la durée de séchage est d'environ 16 heures. Ce même type de séchoir a été utilisé pour le séchage de copra et d'oignon [7].



**Figure III.6:** Séchoir solaire en mode direct à convection forcée [7].

**III.3.2.3 Les avantages et les inconvénients de séchoir solaire indirect****a) Les avantages:**

Le séchoir solaire indirect présente les avantages suivants :

- ✓ Le produit n'est pas exposé directement au soleil.
- ✓ Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- ✓ Possibilité de construire ce type de séchoirs localement, avec un coût réduit.
- ✓ Son fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

**b) Les inconvénients:**

- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

**III.3.3 Les séchoirs solaires directs:**

Un séchoir solaire direct est un appareil simple qui permet de sécher les aliments en les disposant sous une plaque de verre ou de plastique transparente résistante au soleil dans un châssis. L'effet de serre qui se produit abaisse le taux d'humidité des aliments. Pour éviter qu'il y ait de la condensation, des trous d'aération sont percés dans le châssis [8]. C'est le cas de notre étude.

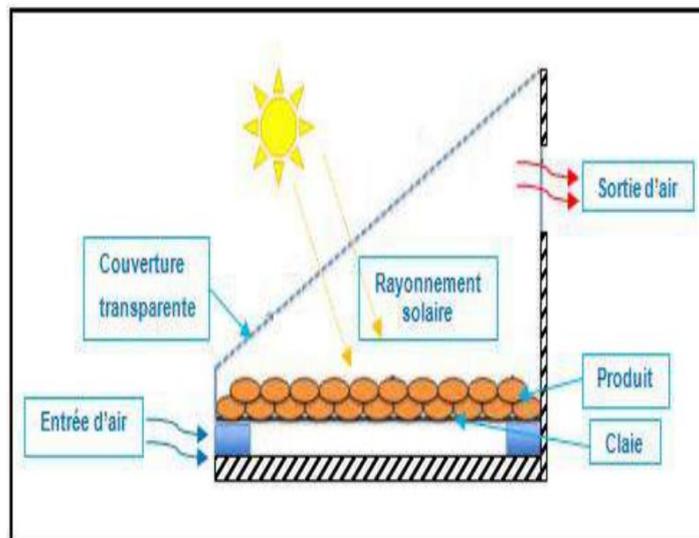
Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de larges possibilités de conception : du séchoir coffre à plateau et adapté à la petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités [9].



**Figure III.7: Séchoir solaire de type direct[10]**

### III.3.3.1 Le principe de fonctionnement:

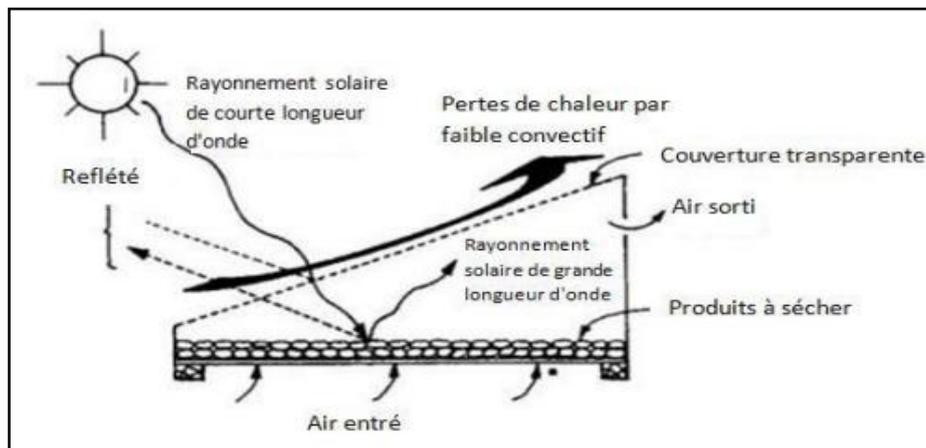
Dans ces séchoirs, les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Ces séchoirs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher. La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la position et orienté généralement au Sud (**Figure 8**). La chaleur est générée par absorption des radiations solaires incidentes sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage [2].



**Figure III.8: Principe de fonctionnement de séchoir solaire direct [2]**

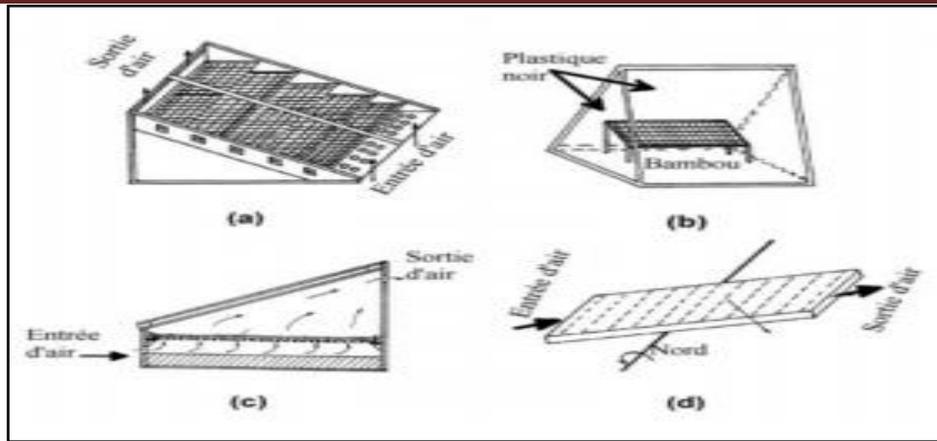
**III.3.3.2 Les types des séchoirs solaires directs:****+ Séchoirs solaires passifs**

