



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, des Sciences de la Terre et de
l'Univers Département de Biologie

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Agronomie

Option : *Agroalimentaire et Contrôle de qualité*

Thème :

*Etude de comparaison entre le séchoir solaire direct et
indirect*

Présenté Par : **Djemmaa Amina**

Boudouaia Ahlem

Soutenu le : / 07/2021

Devant le jury composé de :

- ❖ Mr Benyoubé Noureddine Président
- ❖ Mr Tefiani Chokri Examineur
- ❖ Mr Zennasni Mohamed Amine Encadreur



Remerciement

Nous remercions, Dieu Tout-Puissant qui nous a aidés et donner santé et courage à terminer ce travail.

Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à notre encadreur Mr Zenasni Mohamed Amine pour leur patience, leur disponibilité et surtout leur judicieux conseil.

Nos sincères gratitudes, Aux membres du jury Mr. Benyaoub Noureddine et Mr Tefiani Choukri qui ont accepté d'évaluer notre travail et de faire partie de cette soutenance.

Pour finir, nous remercions tout le corps professoral de notre établissement université Abou Baker Belkaid et employés de l'administration et responsables de la formation en agroalimentaire pour les travaux énormes qui ont fourni la bonne atmosphère pour étudier. À tous, je dis merci.



Dédicace



À toi mon père

Mon exemple éternel, mon soutien moral, source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, qu'Allah te garde en bonne santé et longue vie.

À toi maman que j'adore

Lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie, et mon bonheur.

Aux personnes qui m'ont toujours aimé, aidés et encouragés, qui étaient toujours à mes côtés

Mes frères et ma sœur

Et spécialement mon frère Anouar.

À celle que j'aime beaucoup et qui m'a soutenu tout au long de ce projet : Ma grand-mère Saadia et ma tante Souaad et sa petite famille sans oublier Rabia et Nasr Eddine

À mon binôme Amina, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci

AHLEM



Dédicace



À mes très chers parents qui sont toujours soucieux de ma réussite et qui ont partagé avec moi les bons et les mauvais moments avec l'encouragement et l'aider pour faire ce travail.

Et j'espère que Allah tout puisse pour leur donner la santé et la longévité

À tous mes sœurs Ahsem, Farah et Douaa.

À toutes ce qui m'ont apporté d'aide de près ou de loin.

Sans oublier ma binôme Ahsem.

Amina

Résumé

L'objectif de notre travail consiste à bien comprendre le mécanisme physique de l'opération de séchage qui est entre autre qu'un transfert de chaleur et de matière. De même a étudié les paramètres de séchage solaire (température, vitesse et humidité) sur différents produits, avec les deux différents types de séchoir solaire direct et indirect pour la conservation de ces produits.

D'après ce travail nous avons comparé entre le séchoir solaire direct et indirect à travers des publications et cela pour choisir le meilleur d'entre eux.

Mots clés : Séchage, séchoir solaire, Capteur solaire, Produit agricole, Température, Rayonnement solaire, Séchoir solaire direct, Séchoir solaire indirect.

التلخيص

الهدف من عملنا هو فهم الآلية الفيزيائية لعملية التجفيف والتي هي ، من بين أمور أخرى ، نقل الحرارة والمادة. كذلك درس معاملات التجفيف الشمسي (درجة الحرارة ، السرعة ، الرطوبة) على منتجات مختلفة ، مع نوعين مختلفين من المجفف الشمسي المباشر وغير المباشر لحفظ هذه المنتجات.

في سياق هذا العمل قمنا بمقارنة بين المجفف الشمسي المباشر وغير المباشر من خلال المنشورات وهذا لاختيار الأفضل.

الكلمات المفتاحية: تجفيف ، مجفف شمسي ، مجمع للطاقة الشمسية ، منتج زراعي ، درجة حرارة ، إشعاع شمسي ، مجفف شمسي مباشر ، مجفف شمسي غير مباشر

Abstract

The objective of our work is to understand the physical mechanism of the drying operation which is, among other things, a transfer of heat and matter. Likewise studied the parameters of solar drying (temperature, speed and humidity) on different products, with the two different types of direct and indirect solar dryer for the conservation of these products.

To begin with this work we have compared between the direct and indirect solar dryer through publications and this to choose the best of them.

Keywords: Drying, solar dryer, Solar collector, Agricultural product, Temperature, Solar radiation, Direct solar dryer, Indirect solar dryer.

Table des matières

Remerciement.

Dédicace.

Tableau des matières.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Liste de l'abréviations.

Introduction générale.

Conclusion générale

Chapitre 1 : Généralités sur le séchage

1. Introduction	05
2. Différentes méthodes du séchage	05
2.1. Séchage mécanique	05
2.2. Séchage chimique	06
2.3. Séchage thermique	06
3. Caractéristiques de l'air de séchage	07
3.1. Humidité	07
3.1.1. Humidité absolue	07
3.1.2. Humidité relative	08
3.2. Température	08
3.2.1. Température sèche	08
3.2.2. Température humide du gaz	08
3.3. Vitesse	08
4. Principes de séchage	09
5. Modes de séchage	09
5.1. Séchage thermique	09
5.1.1. Séchage au soleil	09
5.1.2. Séchage à l'air libre	10
5.1.3. Séchage par entraînement	10
5.1.4. Séchage par ébullition	11
5.1.5. Séchage à l'étuve	12
5.1.6. Séchage par micro-onde	12
5.2. Séchage non thermique	13
5.2.1. Lyophilisation	13
5.2.2. Séchage osmotique	14
6. Transfert de chaleur et de matière	14
6.1. Transfert de matière	14
6.2. Transfert de chaleur	14
7. Cinétique de séchage	15
7.1. Période de mise en température (période0)	15
7.2. Période à vitesse constant	15
7.3. Période de ralentissement	15
8. différents modèles des cinétiques de séchage	16
8.1. Modèles empiriques	16
8.1.1. Modèle empirique de Wang Singh (1978)	16
8.2. Modèles diffusifs (modèle de Lewis 1921)	16
8.3. Modèles bases sur les transferts couples de chaleur et de masse	17
8.3.1. Modèle de Henderson et Pabis (1961)	17
8.3.2. Modèle de Page (1949)	17
8.3.3. Modèle logarithmique	17
9. Séchage et qualité	18
9.1. Types de modification de la qualité	18

9.1.1. Modification biochimiques dues à la température	18
9.1.2. Pertes d'arômes	18
9.1.3. Modification physiques et mécaniques	18
9.2. Problème de stockage	19
10. Domaines d'utilisation	19
10.1. Industrie agroalimentaire	19
10.2. Industrie du bois	19
10.3. Industrie alimentaires et pharmaceutiques	20
11. Conclusion	20
Références bibliographiques	21

Chapitre 2 : Séchage solaire

1. Introduction	23
2. Energie solaire	23
2.1. Définition	23
2.2. Utilisation de l'énergie solaire	24
2.3. Conversion d'énergie solaire	25
3. Description de séchoir solaire	26
3.1. Capteur solaire expérimental	27
3.2. Chambre de séchage	27
4. Classification des types de séchoirs solaires	28
4.1. Séchoirs solaires directs	28
4.2. Séchoirs indirects	29
4.3. Séchoirs solaires hybrides	29
4.4. Séchoirs solaires mixtes	30
5. Avantages et inconvénients du séchage	31
5.1. Avantages	31
5.2. Inconvénients	31
6. Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire	32
6.1. Zone du littoral	32
6.2. Zone du tell	32
6.3. Zone steppique	33
6.4. Zone saharienne	33
7. Conclusion	33
Références bibliographiques	34

Chapitre 3 : Séchage des fruits et légumes

1. introduction	36
2. Grandeurs caractéristiques des produits à sécher	36
2.1. Porosité volumique produit	36
2.2. Teneur en eau du produit à sécher	37
2.3. Activité de l'eau dans produit	39
3. Filières fruits et légumes en Algérie	40
3.1. Mode de consommation des fruits et légumes en Algérie	40
3.2. Production de quelques fruits et légumes en Algérie	40
4. Physiologie des fruits et légumes	41
4.1. Mécanisme de maturation des fruits	41
4.2. Dégradation post-récolte des fruits et légumes	43
4.2.1. Facteurs biologiques	44
4.2.2. Facteurs physiques	44
4.2.3. Facteurs enzymatiques	44
5. Conclusion	45
Références bibliographiques	46

Chapitre 4 : Etude comparative de deux installations de séchage solaire :
Séchoir direct et séchoir indirect

1. introduction	48
2. Etude d'un séchoir solaire direct à travers des publications	48
2.1. Séchage solaire direct des produits agroalimentaires en convection naturelle	48
2.2. Etude expérimentale du séchage solaire de la pâte de tomate dans un séchoir direct.	51
2.2.1. Etude du comportement du séchoir solaire	
2.3. Etude comparative de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires dans des modèles de type direct et indirect	53
2.3.1. Intensité du rayonnement solaire	57
2.3.2. Température des différents éléments des séchoirs	58
2.3.3. Cinétique de séchage des produits agroalimentaires	59
2.3.4. Présentation des résultats relatifs du séchage des produits	59
2.4. Etude de comportement thermique d'un séchoir solaire direct influencé par l'intégration d'un milieu poreux non consolidé	60
2.5. Etude comparative de deux installations de séchage solaire : séchoir direct et séchoir indirect	63
2.5.1. Conditions météorologiques de l'expérience	66
2.5.2. Description du séchoir solaire directe	66
3. Etude d'un séchoir solaire indirect à travers des publications	67
3.1. Séchage solaire de la tomate dans un séchoir indirect à convection naturelle	68
3.2. Modélisation et expérimentation du séchage solaire indirect en couches minces de tranches de tomates de la variété Mongal	68
3.3. Séchage solaire des feuilles de menthe verte	71
3.4. Valorisation de la pâte de tomate par le procédé de séchage solaire indirect a convection naturelle	74
3.4.1. Evolution de la couleur du produit séché	78
3.5. Etude expérimentale et théorique du séchage solaire des grains de fève	80
3.5.1. Modélisation de cinétique de séchage de la fève	81
3.5.2. Paramètres de modèle et critères statistiques	82
3.5.3. Expression de l'équation générale des paramètres du modèle	82
4. Comparaison entre les deux méthodes de séchage	84
Références bibliographiques	84
Conclusion général	86
	88

Liste des figures

Figure 1.1 : séchage par centrifugation	06
Figure 1.2 : séchage thermique	07
Figure 1.3 : séchage au soleil	09
Figure 1.4 : séchage a l'air libre	10
Figure 1.5 : séchage par entrainement	11
Figure 1.6 : séchage par ébullition	11
Figure 1.7 : séchage a l'étuve	12
Figure 1.8 : séchage par micro-onde	13
Figure 1.9 : lyophilisation	13
Figure 1.10 : séchage osmotique	14
Figure 1.11 : cinétique de séchage	16
Figure 2.1 : conversion photovoltaïque	26
Figure 2.2 : séchoir solaire	26
Figure 2.3 : capteur solaire utilisé	27
Figure 2.4 : séchoir solaire direct	28
Figure 2.5 : séchoir solaire en direct	29
Figure 2.6 : séchoir solaire hybride	30
Figure 2.7 : séchoir solaire mixte	31
Figure 3.1 : volume de control microscopique	37
Figure 3.2 : volume de control macroscopique	37
Figure 3.3 : l'eau dans les aliments	38
Figure 3.4 : modèle récapitulant les mécanismes généraux de la maturation des fruits	43
Figure 3.5 : dégradation du fruit (la pomme)	44
Figure 4.1 : séchoir expérimental	49
Figure 4.2 : évolution de l'humidité relative de l'aire	49
Figure 4.3 : évolution de la teneur en eau des prunes au cours de séchage	50
Figure 4.4 : vitesse de séchage journalière	51
Figure 4.5 : schéma descriptif du séchoir solaire	52
Figure 4.6 : la variation du rayonnement global en fonction de la tempe	53
Figure 4.7 : variation de la température dans le séchoir solaire	54
Figure 4.8 : variation de l'humidité de l'air en fonction du temps	54
Figure 4.9 : variation de la vitesse de l'air en fonction du temps	55
Figure 4.10 : variation de la teneur en eau en fonction du temps	56
Figure 4.11 : variation de la teneur en eau en fonction du temps	57
Figure 4.12 : variation du rayonnement théorique	58
Figure 4.13 : évolution théorique et expérimentale du rayonnement solaire	59
Figure 4.14 : variation des températures théoriques (séchoir serre)	59
Figure 4.15 : relevé de la température expérimentale (séchoir serre)	59
Figure 4.16 : variation de l'humidité relative de la menthe	60
Figure 4.17 : variation de l'humidité relative du raisin	61
Figure 4.18 : variation de l'humidité relative de la banane	61
Figure 4.19: vitesse de séchage de la menthe	61
Figure 4.20 : vitesse de séchage du raisin	62
Figure 4.21 : vitesse de séchage de la banane	62
Figure 4.22 : schéma du séchoir solaire direct avec intégration du milieu poreux	63
Figure 4.23: évolution de ma température du séchoir solaire :(a) sans (b) avec intégration du milieu poreux pour 6h du matin	64

Figure 4.24 : évolution de la température du séchoir solaire : (a)sans (b) avec intégration du milieu poreux par 16 :00 du soir	65
Figure 4.25: évolution de la température du séchoir solaire : (a) sans (b) avec intégration du milieu poreux pour 19h	65
Figure 4.26: fraction d'insolation pour une année	67
Figure 4.27: flux solaire global pour un jour type a ciel	67
Figure 4.28: densité de flux solaire global moyen mensuel	68
Figure 4.29: variation de la température interne du séchoir solaire direct, de la température interne du séchoir solaire indirect et température ambiante en fonction du temps pour un jour type	68
Figure 4.30: la variation de la teneur en eau en fonction du temps pour le séchage de la tomate	70
Figure 4.31: la vitesse de séchage de la tomate pour les trois jours de séchage	70
Figure 4.32: variation de la température en fonction du temps	71
Figure 4.33: rayonnements solaires globaux sur un plan horizontal panneau a : mesure 10/04/2019 et panneau b : mesure du 11/04/2019	72
Figure 4.34: évolution des températures relevées dans la chambre de séchage panneau a : mesure du 10 avril 2019 et panneau b : mesure du 11 avril 2019	73
Figure 4.35: évolution de la teneur en eau expérimentale panneau a : mesure de 10/04/2019 et panneau b : mesure 11/4/2019	74
Figure 4.36: évolution de la vitesse de séchage expérimental panneau a : mesure de 10/04/2019 et panneau b : mesure du 11/04/2019	74
Figure 4.37: variation de l'ensoleillement en fonction du temps pour la journée du 18/09/2013	75
Figure 4.38 : évolution de la température ambiante et de la température de l'air asséchant en fonction du temps pour la journée du 18/09/2013	76
Figure 4.39: évolution de la teneur en eau au cours du temps pour la journée du 18/09/2013	76
Figure 4.40: variation de l'humidité relative de l'air asséchant au cours du temps pour la journée du 18/09/2013	77
Figure 4.41: évolution de la température ambiante et de la température de l'air asséchant en fonction du temps pour la journée du 20/09/2013	77
Figure 4.42: évolution de la teneur en eau au cour du temps	78
Figure 4.43: variation de la vitesse au cour du temps	78
Figure 4.44: variation de l'humidité relative de l'air asséchant au cour du temps pour la journée du 20/09/2013	78
Figure 4.45: variation du rayonnement global en fonction du temps	80
Figure 4.46: variation de la température dans le séchoir solaire	80
Figure 4.47: variation de la teneur en eau en fonction du temps	81
Figure 4.48: effet de la température sur la durée de séchage	81
Figure 4.49: teneur en eau en fonction du temps	82
Figure 4.50 : évaluation des erreurs standard à chaque température pour les deuze modèles	83
Figure 4.51: évaluation des coefficients de corrélation à chaque température pour les deuze modèles	84
Figure 4.52: l'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le modèle de page à T = 50°C	84

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Evolution de la production de légume en Algérie (2000-2012)	41
Tableau 3.2 : Evolution de la production de fruit en Algérie (2000-2012)	41
Tableau 4.1 : perte de masse temps de séchage de produit agroalimentaire dans le modèle direct	62

Liste des abréviations

Ha : Humidité absolue

Ma : Quantité d'air sec

Me : Quantité d'eau

Hr : Humidité relative

P_V : Pression partielle de la vapeur dans le mélange

P_S : Pression de saturation

m_v : Flux massique de vapeur

m_s : Masse de solide sec

dH/dT: Variation de l'humidité du solide avec le temps

A : Surface à travers laquelle se produit l'évaporation

A_w : L'activité de l'eau

P_{PV} : Pression de vapeur à la surface du produit

P_{VS} : Pression de vapeur d'eau dans l'air saturé

Introduction Générale

De nos jours, l'homme sur Terre dispose de nombreuses sources d'énergie. Les combustibles les plus couramment utilisés sont les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz), mais l'augmentation des prix et les pénuries de combustibles ont conduit à des études et recherches approfondies sur l'utilisation de l'énergie solaire comme source d'énergie alternative. (Benammar et Gouri, 2018).

L'Algérie dispose d'un important ensoleillement durant la majeure partie de l'année. Elle bénéficie d'une durée annuelle moyenne d'ensoleillement de l'ordre de 2500 heures, et reçoit une énergie solaire moyenne quotidienne de 16.2 à 27 MJ/m² sur le plan horizontal. Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles. (Houhou, 2012).

Le séchage au soleil des récoltes, des fruits et des légumes est pratiqué partout dans le monde depuis des siècles à l'air libre. Il était utilisé pour sécher les céréales, la viande et d'autres produits agricoles. Une grande partie de l'offre mondiale de fruits et légumes séchés traditionnellement continue d'être séchée au soleil à l'air libre sans aide technique. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air. La méthode traditionnelle du séchage souffre de maint problème, parmi ces derniers on cite : sont le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, coût de main d'œuvre élevé, nécessité des zones vastes, infection par des insectes et autres corps étrangers. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, à l'exemple des séchoirs solaires. (Benammar Gouri, 2018).

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits et légumes est l'un des processus énergivores de l'industrie agroalimentaire et constitue un meilleur moyen de réduire les pertes après récolte (Benammar et Gouri, 2018).

L'objectif de notre travail consiste à l'étude de l'influence des quelques paramètres sur la cinétique du séchage pour comparer entre le séchoir solaire direct et indirect.

Le présent travail comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre présente les généralités sur le séchage et leurs méthodes ainsi que la cinétique de séchage et leurs domaines d'utilisation

Le deuxième chapitre comporte une description d'un séchoir solaire et ces types (direct, indirect, hybride et mixte) ainsi que les avantages et les inconvénients du séchage.

Le troisième chapitre présente les grandeurs caractéristiques des produits à sécher (porosité, teneur en eau et l'activité de l'eau) ainsi que les mécanismes de maturation des fruits et leur dégradation post-récolte.

Le quatrième chapitre comporte les résultats expérimentaux et une interprétation des graphes pour le but de comparer entre le séchoir solaire direct et indirect

Chapitre 01

Généralité sur le séchage

1. Introduction

Le séchage est une opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau. Cette opération met en jeu un transfert de chaleur (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide) et un transfert de masse (le liquide imprégnant la solide passe à l'état de vapeur dans l'air asséchant). Le séchage est largement utilisé dans l'industrie chimique où il vient souvent en complément d'opérations comme la sédimentation, la filtration ou l'essorage. Les raisons du séchage peuvent être regroupées comme suit: (Boughali,2010).

- Faciliter la conservation des produits (en réduisant l'activité de l'eau) et amortir le caractère saisonnier de certaines activités agricoles ou industrielles.
- Diminuer la masse et le volume des produits pour réduire leur encombrement et faciliter leur transport.
- Donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit (flocons de purée de pomme
- de terre, café lyophilise...etc.). Mais en revanche les inconvénients du séchage qui sont :
- Modification du produit dans sa forme, sa texture, ses qualités nutritionnelles et organoleptiques.
- L'opération est énergivore : le séchage absorbe, par exemple en France 14% de la consommation énergétique industrielle, 40% de l'énergie consommée en séchage étant imputable aux industries agro-alimentaires. (Boughali,2010)

Ces problèmes de séchage solaire liés à la conservation des produits agricoles se posent, en particulier, dans les pays en voie de développement qui disposent en général de ressources solaires importantes ; et l'une des multiples façons de valoriser ces ressources est la production de chaleur à basse température, suffisante pour le séchage (Boughali,2010).

2. Différents méthodes du séchage

2.1. Séchage mécanique

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation...). Certains processus de pré concentration et de pré séchage peuvent se réaliser sans transfert thermique mais par simple transfert de quantité de mouvement. (Touati Tliba, Drihem, 2018).

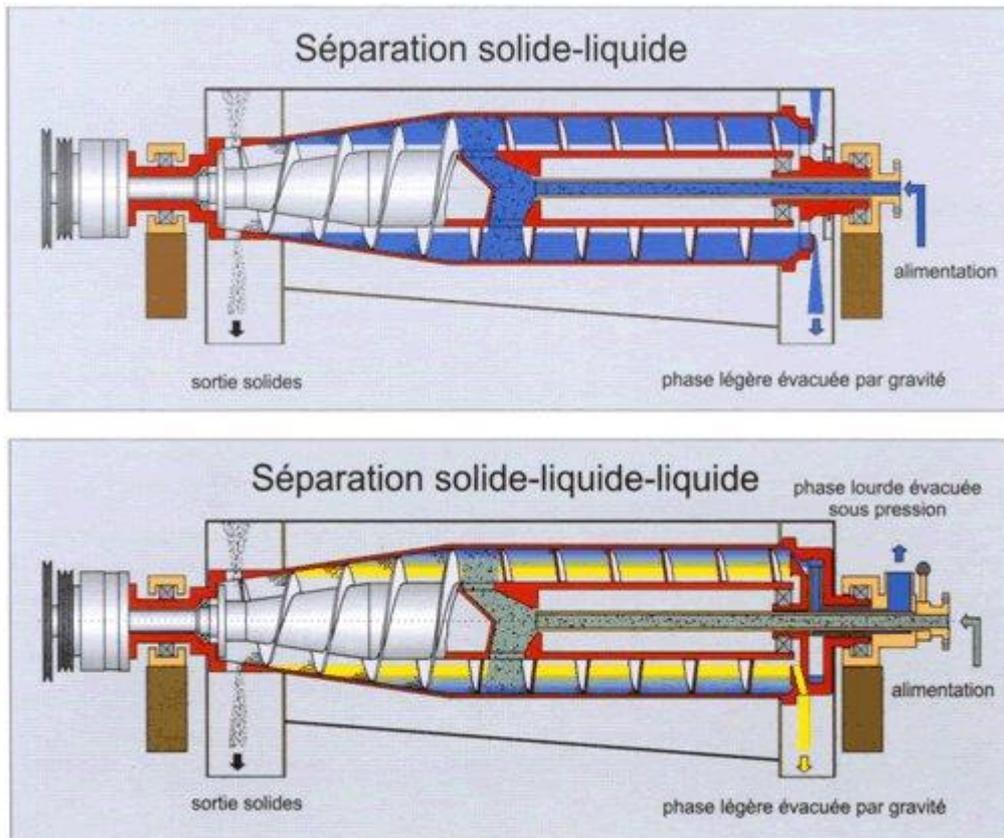


Figure 1.1. Séchage par centrifugation

Source : <https://vireakluon.wordpress.com/2013/01/21/separation-par-centrifugation/> Consulté le 16/05/2021

2.2. Séchage chimique

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium...) pour extraire l'eau (Touati Tliba, Drihem, 2018).

2.3. Séchage thermique

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une « activation » de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur.

Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne :

- Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur du produit.
- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface du produit.
- Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur (Touati Tliba, Drihem 2018)

Séchage en lit fluidisé

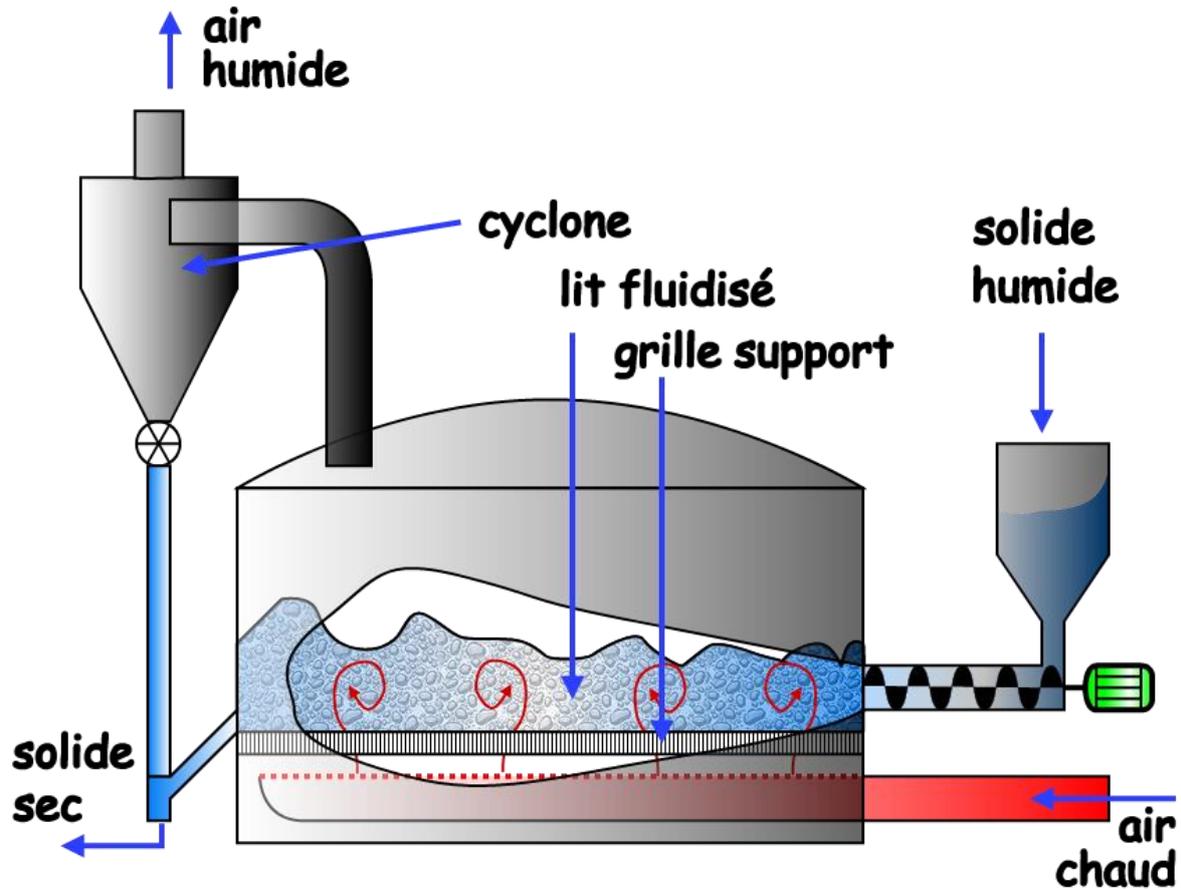


Figure 1.2. Séchage thermique

Source : https://www.azprocede.fr/Schema_GC/picture.php/?779/category/6 Consulté le 16/05/2021

3. Caractéristiques de l'air de séchage

3.1. Humidité

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage. (Benammar et Gouri, 2018).