Ce type de séchoir est connu sous la dénomination de boîte de séchage. Une fraction du flux solaire incident est réfléchi par la couverture transparente, le reste est transmis dans le séchoir. Une partie du flux solaire transmis à l'intérieur du séchoir est réfléchi par les produits à sécher, le reste est absorbé par ces produits et les matériaux dont sont composées les parois du séchoir. Il en résulte une augmentation de leurs températures qui provoque une émission d'un flux de chaleur de grande longueur d'onde pour lequel la transmissibilité de la couverture est faible. C'est l'effet de serre. La couverture transparente sert également à réduire les pertes de chaleur par convection avec le milieu ambiant [7].



**Figure III.9:** Principe du séchoir solaire fonctionnant en mode direct de type passif [7]

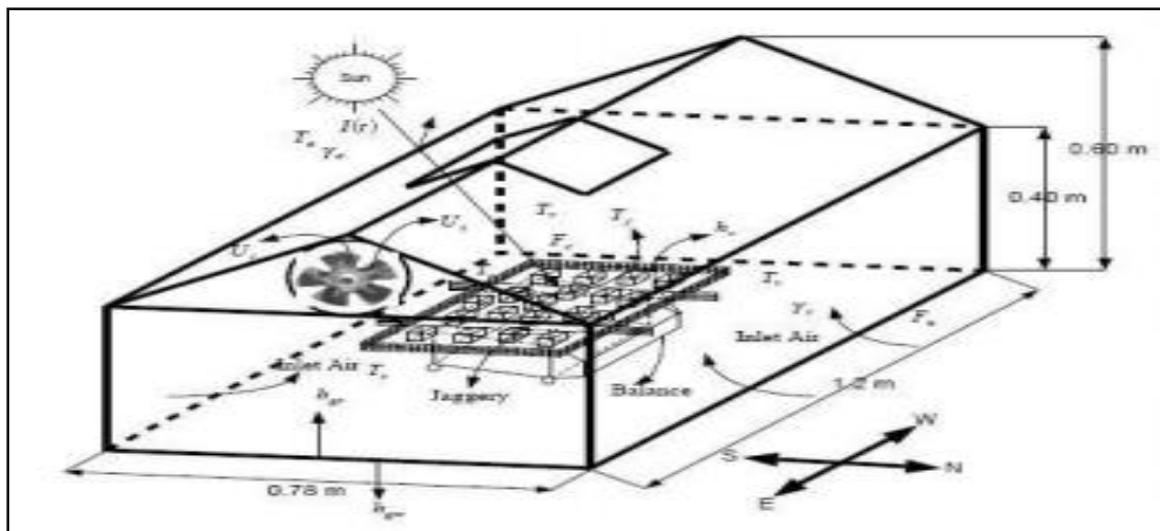
+ Il existe plusieurs types de séchoir solaire direct fonctionnant en convection naturelle. Dans ces séchoirs, les produits sont disposés sur des claies, des dalles en béton ou des nattes.



**Figure III.10:** Exemples de séchoirs solaires directs passifs: (a) boîte de séchage multiple ; (b) tente de séchage ; (c) boîte de séchage simple ; (d) séchoir en monture équatoriale

#### ✚ Séchoirs solaires actifs:

Dans ce type de séchoir, l'air asséchant circule dans le séchoir sous l'action d'un ventilateur. Ainsi, le contrôle du débit d'air contribue à la réduction de la surchauffe du produit et à une diminution de la durée de séchage. La **Figure 11** présente un exemple de ce type de séchoir.



**Figure II.11:** Exemple de séchoir solaire de mode direct de type actif [7]

### III.3.3.3 Les avantages et les inconvénients de séchoir solaire direct

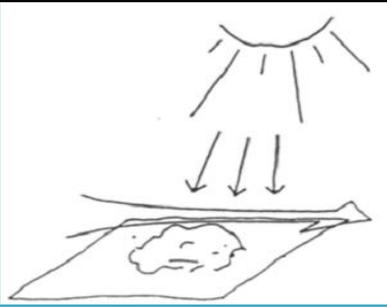
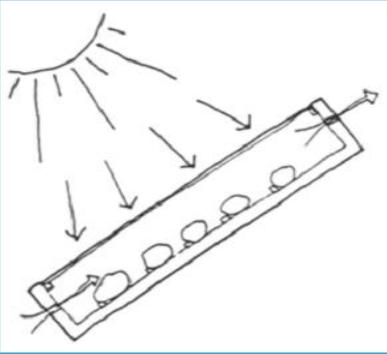
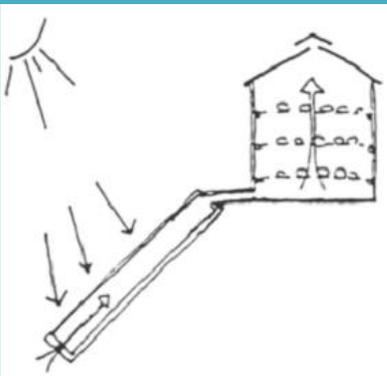
#### a) Les avantages:

- Bien meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Par besoin de main d'œuvre qualifiée.

- Grandes possibilités de conception.

**b) Les inconvénients:**

- Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et B, décoloration.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.

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

**Tableau 5 III.1:** Des différents types de séchoir solaire[11]

**I.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, certains concepts sur les séchoirs solaires ont été définis en mentionnant leurs types, qui sont directs, indirects et mixtes avec leurs avantages et inconvénients. Nous avons également abordé la définition des séchoirs solaires traditionnels que l'homme utilisé aujourd'hui malgré les développements à l'époque, en particulier dans les zones reculées, et en raison de l'exposition des matériaux séchés à de nombreux dangers des séchoirs industriels ont été inventés, qui se caractérisent par une vitesse de séchage élevée et la propreté des matériaux.

**Références bibliographiques:**

- [1] **BOUGHALI, Slimane.** Étude et optimisation du séchage solaire des Produits agro-alimentaires dans les zones Arides et désertiques. 2010. PhD Thesis. Université de Batna2
- [2] **Souheyla KHALDI.** Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie. thèse de doctorat de l'établissement université bourgogne Franche-Comté préparée a l'université de technologie de Belfort-Montbéliard. soutenue à « Tlemcen, Algérie », le « 23/06/2018 »
- [3] [https://wiki.lowtechlab.org/wiki/S%C3%A9choir\\_solaire\\_indirect](https://wiki.lowtechlab.org/wiki/S%C3%A9choir_solaire_indirect) le 04/04/2021
- [4] <https://www.agriculture-afrique.com/fabrication-de-cuiseurs-et-sechoirs-solaires/>
- [5] **Yacine Cheradide<sup>#1</sup> , Samira Chouicha<sup>#2</sup> , Abdelghani Boubekri<sup>#3</sup>.** Université Kasdi Merbah Ouargla, Laboratoire de développement des Energies Nouvelles et Renouvelables dans les Zones Arides et sahariennes, Faculté des Sciences Appliquées, Ouargla, du 22 au 24 Novembre, 2015
- [6] **A. TOM,** ‘‘ contribution au séchage solaire des produits carnés: modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux.’’ , Thèse, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2015 ;
- [7] **Aumporn Orawan.** contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase. université de perpignan via domitia. 7 décembre 2017
- [8] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-enouvelable-fonctionne-sechoir-solaire-4135/>
- [9] **SEBBAGH Khadidja, CHERFAOUI Imane;** Etude du séchage des produits agricoles dans un séchoir solaire-cas de poivron rouge Mémoire de MASTER En énergétique université M'hamed Bougara Boumerdes, 2017
- [10] Centre de Développement des Énergies Renouvelables  
<https://www.cder.dz/spip.php?article1923>
- [11] Les séchoirs : une très grande diversité Diffusé par SECAAR, 06 BP 2037 –  
Abidjan 06 – Côte d'Ivoire

---

## **CHAPITRE IV: ÉTUDE THÉORIQUE DU SÉCHAGE SOLAIRE**

### IV.1 Introduction:

Le processus de séchage se déroule à travers deux phénomènes physiques qui s'entremêlent, qui sont les phénomènes de transfert thermique et de transfert de masse, qui sont un résultat commun entre l'interaction du produit et l'air qu'il contient. Dans ce chapitre, nous allons découvrir les différentes modes du transfert, ainsi que la vitesse de séchage, ses différents modèles et ses périodes.

### IV.2 Les différents modes de transfert de chaleur et de masse au cours de séchage:

Le séchage est caractérisé par un transfert de chaleur et de masse (l'eau sous forme de vapeur). L'eau est transférée de l'intérieur du produit vers l'interface produit –air par le phénomène de diffusion et de l'interface vers l'air asséchant par le phénomène de convection [1].