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 (Benammar et Gouri, 2018).

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} [\text{Kg}_v \cdot \text{Kg}_{\text{as}}^{-1}] \quad \text{Equation 01}$$

Avec

H_a : humidité absolue

M_a : quantité d'air sec.

M_e : quantité d'eau

3.1.2. Humidité relative

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans la mélange ; à sa pression de saturation dans le même mélange ; pris à la même température (Benammar et Gouri,2018).

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} 100 \quad 0\% \leq H_r \leq 100\% \quad \text{Equation02}$$

H_r : humidité relative

P_v : pression partielle de la vapeur dans le mélange

P_s : pression de saturation

3.2. Température

3.2.1. Température sèche

On nomme température sèche d'un gaz la température indiquée par une sonde de température placée dans le courant gazeux. Il s'agit de la température d'un gaz au sens courant. (Benammar et Gouri,2018).

3.2.2. Température humide du gaz

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. (Benammar et Gouri,2018).

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 : (Benammar et Gouri, 2018).

$$\frac{m_v}{A} = - \frac{m_s}{A} \frac{dH}{dt} \text{Equation 03}$$

m_v = flux massique de vapeur

m_s = masse du solide sec.

$\frac{dH}{dt}$ = 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 :

- La nature, la porosité, la forme et l’humidité du produit.
- La température, l’humidité et la vitesse du gaz sécheur.
- Les conditions de mise en contact des deux phases ainsi que du mode de transfert de la chaleur (Benammar et Gouri, 2018)

4. Principes de séchage

Le séchage implique deux types de transferts : le transfert d’énergie thermique, de l’environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l’intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. La vitesse du séchage est directement liée à ces deux modes de transfert (Abdellah Mohammed Essalih, 2018)

5. Modes de séchage

5.1 . Séchage Thermique

5.1.1. Séchage au soleil

Le séchage au soleil s'est largement développé dans les zones arides ou semi-arides qui présentent des conditions climatiques optimales : une saison sèche avec un fort ensoleillement, une faible pluviométrie, une hygrométrie peu élevée.

Le séchage s'effectue sur le sol, sur des nattes, sur des rochers plats, ou bien sur les toits des maisons.(Saf et Reddam, 2018).



Figure 1.3. Séchage au soleil

Source : <https://www.epicesdemadagascar.net/2019/07/24/le-sechage-des-ruits-au-soleil-a-madagascar>

consulté le 16/05/2021

5.1.2. Séchage a l'air libre

Le séchage à l'air libre est réalisé dans l'ombre, avec une circulation naturelle de l'air. La température moyenne de la chambre est de 22 ± 2 °C. Le séchage est contrôlé par convection naturelle. (Saf et Reddam, 2018).



Figure 1.4. Séchage a l'air libre

Source : https://www.google.com/search?q=s%C3%A9chage+%C3%A0+l%27air+libre&tbm=isch&ved=2ahUK_EwiAi_mwxtHwAhUMpRoKHf2FCEsQ2cCegQIABAA&oeq=s%C3%A9chage+%C3%A0+l%27 consulté le

17/05/2021 à 21 :36

5.1.3. Séchage par entraînement

Lorsqu'un produit humide est placé dans un courant de gaz (air le plus souvent) suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle tel que :

- Le gaz apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation
- L'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau.

La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et elle est ensuite entraînée par le gaz (Saf et Reddam, 2018).

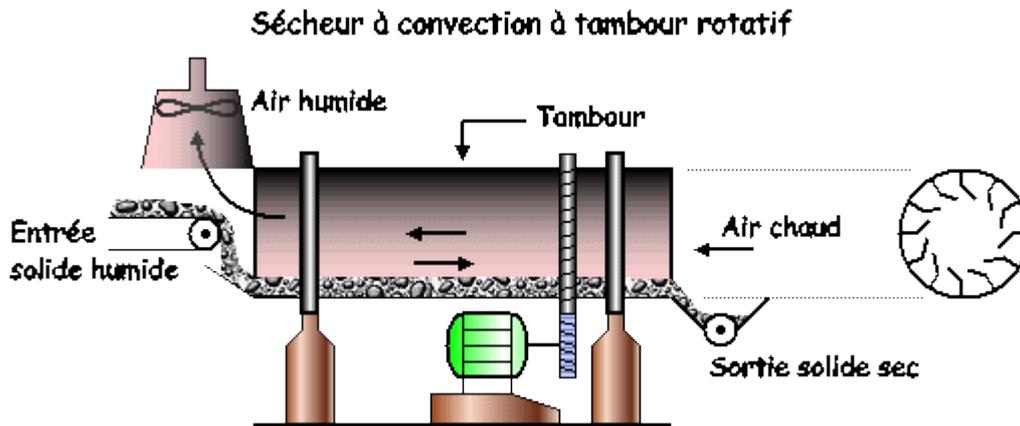


Figure 1.5.Séchage par entrainement

Source : https://www.google.com/search?q=s%C3%A9chage+par+entrainement&tbm=isch&chips=q:s%C3%A9chage+par+entrainement,online_chips:humidit%C3%A9:QWgzZhw9xs%3D&hl= consulté le 17/05/2021 à 19 :55

5.1.4. Séchage par ébullition

Le séchage par ébullition a lieu lorsque le flux thermique transféré au produit est très intense à cause d'un écart de température très élevé entre la source chaude et le produit (par conduction sur une surface chaude, séchoirs cylindres...etc.).(Saf et Reddam, 2018).

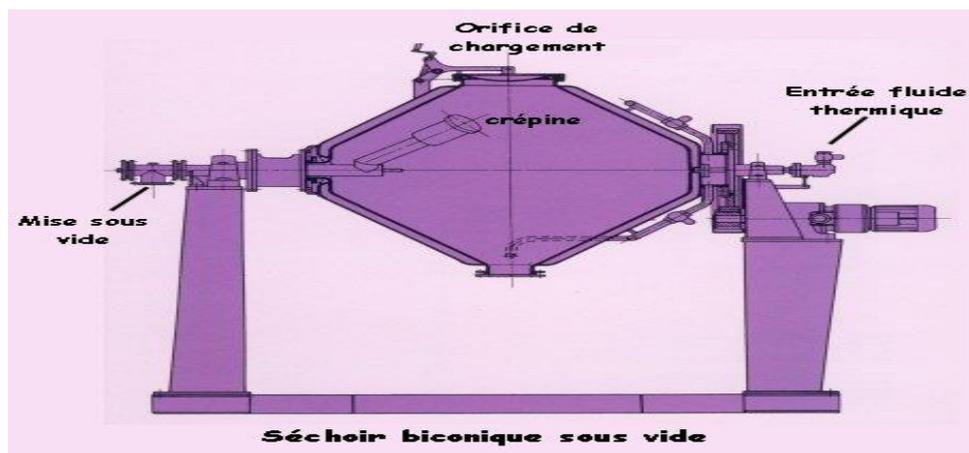


Figure 1.6.Séchage par ébullition

Source : <https://www.google.com/search?q=s%C3%A9chage+par+%C3%A9bullition&tbm=isch&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEwj95N2ss9HwAhUKaBoKHYYV3BTQOgowBegQIARAW&biw=1349&bih=63> consulté le

17/05/2017 à 20 :18

5.1.5. Séchage à l'étuve

Dans ce type de séchage, l'air chauffé est mis en contact avec le matériel humide pour faciliter la chaleur et le transfert massif ; la convection est principalement impliquée. Il faut préciser la consigne de température de l'étuve, le temps de séjour, et la taille de l'échantillon à tester. (Saf et Reddam, 2018).

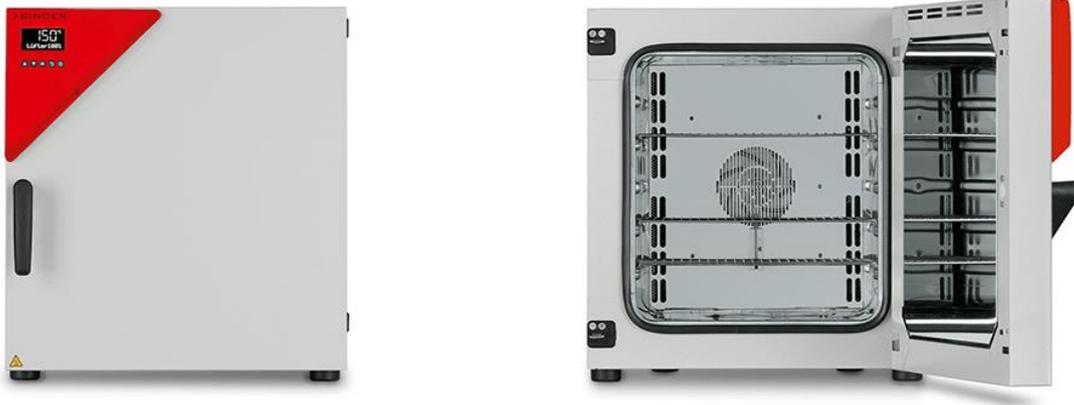


Figure 1.7.Séchage à l'étuve

Source : https://www.google.com/search?q=s%C3%A9chage+%C3%A0+l%27%C3%A9tuve&tbm=isch&ved=2ahUKEwjH5_PMs9HwAhUNgHMKHZFmCcCegQIABAA&oeq=s%C3%A9chage+%C3%A0+&gs_lcp=CgNpbWcQ consulté le 17/05/2021 à 20 :32

5.1.6. Séchage par micro-onde

Le chauffage par micro-ondes se rapporte à l'utilisation d'ondes électromagnétiques afin de produire de la chaleur dans le matériel à sécher.

Le fonctionnement d'un four à micro-onde est simple, l'énergie électrique apportée alimente le magnétron qui convertit l'énergie électrique en champ électromagnétique et par un guide d'onde (tube rectangulaire en métal). (Saf et Reddam, 2018).



Figure 1.8. Séchage par micro-onde

Source : https://www.google.com/search?q=s%C3%A9chage+par+microondes&tbm=isch&ved=2ahUKEwi8vO7LudHwAhUFZRoKHXI0DocCegQIABAA&oeq=s%C3%A9chage+par+micro&gs_lcp consulté le 17/05/2021 à

20 :45

5.2. Séchage non thermique

5.2.1. Lyophilisation

C'est un procédé de conservation permettant de préserver des denrées alimentaires périssables et des substances biologiques et chimiques dites fragiles.

La lyophilisation concerne un produit qui est préalablement congelé, de telle sorte que l'eau puisse passer directement de l'état solide (glace) vers la phase vapeur sans l'étape de fusion, ce changement d'état étant appelé « sublimation ». La période de sublimation est suivie d'une période de séchage par désorption d'une fraction d'eau liée, à une température de plus en plus élevée. (Saf et Reddam, 2018).

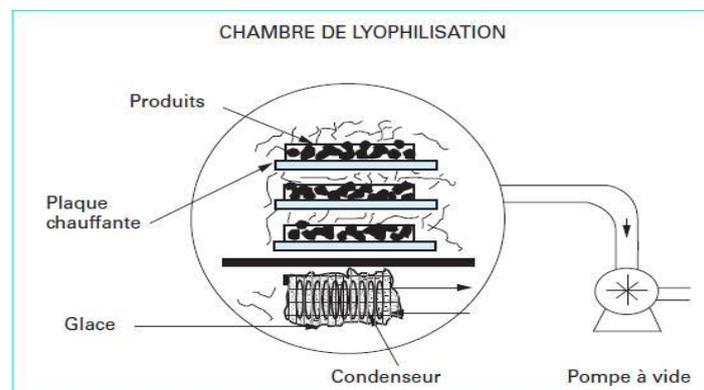


Figure 1.9. Lyophilisation

Source : <https://wle.com/search?q=séchage+non+thémique+lyophilisation&tbm=isch&ved=2ahUKEwiJ367hu9HwAhUpgHMKHRo6AjsQ2-cCegQIABAA&oq=séchage+non+#> consulté le 17/05/2021 à 21 :22

5.2.2. Séchage osmotique

Ce qu'on appelle déshydratation osmotique dans le domaine de la transformation des fruits et légumes, est un procédé de réduction de la teneur en eau obtenue par immersion de ces derniers, entiers ou en morceaux, dans une solution hypertonique de sucres et/ou saline (Saf et Reddam, 2018).

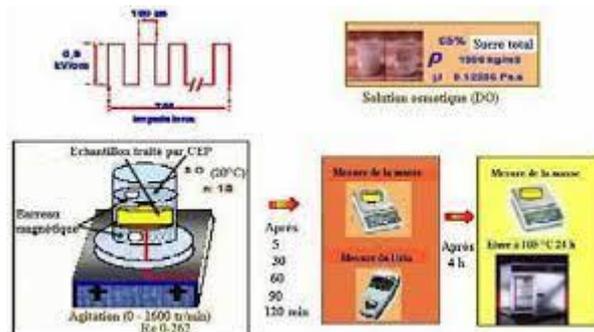


Figure 1.10. Séchage osmotique

Source : https://www.google.com/search?q=s%C3%A9chage+osmotique&tbm=isch&hl=fr&chips=q:s%C3%A9chage+osmotique,online_chips:cellule:icLdd8GHuQ%3D&sa=X&ved=2ahUKEwi4w-2u consulté le 17/05/2021

à 22 :15

6. Transfert de chaleur et de matière

6.1. Transfert de matière

L'eau migre de l'intérieur vers la surface du produit sous l'action de divers mécanismes qui peuvent se combiner. Il est généralement admis que le transport capillaire est l'un des mécanismes fondamentaux dans les produits poreux riches en eau. Dans les produits alimentaires, on préfère souvent attribuer le transport d'eau à une diffusion sous l'effet du gradient de concentration. L'évolution de teneur en eau s'exprime en fonction du profil de teneur en eau et d'une diffusivité « Apparente » qui regroupe les différents phénomènes de transport (Bimbenet et al, 2006).

6.2. Transfert de chaleur

En l'absence de tout rayonnement infrarouge ou micro-onde, la chaleur diffuse dans le produit sous l'effet du gradient de température (Bimbenet et al, 2006).

7. Cinétique du séchage

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps, au celle donnant la vitesse de séchage $\left(-\frac{dx}{dt}\right)$ en fonction de x . Ces courbes sont généralement obtenues pour différents Conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...).

Elles Caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps. (Benammar et Gouri 2018).

Sur la courbe schématique présentée à la Figure 1.11, on peut distinguer trois phases :

7.1. Période de mise en température (Période 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. 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. (Benammar et Gouri 2018).

7.2. Période à vitesse constant

Durant cette période, la vitesse de séchage reste à peu près constante pour la plupart des produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide principalement sous l'effet des forces capillaires. L'équilibre entre la diffusion dans la couche limite (à l'interface air matériau) et les mécanismes de transfert d'humidité interne au sein du produit vers la surface est établi. La température reste uniforme dans le produit car le flux de chaleur échangé avec l'air chaud est entièrement utilisé pour la vaporisation de l'eau à la surface, cette période s'achève lorsque les forces capillaires ne peuvent plus soutenir la vaporisation l'eau de surface, et couvre généralement une grande partie du temps de séchage (Benammar et Gouri 2018).

7.3. Période de ralentissement

Pendant cette phase, les forces capillaires ne sont plus suffisantes pour acheminer l'eau vers la surface du produit. La vitesse de séchage ne peut plus être maintenue constante et elle commence à décroître (Benammar et Gouri 2018).

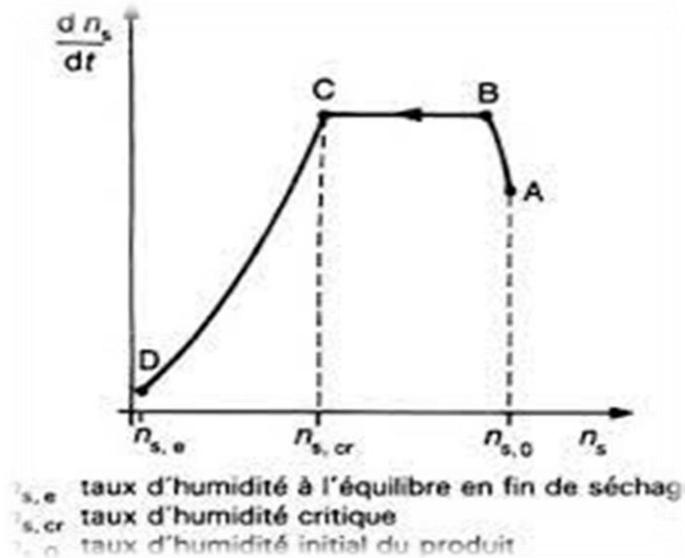


Figure 1.11. Cinétique de séchage

Source : https://www.google.com/search?q=cin%C3%A9tique+de+s%C3%A9chage&xsrf=ALeKk03rjq2LhNawszaVS3S5BH3_8tXstQ:1619347269080&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjwPbVmpnwAhU5
 _consulté le 25/04/2021 à 11:49

8. Différents modèles des cinétiques de séchage

8.1. 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. (Benammar et Gouri 2018).

8.1.1. 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 (Benammar et Gouri 2018).

$$\frac{X-X_e}{X-X_{e0}} = 1 + at + bt^2 \quad \text{Equation 04}$$

a et b sont des constantes de séchage.

8.2. 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 : (Benammar et Gouri 2018).

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_e) \quad \text{Equation 05}$$

La forme générale du modèle de Lewis prend la forme exponentielle suivante : (Benammar et Gouri 2018).

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-Kt) \quad \text{Equation 06}$$

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.

8.3. Modèles bases sur les transferts couplés 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. (Benammar et Gouri 2018).

8.3.1. Modèle de Henderson et Pabis (1961)

C'est la solution de la deuxième équation de Fick. (Benammar et Gouri 2018).

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = A. \exp(-Kt) \quad \text{Equation 07}$$

A et k sont des constantes de séchage. Ce modèle a été utilisé par Sebaii et autres, pour estimer le temps de séchage.

8.3.2. Modèle de Page (1949)

Page a proposé une équation de séchage de la forme suivante : (Benammar et Gouri 2018).

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-Kt^n) \quad \text{Equation 08}$$

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

8.3.3. Modèle Logarithmique

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a \exp(-Kt) + c \quad \text{Equation 09}$$

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 Peulvan, pour décrire les courbes de séchage (Benammar et Gouri 2018).

9. Séchage et qualité

La destination alimentaire du produit rend nécessaire une attention particulière à la qualité du produit fabriqué. (Benammar et Gouri 2018).

9.1. Types de modification de la qualité

9.1.1. Modification biochimiques dues à la température

- Réactions de Maillard, c'est-à-dire brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides. Outre le brunissement, ces réactions entraînent une perte nutritionnelle.
- Oxydations de matières grasses (rancissement)
- Destruction de vitamines
- Dénaturation des protéines, diminuant leur aptitude à se réhydrater lors de l'utilisation du produit et altérant leur pouvoir liant ou moussant.
- Réactions enzymatiques : si les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable ou par la température au cours du séchage, elles produisent leurs effets de brunissement des poly phénols, hydrolyse des lipides...etc. (Houhou, 2012).

9.1.2. Pertes d'arômes

Le séchage un procédé de séparation basé sur la volatilité. Par conséquent, l'eau contenue dans le produit à sécher ne sera pas éliminée toute seule. Mais avec tout autre produit volatil existant également dans le produit. Dans la plupart des cas, il s'agit des arômes contenus dans les produits biologiques destinés à l'alimentation. (Houhou, 2012).

9.1.3. Modifications physiques et mécaniques

Le séchage provoque chez la plupart des plantes des altérations physiques et mécaniques caractérisées par : (Houhou, 2012).

- Migration des solutés vers la surface : outre son effet sur l'aspect du produit, cette accumulation de sucres ou d'autres solutés en surface est préjudiciable à la valeur du produit lorsqu'il est consommé réhydraté.
- Fusion et migration de matières grasses.
- Modifications de forme : en règle générale, le départ de l'eau du produit entraîne un effondrement du produit sur lui-même. Toutefois, dans certaines situations, un départ d'eau très rapide et l'existence d'une matrice solide permettent d'obtenir un produit de

même volume mais d'une structure poreuse. (Houhou, 2012).

9.2. Problème du stockage

Beaucoup des idées précédentes sont valables pour la période de stockage : modifications biochimiques et pertes d'arômes. Un facteur supplémentaire est le risque de reprise d'humidité, dont les effets sont désastreux : collage, moisissure, (Benammar et Gouri 2018)

Mise à part la température de conservation, importante mais sur laquelle on a peu de prise (l'intérêt du séchage étant de ne pas nécessiter de stockage réfrigéré), c'est donc sur **l'emballage** que repose la conservation de la qualité lors du stockage :

- Etanche à l'eau, il évite la reprise d'humidité.
- Etanche à l'oxygène, quand nécessaire, il réduit les oxydations, on peut aller jusqu'à la conservation en atmosphère inerte (azote, CO₂ ou vide).
- Etanche aux arômes, il empêche leur départ.
- Opaque, il réduit l'allure d'éventuelles réactions catalysées par la lumière (oxydations, décolorations).
- Sa résistance mécanique empêche les brisures ou cassures du produit lorsqu'il est fragile (Benammar et Gouri 2018).

10. Domaines d'utilisations

10.1. Industrie agroalimentaire

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage. Le séchage peut être une étape nécessaire à la conservation de l'aliment. Il existe moins de 200 types de séchoirs industriels dans le secteur alimentaire. On peut citer par exemple :

- Les pâtes alimentaires.
- Le sucre cristallisé est obtenu par évaporation.
- Les jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation.
- Le sel (gisement minier) est concassé, dissout, épuré avant d'être essoré et enfin séché jusqu'à devenir du sel raffiné.
- Certains produits en poudre : cacao, lait. (Benammar et Gouri 2018)

10.2. Industrie du bois

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme du bois (Benammar et Gouri 2018).

10.3. Industries alimentaires et pharmaceutiques

- Séchage des plantes médicinales à la ferme.
- Séchage des feuilles de la menthe verte.

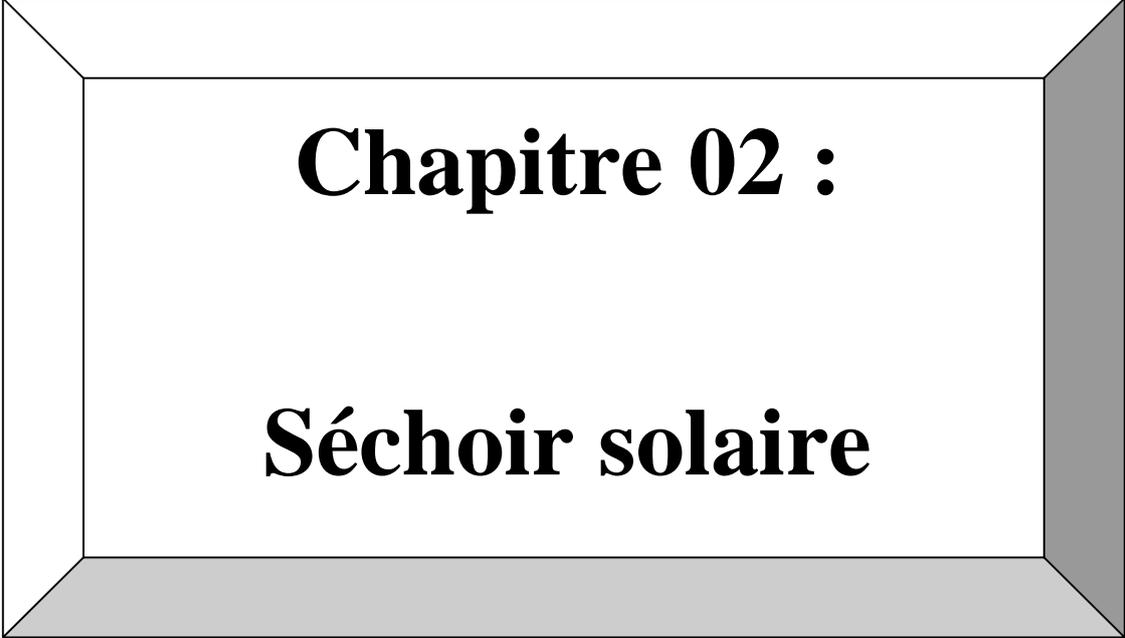
(Dans ce cas on utilise l'opération de lyophilisation, où l'eau est sublimée (passage direct de l'état de glace à l'état de vapeur). S'effectue généralement sous vide, sur le produit préalablement congelé) (Benammar, Gouri 2018).

11. Conclusion

A travers le premier chapitre on a pu citer les caractéristiques de l'air humide et d'un solide humide ceci est dans le but de trouver leurs humidités relatives, la température et la variation de la cinétique de séchage pour le produit à sécher. Ainsi que l'influence de séchage sur les produits agro-alimentaires suivant les modifications biochimiques dues à la température et les modifications physiques et mécaniques.

Références

- Abdellah Mohammed Essalih (2018), Modélisation des Isothermes De désorption du produit Agroalimentaire. Mémoire de Master. Université Ahmed Draïa – Adrar.
- Benammar Roumaïssa, Gouri Kaouter (2018), Séchage solaire des produits agricoles. Mémoire de Master. Université KasdiMerbah- Ouargla.
- Houhou Hatem (2012), Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agroalimentaires. Mémoire en magister. Université Mohammed Khider-Biskra.
- Jean-Jacques Bimbenet, Albert Duquenoy, Gilles Trystram (2006), Génie des procédés alimentaires des bases aux applications. Ouvrage coordonné. Saint- Just- la-pendue-France, ISBN :2 10 004435 4.
- Saf Anis, Reddam Souad (2018), Séchage de deux matrices végétales par étuve. Mémoire de Master. Université A. Mira-Bejaia.
- Slimane Boughali (2010), Etude et optimisation du séchage solaire des produits agroalimentaires dans les zones arides et désertiques. Thèse Doctorat. Université El Hadj Lakhdar- Batna.
- Touati Tliba Marouane, Dirhem Badr Eddine (2018), Etude expérimentale du séchage solaire des plantes feuillues. Mémoire fin d'étude. Université Echahid Hamma Lakhdar-El oued.



Chapitre 02 :

Séchoir solaire

1. Introduction

De nombreux produits agricoles, consommés en grandes quantités ne sont pas toujours disponibles au cours des saisons. Plusieurs solutions sont proposées pour cacher ce handicap culture sous serre, congélation, conservation par séchage. Le recours au séchage se révèle une solution simple, sûre et adéquate pour un grand nombre de produits. Les régions du sud algérien commencent à connaître un développement agricole plus ou moins rapide. Une grande partie de la production agricole de ces régions (tomate, pomme de terre, arachides, dattes...) se prête à une conservation durable par séchage pour assurer une continuité dans leurs disponibilités et permettre leur transport à moindre coût (Mohammed Essalih, 2018).

Le séchage est une méthode très importante dans le domaine agro-alimentaire et industriel, il consiste à enlever totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide. Le séchage direct au soleil est l'opération la plus utilisée, dans plusieurs pays en voie de développement, pour préserver les produits agro-alimentaires (Mohammed Essalih, 2018). Le séchage solaire est donc un procédé de conservation et de valorisation qui favorise le stockage des aliments et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage, il constitue un moyen rentable pour la déshydratation des produits agro-alimentaires à basses températures. (Mohammed Essalih, 2018)

En agro-alimentaire d'une façon générale, l'optimisation de l'opération de séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation restreinte de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité aromatique du produit à sécher. (Mohammed Essalih, 2018).

2. Energie solaire

2.1. Définition

L'énergie solaire c'est la chaleur et la lumière rayonnante du soleil qui est exploitée en utilisant une gamme de technologies en constante évolution, comme le chauffage solaire, l'énergie photovoltaïque, l'énergie thermique solaire, l'architecture solaire, les centrales de sel fondu et la photosynthèse artificielle (Mohammed Essalih, 2018)

C'est une importante source d'énergie renouvelable et ses technologies sont de manière générale comme soit solaire actif ou solaire passif en fonction de la façon dont ils capturent et distribuent l'énergie solaire ou la convertissent en énergie solaire (Mohammed Essalih, 2018).

Une source d'électricité très attrayante par la grande quantité d'énergie solaire.

Le Programme des Nations Unies dans son évaluation énergétique mondiale 2000 a révélé que le potentiel annuel de l'énergie solaire a été 1,575-49,837 exajoules (EJ). Ce chiffre est plusieurs fois supérieur à la consommation énergétique mondiale totale, qui était de 559,8 EJ en 2012 (Mohammed Essalih, 2018)

En 2011, l'Agence internationale de l'énergie a déclaré que « le développement de technologies de l'énergie solaire abordable, inépuisable et propre aura d'énormes avantages à plus long terme. Cela augmentera la sécurité énergétique des pays à travers le recours à une ressource locale, inépuisable et surtout l'importation indépendante, cette durée améliore, la réduction de la pollution, des coûts d'atténuation du réchauffement climatique, et maintient les prix des combustibles fossiles moins que le contraire. Ces avantages sont globaux. Par conséquent, les coûts supplémentaires des incitations pour le déploiement rapide devraient être considérés comme des investissements d'apprentissage; ils doivent être dépensés à bon escient et doivent être largement partagés. (Mohammed Essalih, 2018)

Pour comprendre le potentiel de l'énergie solaire, il faut savoir que l'énergie émise par le soleil et reçue par la Terre en environ 1 heure devrait permettre, si elle était récupérée en totalité, de pourvoir aux besoins énergétiques de l'humanité pendant 1 an (Mohammed Essalih, 2018)

2.2. Utilisation de l'énergie solaire

Depuis l'Antiquité, l'homme a directement bénéficié de l'énergie rayonnante du soleil dans de nombreuses applications comme le séchage des cultures agricoles et le chauffage des maisons. Il est également utilisé dans d'autres domaines mentionnés dans les livres de la science historique, Archimède par exemple a brûlé la Flotte de guerre romaine en l'an 212 avant Jésus Christ en concentrant le rayonnement solaire sur les navires des ennemis par des centaines de boucliers métalliques. (Mohammed Essalih, 2018)

À l'époque babylonienne, les femmes des prêtres utilisent des vaisseaux d'or polis comme des miroirs pour concentrer le rayonnement solaire afin d'obtenir du feu. Des scientifiques comme Churchill, Suez, Lavoisier, Mochot, Eriksson, Harding et d'autres utilisaient l'énergie solaire pour faire fondre les matériaux, cuire les aliments, produire de la vapeur d'eau, distiller de l'eau et chauffer l'air. (Mohammed Essalih, 2018)

Au début du siècle actuel, la première usine d'irrigation à énergie solaire fonctionnait cinq heures par jour était à Maadi, près du Caire. Depuis longtemps, l'homme a essayé de tirer parti de l'énergie solaire et de l'exploiter, mais c'était de façons peu nombreuses et limitées, et avec le grand développement de la technologie et du progrès scientifique, le domaine de

l'exploitation de l'énergie solaire a ouvert des nouveaux horizons scientifiques. (Mohammed Essalih, 2018)

2.3. Conversion d'énergie solaire

L'énergie solaire peut être convertie en énergie électrique et en énergie thermique grâce au mécanisme de Conversion Photovoltaïque et au Conversion thermique de l'énergie solaire, La conversion photovoltaïque signifie que les rayons du soleil ou optique sont directement convertis en énergie électrique par les cellules solaires (Photovoltaïque). De nombreux modèles de cellules solaires ont été fabriqués Peuvent produire l'électricité de façon scientifique Les cellules solaires sont caractérisées par l'absence des sections ou des pièces mobiles, Ils ne consomment pas de carburant et ne polluent pas l'atmosphère Sa vie est longue et nécessite peu d'entretien. (Mohammed Essalih, 2018)

La meilleure utilisation de cette technique est réalisée sous les applications de l'unité de rayonnement solaire (module solaire). C'est à dire sans concentrateurs ou lentilles optiques, et peut donc être installé sur les toits des bâtiments pour bénéficier de la production d'électricité Son efficacité est généralement estimée à environ 20%. Le reste peut être utilisé pour fournir la chaleur pour le chauffage et pour le chauffage de l'eau. Les cellules solaires sont également utilisées pour faire fonctionner les différents systèmes de communication et pour éclairer les routes et les installations et pour pomper l'eau et autres (Mohammed Essalih, 2018). Donc, La conversion solaire thermique dépend de la conversion du rayonnement solaire en énergie à travers les capteurs solaires et les matériaux thermiques. Si un objet sombre et isolé est exposé au rayonnement solaire, Il va l'absorber et augmente sa température. Cette chaleur est utilisée dans le chauffage, le refroidissement, le chauffage de l'eau, la production d'électricité et autres. Les applications de panneaux solaires sont les plus répandues dans la conversion thermique de l'énergie solaire. En termes d'importance, cela est suivi par les séchoirs solaires, qui sont souvent utilisés dans le séchage de certaines cultures agricoles comme les dattes et autres. On peut également utiliser l'énergie thermique pour cuisiner, car des recherches sont en cours pour produire du matériel de cuisson à l'intérieur de maison, Plutôt que de souffrir assis sous le soleil pendant la cuisson. (Mohammed Essalih, 2018).

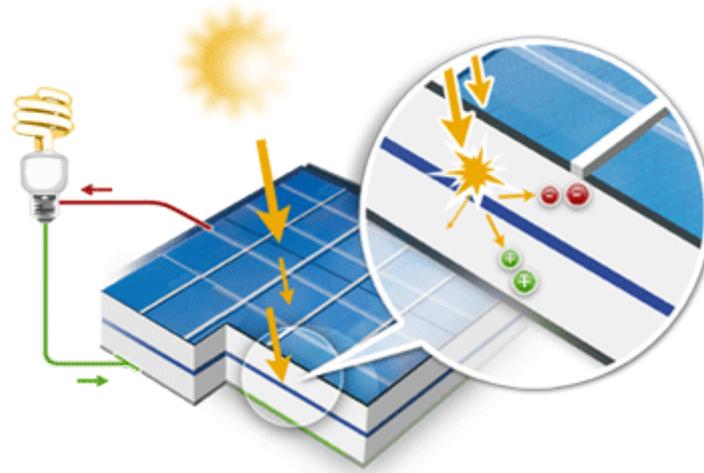


Figure 2.1 Conversion Photovoltaïque

Source : <https://www.mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-solaire/lenergie-solaire-photovoltaique-pour-produire-de> consulté le 16/05/2021

3. Description de séchoir solaire

Le séchoir solaire se compose en deux parties, un capteur solaire plan à air et une chambre de séchage. Les deux parties sont assemblées de façon que la sortie du capteur soit branchée directement avec l'entrée de la chambre pour évacuer l'air chaud sortant du capteur dans la chambre de séchage (Houhou Hatem, 2012).



Figure 2.2. Séchoir solaire

Source : <https://www.google.com/search?q=s%C3%A9choir+solaire+utilis%C3%A9&xsrf=ALeKk01e-d27p8ym56GBKYANzd7vYbkBA:1620167999151&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKewjHg8OHw> consulté le :05/05/2021 à 22 :56

3.1. Capteur solaire expérimental

Le capteur solaire plan à air utilisé dans l'étude expérimentale est d'une longueur de 1,95 m et une largeur de 0,89 m, il est recouvert d'une plaque de verre d'une épaisseur de 5 mm. La couverture transparente en verre est distante de 0,02 m de la plaque absorbante, fabriquée d'acier galvanisé d'épaisseur 0,4 mm peinte en noire mate pour lui acquérir les propriétés optiques convenable. La partie inférieure est isolée thermiquement avec une plaque de bois et en polystyrène. Le capteur est incliné d'un angle de 34.8° par rapport au plan horizontal et orienté vers sud (Houhou Hatem, 2012).



Figure 2.3. Capteur solaire utilisé

Source : https://www.google.com/search?q=capteur++solaire+utilis%C3%A9&tbm=isch&ved=2ahUKEwitzJ_jwrPwAhUPTRoKHe8bBocQ2cCegQIABAA&oq=capteur++solaire+utilis%C3%A9&gs_lcp=CgNpbWcQAzoGc
consulté le :05/05/2021 à 23 :54

3.2. Chambre de séchage

La chambre de séchage est une boîte fabriquée en acier galvanisé de forme parallélépipédique, d'une hauteur de 1,05 m, d'une largeur de 0,51 m et d'une longueur égale à 0,53m.

Les parois latérales, les parties inférieures et supérieures sont isolées thermiquement avec de la laine de verre, la porte est isolée par une plaque de polystyrène.

La chambre de séchage est posée sur un support métallique, les produits sont déposés l'intérieur de la chambre sur une claie mobile d'une forme circulaire.

Deux petits aspirateurs sont placés à la sortie de la chambre pour assurer le dégagement de l'air humide (Houhou Hatem, 2012).

4. Classification des types de séchoirs solaires

4.1. Séchoirs solaires directs

Le séchage solaire direct, utilise les rayons directs du soleil pour sécher les aliments. Il est simple à réaliser. Il nécessite par exemple une boîte en bois ou en carton, trouée en bas et en haut pour laisser échapper l'air entré par le bas et l'air chaud sortir par le haut. Cette boîte contient les claies où seront séchés les aliments, et elle est recouverte d'une vitre pour augmenter l'effet de serre. (Missoum, 2016).

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. (Missoum, 2016).

Cependant, on note une évolution dans ce mode de séchage qui consiste à placer cette fois-ci les produits à sécher dans une enceinte de séchage qui peut être en verre, en métal ou en bois tout en assurant une circulation d'air grâce à des ouvertures bien positionnées. (Missoum, 2016).



Figure 2.4.Séchoir solaire direct

Source : https://www.google.com/search?q=s%C3%A9choir+solaire+direct&sxsrf=ALeKk02Q_c2wQ_rIJqPc_jX640a5zskQ:1620260159317&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiqgvW547PwAhX consulté le : 06/05/2021 à 01 :44

4.2. Séchoirs solaires indirects

Les aliments à sécher ne sont pas exposés directement au rayon du soleil. 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. (Missoum, 2016).

L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur, qui le réchauffent en fonction du débit utilisé. (Missoum, 2016).

Le séchage solaire indirect, permet de sécher les fruits, les plantes grâce au soleil sans que les rayons du soleil atteignent directement ce qui est séché ; ainsi la couleur, le goût et les propriétés du fruit ou de la plante sont conservées (vitamines, matières nutritives).

Dans ce cas, le séchoir comprend deux parties, (Missoum, 2016).

- Une partie constituée d'un capteur solaire qui préchauffe ainsi l'air de séchage.
- Une deuxième partie qui constitue la chambre de séchage. (Missoum, 2016).

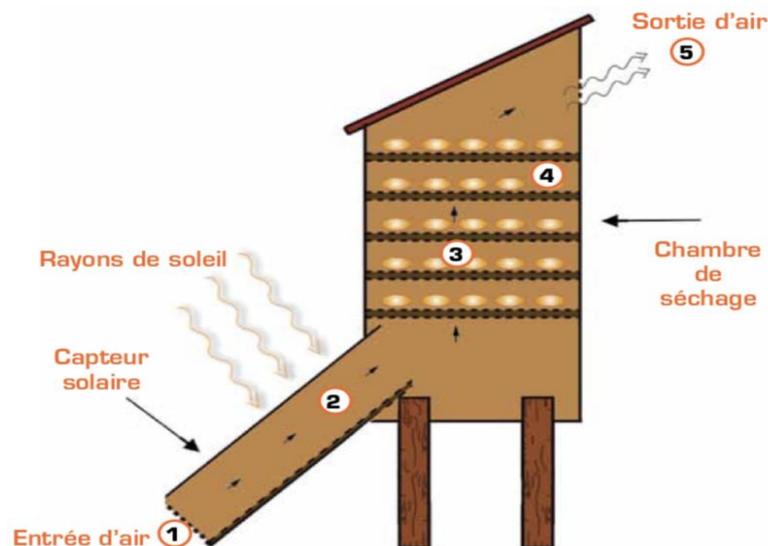


Figure 2.5. Séchoir solaire indirect

Source : https://www.google.com/search?q=s%C3%A9choir+solaire+indirect&tbm=isch&ved=2ahUKEwjtzfHG47PwAhUFIIUKHUa2DA4Q2cCegQIABAA&oq=s%C3%A9choir+solaire+indirect&gs_lcp=CgNpbWc consulté le :06/05/2021 à 02:19.

4.3. Séchoirs solaires hybrides

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

Le préchauffage de l'air est souvent servi par l'énergie solaire. 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. (Mohammed Essalih, 2018).

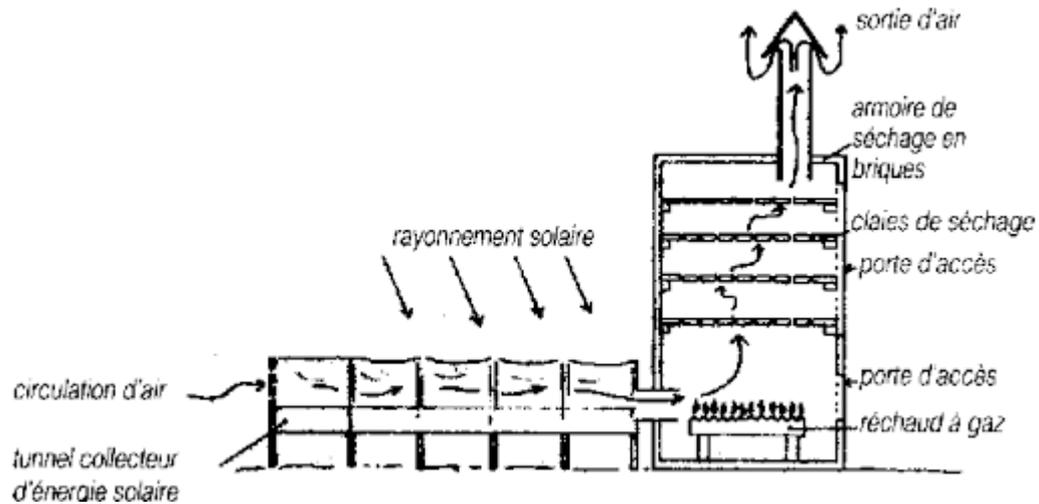


Figure 2.6.Séchoir solaire hybride

Source : https://www.google.com/search?q=s%C3%A9choir+sUKEwiP6KKugbTwAhUOSRoKHSvHC_AQ2cCegQIABAA&oq=s%C3%A9choir+solaire+hybride&gs_lcp=CgNpbWcQA consulté le :06/05/2021 à 03:38

4.4. Séchoirs solaires mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage. (Missoum, 2016).

Un séchoir mixte à circulation naturelle a les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage, et une cheminée), car les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayon du soleil empiète directement sur le produit tel que le séchoir intégral (Ekechukwnet Norton 1999. (Missoum, 2016).

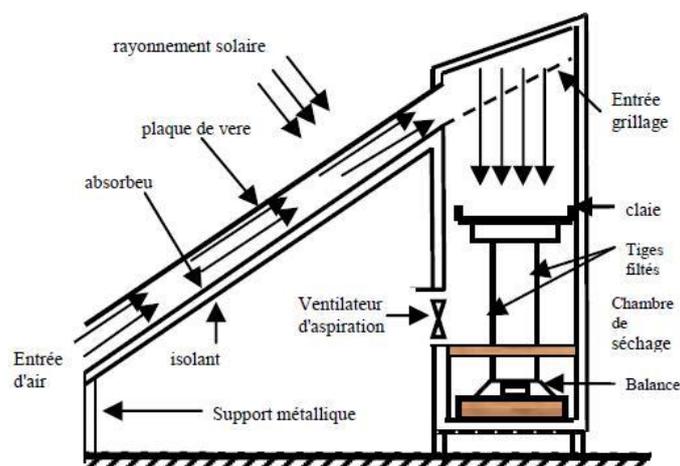


Figure 2.7. Séchoir solaire mixte (Khedimou, 2016)

5. Avantages et inconvénients du séchage

Comme toutes les méthodes de préservation thermique des produits, l'utilisation du séchage présente des avantages et des inconvénients.

(Saf et Reddam, 2018)

5.1. Avantages

Les principaux avantages du procédé de séchage sont :

- La simplicité de la méthode avec généralement un bon rendement.
- Une durée de conservation des aliments déshydratés qui peut être de plusieurs mois.
- La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments.
- L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité de l'eau
- Sa capacité à être utilisée à des fins commerciales permettant de limiter les pertes de récoltes.
- La diminution des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises en raison de la réduction massique. (Saf et Reddam, 2018)

5.2. Inconvénients

Comme tous les traitements thermiques, le séchage peut entraîner, en particulier,

- des pertes d'arômes, de vitamines et de pigments, des réactions de brunissement, des durcissements superficiels.
- des modifications irréversibles de texture et donc de capacité à la réhydratation, des pertes de constituants volatils.

- la modification de la répartition de l'humidité dans le produit.
- Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération

En général, le séchage a globalement moins d'inconvénients que d'autres procédés de conservation (appertisation, congélation ou traitement aseptique). Le séchage des fruits, des légumes et des épices reste encore une méthode très répandue de conservation de ces aliments

(Ekechukwu et Norton, 1999). (Saf et Reddam, 2018)

6. Aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire

En se basant sur les valeurs atteintes par les contraintes hydriques, l'analyse des données recueillies dans les différentes zones permet de caractériser celles-ci de la façon suivante, pour les quatre mois de juin à septembre.

6.1. Zone du littoral

Les contraintes hydriques sont basses et ne manifestent que des écarts diurnes et mensuels de faible importance pour une même station et d'une station à l'autre. Toutes les observations se localisent entre 30°C et 70°C pour le groupe entier et tous les mois réunis. La variation diurne moyenne par station est de 10. Ces conditions rendent cette zone pratiquement impropre au séchage des fruits par la méthode solaire et non recommandable par les procédés artificiels.

6.2. Zone du tell

L'écart diurne s'accroît et atteint 60 entre 7h et 13h. Les stations situées en altitude ont une contrainte relativement élevée, phénomène particulièrement accusé le matin, en juillet-août

L'humidité nocturne et matinale est très gênante et nécessite des précautions spéciales pour soustraire les fruits à la réhydratation.

- Juin. - La contrainte matinale reste faible : 70.

Celle de 13h est élevée et oscille entre 100 et 140 pour l'ensemble des stations, pour retomber entre 70 et 120 à 18h.

Le séchage devient possible sous les conditions indiquées plus haut.

- Juillet- Le climat devient nettement favorable, avec des contraintes de 140 à 170 au milieu du jour. Cependant, certaines stations basses manifestent encore une contrainte matinale très faible :

Relizane, 51 ; TiziOuzou, 55 ; Sidi-Bel-Abbès, 53 ; Orléanville, 60 ; tandis que les stations de montagne se montrent plus sèches à la même heure : Fort-National et Téniet-el-Haad : 97.

- Aout- L'allure des contraintes est sensiblement la même que le mois précédent. On constate des différences analogues pour les observations de 7h. En pleine Relizane tombe à 43, Sidi-Bel-Abbès à 47, Orléanville (Asnam) à 50, tandis qu'en altitude Reibell culmine à 104, Fort-National à 103, Médéa à 95 et Tiaret à 82.
- Septembre- L'humidité matinale s'accroît et les difficultés rencontrées en juin réapparaissent.

Certaines stations sont particulièrement défavorisées à 7 heures :

Relizane, 36 ; Sidi-Bel-Abbès, 37 ; Orléanville et Oujda, 39. Comme précédemment, les stations d'altitude sont les mieux placées, mais Fort-National se distingue particulièrement avec 75, ce qui explique la réussite relative du séchage des figes, malgré une pluviométrie « à priori » excessive.

A 13 h, les écarts se situent entre 145 (Saida) et 98 (Téniet et Miliana).

A 18 h, Orléanville 97 et Reibell 92 viennent en tête, tandis que certaines localités se ressentent déjà de l'humidité nocturne (Téniet 59, Oujda 67), Médéa, Miliana et Mascara 69.

6.3. Zone steppique

Nous trouvons une région très propice au séchage des fruits au soleil en raison de ces contraintes hydriques élevées. Les écarts journaliers s'accroissent encore. Les moyennes matinales sont légèrement plus élevées que dans la zone précédente, sauf pour Septembre. Les régions de Sétif ne s'écartent guère des possibilités du Tell pour juin et septembre, mais s'en distinguent nettement en juillet-août.

- Juin- Djelfa, et Sétif ont une contrainte matinale basse, entre 50 et 60, tandis que les autres stations atteignent de 86 à 95. La moyenne générale est élevée à 13h et 160 à 18h.
- Juillet- Mois très favorable, avec une contrainte qui se situe autour de 100 à 7h, 190 à 13h. et 160 à 18h
- Aout- Mêmes caractéristiques
- Septembre- L'humidité nocturne est aussi élevée que dans le Tell à la même époque.

Ce mois est moins favorable que juin. Des précautions vigilantes seront prises pour mettre les fruits à l'abri d'une réhydratation au cours de la nuit.

6.4. Zone saharienne

Le séchage peut s'effectuer dans les meilleures conditions durant les 4 mois envisagés. La contrainte matinale moyenne ne descend pas en dessous de 70 en septembre, 90 en juin et 100 en juillet-août. La dessiccation se poursuit même pendant la nuit.

7. Conclusion

A travers ce chapitre on comprend le principe de fonctionnement de ces dispositifs, une partie est réservée aux différents types de séchoirs existants, aux avantages et aux inconvénients ainsi que leur classification suivant le principe de fonctionnement, sans oublier l'aptitude climatique de l'Algérie au séchage solaire ainsi que la description des différentes parties de séchoir solaire (chambre de séchage, capteur solaire).

Références

Abdellah Mohammed Essalih (2018), Modélisation des isothermes de désorption du produit agroalimentaire. Mémoire de master. Université Ahmed Daria-Adrar

Djamel Eddine Missoum (2016), optimisation d'un système de séchage solaire des produits agroalimentaire. Mémoire de master. Université Abou BakrBelkaid -Tlemcen

Houhou Hatem (2012), Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agroalimentaires. Mémoire de magister. Université Mohammed Khider-Biskra

https://www.google.com/search?q=s%C3%A9chage+osmotique&tbm=isch&hl=fr&chips=q:s%C3%A9chage+osmotique,online_chips:cellule:icLdd8GHuQ%3D&sa=X&ved=2ahUKEwi4w-2u

KhedimouChaib, Khemgani Moustapha (2016), Etude de différentes méthodes de séchage de la pomme de terre. Master académique, Génie Energétique, Université Ourgla

Saf Anis, ReddamSouaad (2018). Séchage de deux matrices végétales par étuve. Mémoire de master. Université A. Mira-Bejaia

Chapitre 03

Séchage des fruits et légumes

1. Introduction

La consommation des fruits et légumes en grande quantité apporte des substances organiques essentielles, des vitamines, des sels minéraux et autres oligo-éléments, participant ainsi à l'équilibre des rations alimentaires des populations (Harisoamahefa, 2013).

Pour réussir la transformation et la conservation des produits frais il ya plusieurs méthodes parmi ces méthodes le séchage (Harisoamahefa, 2013).

Le séchage des fruits et légumes est l'une des plus anciennes méthodes de conservation des aliments connues par l'homme, car il a un grand effet sur la qualité des produits secs. L'objectif majeur dans le séchage des produits agricoles est la réduction de la teneur en humidité à un niveau qui permet le stockage en toute sécurité sur une période prolongée. Il entraîne également une réduction du poids ainsi que de volume, ce qui réduit l'emballage, le stockage et les frais de transport (Harisoamahefa, 2013).

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits, légumes est l'un des processus des grandes consommations d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduction des dépenses et pertes après les récoltes. Le séchage solaire a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles en plein air. (Saf et Reddam 2018).