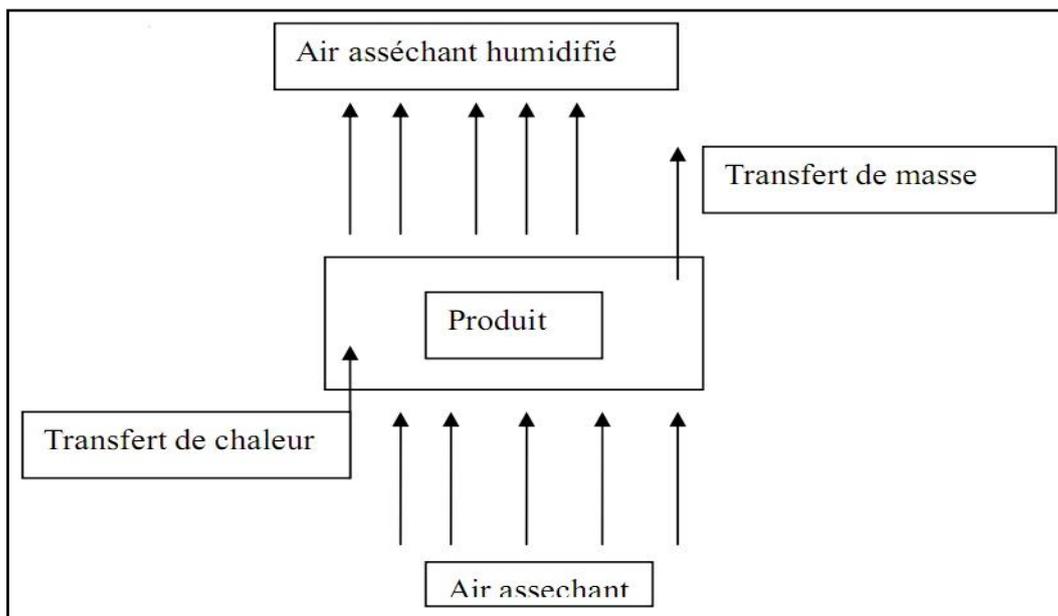


Figure IV.11: Mode de transfert lors de séchage [1]

#### IV.2.1 Les modes de transfert de chaleur

##### IV.2.1.1 Séchage par conduction:

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée [2].

La surface du produit chauffée par l'air asséchant, cette chaleur énergie est transmise vers les couches internes du produit par conduction. Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation:

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \quad 1$$

Avec:

- $\lambda$  : Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/m. K).
- $\frac{dT}{dt}$ : Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

#### IV.2.1.2 Séchage par convection [2, 3]:

Le séchage par convection consiste à mettre en contact, un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent, autour du corps à sécher, qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de fibre ou de plaques. Pour un séchage par convection, les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage sont déterminés par les coefficients de transfert à la surface, qui dépendent des caractéristiques de l'air (vitesse, température, humidité). En régime convectif, la chaleur est directement transportée par un fluide caloporteur, qui emmagasine la chaleur (air chaud, vapeur, eau, etc.). La convection est un mode de transfert rapide

- Si le mouvement de fluide est renforcé par un travail mécanique « artificiel » (ventilation, agitation, pompage d'un fluide), on parle de « convection forcée ».
  - Si au contraire, le mouvement du fluide, n'est dû qu'à des courants thermiques ou des mouvements ascensionnels d'ébullition, la convection est dite « naturelle »
- Le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température, entre le fluide et le produit, est augmentée. Toutefois la thermo-sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter), limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage.

Ce type de transfert utilise l'équation suivante:

$$Q = h A(T_a - T_s) \quad 2$$

Avec :

- $Q$  (W): la quantité de chaleur transférée par unité de temps.

- $A$  ( $m^2$ ): surface d'échange.
- $(T_a - T_s)$  ( $^{\circ}K$ ): l'écart entre la température d'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher.
- $h$  ( $W / m^2 \cdot K$ ) : coefficient d'échange par convection.

#### IV.2.1.3 Séchage par rayonnement [3]:

Ce mode est destiné aux produits en plaque (carton, viande), ou en fibre (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faibles épaisseurs (cigarettes). L'énergie est apportée aux produits à sécher par des ondes électromagnétiques (rayonnement), soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. La quantité de chaleur transmise au produit par unité du temps par ce mode de transfert est donnée par :

$$Q = A_1 \cdot C \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi \quad 3$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad 4$$

Avec:

- $T_1$  : Température de la source émettrice (K).
- $T_2$  : Température du produit (K).
- $A_1$  : Surface de l'émetteur infrarouge ( $m^2$ ).
- $A_2$  : Surface du corps recevant le rayonnement ( $m^2$ ).
- $\varphi$ : Facteur de forme.
- $\varepsilon_1$  : Émissivité de l'émetteur.
- $\varepsilon_2$  : Émissivité du produit.

#### IV.2.2 Transferts de matière [2]

Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base, telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment.

Les difficultés d'application des théories de transfert de masse, dans les processus de transformation des aliments, résultent des structures physiques complexes et de la composition chimique des denrées alimentaires qui varient pour une même denrée et change pendant la transformation.

#### **IV.2.3 Transferts d'eau en séchage [3- 2]**

Les corps à sécher sont constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci.

L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière (**Figure 2**). Le séchage peut être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur, dans un matériau poreux non saturé. Dans les produits biologiques le transfert interne d'eau est souvent le phénomène limitant. La taille des pores et la distribution des rayons des pores dans le produit, influent sur le caractère hygroscopique du produit (plus les pores sont petits, plus le caractère hygroscopique est important).

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher, qui provoque la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau.

Les difficultés sont plus complexes dans les aliments solides que dans les liquides.