2. Grandeurs caractéristiques des produits à sécher

2.1. Porosité volumique d'un produit

Il existe de très nombreuses méthodes de caractérisation de la porosité d'un matériau solide. Chacune d'entre elles est plus ou moins bien adaptée à une texture de matériau, ou à une dimension d'échantillon ou encore à une taille de pores. . . De plus, chaque méthode ne fournit qu'une caractérisation partielle de la porosité en termes de géométrie des pores ou de capacité de stockage ou d'adsorption (diamètre, surface, volume, répartition. . .). Le choix de la technique se fait également en fonction de l'application à laquelle est destiné le matériau. (Patrick Pinot ,2015)

La porosité volumique ϵ (figure 3.1) est définie par :(Patrick Pinot ,2015)

$$\epsilon = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume apparent du produit}} \quad \text{Equation 01}$$

Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc $1 - \epsilon$ (Patrick Pinot ,2015)



Figure 3.1 : Volume de contrôle microscopique

Source www.google.com/search?q=Volume+de+contr%C3%B4le+microscopique&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj_zuOP2LzwAhWVTRUIHZqsDKIQ_AUoAXoECAEQAw&biw=911& consulté le : 09/05/2021 à 14 :29

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure 3.2). La définition est équivalente. (Houhou, 2012)

$$\epsilon = \frac{\text{volume de l'amas} - \text{volume de produit}}{\text{volume de l'amas}} \quad \text{Equation 02}$$

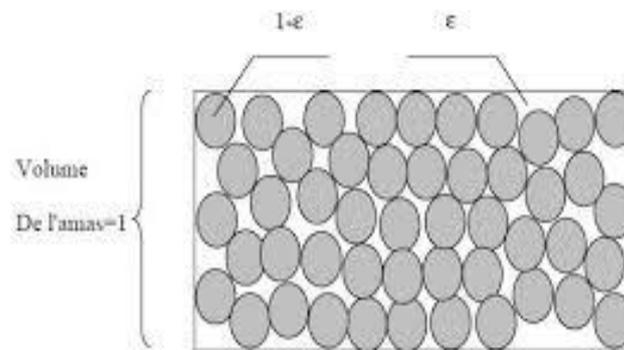


Figure 3.2 : Volume de contrôle macroscopique

Source : <https://www.google.com/search?q=Volume+de+contr%C3%B4le+macroscopique+&tbm=isch&ved=2ahUKEwigibHu2LzwAhVO2xoKHfr3Ck8Q2-cCegQIABAA&oq=+Volume+de+contr%C3%B4le> le consulté le 09/05/2021 à 14 :35

2.2. Teneur en eau du produit à sécher

Il n'y a pas un produit agricole à l'état naturel complètement sec et l'eau est toujours présente. Deux méthodes sont utilisées pour calculer sa teneur en eau : en base humide (bh) Ou en base sèche (bs). En outre, la teneur en eau peut être exprimée en pourcentage ou comme un rapport décimal. (Lahbari, 2015).

- L'eau présente dans les tissus végétaux et animaux peut être plus ou moins disponible et on distingue « l'eau libre » et « l'eau liée ». (Harisoamahefa, 2013).
- L'eau libre est celle qui s'évapore librement d'une superficie lorsque sa pression de vapeur est supérieure à celle de l'atmosphère qui l'entoure. L'eau libre est la plus facile à éliminer et est d'ailleurs la première à s'évaporer lors du séchage.
- L'eau liée peut être fixée plus ou moins fortement. L'eau liée s'évapore à une vitesse décroissante, elle doit néanmoins être diminuée jusqu'à un seuil d'activité de l'eau (A_w) minimum. Car, elle pourrait être utilisée par les larves d'insectes et les microorganismes pour leur croissance. La plupart des levures se développent à une A_w supérieure à 0.88 et les moisissures à un A_w supérieur 0.80. (Harisoamahefa, 2013).

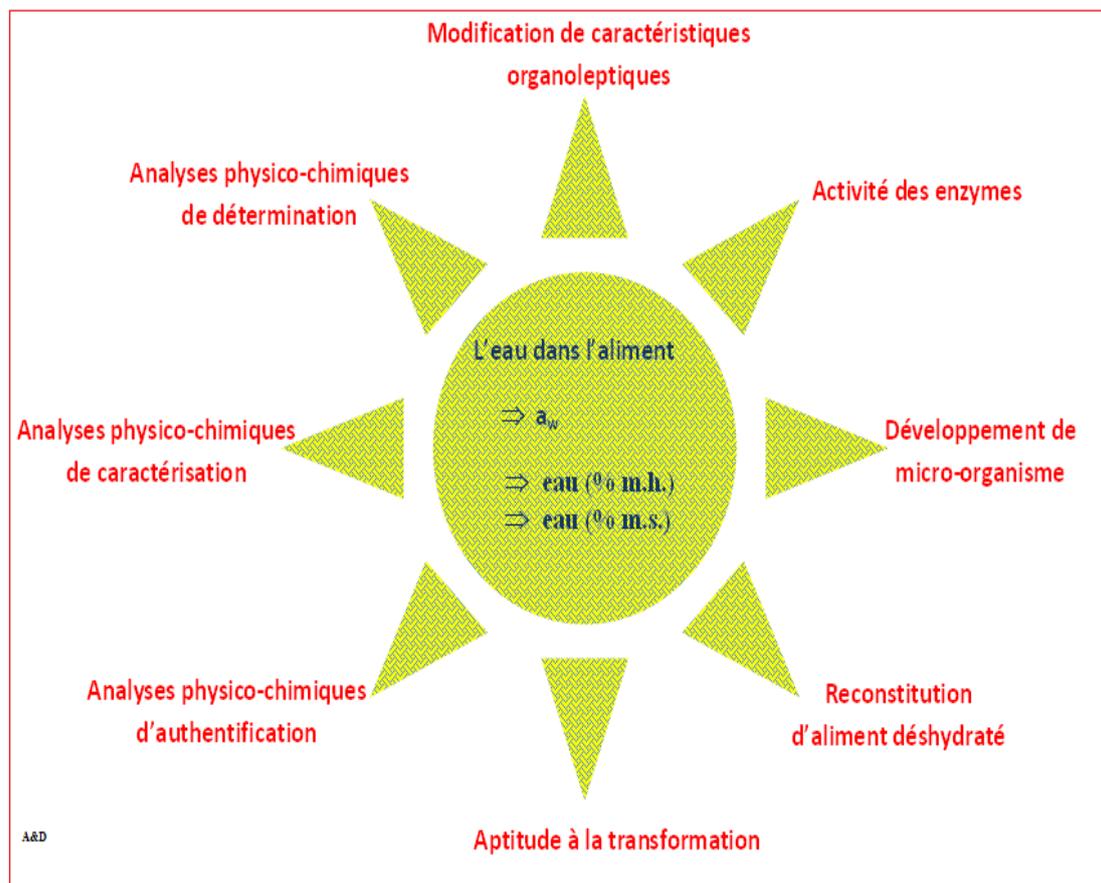


Figure 3.3 : l'eau dans les aliments

Source : <http://www.aliment-et-developpement.com/l-eau/leau-dans-laliment-et-laliment-dans-leau> consulté le 18/05/2012 à 16 :54

2.3. Activité de l'eau dans le produit

L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques de nombreuses substances, telles entre autres la fluidité, la coagulation, la cohésion et l'électricité statique(Lahbari, 2015).

La capacité de conservation des aliments, la stabilité des couleurs, du goût, la teneur en vitamines, l'arôme et les conditions favorables à la formation de moisissures et à la croissance des microbes sont directement influencés par la valeur aw (water activity)(Lahbari, 2015).

L'activité de l'eau est un facteur critique qui détermine directement la conservation des aliments. La température, le pH et quelques autres facteurs ont une certaine influence sur la possibilité et le taux de croissance d'un organisme dans des denrées. L'activité de l'eau représente le plus important de ces facteurs(Lahbari, 2015).

L'humidité d'équilibre d'un matériau hygroscopique joue dans ce processus un rôle important. On entend par humidité d'équilibre l'humidité relative qui doit régner dans une atmosphère environnante pour empêcher tout échange d'eau entre les matériaux et l'air. Il est donc clair que pour assurer une bonne conservation et stockage de produits, le climat ambiant ne doit pas dépasser les valeurs limites établies par la mesure de l'activité de l'eau.(Lahbari, 2015).

L'activité de l'eau est, par définition, pratiquement identique à l'humidité d'équilibre, elle n'est toutefois pas exprimée en pourcentage (0 à 100%), mais de 0 à 1.0 aw. (Lahbari, 2015).

On définit l'activité de l'eau (aw) dans le produit par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit (P_{vp}) à la pression de vapeur de l'air saturé (P_{vs})(Mohammed Essalih,2018)

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad \text{Equation 03}$$

Avec :

P_{pv} : Pression de vapeur d'eau à la surface du produit.

P_{vs} : Pression de vapeur d'eau dans l'air saturé.

Ces deux pressions dépendent dans une large mesure de la température, alors que leur relation est bien moindre. Dans le même ordre d'idées, ils justifient que l'humidité relative (Hr) d'une atmosphère (un nombre sans dimension compris entre 0 et 100) est donnée par l'expression (Mohammed Essalih, 2018)

$$H_r(\%) = \frac{P_{vp}}{P_{vs(T)}} \cdot 100 \quad \text{Equation 04}$$

Alors l'activité de l'eau dans le produit est liée à l'humidité relative d'équilibre au-dessus d'un produit par la relation suivante :(Mohammed Essalih,2018)

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{H_r(\%)}{100} \quad \text{Equation 05}$$

3. Filières fruits et légumes en Algérie

3.1. Mode de consommation des fruits et légumes en Algérie

Les Algériens mangent local, les légumes frais qui sont : mercuriale, oignon sec, carotte, navet, fenouil, choux fleurs, artichaut vert, tomate, salade, la courgette, betterave.

Dans la filière des fruits, les bananes restent indétrônables dans les habitudes de consommation des Algériens, les oranges, Les dates, les pommes, aujourd'hui, c'est suffisamment onéreux pour que de nombreux Algériens consomment plus de fruits importés." Son raisonnement concerne en fait les fruits locaux quand ils sont disponibles, car la disponibilité ne fait pas toujours figure d'évidence, étant hors de portée des bourses modestes.

3.2. Production de quelques fruits et légumes en Algérie

➤ Légume

Au cours des dernières décennies, les cultures maraîchères se sont fortement développées. En 40 ans, les superficies sont passées de 85 000 hectares à environ 470 000 hectares. La portée des toits fait face à des limitations d'eau qui restent le facteur limitant. Les pommes de terre (140 000 ha en 2012) occupent environ 30% de la superficie totale consacrée aux légumes. (Benagoudjil ,2014).

➤ Fruit

Traditionnellement, l'arboriculture comprend les oliviers, les figuiers, les vignes, les agrumes et les palmiers dattiers. Depuis les années 1990, l'Algérie cultive des pommiers, des poires, des abricots, des pêches, des cerisiers, des amandiers, des grenadiers et des abricotiers.

Entre 2000 et 2011, la production de fruits a plus que doublé (fruits à noyaux et pépins +250 %, agrumes + 135%, figues +120%, olives +100%, dattes + 65%), en partie grâce à l'amélioration des rendements, même si ceux-ci restent très faibles, mais surtout à cause de l'extension du verger. (Benagoudjil ,2014).

La production de quelques fruits et légumes en Algérie est présentés dans les tableaux suivant :

Tableau 3.1 : Evolution de la production de légumes en Algérie (2000-2012)(Benagoudjil ,2014).

	Production en tonnes		
	Année	2000	2005
Légume sec	21864	47106	84290
Pomme de terre	1207690	2156550	6219475
Tomates	341447	513780	796963
Oignons	315741	685500	1183268
Aulx	35605	46436	77648
Carottes	148636	163579	354101
Poivrons	97433	150643	245023
Courgette	94882	188500	227789
Choux-fleur	43822	51481	119224
Fève	77719	207500	257700

Tableau 3.2 : Evolution de la production de fruits en Algérie (2000-2012) (Benagoudjil ,2014).

	Production en tonnes		
	Année	2000	2005
Abricots	56354	145096	269308
Pêche	59140	95059	177986
Paire	74176	158193	211191
Pomme	96517	199712	397529
Prunes	26353	46216	105490
Cerises	4168	3081	7930
Grenades	25639	41354	71706

4. Physiologie des fruits et légumes

4.1. Mécanisme de maturation des fruits

La maturation est une étape au cours de laquelle le fruit se transforme en un produit agréable à consommer. Pendant la première période de sa vie, le fruit est immature. S'il est récolté pendant cette période, il ne pourra jamais acquérir des qualités organoleptiques convenables.

La maturation est une série d'événements physiologiques, biochimiques et structurels programmés qui impliquent l'expression ordonnée de gènes spécifiques. (Harisoamahefa, 2013). Il s'agit d'une étape très importante pour la qualité du fruit car elle correspond à l'accumulation continue de réserves dans le fruit, à la perte de dureté (détérioration des parois), à la diminution de l'acidité et à l'augmentation de la teneur. Dans les polysaccharides, mais aussi l'évolution des odeurs, de l'éthylène et l'apparition de la couleur. (Harisoamahefa, 2013).

Le ramollissement du fruit est une propriété de maturation importante. Elle est associée à une augmentation de la concentration de pectine soluble. Le fruit perdra sa puissance en raison de la dégradation des parois pectocellulosiques sous l'influence de l'hydrolase, de la cellulase, des polygalacturonases. La teneur en sucre du fruit augmente fortement pendant cette étape. Deux mécanismes participent simultanément au changement de couleur au fur et à mesure que le fruit mûrit. D'une part, c'est la dégradation de la chlorophylle, provoquant une perte de couleur verte, d'autre part, la nouvelle synthèse des pigments de couleur. (Harisoamahefa, 2013).

Les fruits sont divisés en deux groupes selon leur mécanisme de maturation:

Les fruits dits climactériques : la tomate, la pomme, la banane et l'abricot. Ils ont une crise caractérisée par une forte augmentation de la respiration accompagnée d'une production élevée d'éthylène. (Harisoamahefa, 2013).

Les fruits dits non-climactériques : le raisin, la fraise et les agrumes ne présentent pas de crise respiratoire, ni de pic d'éthylène. Ils se distinguent des précédents par leur incapacité à mûrir après récolte (Harisoamahefa, 2013).

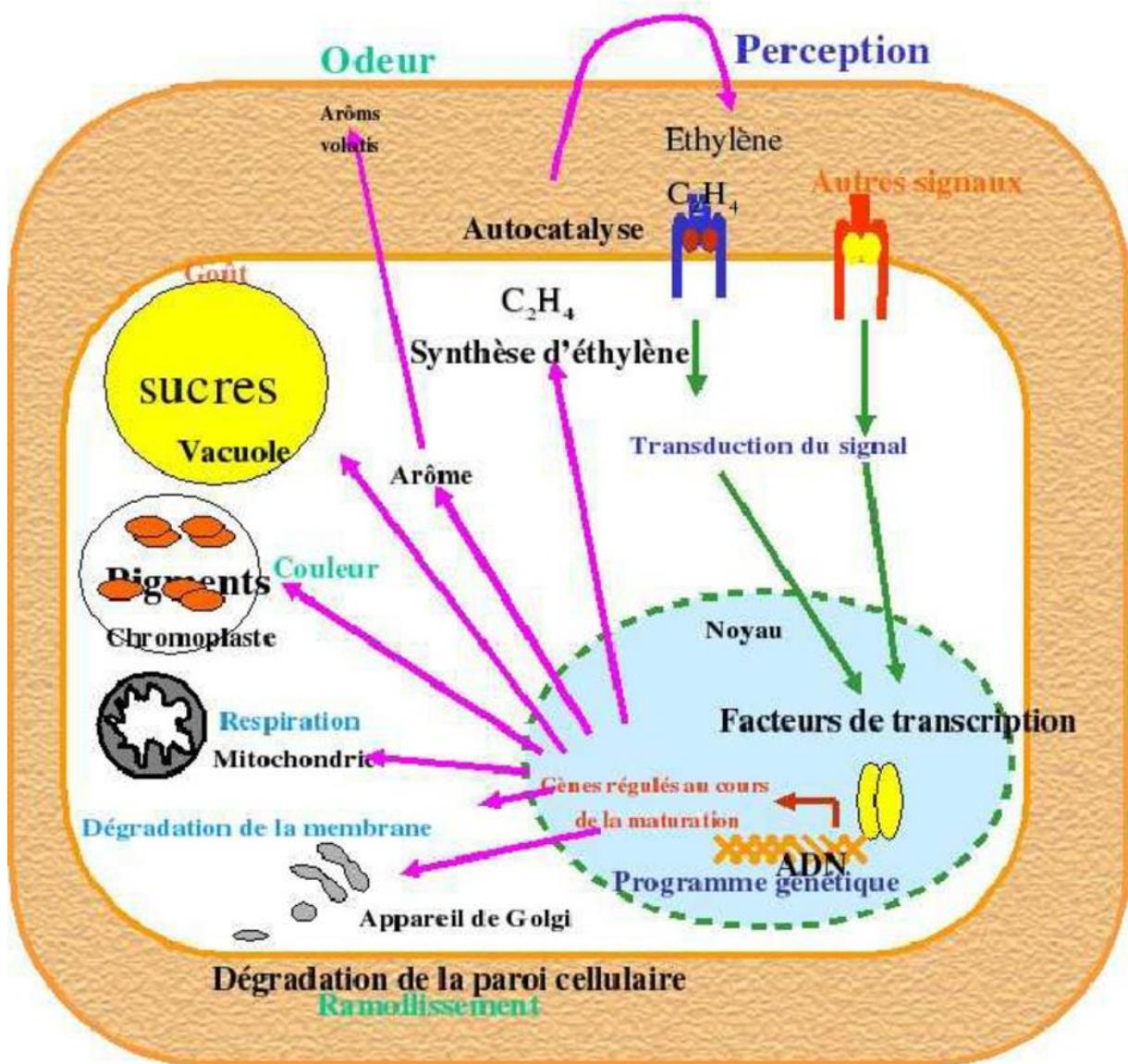


Figure 3.4 : Modèle récapitulatif des mécanismes généraux de la maturation des fruits.

Source : https://www.google.com/search?q=M%C3%A9canisme+de+maturation+des+fruits&rlz=1C1GCEA_enDZ876DZ876&sxsrf=ALeKk01if-OjTMHSD1ts8Gjo3gIHvpMA:1624988847320&source=inms

Consulté le 29/06/2021 à 17 :00

4.2. Dégradation post-récolte des fruits et légumes

Les dégradations provoquent des changements de texture, de couleur et de goût et peuvent rendre les aliments impropres à la consommation. Il y a plusieurs raisons à cette détérioration pour les fruits et légumes: (Harisoamahefa, 2013).



Figure 3.5 : Dégradation des fruits (Pomme)

Source : https://www.google.com/search?q=D%C3%A9gradation+post-r%C3%A9colte+des+fruits+et+1%C3%A9gumes&rlz=1C1GCEA_enDZ876DZ876&sxsrf=ALeKk03FVS6fxxPjczLKjpcv6cmXIBEN0Q:1624989669418&s consulté le 29/06/2012 à 19 :06

4.2.1. Facteurs biologiques

Les aliments périssables sont dégradés par l'influence des animaux tels que les rongeurs, insectes, les et les germes microbiens. Les fruits et légumes constituent un milieu idéal pour les micro-organismes, en particulier les levures et les moisissures, sans traitement préalable et compte tenu de leurs différents composants, et la plupart d'entre eux pénètrent dans les tissus endommagés. Les facteurs affectant la croissance des micro-organismes dans les fruits et légumes sont: le pH, la température, l'activité de l'eau (AW) et le potentiel d'oxydoréduction.(Harisoamahefa, 2013).

4.2.2. Facteurs physiques

Les températures élevées et les chocs auxquels ils sont exposés lors de la récolte et du transport sont un facteur de détérioration. Par exemple, la température appropriée pour le transport d'ananas frais est de 7 ° C et 8 ° C.(Harisoamahefa, 2013).

4.2.3. Facteurs enzymatiques

Plusieurs types d'enzymes sont impliqués dans la décomposition des fruits et légumes après la récolte. Ce qui concerne : (Harisoamahefa, 2013).

- Enzymes qui décomposent la matière bactérienne du fruit. Ces enzymes se composent de deux classes: la dipolymérase et l'estérase qui agissent dans les régions lisses et les

rhamnogalacturonases, les arabinanases, les galactanases et parfois les férulatestérases qui se produisent dans les régions infestées de pectine.

- Enzymes qui provoquent des réactions structurales-enzymatiques. Cette coloration brune résulte de l'oxydation des composés phénoliques dans la cellule végétale par des enzymes appelées polyphénoloxydases. Cette réaction conduit à la formation de quinones, espèces très instables qui se polymérisent en entraînant la formation de pigments bruns (Harisoamahefa, 2013).

5. conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé sur les teneurs en eau et l'activité de l'eau dans un produit à sécher ainsi que les mécanismes de maturation et les causes de la détérioration les fruits et légumes et aussi la production et la consommation des fruits et légumes en Algérie.

Référence

Abdellah Mohammed Essalih (2018), Modélisation des Isothermes De désorption du produit Agroalimentaire. Mémoire de Master. Université Ahmed Draïa – Adrar.

Harisoamahefa Hanitriniony (2013), Etude des modalités de séchage de fruit et légume au moyen du séchoir solaire boara, qualités nutritionnelles et microbiologique des produits obtenus, Mémoire pour l'obtention du diplôme d'étude approfondies de science du vié.

Houhou Hatem (2012), Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agroalimentaires. Mémoire en magister. Université Mohammed Khider-Biskra.

Miloud Lahbari (2015), Etude et stimulation du séchage de l'abricot : application a quelque variété de la région des aures, thèse présentée pour obtenir le grade de docteur en science, Université Hadj Lakhdar –Batna-.

Mohamed Benagoudjil (2014), Leader of fruit juice in Alegria.

Patrick Pinot (2015), Détermination de la porosité de roches calcaires : méthode et incertitude de mesure, determining the porosity of limestone : experimental method and uncertainty. Revue Française De Métrologie, 37.

Saf Anis, Reddam Souad (2018), Séchage de deux matrices végétales par étuve. Mémoire de Master. Université A. Mira-Bejaia.

<https://www.liberte-algerie.com/dossier-economique/legumes-locaux-et-fruits-importes-dans-lassiette-des-algeriens-225189> consulté le : 15/05/2015 a 19.

Chapitre 04

**Etude comparative de deux installations
de séchage solaire :**

Séchoir direct et Séchoir indirect

1. Introduction

Le séchage est, soit un moyen de conservation, soit une étape dans la transformation de certains produits. Il est utilisé à la fois dans le monde rural dans le monde industriel à travers l'agro-alimentaire, le textile...etc. Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles. Evidemment la quantité de soleil et d'humidité affectera les performances du séchoir. Les séchoirs solaires se divisent en deux modèles, de type directs et indirects. (Benkhelfellah, El mokhtar, Miri, Behamel,2005).

Dans ce chapitre on a choisi des différentes publications pour chaque séchoir solaire afin de comparer entre le séchoir solaire directe et indirecte pour choisir le meilleur séchoir

2. Etude d'un séchoir solaire direct à travers les publications

2.1.S. EL Mokretar, A. Azzi, F. Saidj, M. Belhamel. Séchage solaire direct de produits agroalimentaire en convection naturelle

Le dispositif expérimental présenté dans cette étude (figure 4.1), comprend essentiellement :

- Un séchoir solaire de type direct
- Le plancher est isolé thermiquement.
- La couverture du séchoir est composée en verre ordinaire d'épaisseur 4mm, comprend deux parties : Un vitrage fortement incliné (55°), maximisant la captation durant la période hivernale et un vitrage faiblement incliné (15°) maximisant la captation durant la période estivale.
- Les parois d'un lit de cailloux (galets) peints en noir.
- Les appareils de mesure de l'humidité, du rayonnement et de la température, reliés à un enregistreur automatique de données.
- Une balance de précision

L'étude expérimentale, entreprise sur ce séchoir, consiste en la mesure systématique :

- Du flux solaire global reçu par le vitrage.
- Des températures des couvertures vitrées, des différentes parois, de l'air intérieur, du plancher (lit de cailloux) et du milieu ambiant (extérieur) du séchoir.
- De l'humidité relative à l'intérieur de la serre.
- Des pesées systématiques des produits séchés.
- Comportement thermique du séchoir : L'élévation de température engendre une baisse de l'humidité relative de l'air asséchant (fig. 4.2) augmentant ainsi sa capacité d'absorption de l'humidité. L'apport de chaleur assuré par le lit de galets permet de maintenir des

conditions de température et d'humidité relative de l'air intérieur favorisant le séchage en période nocturne



Figure 4.1. Séchoir expérimental

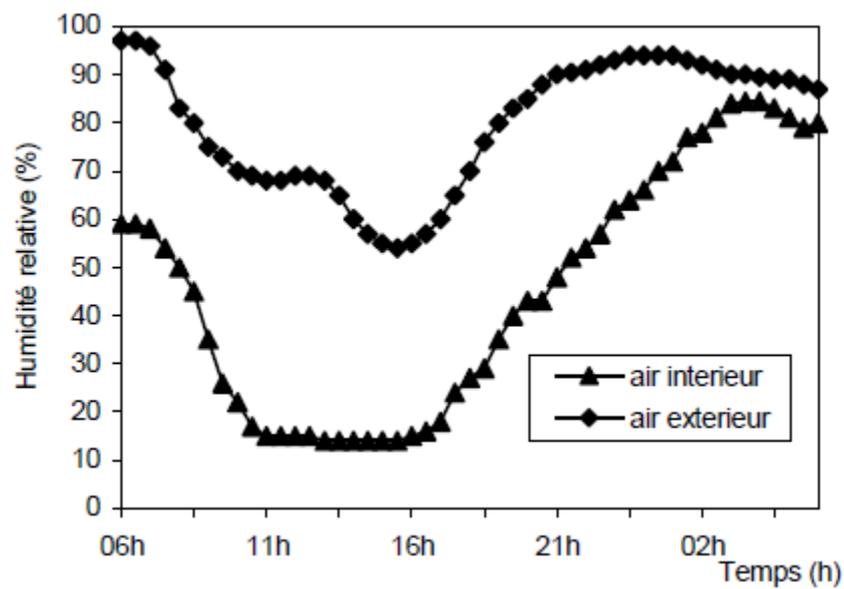


Figure 4.2. Evolution de l'humidité relative de l'air

- Cinétique de séchage : L'allure décroissante de la courbe de séchage solaire direct des prunes présente deux phases : Une première phase de séchage à allure décroissante rapide, appelée souvent « deuxième phase de séchage », correspondant à des taux d'évaporation d'humidité importantes. L'influence de la teneur en eau des prunes (fig. 4.3), à ce stade du processus de séchage, se fait sentir beaucoup plus durant cette période et les facteurs limitants deviennent beaucoup plus importants. La perte de masse continue ainsi jusqu'à atteindre une masse stable correspondant à une teneur en eau du produit en équilibre avec les conditions de température et d'humidité relative de l'air de séchage.

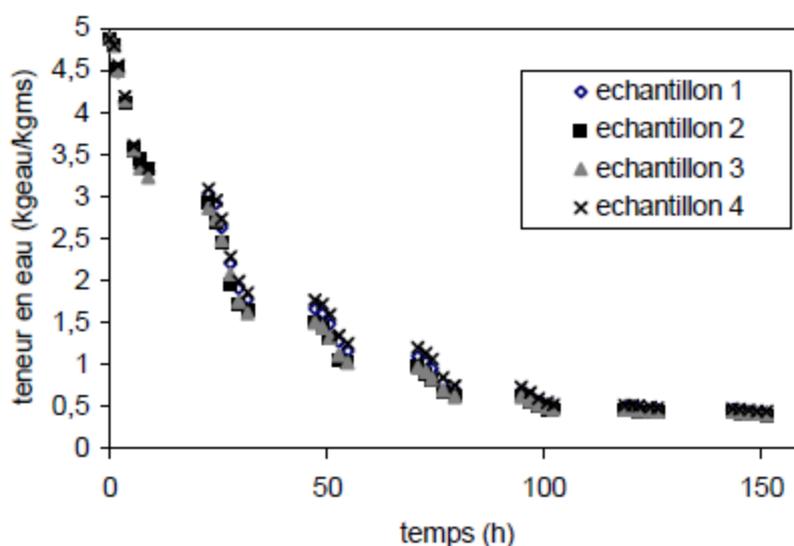


Figure 4.3. Evolution de la teneur en eau des prunes au cours de séchage

Sur la figure 4.4, nous traçons l'évolution journalière de la vitesse de séchage en fonction du temps. La vitesse de séchage journalière qui suit d'une manière systématique. L'évolution de l'énergie solaire globale chute brusquement pendant l'après-midi avec la chute de l'intensité lumineuse. En période nocturne, bien que les pertes de chaleur par convection (renouvellement d'air) et par rayonnement avec la voûte céleste sont très importantes, le processus de séchage suit son cours mais avec des taux d'évaporation d'humidité beaucoup plus faible relativement à ceux enregistrés pendant la période diurne.

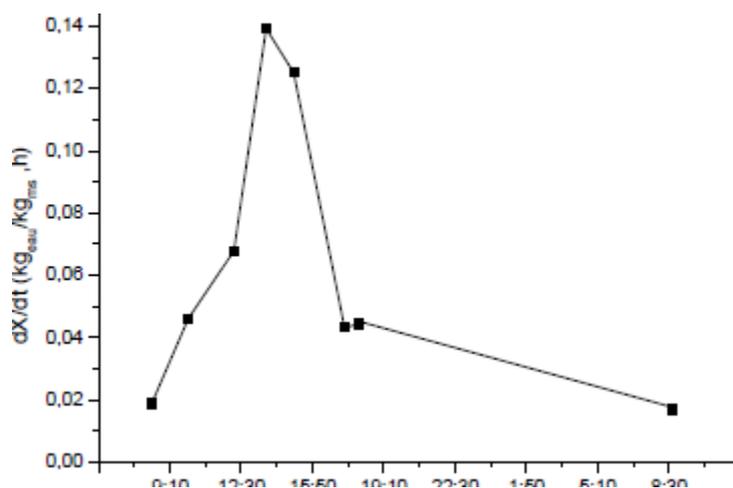


Figure 4.4. Vitesse de séchage journalière

L'étude expérimentale entreprise sur le séchage solaire de type direct a consisté, en premier lieu, en la mesure et au relevé des composantes du rayonnement solaire, des températures et de l'humidité à l'intérieur du modèle et, en second lieu, en la détermination des courbes de perte d'humidité du produit séché par des pesées successives pendant toute l'opération de séchage jusqu'à la stabilisation de la masse du produit. Les températures de l'air relativement élevées (variant entre 45°C et 65°C) enregistrées à l'intérieur du séchoir solaire direct sont très intéressantes pour le séchage des produits à forte teneur en eau tel que les prunes et le raisin. D'une manière générale, les produits sèchent 2 à 5 fois plus vite dans un séchoir direct qu'à l'air libre, sans aucun apport d'énergie d'appoint, grâce au système de stockage de chaleur sensible.

2.2. D Mennouche, 2010, Etude expérimentale du séchage solaire de la pâte de tomate dans un séchoir direct

Les essais de séchage de la pâte ont été effectués sur un séchoir solaire direct (figure 4.5). Elle est constituée de six plaques de verre (épaisseur de 4 mm), deux sont inclinés d'un angle de 31,57°, deux sont positionnées dans la partie avant et arrière du séchoir, et deux dans les parties latérales du séchoir. Les quatre dernières plaques de verre sont reposées sur des plaques en tôle galvanisés séparés avec le polystyrène, l'une des plaques est peinte en noir et considéré comme absorbeur. La chambre de séchage est posée sur un support métallique

Le produit à sécher (pâte de tomate) est étalonné sur une claie, ce dernier est déposé sur une balance, situer au-dessous de la chambre à l'aide de quatre tiges filetées (diamètre 10 mm).

La cheminée du séchoir présente un cylindre en tôle galvanisée, de hauteur de 1 m et de diamètre de 10 cm, qui joue le rôle d'un aspirateur de l'air circulant à l'intérieur de la chambre du séchoir solaire.

- Fonctionnement du séchoir solaire : l'air frais arrivé de l'extérieur passe par les trous perforés du séchoir solaire. Il traverse la surface de la plaque noire, sa température augmente sous l'effet de serre. Puis il continue son chemin à travers la surface du produit. Enfin l'air de séchage chargé par les vapeurs d'eau est évacué à l'extérieur à travers la cheminée.
- Préparation du produit : la préparation du produit s'effectue selon les étapes suivantes : Lavage de la tomate ; Epluchage et l'enlèvement des graines ; Broyage ; Egouttage ; Mise en place du produit : Une masse d'environ 2,425 kg de produit égoutté est étalé sur une claie de dimensions 30 cm x 20 cm, en couche d'épaisseur de 2.5cm. Il est ensuite introduit dans la chambre de séchage
- Protocole expérimental : pour suivre la perte de masse du produit au cours du séchage, ils ont effectué des mesures de poids chaque 30 minutes à l'aide d'une balance à affichage numérique. La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre une teneur en eau finale souhaitée. Les mesures de température, du rayonnement, et de la vitesse de l'air sont également effectuées chaque 30 minute. Le séchage du produit est réalisé quotidiennement entre 9h et 18h. En fin de chaque journée le produit est stocké dans un endroit sec pour prévenir toute réhydratation. La manipulation est arrêtée lorsque la teneur en eau souhaitée est atteinte.

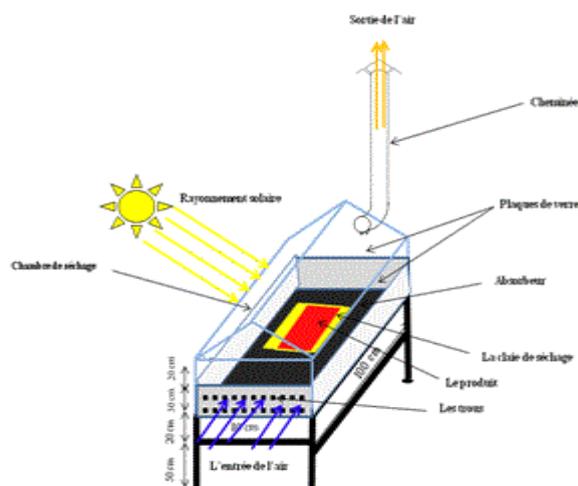


Figure 4.5. Schéma descriptif du séchoir solaire

2.2.1. Etude du comportement du séchoir solaire

- Variation du rayonnement solaire : (la figure 4.6) présente la variation du rayonnement solaire global en fonction du temps pour les trois jours de séchage :
- ❖ Le premier jour de 420 W/m² au début de l'opération de séchage (9h:00 AM) jusqu'à 77 W/m² à 18h et atteint un maximum de 742 W/m² à 12h 30 min.
- ❖ Le deuxième jour il varie de 396 W/m² à 9h jusqu'à 112 W/m² à 18h et atteint un maximum de 740 W/m² à 13h.
- ❖ Enfin le rayonnement solaire prend la valeur de 685 W/m² à la fin de l'opération de séchage

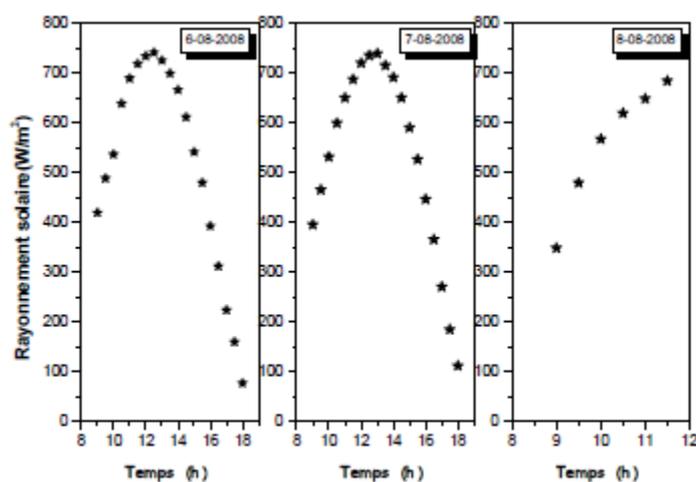


Figure 4.6. La variation du rayonnement global en fonction du temps

- Evolution de la température dans le séchoir : l'augmentation de la température au milieu de la claie de séchage est due aux influences ajoutées du rayonnement solaire "piégé" (effet serre), et de son effet sur la surface absorbante qui atteint une température maximale (T_{abs}) de 103°C à 14h pour le deuxième jour de séchage. On remarque aussi que la température du produit atteint un maximum de 53,6°C, 55,8°C et 60°C. Ceci est expliqué par la diminution de l'évaporation de l'eau à la surface du produit, ce qui entraîne une augmentation de la température du produit due au flux de chaleur échangée. Une diminution de la température est lisiblement observée. Ceci peut être justifié par la consommation d'une quantité de chaleur pendant l'évaporation de l'eau au cours de l'opération de séchage.

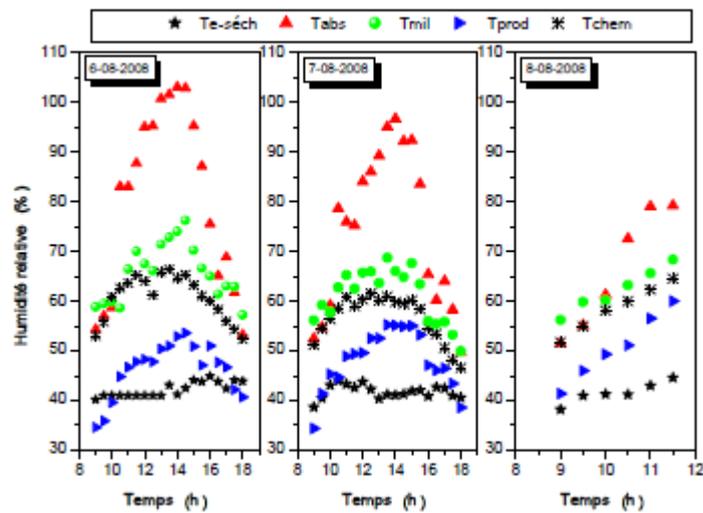


Figure 4.7. Variation de la température dans le séchoir solaire

- Variation de l'humidité relative de l'air : (la figure IV.8) présente la variation de l'humidité relative avant la claie de séchage, après la claie, et au niveau de la cheminée en fonction du temps. On remarque sur cette figure que Hr_{-av} varie entre 0,5% et 10% pendant les jours de séchage. Cette faible valeur d'humidité relative est expliquée par l'effet de l'augmentation de la température de l'air (figure IV.7), à travers la plaque noire, du séchoir solaire sur l'humidité relative. L'évaporation de l'eau du produit favorise la diffusion de vapeur de l'eau dans l'air de séchage, en effet cela se traduit par une élévation de Hr_{-ap} , qui atteint un maximum de 18% pour le premier jour de séchage. La figure précédente montre aussi une diminution de l'humidité de l'air au niveau de la cheminée ceci peut être justifié par l'augmentation de la température durant le passage de l'air à travers l'absorbeur du séchoir.

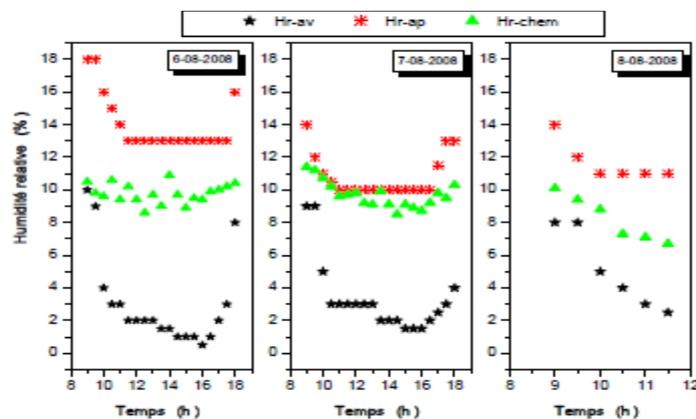


Figure 4.8. Variation de l'humidité de l'air en fonction du temps

Evolution de vitesse d'air : (la figure 4.9) montre la variation de la vitesse de l'air en fonction du temps. On remarque que la vitesse d'écoulement de l'air dans le séchoir varie entre 0.11 m/s et 0.71 m/s. Le rôle de cette vitesse est tout simplement d'évacuer la vapeur d'eau

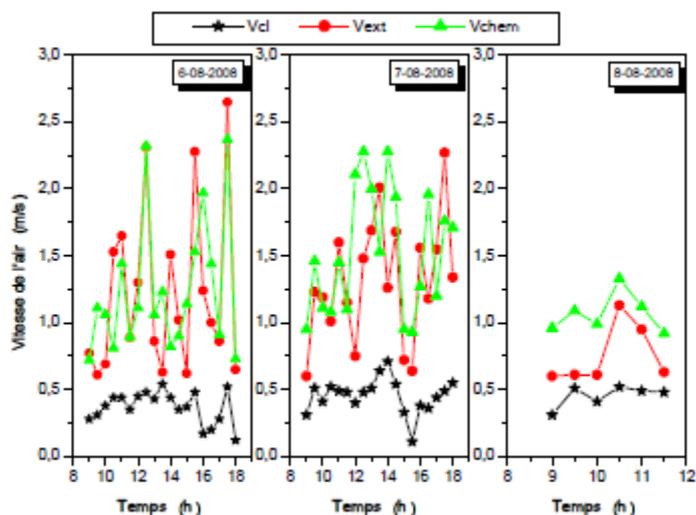


Figure 4.9. Variation de la vitesse de l'air en fonction du temps

- Variation de la teneur en eau : On remarque sur cette figure que la durée de séchage pour avoir une teneur en eau finale $X_f = 0,13$ Kg eau/kg m.s (épaisseur de 2,5 cm) est d'environ 20 heures (Trois jours), dont :
 - ❖ Le premier présente une diminution de la teneur en eau de 8,82 jusqu'à 5,01 Kg eau/kg m.s (43,20% par rapport à la valeur initiale), c'est-à-dire une évaporation d'une quantité d'eau égale à 0,940 Kg.
 - ❖ Le deuxième jour on observe une diminution moins importante de la teneur en eau de 4,38 jusqu'à 1,25 Kg eau/kg ms (35,49%), et la quantité d'eau évaporée égale à 0,775 Kg.
 - ❖ En fin pour le troisième jour une diminution de 7,82%. On peut voir aussi sur la figure (IV.10), l'existence d'une perte d'humidité de 7,25% et 4,88%, pour le premier et le deuxième jour respectivement, pendant le stockage du produit.

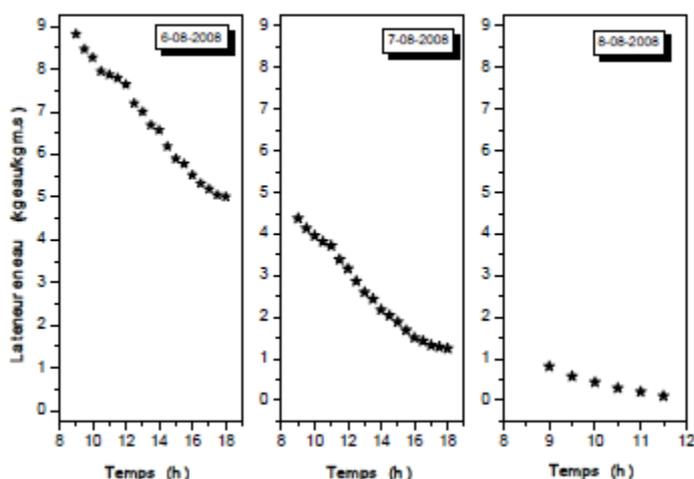


Figure 4.10. Variation de la teneur en eau en fonction du temps

- Effet de l'épaisseur de la couche de pâte : on remarque sur cette figure (4.11) que pour une épaisseur de 1,5cm de la couche de pâte la teneur en eau varie, pendant une journée de séchage, de 8,82 kg eau/kg m.s jusqu'à 2,46 kg eau/kg m.s avec une évaporation d'une quantité d'eau de 0,940 kg (figure 10), par contre pour une épaisseur de 2,5cm, celle-ci varie de 8,82 kg eau/kg m.s jusqu'à 5,01 kg eau/kg m.s, et la masse évaporée est de 0,890 kg (figure 10). Ceci montre que la réduction de 1 cm dans l'épaisseur de la couche de la pâte de tomate réduit la teneur en eau de 28,91%. Et la croissance des moisissures durant le stockage pendant la nuit à l'état humide ($X < 0,13$ kg eau/kg m.s). L'appréciation visuelle du produit final permet de dire que le procédé de séchage de la pâte de tomate pour une épaisseur de 1,5 cm se fait d'une façon homogène. Par contre, dans le cas de 2,5cm d'épaisseur nous avons remarqué l'apparition de certaines zones peu séchées dans la partie inférieure de la couche de tomate. En plus le produit final en cas de 2,5cm présente des fissures sur la surface extérieure.

Les résultats expérimentaux amènent aux conclusions suivantes :

- Le temps de séchage pour avoir une teneur en eau finale du produit (0,13 kg eau/kg m.s) est de trois jours, pour une couche de pâte d'épaisseur de 2,5cm.

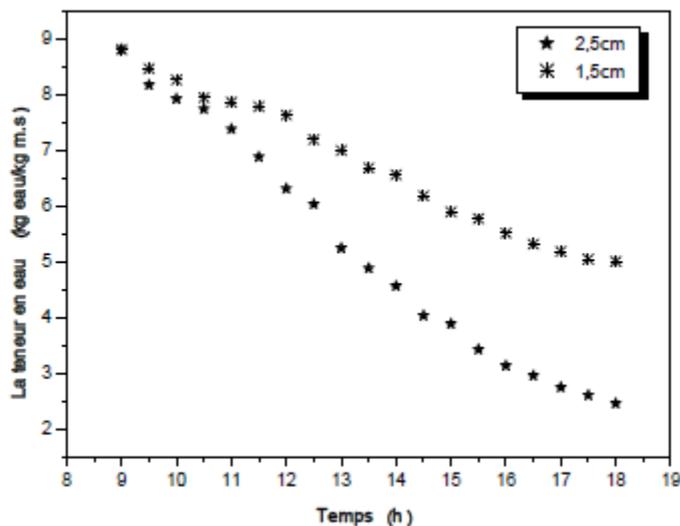


Figure 4.11. Variation de la teneur en eau en fonction du temps

- La variation de la température de séchage dans l'intervalle de 50-76°C pendant les journées de l'expérience, présente une température adéquate pour le séchage de la pâte de tomate.
- La réduction de 1cm dans l'épaisseur de la couche de pâte, pour une journée de séchage, permet de réduire la teneur en eau de 28,91%.
- Le séchage d'une couche de pâte de tomate, pour une épaisseur de 1,5 cm, présente à la fin du traitement un produit homogène avec moins de fissures sur la surface.

2.3. RyadBenkhelfellah, Sofiane El mokhtar, Rachid Miri, MaioufBelhamel, 2005, Séchoirs solaires. Etude comparative de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires dans des modèles de type direct et indirect

Le séchoir solaire de type direct s'apparente à une serre solaire: Le grand axe du dispositif est parallèle à la direction Est-Ouest. La couverture du modèle exposé au sud géographique et composée en verre ordinaire d'épaisseur 4mm, comprend deux parties : Un vitrage fortement incliné (55°) et un vitrage faiblement incliné (15°). Les parois latérales et verticales ainsi que le plancher sont isolés thermiquement. Il comprend, en outre, un système de stockage d'énergie constitué d'un lit de cailloux (granite) peints en noir.

2.3.1. Intensité du rayonnement solaire

La figure 4.12 illustre l'évolution théorique des composantes incidente, diffuse et globale du rayonnement solaire. L'intensité lumineuse incidente (directe) augmente progressivement jusqu'à atteindre sa valeur théorique maximale de 780 (W/m^2) pour un relevé expérimental de 818 (W/m^2) à 12 TSV (13h locales), puis chute jusqu'à atteindre une valeur nulle aux environs de 19h locales. Pour ce qui est du rayonnement diffus, nous pouvons voir qu'il est régulièrement réparti autour de la valeur moyenne de 105 W/m^2 , soit 12% de l'éclairement énergétique total. Etant le résultat de la somme des rayonnements diffus et direct, la distribution du rayonnement global (figure .13) atteint une valeur théorique maximale de 884 W/m^2 tan disque le relevé expérimental indique, pour cet ensoleillement, une valeur maximale de 922 W/m^2 . Ils notent une similitude entre les courbes théoriques et expérimentales avec un écart max. inférieur à 10%

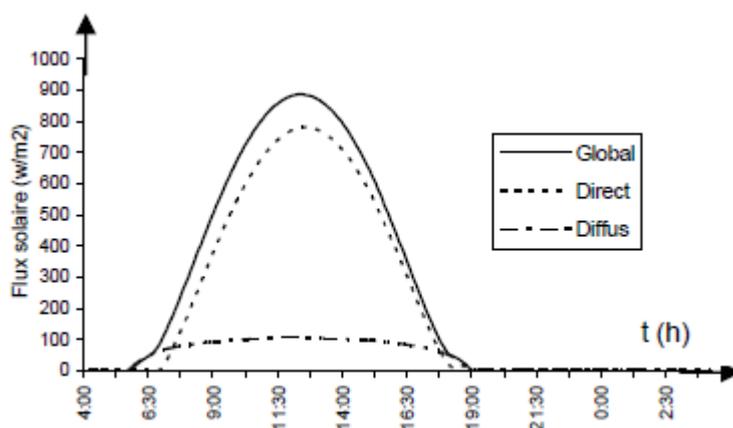


Figure 4.12. Variation du rayonnement théorique

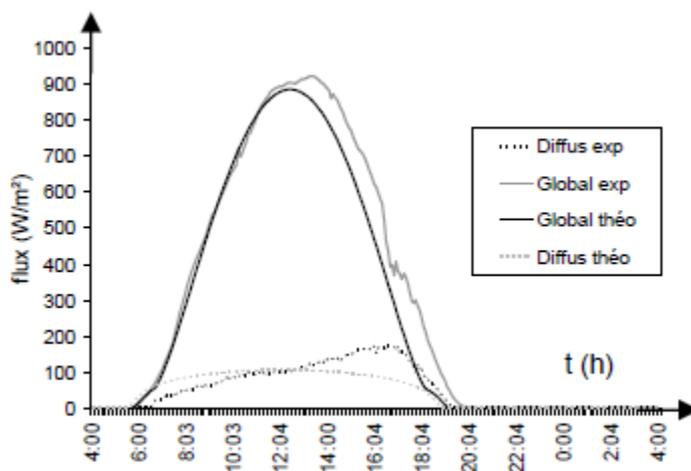


Figure 4.13. Evolution théorique et expérimentale du rayonnement solaire (flux global et diffus)

2.3.2. Température des différents éléments des séchoirs

Les températures des différents éléments du modèle direct sont successivement représentées sur la figures IV.14 (résultats théoriques) et sur la figure IV.15 (relevés expérimentaux). L'allure des courbes est la même pour chaque élément et suit d'une manière systématique l'évolution de l'énergie solaire globale. En période nocturne le lit de galets permet de maintenir l'air intérieur à des températures de valeurs supérieures à celle du milieu extérieur. La comparaison entre les courbes théoriques et expérimentales témoigne d'un accord satisfaisant avec un écart maximum de 10%.