Le transfert de masse implique un transfert d'une variété de composants avec la phase et en interphase par diffusion moléculaire naturelle ou par convection forcée. La masse est transférée par gradient de concentration ou de pression partielle.

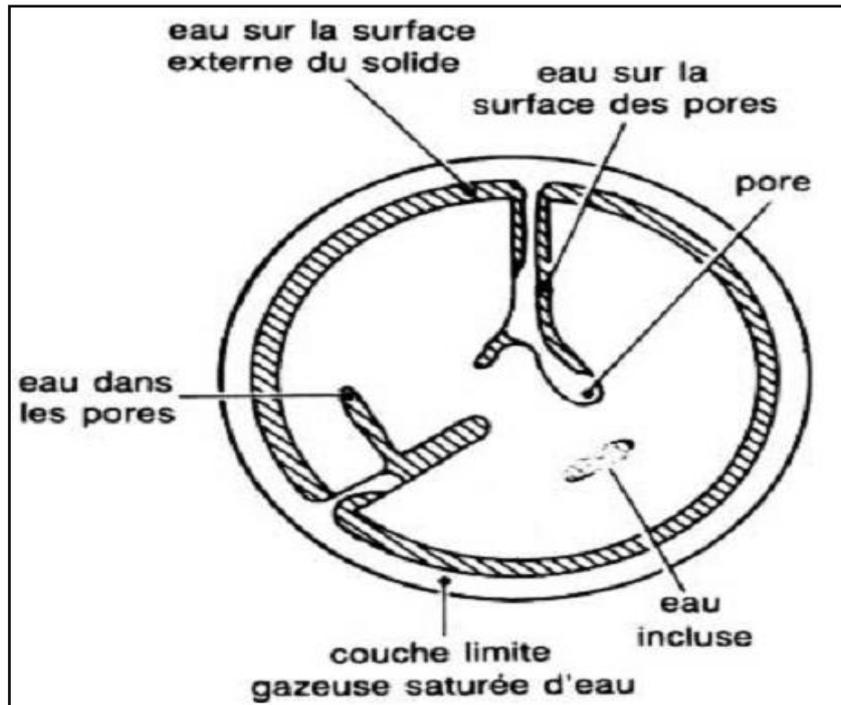


Figure IV.12: Représentation schématique d'un solide humide [2]

### IV.3 Caractéristiques de l'air de séchage :

#### IV.3.1 Humidité :

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.

##### IV.3.1.1 Humidité absolue :

On appelle humidité absolue ou teneur en humidité, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par  $H_a$  est donnée par la relation suivante :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} [Kg_v \cdot Kg_{as}^{-1}] \quad 5$$

##### IV.3.1.2 Humidité relative :

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} 100 \quad 0\% \leq H_r \leq 100\% \quad 6$$

$P_v$  : Pression partielle de la vapeur dans le mélange.

$P_s$  : Pression de saturation.

### IV.3.2 Température:

#### IV.3.2.1 Température sèche T:

On nomme température sèche de l'air ou d'un gaz la température indiquée par une sonde de température nue placée dans le courant d'air ou de gaz.

#### IV.3.2.2 Température humide $T_H$ :

On nomme température humide (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température prise par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement [4].

La différence (T- $T_H$ ) représente l'humidité relative de l'air.

- Elle est égale à zéro si l'air est saturé en vapeur d'eau c'est-à-dire  $\phi=100\%$  donc pas d'évaporation possible.
- Elle augmente avec la différence [ $P_s(\theta) - P_v$ ] qui est le terme moteur du transfert de masse.

### IV.3.3 Vitesse:

On appelle vitesse de séchage la masse de liquide évaporée pendant l'unité de temps à travers une surface unitaire d'évaporation.

Cette vitesse est donnée par :

$$\frac{\dot{m}_v}{A} = - \frac{m_s}{A} \frac{dH}{d\tau} \quad 7$$

$\dot{m}_v$  = flux massique de vapeur.

$m_s$  = masse du solide sec.

$\frac{dH}{d\tau}$  = variation de l'humidité du solide avec le temps.

A = surface à travers laquelle se produit l'évaporation.

Le signe (-) indiquant que l'humidité diminue avec le temps.

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont [5]:

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit,
- la température, l'humidité et la vitesse du gaz sécheur.

On peut déterminer la vitesse de séchage de deux façons différentes:

- Soit on utilise les vitesses de séchage expérimentales d'une fine couche de produit en recherchant une corrélation qui donne directement l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps et des caractéristiques de l'air asséchant.
- Soit on se donne un modèle logique de transfert d'humidité entre le produit et l'air, les résultats expérimentaux servant à recalculer le modèle.