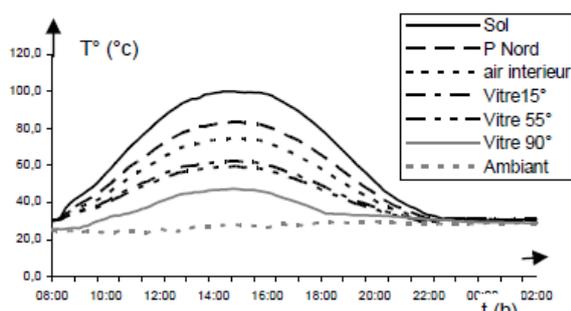


Figure 4.14. Variation des températures Théoriques (séchoir serre)

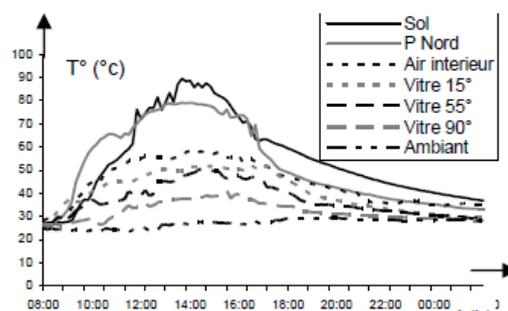


Figure 4.15. Relevé des températures expérimentales (séchoir serre)

2.3.3. Cinétique de séchage de produits agro-alimentaires

Cette partie du travail est consacrée au séchage de différents produits agroalimentaires dans les séchoirs de type direct. Le but essentiel de cette partie expérimentale est de déterminer les

courbes de perte d'humidité relative et de vitesse de séchage des produits suivants : Menthe verte, Verveine, Laurier, Raisin (dattier), Prune, Banane, Piment, Figue et datte. L'étude expérimentale s'est déroulée entre juillet et Septembre. Les mêmes appareils que ceux décrits précédemment sont utilisés, en plus d'une balance de précision (0.1 g) pour la pesée des produits à sécher. La vitesse de l'air à l'entrée de notre modèle, mesurée à l'aide d'un anémomètre, est restée pratiquement constante tout le long de l'expérience. Sa valeur variant entre 1.2 et 2 m/s. Les valeurs moyennes de température et de rayonnement à l'intérieur de notre modèle sont respectivement: $T_m = 45^\circ\text{C}$ et $HS\tau = 653 \text{ w/m}^2$. Après le traitement des produits à sécher (découpage, blanchiment ou sulfuration).

2.3.4. Présentation des résultats relatifs au séchage des produits

Sont représentées, sur les figures 4.16, 4.17, 4.18, les évolutions de perte de masse (ou de l'humidité relative) et sur les figures 4.19, 4.20, 4.21, les courbes de vitesse de séchage valables pour le modèle serre, d'échantillon de trois catégories de produits : la menthe (produit en feuille et à faible teneur en humidité), le raisin (produits gorgés d'eau) et la banane (produit à humidité profonde et à haute concentration de sucre). Pour la détermination des courbes de perte d'humidité, des pesées sont effectuées durant toute l'opération de séchage jusqu'à la stabilisation de la masse des produits (fin de l'opération de séchage). L'humidité initiale est déduite à la fin de l'opération de séchage, par la différence entre la masse initiale et finale du produit considéré. Il reste bien entendu que chaque produit gardera, après le séchage, un certain taux humidité évalué par étuvage.

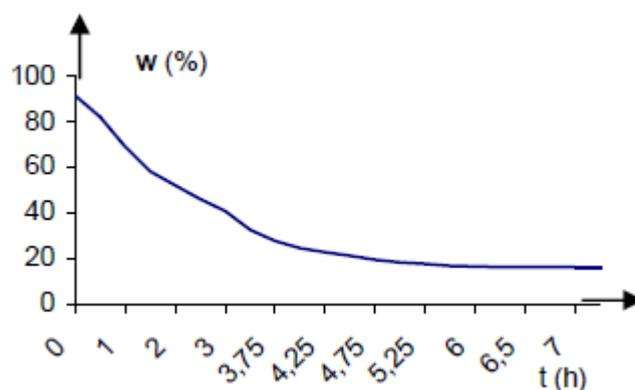


Figure 4.16. Variation de l'humidité relative de la menthe

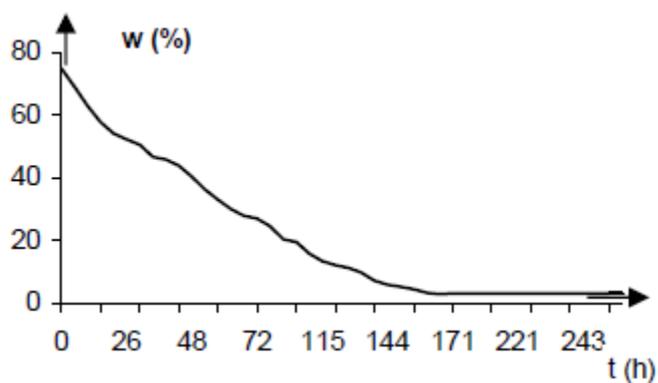


Figure 4.17. Variation de l'humidité relative du raisin

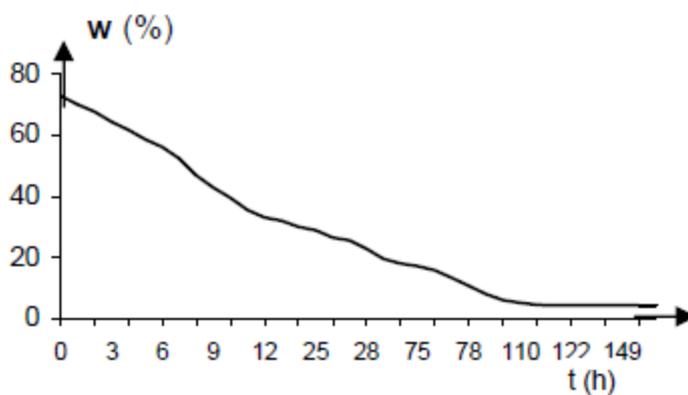


Figure 4.18. Variation de l'humidité relative de la banane

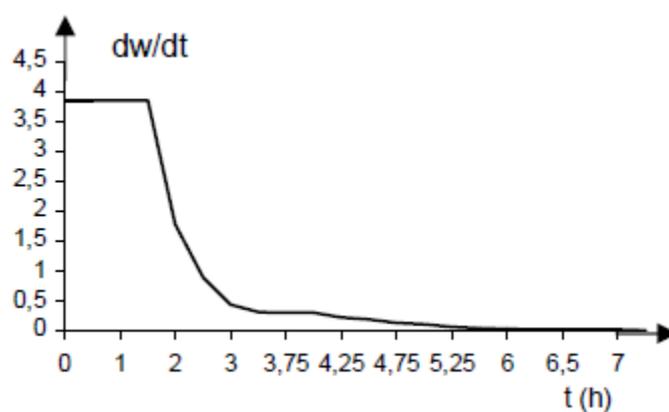


Figure 4.19. Vitesse de séchage de la menthe

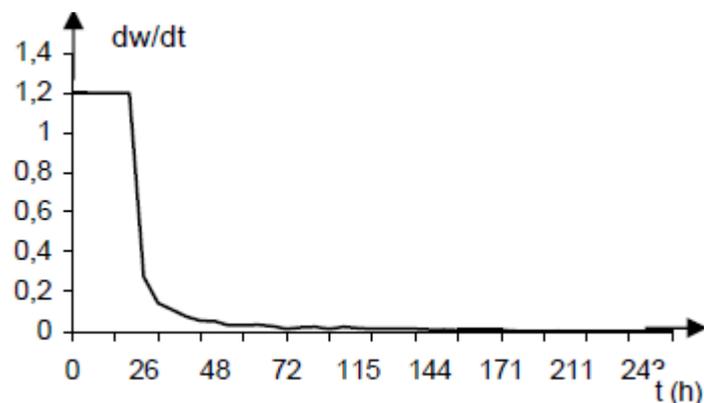


Figure 4.20. Vitesse de séchage du raisin

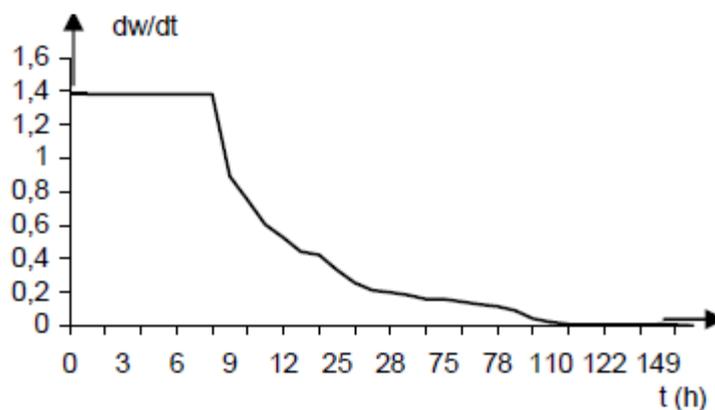


Figure 4.21 Vitesse de séchage de la banane

Tableau 4.1: Perte de masse et temps de séchage de produits agroalimentaires dans le modèle direct

Produit	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	% d'humidité extraite	Temp de séchage (heure)
Menthe	1000	83	83 %	8
Verveine	1000	430	67 %	48
Laurier	1000	427	64 %	28
Banane	1000	271	73 %	144
Raisin	1000	251	75 %	268
Prune	1000	277	72.3 %	175
Piment	1000	307	70 %	72
Pigues	1000	205	77.2 %	219
Datte	1000	816	15.4 %	214

L'étude théorique et expérimentale entreprise sur le séchage solaire de type direct, en convection naturelle et sans aucun apport d'énergie d'appoint, a consisté en premier lieu, en la mesure et au relevé des composantes du rayonnement solaire, des températures et de l'humidité à l'intérieur de notre modèle. En second lieu, en la détermination des courbes de perte d'humidité de chaque produit séché par des pesées successives pendant toute l'opération de séchage jusqu'à la stabilisation de la masse des produits. D'une manière générale, les produits sèchent 2 à 5 fois plus vite dans un séchoir solaire qu'à l'air libre.

Ce qui paraît satisfaisant compte tenu de la difficulté de déterminer avec précision certains paramètres astronomiques ou atmosphériques et les coefficients d'échange basés, dans la plupart des cas, sur des relations empiriques.

2.4. Messaoud Sandali, AbdelghaniBoubekri, Djamel Mennouche, Abderrahmane Benhamza, 2018, Etude du comportement thermique d'un séchoir solaire direct influencé par l'intégration d'un milieu poreux non consolidé

La géométrie du problème étudié est montrée dans la figure 4.22. C'est un séchoir solaire direct à échelle de laboratoire avec intégration d'un milieu poreux. Dans cette étude, l'air entre avec une faible température (température ambiante), qui ensuite augmente par contact avec l'absorbeur qui est plus chaud par l'influence des rayons solaires. En passant à travers le milieu poreux, l'air prend la chaleur stockée dans le matériau de stockage qui est le gravier dans notre cas d'étude. Les dimensions géométriques du problème étudié ont été choisies considérant le cas réel du séchoir solaire direct existant au niveau du laboratoire LENREZA (Université de Ouargla, Algérie).

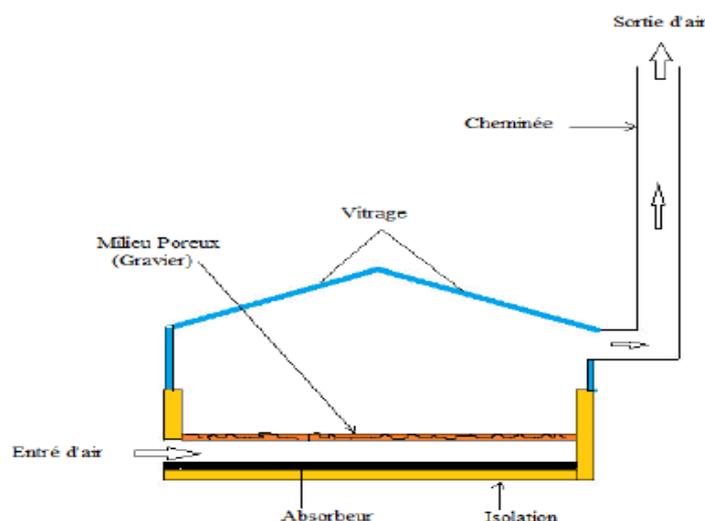


Figure 4.22. Schéma du séchoir solaire direct avec intégration du milieu poreux

Dans une première étape et en vue d'examiner l'état initial, nous avons étudié le cas du séchoir sans intégration d'un milieu poreux. En second lieu, une étude comparative entre les deux cas : sans et avec intégration d'un milieu poreux est présentée pour montrer l'influence du milieu poreux sur la performance du séchoir solaire. Les contours de la température dans les deux cas sont présentés et discutés

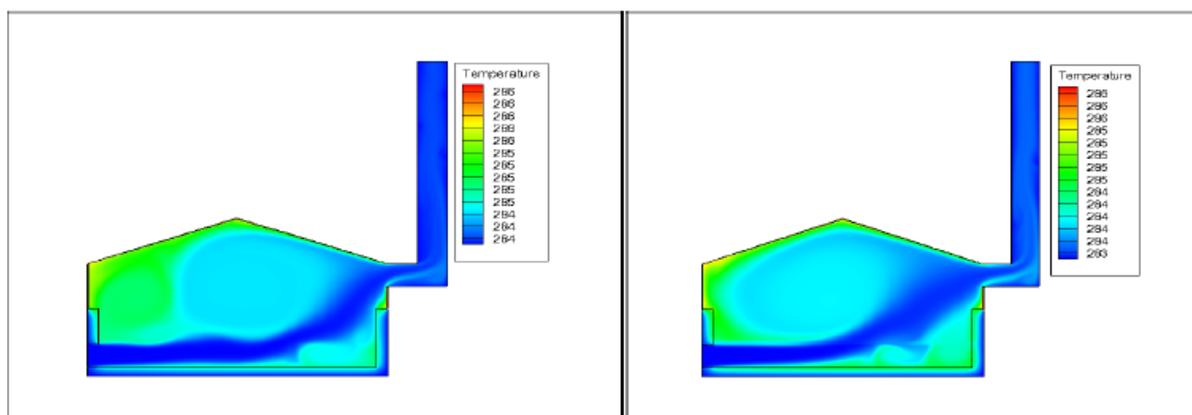


Figure 4.23. Evolution de la température du séchoir solaire : (a) sans (b) avec intégration du milieu poreux pour 6h du matin

La figure 4.23 montre l'évolution de la température de l'air à l'intérieur du séchoir solaire dans les deux cas ; sans et avec intégration du milieu poreux. Au lever du soleil, l'absorbeur commence à absorber la chaleur pour la fournir ensuite pour chauffer l'air de séchage. L'effet du milieu poreux est encore négligeable à cause de sa faible température dans les premières heures de la journée.

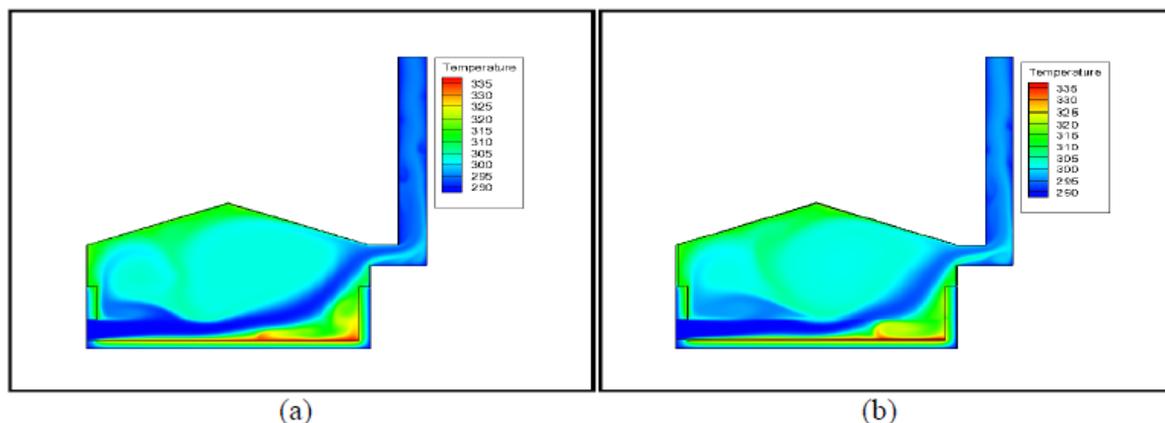


Figure 4.24. Evolution de la température du séchoir solaire : (a) sans (b) avec intégration du milieu poreux pour 16h00 du soir

Lorsque le temps avance dans la journée, la température de l'absorbeur augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire (figure 4.24); ce qui génère un bon échauffement de l'air circulant à l'intérieur du séchoir solaire. Les températures de l'absorbeur et de l'air de séchage à 16h00 du soir atteignent les valeurs de 335K et 305K respectivement. La température du milieu poreux augmente aussi et commence à stocker la chaleur pour la déstocker après le coucher de soleil.

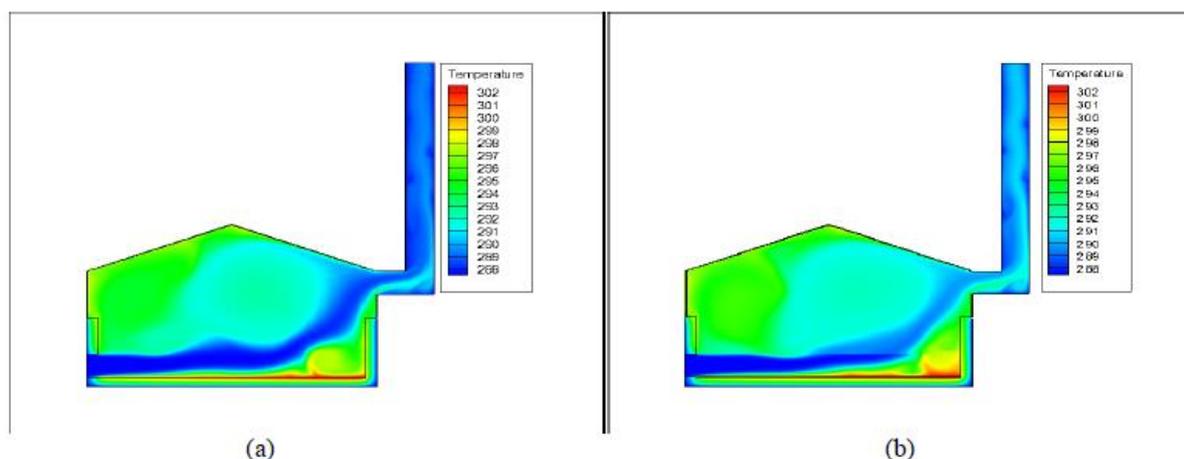


Figure 4.25. Evolution de la température du séchoir solaire : (a) sans (b) avec intégration du milieu poreux pour 19h00

Après le coucher de soleil (19h00), la température de l'absorbeur devient plus faible ce qui réduit son influence sur l'échauffement de l'air comme il est montré dans la figure 4.25. Durant le passage de l'air à travers le milieu poreux, ce dernier relâche sa chaleur sensible ce qui permet de garder la température de l'air circulant importante pour continuer l'opération de séchage même après le coucher de soleil. L'effet du milieu poreux est remarquable après le coucher de

soleil, il permet d'augmenter la température de l'air par 2°C pour une heure après le coucher de soleil.

Le présent travail concerne la contribution à l'étude d'évaluation des performances thermiques d'un séchoir solaire direct. Des calculs de simulations ont été pratiqués moyennant la méthode des volumes finis par un modèle instationnaire bidimensionnel mis en application sur le logiciel CFD Fluent. Cette étude a prouvé la faisabilité de stockage de chaleur en sensible en lit de roches pour les applications de séchage solaire. En effet le milieu poreux favorise le transfert thermique par augmentation de la surface d'échange entre le matériau de stockage et l'air de séchage. Le milieu poreux se comporte comme une source de chaleur après le coucher de soleil. Avec l'intégration du milieu poreux, la température de l'air asséchant augmente par 2°C après le coucher de soleil. Néanmoins l'ordre de grandeur des températures atteintes et la durée de chauffage nocturne restent à explorer par une extension à échelle industrielle.

2.5. Ridha fethiMechlouch, Houcine Ben Daoud, Mohamed Bagane, Rhomdan Ben Salma, Ammar Ben Brahim, 2010, Etude comparative de deux installations de séchage solaire : séchoir direct et séchoir indirect

2.5.1. Conditions météorologiques de l'expérience

Afin d'avoir une idée sur les conditions météorologiques de l'expérience dans la région de Gabès, on a donné respectivement sur les figures 4.26, 4.27 et 4.28 la fraction d'insolation pour une année, le flux solaire global pour un jour type à ciel clair ainsi que le flux solaire global moyen mensuel.

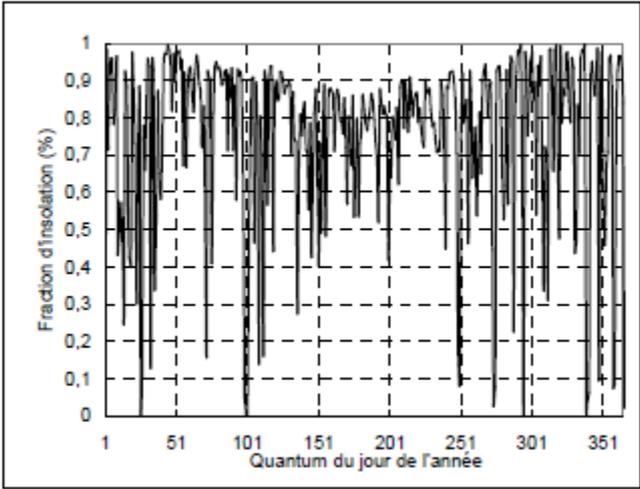


Figure 4.26. Fraction d'onsolation pour une année

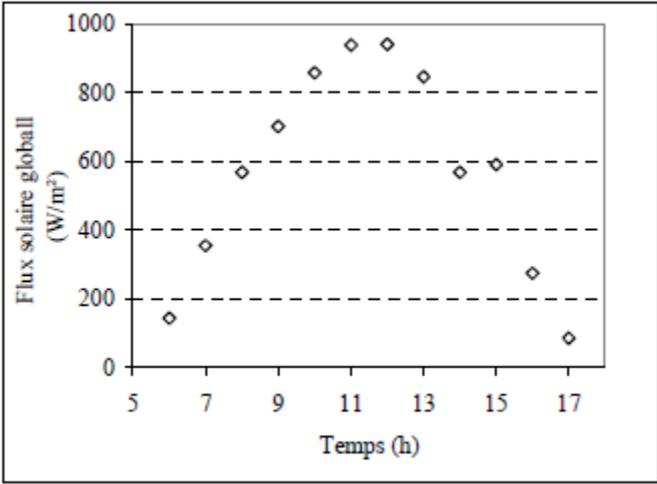


Figure 4.27. Flux solaire global pour un jour type à ciel

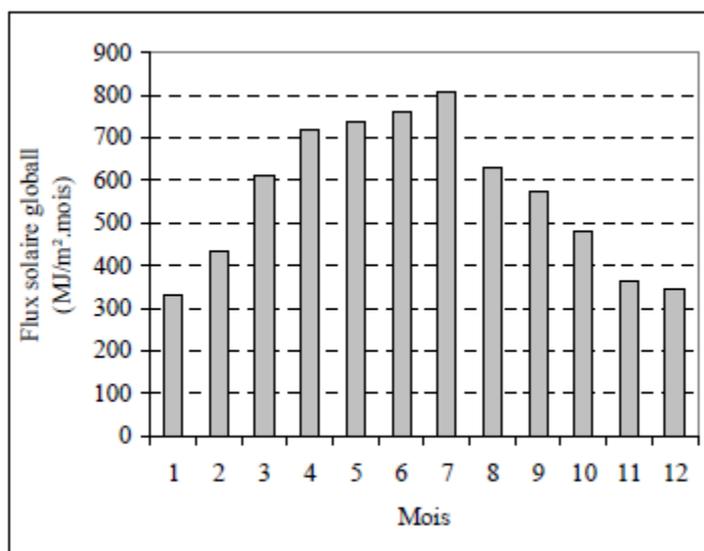


Figure 4.28. Densité de flux solaire global moyen mensuel

2.5.2. Description du séchoir solaire direct

Ce séchoir est formé par un coffre isolé latéralement par de la laine de verre. La surface latérale intérieure est couverte par des miroirs et le haut est fermé par une vitre. Dans la face arrière on a une ouverture par laquelle nous faisons entrer le produit à sécher sur des plateaux en grilles métalliques. La ventilation naturelle est assurée par circulation d'air. Ce dernier pénètre et sort par des trous placés respectivement à la base et à la partie haute de la face arrière du séchoir.

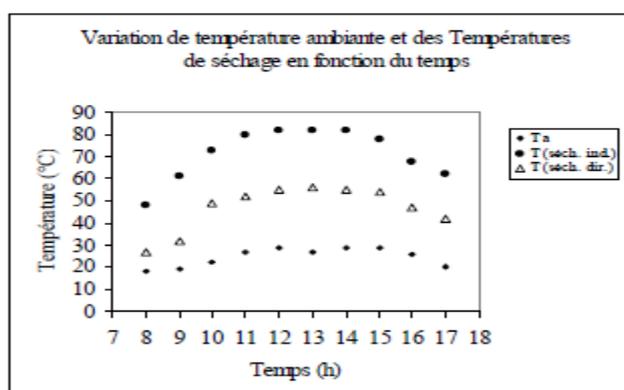


Figure 4.29. Variation de la température interne du séchoir solaire direct, de la température interne de séchoir solaire indirect et température ambiante en fonction du temps pour un jour type

En ce qui concerne la protection des produits à sécher des mauvais effets des insectes, du vent et de la pluie les deux séchoirs (direct et indirect) présentent les mêmes avantages.

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/m². Jour.

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.

La figure 4.29 montre que l'air de séchage a une température maximale de 55°C.

Dans ce cas on a déterminé les rendements d'un séchoir solaire direct. Pour le séchoir solaire direct la production est de 2 kg/m². Jour avec une humidité finale de 35%.

3. Etude d'un séchoir solaire indirect à travers des publications

3.1. D. Mennouche, B. Bouchekima, S. Boughali, H. Bouguettaia, et D. Bechki, (2014), Séchage solaire de la tomate dans un séchoir indirect à convection naturelle

Réglage de la température de l'analyseur d'humidité à 70°. Introduction d'une masse initiale de la tomate dans la chambre de l'analyseur. Démarrage de l'analyseur d'humidité en choisissant le programme convenable de chauffage. Arrêt automatique de l'appareil après que la masse de l'échantillon ait resté constante pour leur expérience, le temps de cette opération est de 8h30 minutes.

La durée de séchage pour avoir une teneur en eau finale $X_f = 0,13$ est de trois jours (17 heures).

- Le premier jour (7h), une diminution de 7 kg eau/kg.ms qui correspond à 45. / de l'humidité initial, ce qui explique l'évaporation d'une quantité d'eau important.
- Le deuxième jour pour (7h) la diminution de X est moins importante, elle varie de 4.9 kg eau/kg ms.
- La troisième jours (3h), la courbe de la teneur en eau est assez uniforme et tend vers la teneur finale de séchage

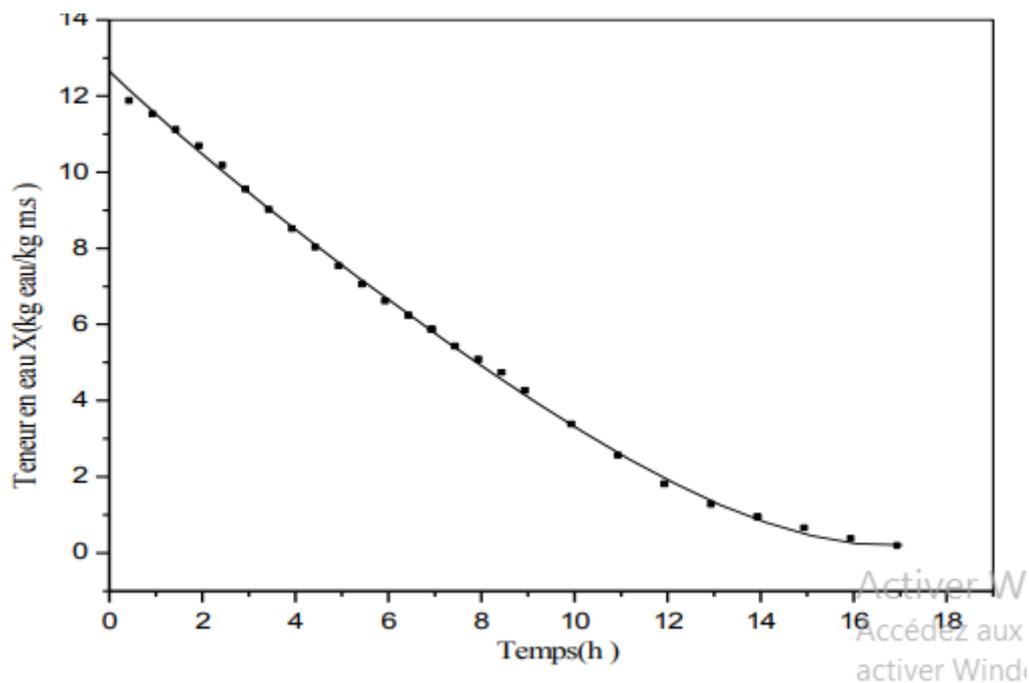


Figure 4.30. La variation de la teneur en eau en fonction du temps pour le séchage de la tomate

Selon cette figure : la durée de séchage pour avoir une teneur en eau final $X_f = 0,13$ et de trois jours

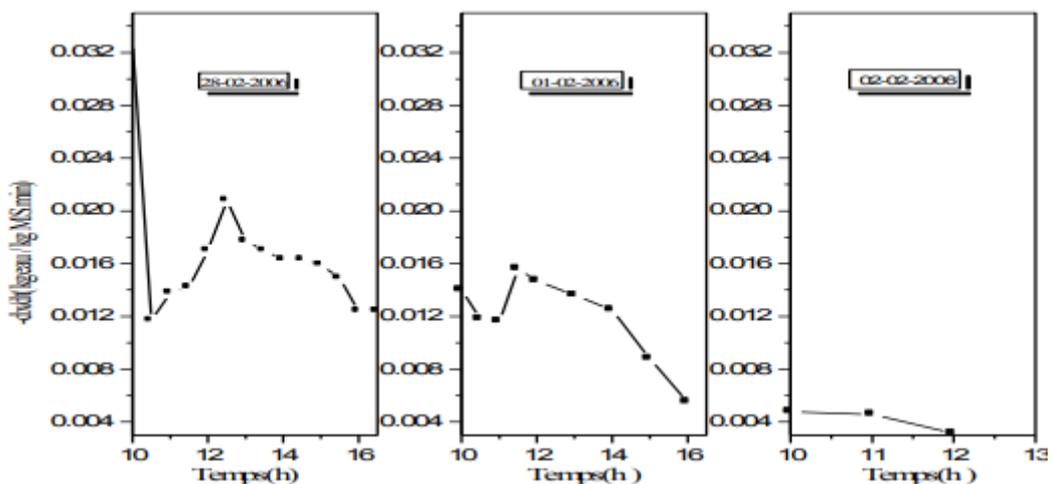


Figure 4.31. La vitesse de séchage de la tomate pour les trois jours de séchage

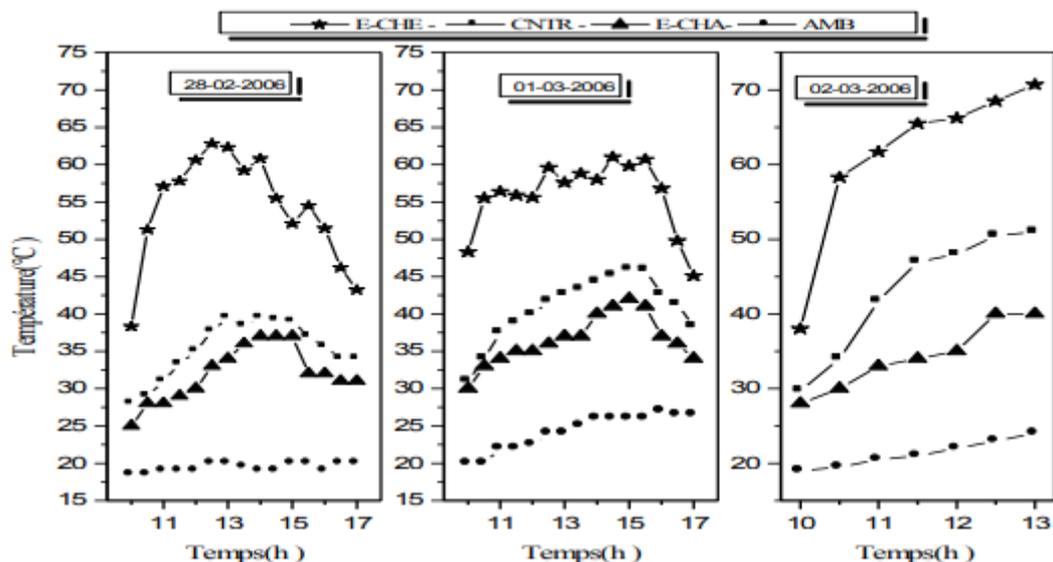


Figure IV.32. Variation de la température en fonction du temps

A partir de la figure 4.31 : on remarque l'absence de la période de mise en température, et la période à allure constante.

- Le premier jour une augmentation de la vitesse de séchage de 0.008 kg eau / kg.ms.min entre 10h 30 min et 12h 30 min, ceci est expliqué par une perturbation dans la phase de ralentissement dû à une augmentation rapide de la température à l'entrée de la chambre de séchage, de 51°C à 63°C. (Figure 4.32).
- Le deuxième jour on remarque aussi une autre perturbation moins importante pendant une demie heure (de 11h à 11h 30 min).

Les séchoirs solaires indirects à convection naturelle sont bien adaptés à ce type de séchage notamment dans les régions arides et semi-arides qui disposent d'un gisement solaire important.

- La durée du séchage de la tomate, pour avoir une teneur finale de 13%, est de 17h (trois jours).
- L'étude cinétique du séchage solaire de la tomate montre la présence unique de la phase de ralentissement et l'absence de la phase de mise en température du produit et la phase à allure constante.

3.2. Roland Lankouande, Frédéric Ouattara, Kalifa Palm, (2020), Modélisation et Expérimentation du Séchage Solaire Indirect en Couches Minces de Tranches de Tomates de la Variété Mongal

Les tomates utilisées dans cette étude proviennent du marché de fruits d'Ouagadougou. Pour préparer les échantillons, des fruits de bonne qualité (ni trop mûrs, ni trop ni crus) ont été choisis, lavés et rincés à l'eau potable. Les tomates ont ensuite été découpées en tranche d'épaisseur d'environ 1 cm. Les tranches obtenues sont alors uniformément disposées sur trois (3) claies à l'intérieur de la chambre de séchage (figure et sur une (1) claie à l'air libre comme témoin. Le séchage réalisé quotidiennement de 07:30 à 17:30. A la fin de la première journée, les claies sont retirées et placées à l'air libre comme la claie témoin. Au deuxième jour, avant de placer les produits dans le séchoir, nous les pesons

La modélisation du séchage en couche mince de la tomate est faite sous huit (8) hypothèses simplificatrices :

- Les échanges radiatifs à l'intérieur du séchoir sont négligés.
- L'écoulement de l'air est supposé unidirectionnel et uniforme.
- La température et la teneur en eau sont supposées uniformes à l'intérieur du produit ;
- La conduction claie produit est négligée.
- Les propriétés physiques du produit sont constantes.
- Le produit est coupé en couches minces.
- Les variations temporelles de la température de l'air sont négligeables devant celles du produit.
- Les échanges se font avec l'air pris dans les conditions de sortie de la tranche précédent

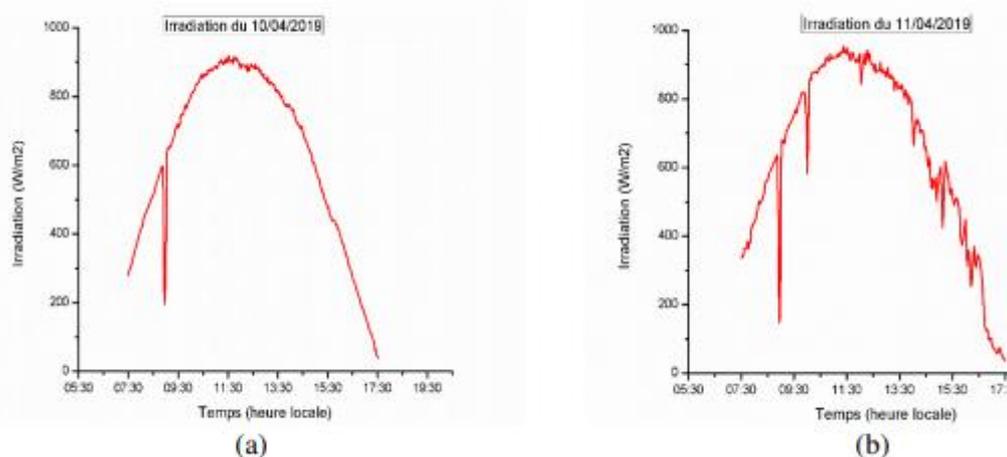


Figure 4.33. Rayonnements solaires globaux sur un plan horizontal Panneau a: mesures 10/04/19 et panneau b: mesures du 11/04/19

A partir de la figure 4.33 : De 07:30 à 11:30, on observe une augmentation de l'irradiation alors que de 11:30 à 17:30, on observe une baisse de cette irradiation. On note quelques fluctuations et baisses de puissance au niveau des graphes dues aux différents passages nuageux. La valeur maximale atteinte par le rayonnement est de 918 W/m² pour le premier jour et de 953 W/m² pour le deuxième jour. Cette valeur maximale est atteinte en milieu de journée.

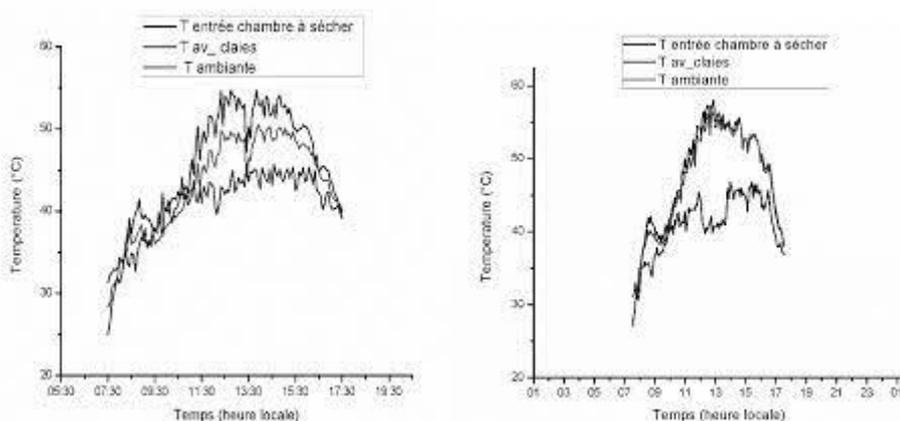


Figure 4.34. Evolution des températures relevées dans la chambre de séchage Panneau a: mesures du 10 avril 2019 et panneau b: mesures du 11 avril 2019.

A partir de la figure 4.34 : La courbe en noir représente l'évolution de la température d'entrée de la chambre à sécher, la courbe en rouge l'évolution de la température en avant des claies et celle en bleue caractérise la variation temporelle de la température ambiante. Pour le premier jour a 07:30 à 12:30, on observe une augmentation des températures (ambiante et dans la chambre de séchage) alors que de 12:30 à 17:30, on observe une baisse de ces températures. Des fluctuations, dues à quelques passages nuageux sont également observés. Les mêmes observations dans le deuxième jour. On observe également un écart entre la température ambiante (entrée capteur), la température à l'entrée de la chambre à sécher et la température au niveau des claies. Cet écart est dû au réchauffement de l'absorbeur dans le capteur solaire. En effet, sous l'effet du rayonnement solaire, la température de l'air ambiant augmente à la sortie du capteur.

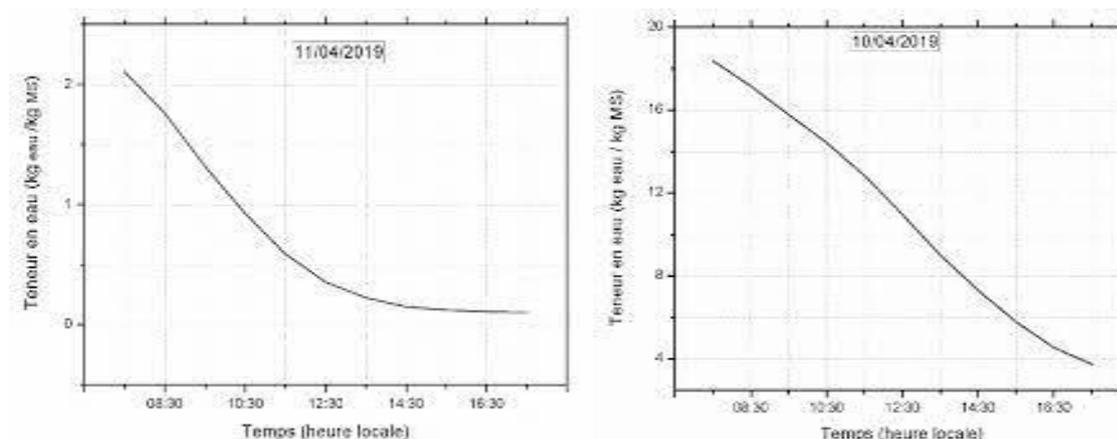


Figure 4.35. Mesure du 10 avril 2019 et panneau b: mesures du 11 avril 2019

A partir de la figure 4.35: On remarque que la teneur en eau finale qui est de 0,10 kg eau / kg de matière sèche est atteinte au bout de 02 jours (panneau b).

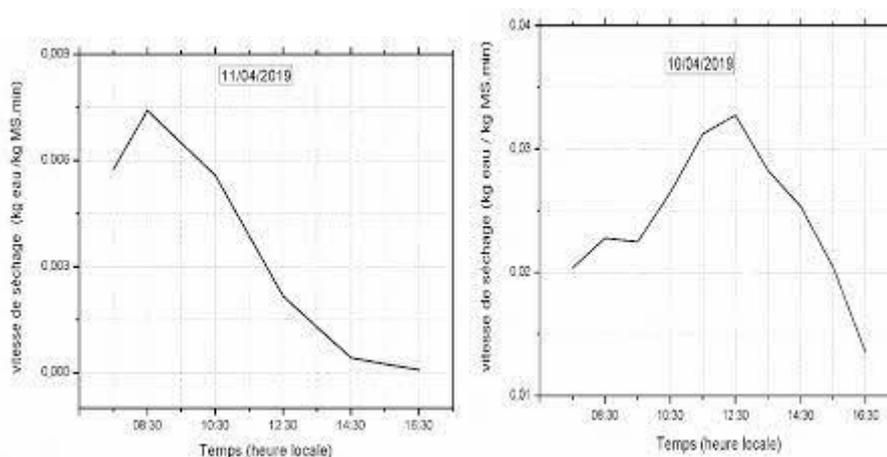


Figure 4.36. Evolution de la vitesse de séchage expérimentale Panneau a: mesures du 10 avril 2019 et panneau b: mesures du 11 avril 2019

A partir de la figure 4.36 : Pour le premier jour (panneau a), une augmentation de la vitesse du séchage entre 09 :30 et 12 :30 et pour le deuxième jour, on remarque une perturbation mineure entre 07:30 et 08:30 due à l'absence de graphe au cours de cette période.

Le temps de séchage des tranches de tomates (1 cm d'épaisseur) pour avoir une teneur en eau finale de 0,1 kg eau / kg de matière sèche est de 19 heures. Cette teneur en eau finale est la valeur optimale pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles (couleur, goût, odeur, etc.).

L'étude cinétique du séchage solaire de la tomate montre la présence unique de la phase de ralentissement et l'absence de la phase de mise en température du produit et la phase à allure constante.

Les résultats de la simulation et ceux de l'expérience sont similaires à 10% près.

Au regard des résultats obtenus, pour rendre disponible la tomate en toute saison sans détérioration de sa couleur, de son goût et de son odeur, etc., nous préconisons sa conservation au moyen du procédé de séchage indirect.

3.3. A. Bayouh et J. Sghaier, (2014), Séchage solaire des feuilles de menthe verte, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 17 N°3 (2014) 427 – 433

Le séchoir solaire utilisé au cours des expériences est un séchoir indirect à convection forcée. Il est constitué de : Un capteur solaire plan à air, simple passe, simple vitrage, Une chambre de séchage sous forme d'une armoire en tôle calorifugée avec laine de verre, un ventilateur centrifuge monté à l'amont du capteur solaire, des instruments de mesure.

Ils ont effectué deux expériences, l'expérience 1 est réalisée sans recyclage d'air et la deuxième est effectuée avec un système de recyclage d'air asséchant.

Pour chaque expérience, ils ont étalé uniformément sur une claie de la chambre de séchage une quantité de 100 g de feuilles de menthe. Ils ont pesé le produit tous les 15 min jusqu'à la fin de séchage et pour chaque pesée, ils ont déterminé à l'aide des instruments de mesure utilisés les différents autres paramètres : température, humidité relative, ensoleillement.

➤ Résultats de l'expérience 1 :

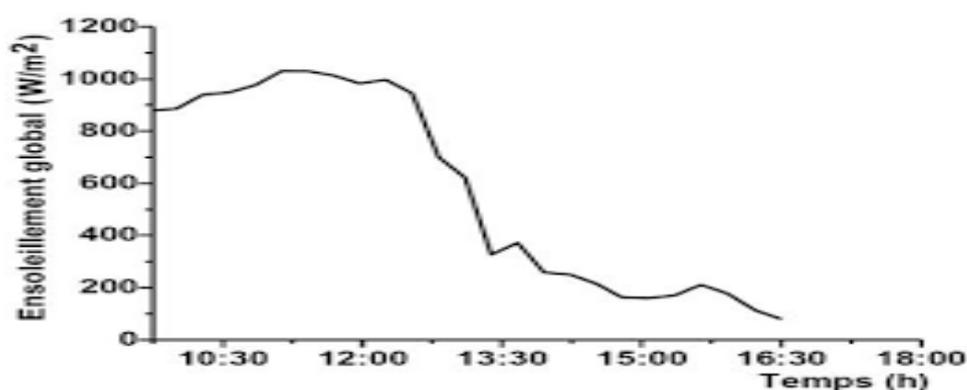


Figure 4.37. Variation de l'ensoleillement en fonction du temps pour la journée du 18/09/2013

Elle atteint un maximum de 1030 W/m^2 à midi. La variation de l'ensoleillement au cours du séchage implique une variation au niveau de la température de l'air ambiant à l'entrée du capteur solaire et par la suite celle de l'air asséchant à la sortie du capteur.

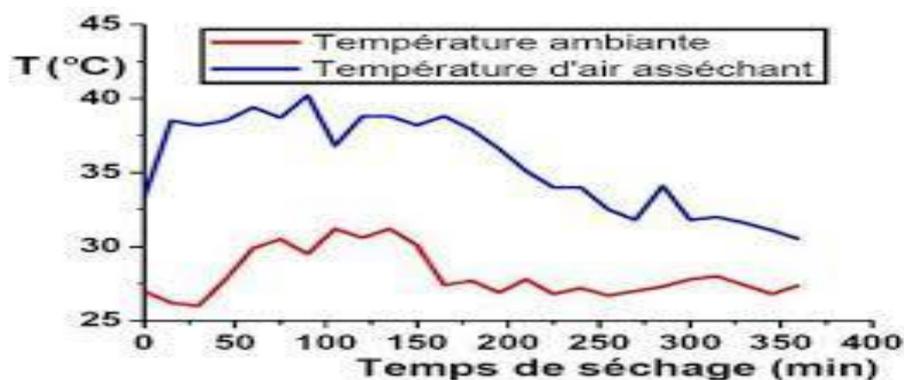


Figure 4.38. Evolution de la température ambiante et de la température de l'air asséchant en fonction du temps pour la journée du 18/09/2013

On observe que l'écart entre la température ambiante et la température de l'air asséchant a atteint les $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

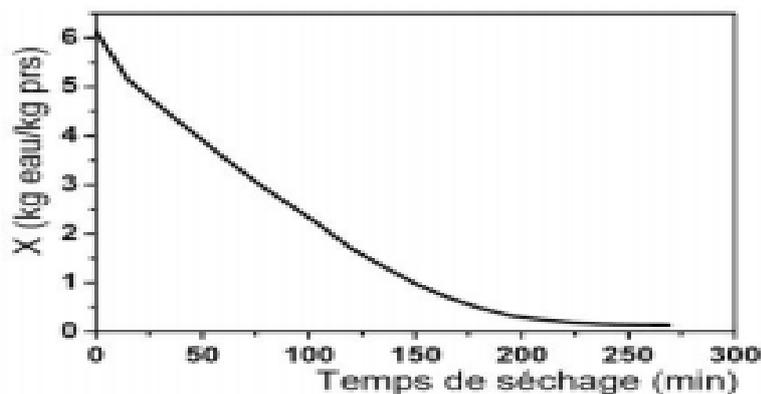


Figure 4.39. Evolution de la teneur en eau au cours du temps pour la journée du 18/09/2013

Les figures 4.38 et 4.39 présentent respectivement la cinétique de séchage et la variation de la teneur en eau en fonction du temps pour l'expérience 1. L'allure de deux courbes est décroissante. Elles montrent l'absence de la phase de mise en température et la phase de séchage à vitesse constante, il n'y a que la phase à vitesse décroissante [2, 5]. La durée de séchage est de six

heures pour une température d'air asséchant qui varie entre 30 °C et 40 °C pendant la période de séchage.

Un facteur essentiel dans le procédé de séchage est l'humidité de l'air, la figure 4.40 présente la variation de l'humidité relative de l'air asséchant dans la chambre de séchage avant et après qu'il traverse la claie où s'étaler les feuilles de menthe

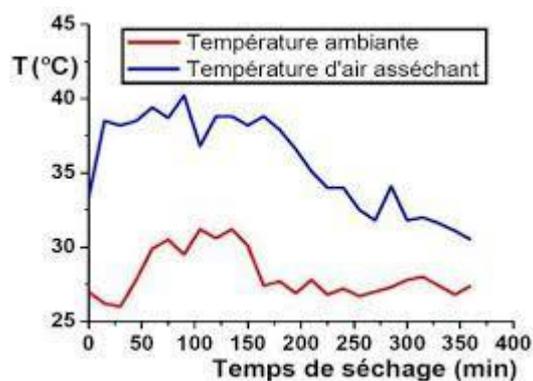


Figure 4.40. Variation de l'humidité relative de l'air asséchant au cours du temps pour la journée du 18/09/2013

➤ Résultats de l'expérience 2

L'écart entre la température ambiante et la température à la sortie du capteur solaire est plus important dans l'expérience 2 que celle qui est dans l'expérience 1, (Fig.4.41), il atteint 20 °C

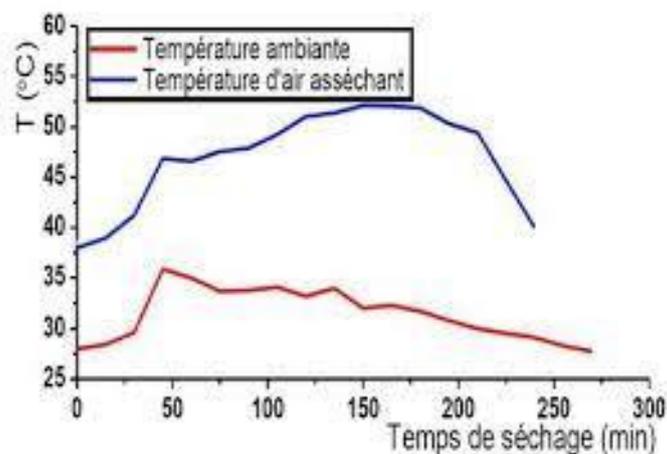


Figure 4.41. Evolution de la température ambiante et de la température de l'air asséchant en fonction du temps pour la journée du 20/09/2013

Elles admettent la même allure que la première expérience, mais avec un gain du temps de deux heures, la durée de séchage pour la deuxième expérience est de l'ordre de quatre heures avec une température d'air asséchant qui varie entre 38 °C et 52 °C.