#### IV.4 Cinétique du séchage :

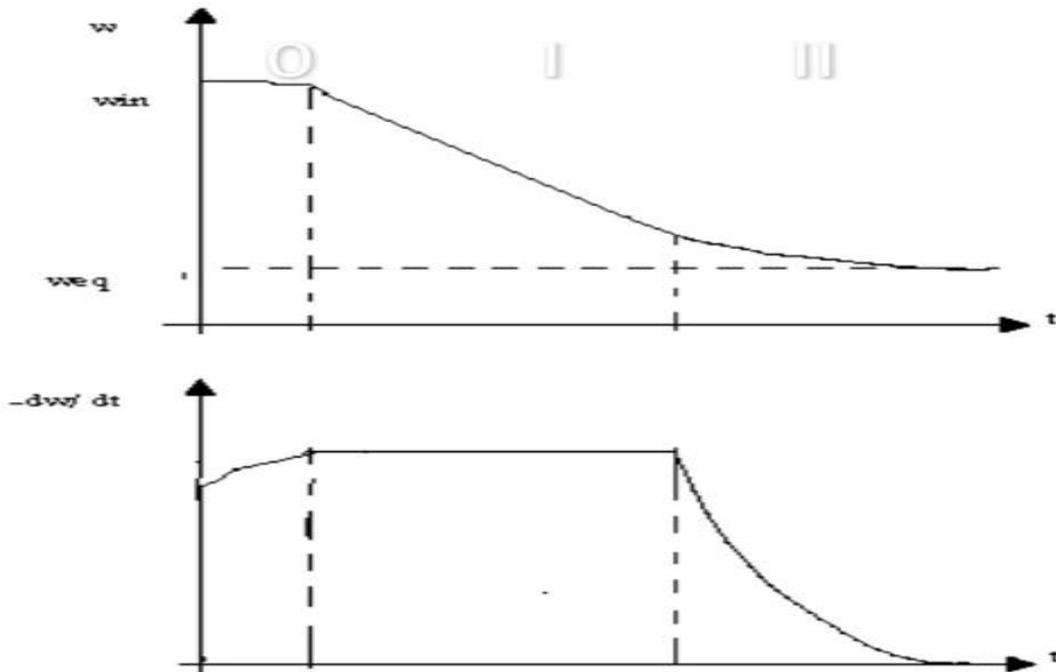
On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau (kg d'eau / m<sup>2</sup> s) en fonction du temps, au celle donnant la vitesse de séchage  $\left(-\frac{dx}{dt}\right)$  en fonction de x. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Les courbes de séchage sont représentées soit par les variations de l'humidité absolue (X) du produit en fonction du temps, soit par la variation de la vitesse de séchage  $(-dX/dt)$  en fonction du temps t [1].

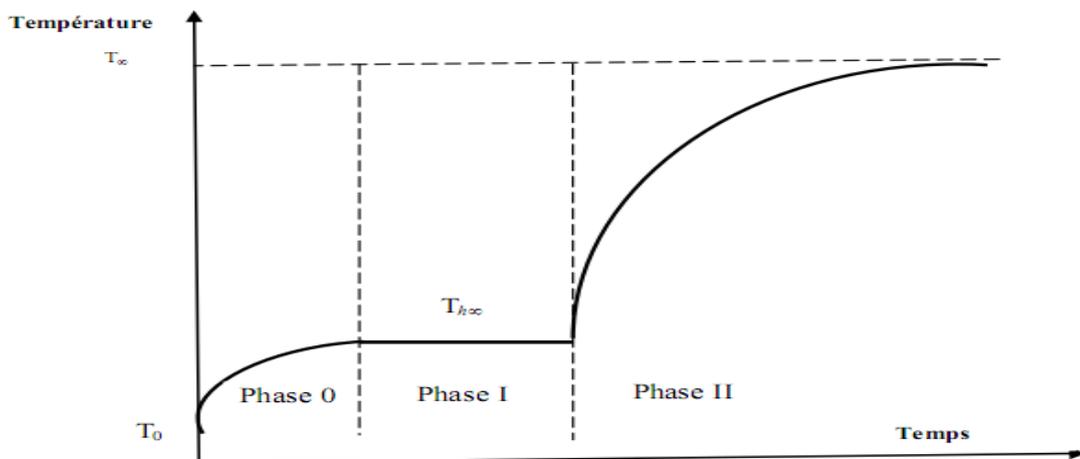
##### IV.4.1 Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide:

Tous les travaux de séchage montrent que ces courbes se distinguent suivant la nature du produit. Mais d'une manière générale, on constate l'existence de différentes périodes qui se caractérisent par un comportement différent de la vitesse de séchage [6].

Le processus de séchage est généralement subdivisé en 3 phases **figure 3** [7]:



**Figure IV.13:** Allure de séchage en fonction du temps [5].



**Figure IV.14:** Évolution de la température du produit au cours du séchage [7].

#### IV.4.1.1 Période de mise en température (phase 0):

L'humidité du produit dans cette période varie mais pas sensiblement et la température du produit varie (croît ou décroît) jusqu'à la température humide correspondant à l'environnement séchant (zone 0). Cette période est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grande taille, ou si la différence de température entre l'air et le produit est important [4].

En effet quand le produit est introduit dans le séchoir il est généralement froid et l'énergie apportée en début de séchage sert à le chauffer [7].

**IV.4.1.2 Période à vitesse de séchage constante (phase I) :**

Au cours de cette phase la quantité de chaleur apportée au produit est égale à la quantité de chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau libre. C'est la phase isenthalpe pendant laquelle la température du produit est uniforme et égale à la température humide de l'air  $T_{h\infty}$  (**Figure 4**), si l'apport de chaleur est uniquement convectif [7].

**IV.4.1.3 Période de ralentissement :**

Démarrant à une teneur en eau dite « critique », au cours de laquelle la vitesse de séchage diminue et la température du produit augmente (de sa surface vers l'intérieur) pour tendre vers la température de l'air de séchage  $T_{\infty}$ . La teneur en eau du produit diminue jusqu'à atteindre la teneur en eau d'équilibre qui est la teneur en eau limite de séchage du produit dans cet environnement (température et humidité relative) [7].

✚ Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants [6]:

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

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

**b. L'épaisseur du produit:**

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

**c. La diffusivité de l'eau dans le produit :**

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

**d. La résistance mécanique de parois cellulaires intactes :**

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

**e. Le croutage :**

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

**IV.4.2 Différents modèles de la cinétique de séchage:**

La modélisation des courbes de séchage consiste à déterminer une équation caractéristique de séchage de type :  $MR=f(t)$ . Les courbes de cinétique de séchage sont modélisées par des relations empiriques ou semi-empiriques entre la teneur en eau réduite du produit (MR) et le temps (t). Ces relations sont basées sur des constantes qui sont déterminées à partir des courbes expérimentales de séchage [4].

Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire le phénomène de changement d'humidité, et le transfert de chaleur et de masse dans le séchage.

Les modèles de séchage sont classés en trois types : les modèles empiriques, les modèles diffusifs et les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse.

**IV.4.2.1 Les modèles empiriques**

Ces modèles sont basés sur l'expérimentation pour la détermination des paramètres de séchage. Toutefois, l'utilisation de ces modèles est limitée car chacun d'eux est spécifique au type de produit ainsi aux conditions expérimentales de son séchage. Les modèles ne sont donc pas extrapolables au delà des limites de l'expérience [4].

- **Modèle empirique de Wang Singh (1978) :**

Wang Singh a proposé un modèle empirique, pour décrire les caractéristiques de séchage du produit utilisé, suivant l'équation:

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = 1 + at + bt^2 \quad 8$$

Avec :

a et b sont des constantes de séchage.

#### IV.4.2.2 Les modèles diffusifs: (Modèle de Lewis (1921) )

Le modèle de Lewis est la solution générale de la loi de Fick. Ce modèle ne considère que la diffusion basée sur la migration d'humidité. Le modèle simple de Lewis est donné comme suit:

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \quad 9$$

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

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-kt) \quad 10$$

Avec ;

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.

#### IV.4.2.3 Les modèles bases sur les transferts couplent de chaleur et de masse :

Les modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse sont les modèles qui détaillent le plus finement les différents phénomènes mis en jeu au cours du séchage. Ils permettent de séparer les phénomènes de transport internes en utilisant tout un ensemble d'équations de conservation de masse et de chaleur. Les travaux de Luikov, Philip et De Varies, Krischer, Glaser et Whitaker ont utilisé ce type de modèles basés sur les transferts couplés de chaleur et de masse. Les plus connus de ces modèles sont les suivants:

##### a) **Modèle de Henderson et Pabis (1961) :**

C'est la solution de la deuxième équation de Fick.

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = A. \exp(-kt) \quad 11$$

Avec :

A et k sont des constantes de séchage.

Ce modèle a été utilisé par Sebaii et autres, pour estimer le temps de séchage.

**b) Modèle de Page (1949) :**

Page a proposé une équation de séchage de la forme suivante.

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

Avec :

K et n sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et de la nature du produit, Ce modèle a été utilisé par I. Doymaz [4].

**c) Modèle Logarithmique:**

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a \exp(-kt) + c \quad 13$$

Avec :

k, a et c sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et sa vitesse. Ce modèle a été utilisé par Inci Türk et Phelivan ,pour décrire les courbes de séchage [4].

**IV.5 Courbe caractéristique de séchage:**

Les courbes caractéristiques à chaque produit sont obtenues après les transformations suivantes [5]:

**a.** La vitesse de séchage est remplacée par une vitesse réduite F :

$$F = \frac{V_S}{V_{S1}} \quad 14$$

Avec :

$V_{S1}$  : Vitesse de séchage constante durant la première phase.

**b.** La teneur en eau du produit est remplacée par la teneur en eau adimensionnelle.

$$x = \frac{W-W_{eq}}{W_{cr}-W_{eq}} \quad 15$$

Avec :

$W_{eq}$  : Valeur d'équilibre de la teneur en eau

$W_{cr}$  : Teneur en eau critique correspondant à la valeur moyenne de cette grandeur à la fin de la première phase à vitesse de séchage constante.

Le séchage est alors décrit par fonction  $F(x)$  avec :

$$F(1) = 1$$

$$F(0) = 0$$

$$0 < F(x) < 1 \text{ quand } 0 < x < 1$$

Cette démarche permet de représenter, pour des conditions expérimentales constantes, des fonctions  $F(x)$  uniques à chaque produit.