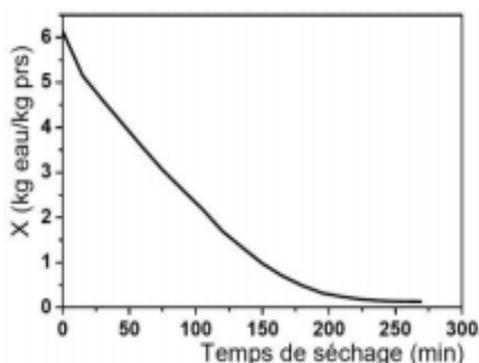


Figure 4.42. Evolution de la teneur en eau au cours du temps

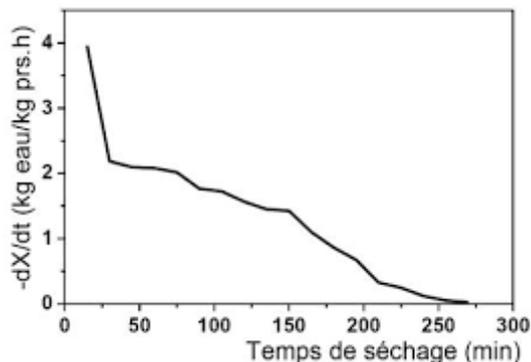


Figure 4.43. Variation de la vitesse de séchage

A partir de la figure 4.44: L'air à la sortie de la chambre de séchage est plus humide que celui qui est à l'entrée.

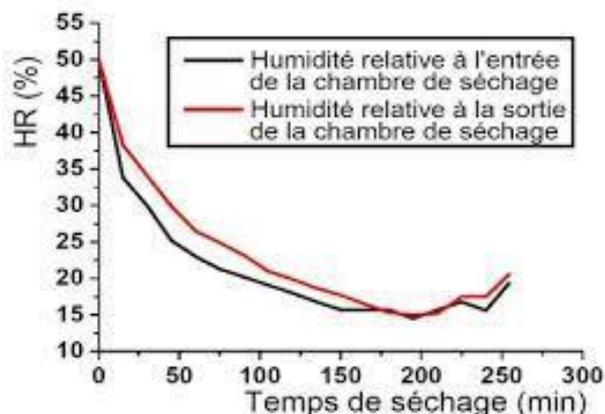


Figure 4.44. Variation de l'humidité relative de l'air asséchant au cours du temps pour la journée du 20/09/2013

Ces expériences ont permis de déterminer l'évolution de la cinétique de séchage et de la vitesse au cours du temps et d'établir la variation de la température et de l'humidité relative de l'air. Le recyclage de l'air asséchant permet un gain du temps important.

3.4. Djamel Mennouche, Bachir Bouchekima, AbdelghaniBoubekri Slimane Boughali Karima Karroumi, Samira Chouicha, (2013), Valorisation de la pâte de tomate par le procédé de séchage solaire indirect a convection naturelle

Dans cette étude ils ont utilisé un séchoir solaire hybride indirect à convection forcée.

La préparation du produit s'effectue selon les étapes suivantes :

- Le lavage de la tomate : Pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides et autres contaminations.
- L'épluchage et l'enlèvement des graines : Pour assurer une couche de pâte homogène, et faciliter l'opération de séchage.
- Le broyage : Le broyage des tomates s'effectue dans un broyeur spécifique pour les légumes.
- L'égouttage : L'égouttage de la tomate broyée est effectué dans un sac perméable durant quelques heures.
- Mise en place du produit : Une masse de la pâte de tomate égouttée est étalée sur une claie en couche d'épaisseur 1cm et coupée en tranches de forme triangulaire. Ces tranches sont placées sur une claie galvanisée de dimension 38 cm x 40 cm. Enfin, le produit est introduit dans la chambre de séchage.

La détermination de la masse sèche du produit est effectuée à l'aide d'un analyseur d'humidité (type MA 45), selon les étapes suivantes :

- Réglage de la température de l'analyseur d'humidité à 105°C.
- Introduction d'une masse initiale de la pâte de tomate (3g) dans la chambre de l'analyseur
- Démarrage de l'analyseur en choisissant le programme convenable de chauffage.
- Arrêt automatique de l'appareil dès que la masse de l'échantillon reste constant.

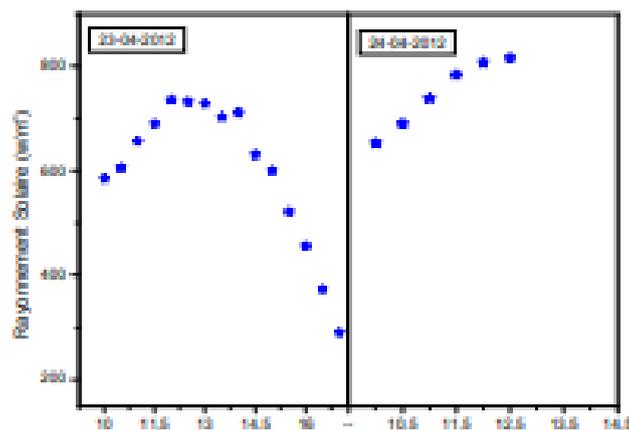


Figure 4.45. Variation du rayonnement global en fonction du temps

A partir de la figure 4.45: le rayonnement varie de 459 W/m² au début de l'opération de séchage à 9 heures jusqu'à 31 W/m² à 18 heures. Le rayonnement solaire atteint une valeur maximale de 840 W/m² vers midi et trente minutes.

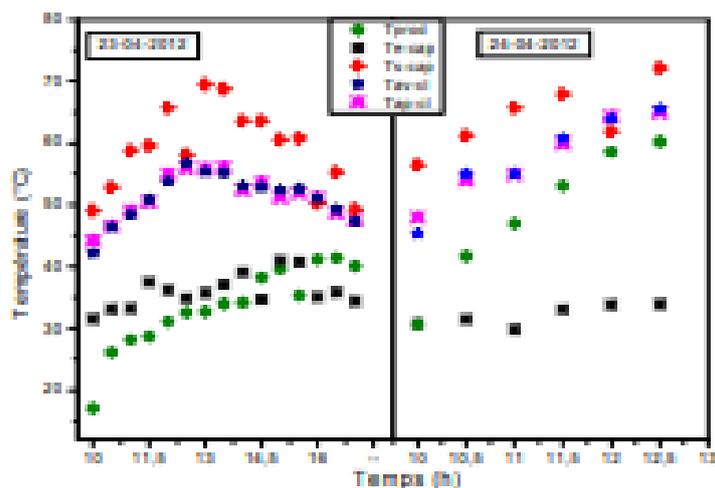


Figure 4.46. Variation de la température dans le séchoir solaire

On constate un écart important entre l'entrée et la sortie du capteur dû aux effets de l'absorbeur et des chicane sur l'air circulant dans le capteur solaire, On remarque que la variation de Tavant présente deux zones : la première zone est caractérisée par des faibles températures et la deuxième zone caractérisée par des températures constantes dont la température moyenne est égale à 41,65°C.

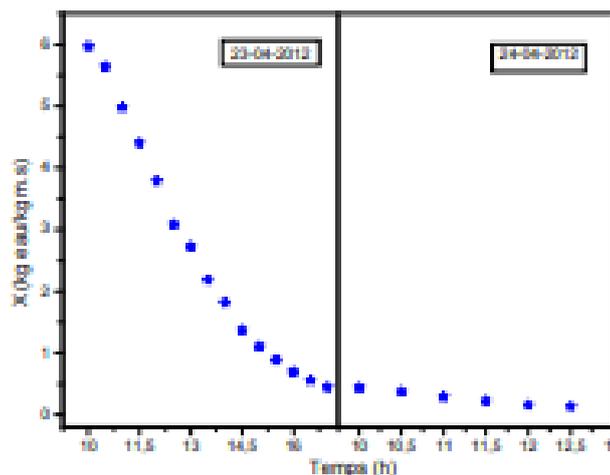


Figure 4.47. Variation de la teneur en eau en fonction du temps

À partir de la figure 4.47: 9h et jusqu'à 14h la teneur en eau présente une diminution importante allant de 3.41kg eau/kg de matière sèche, la diminution de la teneur en eau est moins importante et tend vers une valeur finale de 0,13 kg eau/kg de matière sèche.

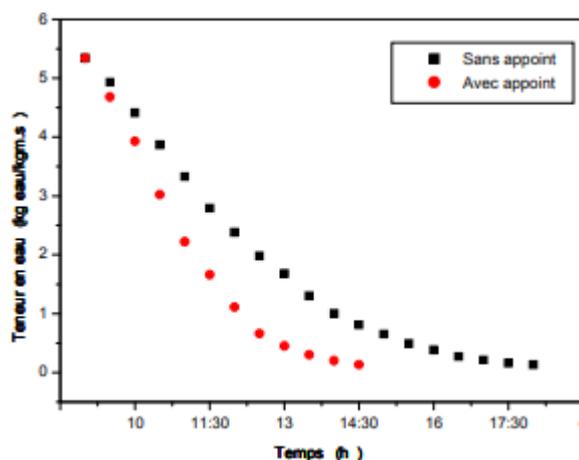


Figure 4.48. Effet de la température sur la durée de séchage

On remarque sur la figure 4.48 que l'augmentation de la température de séchage jusqu'à une température de 60°C en utilisant le système d'appoint provoque une diminution de 3h 30 min dans la durée de l'opération de séchage.

3.4.1. Evolution de la couleur du produit séché : le changement de couleur global est alors exprimé par la quantité E dite distance de couleur. ΔE est calculée en utilisant l'équation (1), L_0 , a_0 et b_0 se rapportent aux valeurs des couleurs mesurées pour un échantillon de la pâte de tomate avant l'opération de séchage.

Plus ΔE est petit plus le produit s'approche de la meilleure qualité

Le temps de séchage des couches de la pâte de tomate (épaisseur 1 cm) pour avoir une teneur en eau finale du produit (0,13 kg eau/kg de matière sèche) est de 9 h (une journée) pour le procédé de séchage solaire naturel. L'augmentation de la température de séchage jusqu'à une température de 60°C en utilisant un système d'appoint qui présente une résistance alimentée par un réseau électrique, provoque une diminution de 3h 30 min dans la durée de l'opération de séchage. L'étude de la qualité du produit par la mesure des variations de la distance de couleur montre que le séchage solaire naturel présente le meilleur procédé pour la valorisation de la tomate

3.5. IyesFrihi, Samira Chouicha, AbdelghaniBoubekri, Mohamed HafedBerebeuh, (2015), Etude expérimentale et théorique du séchage solaire des grains de fève

C'est un séchoir solaire indirect à convection forcée, il est composé de deux parties principales : un capteur solaire et une chambre de séchage.

L'air frais capté provenant de l'ambiance extérieure est préalablement chauffé dans le capteur solaire, le contact air absorbeur ainsi que le transfert convectif 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 résistance électrique alimentée par une résistance électrique qui fournit, en cas de besoin, un appoint en énergie permettant d'assurer une température de séchage plus élevée. L'aspirateur aspire l'air de séchage qui traverse la claie, et l'évacue vers l'extérieur.

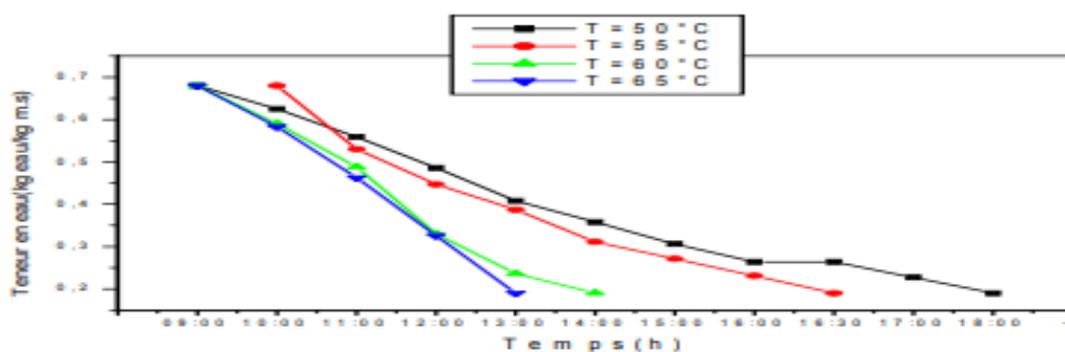


Figure 4.49. Teneur en eau en fonction du temps

A partir de la figure 4.49 :

- Plus de température est élevée plus le temps de séchage est réduit.
- Le temps de séchage pour atteindre une teneur finale $X_f = 0,19$ kg d'eau /kg ms est plus court quand la température de l'air est plus élevée.
- Et par conséquent, plus la température augmente plus la cinétique de séchage croît et plus le temps de traitement est réduit.

- L'augmentation de flux de chaleur apporté par l'air au produit et d'autre part de l'accélération de la migration interne de l'eau.

3.5.1. Modélisation de cinétique de séchage de la fève

Détermination du modèle le plus approprié : le choix d'un modèle approprié à la description de l'allure de séchage de la fève, dans notre présente étude, est basé sur la confrontation des courbes estimées par chacun des modèles à celles expérimentales avec analyse des résidus en appliquant aux différentes températures. On a procédé d'autre part à l'analyse statistique utilisant les critères suivants :

- Une erreur standard de l'évaluation (S) minimale.
- Un coefficient de corrélation (r) élevé. - Une fonction Chi-2 minimal

3.5.2. Paramètres de modèle et critères statistique

- La modélisation de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage de la fève est présentée numériquement (valeurs des paramètres, critères statistique).

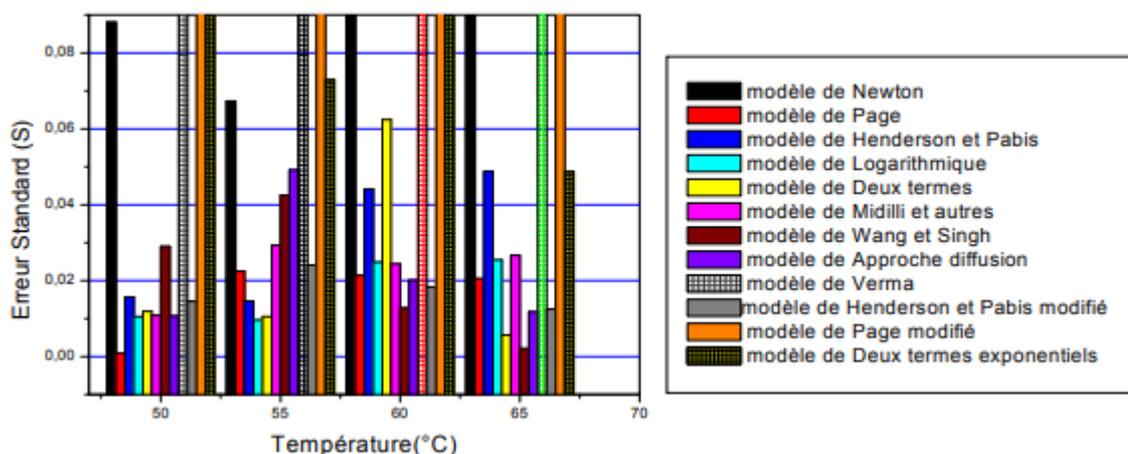


Figure 4.50. Evaluation des erreurs standard à chaque température pour les deuze modèles

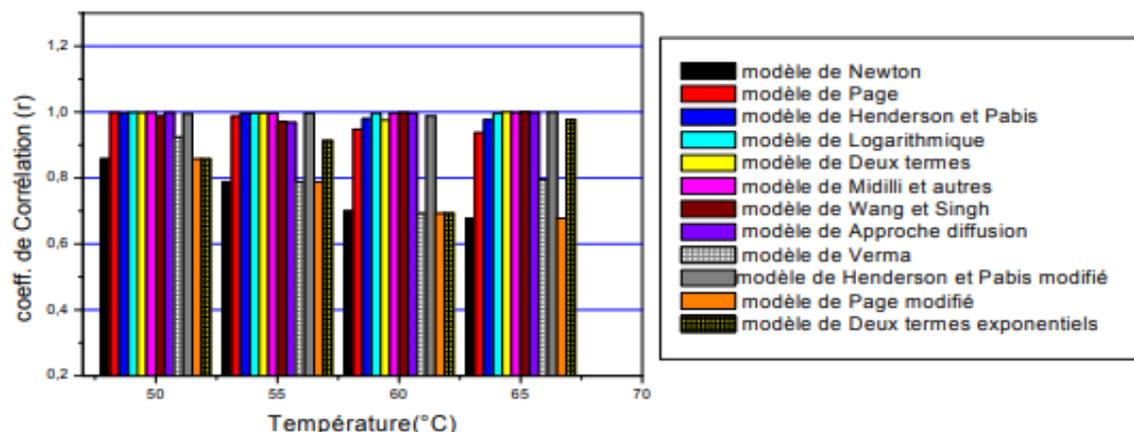


Figure 4.51. Evaluation des coefficients de corrélations à chaque température pour les douze Modèles

D'après les résultats de calcul on constate que pour le modèle de page, La valeur minimale de l'erreur standard $r = 0.000819$, le coefficient de corrélation S correspond à une grande valeur $S = 0.999848023$, avec une valeur minimale de Chi carrée = 0.01000819 donc le modèle empirique de page décrit le séchage solaire de grain de fève ces résultats sont d'accord avec le séchage des produits similaires aux grains de fève

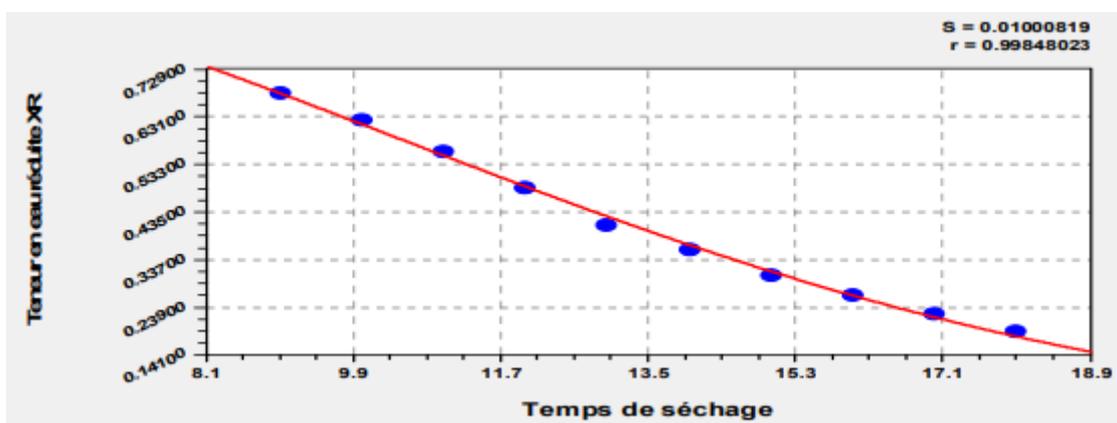


Figure 4.52. L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le modèle de page à $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

La figure 4.51 représentant l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps pour $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, L'évolution de la teneur en eau réduite avec le temps des points mesurés pour le modèle de page à $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$XR(t) = e^{(-kt^R)}$$

3.5.3. Expressions de l'équation générale et des paramètres du modèle :

Enfin pour récapituler, on donne ci-dessous les expressions finales adoptées pour l'équation générale selon le modèle à page avec les expressions des différents paramètres en fonction du temps et de la température de l'air de séchage

$$XR(L) = e^{(-Kt^R)}$$

$$N(t) = 2,916086 + 0,7750233 \cos(0,26769959T - 4,1144753)$$

$$K(t) = 0,091139738 + 0,0029392827T + 2,3696908e^{0.6T}$$

Sur le plan expérimental ils ont réalisé différents essais de séchage solaire en régime constant d'un système hybride fonctionnant par le couplage entre l'énergie solaire et un appoint énergétique supplémentaire assurant une température constante de ($T=50^{\circ}\text{C}$, $T=55^{\circ}\text{C}$, $T=60^{\circ}\text{C}$, et $T=65^{\circ}\text{C}$) avec une vitesse $V=1.5\text{m/s}$ pour des durées de séchage ($t_1=10\text{h}$, $t_2=6.5\text{h}$, $t_3=5.5\text{h}$, et $t_4=4\text{h}$). Ces essais ont permis d'obtenir des courbes de cinétique de séchage de fève, en discutant la consommation énergétique et les performances thermiques du séchoir solaire. Une deuxième étude théorique est réalisée pour la fève afin de décrire le comportement physique et le transfert thermo-massique du produit. Ces courbes expérimentales sont lissées par deux modèles empiriques, l'analyse des paramètres statistiques ont montré que le modèle de page décrit bien cette courbe. Les résultats obtenus montrent l'existence d'un excellent accord entre les teneurs en eau réduites expérimentales et celles prédites pour le modèle de page, dont les paramètres de modèle de page dépendent de la température de séchage.

4. Comparaison entre les deux méthodes de séchage.

Pour étudier les deux méthodes de séchoir solaire direct et indirect, nous devons comparer à travers ces publications récentes. Nous remarquons d'après les études faites par ces articles, que :

- Le séchage indirect abaisse le temps de séchage de la tomate par rapport au séchage direct au soleil.
- La cinétique de séchage solaire direct présente deux phases une première phase de séchage à allure décroissement rapide correspond à des taux d'évaporation d'humidité importants par contre la cinétique de séchage solaire indirect montre la présence unique de la phase ralentissement et l'absence de la phase mise en température du produit et la phase à allure constante
- Le séchage direct se fait plus vite que lors du séchage indirect

- Le séchoir solaire indirect est souvent plus compliqué et plus couteux à construire que le séchoir direct
- Les rendements des deux modes de séchage sont voisins et de l'ordre 30% : la production est de $3\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{jour}$ avec une humidité finale de 43% pour le séchoir solaire indirect alors que la production est de $2\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{jour}$ mais l'humidité finale de 35% pour le séchoir solaire direct
- Les produits à sécher au séchoir solaire indirect ne sont pas déposés directement au rayonnement solaire par rapport au séchoir solaire directe.

Grace à ces remarques, nous avons conclu que le séchoir solaire direct est le meilleur par rapport au séchoir solaire indirect.

Références

A. Bayouhd et J. Sghaier, (2014), Séchage solaire des feuilles de menthe verte, Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 427 – 433

Djamel Mennouche, Bachir Boucekima, AbdelghaniBoubekri Slimane Boughali Karima Karroumi , Samira Chouicha, (2013), Valorisation de la pâte de tomate par le procédé de séchage solaire indirect a convection naturelle

D. Mennouche, B. Boucekima, S. Boughali, H. Bouguettaia, et D. Bechki, (2014), Séchage solaire de la tomate dans un séchoir indirect à convection naturelle

D. Mennouche ,2010, Etude expérimentale du séchage solaire de la pâte de tomate dans un séchoir direct

IlyesFrihi, Samira Chouicha, AbdelghaniBoubekri, Mohamed HafedBerebeuh, (2015), Etude expérimentale et théorique du séchage solaire des grains de fève

Messaoud Sandali, AbdelghaniBoubekri, Djamel Mennouche, Abderrahmane Benhamza,2018, Etude du comportement thermique d'un séchoir solaire direct influencé par l'intégration d'un milieu poreux non consolidé

Ridha fethiMechlouch, Houcine Ben Daoud, Mohamed Bagane, Rhomdan Ben Salma, Ammar Ben Brahim, 2010, Etude comparative de deux installations de séchage solaire : séchoir direct et séchoir indirect.

Roland Lankouande, Frédéric Ouattara, Kalifa Palm, (2020), Modélisation et Expérimentation du Séchage Solaire Indirect en Couches Minces de Tranches de Tomates de la Variété Mongal

Ryad Benkhelfellah, Sofiane El mokhtar, Rachid Miri, MaioufBelhamel, 2005,Séchoirs solaires. Etude comparative de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires dans des modèles de type direct et indirect

S. EL Mokretar, A. Azzi, F. Saidj, M. Belhamel. Séchage solaire direct de produits agroalimentaire en convection naturelle

Conclusion générale

Dans ce présent travail, nous nous sommes intéressés au séchage solaire, et plus particulièrement à l'étude de la cinétique du séchage et de certains aspects des séchoirs solaires tels que la performance et l'amélioration. Pour la surface de captation, l'augmentation de ce facteur permet d'augmenter la puissance solaire captée. Ceci conduit à l'élévation de la température de l'air au sein du capteur permettant d'avoir un temps de séchage court. Ainsi, la température de l'air asséchant, son débit, la masse du produit, et le rayonnement solaire sont des facteurs importants pour faire augmenter le rendement du séchoir. L'augmentation de la température de l'air asséchant, qui est le paramètre le plus influent, conduit à l'augmentation de taux d'humidité au sein du séchoir et par conséquent, la réduction de la durée de séchage. Ainsi, l'augmentation du diamètre du produit ou de la masse conduit à l'augmentation du temps de séchage d'une part et à l'abaissement de la température de l'air d'autre part. Après comparaison entre le séchoir solaire direct et indirect, nous avons trouvé que le meilleur type est le séchoir solaire direct.

Résumé

L'objectif de notre travail consiste à bien comprendre le mécanisme physique de l'opération de séchage qui est entre autre qu'un transfert de chaleur et de matière. De même a étudié les paramètres de séchage solaire (température, vitesse et humidité) sur différents produits, avec les deux différents types de séchoir solaire direct et indirect pour la conservation de ces produits.

D'apprêt ce travail nous avons comparé entre le séchoir solaire direct et indirect à travers des publications et cela pour choisir le meilleur d'entre eux.

Mots clés : Séchage, séchoir solaire, Capteur solaire, Produit agricole, Température, Rayonnement solaire, Séchoir solaire direct, Séchoir solaire indirect.

التلخيص

الهدف من عملنا هو فهم الآلية الفيزيائية لعملية التجفيف والتي هي ، من بين أمور أخرى ، نقل الحرارة والمادة. كذلك درس معاملات التجفيف الشمسي (درجة الحرارة ، السرعة ، الرطوبة) على منتجات مختلفة ، مع نوعين مختلفين من المجفف الشمسي المباشر وغير المباشر لحفظ هذه المنتجات.

في سياق هذا العمل قمنا بمقارنة بين المجفف الشمسي المباشر وغير المباشر من خلال المنشورات وهذا لاختيار الأفضل.

الكلمات المفتاحية: تجفيف ، مجفف شمسي ، مجمع للطاقة الشمسية ، منتج زراعي ، درجة حرارة ، إشعاع شمسي ، مجفف شمسي مباشر ، مجفف شمسي غير مباشر

Abstract

dryer for the conservation of these products.

To begin with this work we have compared between the direct and indirect solar dryer through publications and this to choose the best of them.

Keywords: Drying, solar dryer, Solar collector, Agricultural product, Temperature, Solar radiation, Direct solar dryer, Indirect solar dryer
The objective of our work is to understand the physical mechanism of the drying operation which is, among other things, a transfer of heat and matter. Likewise studied the parameters of solar drying (temperature, speed and humidity) on different products, with the two different types of direct and indirect solar