#### **IV.6 Le rendement de séchoir solaire direct [8]:**

Dans le séchoir direct un seul plateau horizontal (pour ne pas créer une zone d'ombre qui diminue l'efficacité du séchage) la production n'est que de 2 kg/m<sup>2</sup>.jour. Le rendement thermique est de l'ordre de 30% pour les deux types de séchoirs (direct et indirect). Dans le séchoir direct les produits à sécher sont exposés directement au rayonnement solaire, de plus les réflecteurs latéraux augmentent l'intensité solaire incidente ce qui a donné un séchage plus efficace. Ainsi pour le séchage direct l'humidité finale moyenne est de 35%.

#### **IV.7 Conclusion**

Le séchage convectif fait appel à deux phénomènes importants : le transfert de chaleur de l'air vers le produit et le transfert de l'eau du sein du produit vers sa surface. La complexité du processus de séchage nécessite l'utilisation de modèles souvent empiriques basés sur la courbe de séchage obtenu expérimentalement.

La modélisation du séchage peut être décrite par les modèles de séchage et la courbe caractéristique de séchage qui exploite les résultats expérimentaux et permet d'étudier le comportement du produit dans un séchoir. La courbe caractéristique de séchage est très utilisée pour la modélisation et la simulation du fonctionnement des séchoirs.

**Références bibliographiques:**

- [1] BOUGHALI, Slimane. Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agro-alimentaires dans les zones Arides et désertiques. 2010. PhDThesis. Université de Batna 2
- [2] **Boussalia Amar**, Contribution a l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux, Mémoire de Magister en Génie Climatique Université mentouri – constantine, 2010
- [3] **MANAA SAADEDDINE**, Analyse structurelle et conceptuelle des facteurs d'optimisation des performances des insolateurs plans munis d'ailettes pour des applications diverses en fonction des contextes géographiques et climatiques, Thèse Doctorat en sciences : Génie Mécanique; Université Mohamed Khider – Biskra, 2017
- [4] **BENAMMAR Roumaïssa; GOURI Kaouther**, Séchage Solaire des Produits Agricoles mémoire de master académique Spécialité : physique énergétique et énergie renouvelable, 2018
- [5] **A. Mouafki**, Modélisation et Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2004.
- [6] **Belachi**, Application du séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaires, Mémoire de magister en physique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009
- [7] **A. TOM**, ‘‘contribution au séchage solaire des produits carnés: modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux.’’ , Thèse, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2015 ;
- [8] **RIDHA FETHI MECHLOUCH<sup>1</sup> , HOUCINE BEN DAOUD<sup>2</sup>, MOHAMED BAGANE<sup>1</sup>, RHOMDAN BEN SLAMA<sup>3</sup>, AMMAR BEN BRAHIM<sup>1</sup>**. Étude comparative de deux installations de séchage solaire : séchoir direct et séchoir indirect

---

## ***CONCLUSION GÉNÉRALE***

---

## Conclusion générale:

Le travail présenté dans cette note est une contribution à une étude théorique sur le séchage solaire direct, nous avons choisi la région du Touat pour étudier ce sujet.

Au début, nous avons étudié la situation géographique de la région du Touat et ses caractéristiques climatiques, nous avons constaté qu'elle est caractérisée par une situation géographique propice à la bonne pratique de l'activité agricole car elle est riche avec un produit agricole abondant qui a besoin de technologies et de méthodes de stockage afin de le préserver et de faciliter son transport et sa commercialisation.

À cet égard, certaines méthodes ont été identifiées qui nous aider à le faire (conservation par la chaleur, conservation par le froid et des techniques de conservation par séparation et élimination d'eau), parmi ces méthodes, le séchage reste le processus utile, en raison de la longue durée de stockage en plus de la facilité de transport et d'utilisation à tout moment. par le passé, ils s'appuyaient sur le séchage naturel (séchage à l'air libre) et en raison de leurs défauts (poussières, exposition aux insectes ..), le développement dans ce domaine était réalisé en utilisant l'énergie solaire grâce à des séchoirs solaires.

Nous avons étudié certains types de séchoirs solaires: naturels, indirects et directe.

Lors du séchage direct, les denrées alimentaires sont séchées en dirigeant les rayons solaires vers les matières séchées. Grâce au mouvement naturel de l'air, L'humidité de l'air est éliminée, augmentant ainsi la durée de conservation.

Dans la suite de notre travail, nous avons étudié le processus de séchage ainsi que les caractéristiques de l'air de séchage. Nous avons conclu que le processus de séchage passe par deux phénomènes importants: le transfert de chaleur de l'air vers le produit et le transfert de l'eau du sein du produit vers sa surface.

A travers des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage, nous avons étudié la cinétique de séchage, ces courbes ont été obtenues en général pour différentes conditions expérimentales (température, vitesse de l'air de séchage et humidité). Tous les travaux de séchage montrent que ces courbes diffèrent selon la nature du produit.

Nous n'avons constaté que le séchage solaire présente des avantages qui en font la meilleure solution pour conserver les produits agricoles et les protéger de la détérioration.

