



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences de la Technologie
Département Génie mécanique

MÉMOIRE DE

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Mécanique Energétique

Réf. :

Présenté et soutenu par :

Boutalbi Adel et Mokrani elmahdi

Le : lundi 27 juin 2022

Etude expérimentale du séchage des petits pois

Jury :

Pr. Moummi Nouredine	Grade	Université de Biskra	Président
Pr. Labed Adnane	Grade	Université de Biskra	Rapporteur
Dr. Maboub chawki	Grade	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2021 - 2022

REMERCIEMENTS

- ♥ Tout d'abord, nous remercions Dieu qui nous a donné la force et la patience de faire cet humble travail.
- ♥ Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à nos parents pour leur soutien continu et leur contribution pour compléter le parcours scolaire
- ♥ Nous adressons également nos sincères remerciements à notre encadreur Mr. Labeled Adnane pour ces conseils et son soutien, et nous remercions les membres du jury Pr Moummi Nouredine Et Dr. Mahboub Chaouki
- ♥ Merci également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, notamment la famille du Département de génie mécanique, qui a été pour nous comme une seconde famille.

DEDICACE

J'aimerais partager les meilleurs moments de ma vie avec les gens j'aime.

Au terme des années d'étude, je veux dédier ce travail à :

♥A ma chère mère et à mon cher père,

♥A mon frère et mes sœurs

♥A l'honorable famille

♥Pour la famille de Boutalbi

♥A tous mes chers amis

♥A tous mes collègues

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser cet humble travail.

Adel Boutalbi

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à mes parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler, tout au long de ma vie, aux sacrifices qu'ils ont faits pour m'aider pendant mes études. Je demande à Dieu de leur accorder bonheur et santé et

À mes chers frères et sœurs.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible.

Mokrani Elmahdi

Sommaire

Remerciements	
Dédicace 1	
Dédicace 2	
Sommaire	
Liste des figures Liste des tableaux Nomenclature	
Introduction générale	1
<i>Chapitre I : généralité sur le séchage.</i>	
I.1 Introduction	3
I.2-Définition du séchage	4
I.3-Théories descriptives du phénomène de séchage	4
I.3.1. La théorie diffusion	4
I.3.2 Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929).....	5
I.3.3.La théorie de Luikov (1934)	5
I.3.4 Théorie capillaire (1937).....	5
I.3.5. La théorie de Krischer –Berger et Pei (1938).....	5
I.3.6 Théorie de Philip et De Vries (1957)	6
I.4 Terminologie de séchage	6
I.4.1 Humidité	6
I.4.2 Humidité absolue	6
I.4.3 Humidité relative	6
I.4.4 Taux d’humidité.....	7
I.4.5 Taux d’humidité à l’équilibre	7
I.5 CARACTERISTIQUES DES SOLIDES.....	7
I.5.1 Humidité relative	7
I.5.2 Humidité absolue	7
I.6 États de siccité	8
I.7 Corps hygroscopique	8
I.8 Les caractéristiques de Température	8

I.8.1	Température sèche	8
I.8.2	Température humide du gaz	8
I.8.3	Température de rosée	8
I.9	Vitesse de séchage.....	8
I.10	Cinétique du séchage	9
I.10.1	Période de mise en température	9
I.10.2	Période à vitesse constant	9
I.10.3	Période de ralentissement	9
I.11	Les modes de séchages.....	10
I.11.1	Transfert de chaleur par conduction	10
I.11.2.	Le transfert thermique par convection	11
I.11.3	transfert thermique par rayonnement	11
I.12	Transfert de Chaleur et de matière	12
I.12.1	Transfert de chaleur et matière dans le produit agricole	12
I.12.2	Transfert de chaleur et matière dans l'air entourant le produit	12
I.12.3	Transfert de masse et les différentes étapes de séchage d'un produit humide.....	13
I.13	Les Formes D'eau dans Les aliments.....	14
I.13.1	Eau d'hydratation.....	14
I.13.2.	Eau de constitution.....	14
I.13.3	Vapeur d'eau	14
I.14	Activité de L'eau	14
I.15	Principes de séchage	14
I.15.1	séchage par Ebullition	15
I.15.2	Séchage par entraînement	15
I.16	Séchage et qualité	16
I.16.1	Types de modification de la qualité	16
 Chapitre II: Séchage solaire		
II.1	Introduction.....	18

II.2 Séchage solaire	18
II.2.1 Technologies de séchage solaire.....	18
I.3. Domaines d'utilisations	19
I.3.1 Industrie agro-alimentaire.....	19
I.3.2 Industrie du bois	19
I.3.3 Industries alimentaires et pharmaceutiques	19
I.4 Différentes méthodes de séchage	20
I.4.1 Séchage mécanique.....	20
I.4.2 Séchage chimique	21
I.4.3 Séchage thermique	21
I.5 Les séchoirs solaires	22
I.5.1 Définition	22
I.5.2 Principe de fonctionnement	22
I.5.3. Les types de séchoir	23
I.6. Les différents types de séchoirs solaires convection naturelle et forcée	26
I.6.1 Le séchoir solaire "coquillage"	26
I.6.2. Séchoirs directs	27
I.6.3 Le séchoir solaire par convection forcée	27
I.6.4 Les séchoirs solaires tunnels	28
I.6.5 séchoirs solaires hybrides	28
I.6.6. Séchage a l'air libre	29
I.6.7 Les séchoirs solaires mixtes	30
I.7 Les capteurs solaires	31
I.7.1 Capteurs solaires thermiques	31
I.7.2 Capteurs plans	31
I.7.3 Capteurs par concentration	32
<i>Chapitre III: Protocol experimental</i>	
III.1 Introduction	34
III.2 Lieu des expériences	34

III.3 Caractéristiques de la zone expérimentaux.....	35
III.4 Méthode expérimentale	35
III.5 étuve de séchage.....	35
III.5.1 Définition	35
III.5.2 Composants du sécheur étuve	36
III.6 Outils de mesure	37
<i>Chapitre IV :résultats et discussion</i>	
IV.1 Introduction.....	42
IV.2Résultats expérimentaux	42
IV.3 Teneur en eau	42
IV.4 La perte de masse	48
IV.5 Conclusion	53
Conclusion générale	54

Liste des figures

Figure (I.1) : Cinétique de séchage.....	10
Figure (I.2) : schéma d'un solide humide.....	13
Figure (I.3) : Séchage isenthalpique par entraînement.....	16
Figure (I. 4) : Effets mécaniques du séchage.	14
Figure (II.1) : le séchage au soleil et le séchage à l'air.	18
Figure (II.2) : séchage de bois.....	19
Figure (II.3) : séchage de alimentaires et pharmaceutiques	20
Figure (II.4) : <i>Sécheur mécanique T 2016</i>	20
Figure (II.5) : bombe à vide.	21
Figure (II.6) : séchage au solaire.....	22
Figure (II.7) : séchoir par étuve.	23
Figure (II.8) : Classification des types de séchoirs solaires.	26
Figure (II.9) : Les échoir solaire coquillage à trois claies.	27
Figure (II.10) : séchoirs directs.	27
Figure (II.11) : Le séchoir solaire par convection forcée.....	28
Figure(II.12) : Unséchoir tunnel.	28
Figure (II.13) : Séchoir solaire hybride solaire-gaz.	29
Figure (II.14): séchoir solaire hybride à convection forcée.	29
Figure (II.15) : Séchage a l'air libre	30
Figure (II.16) : Les séchoirs solaires mixtes	30
Figure (II.17) :Capteurs solaire plans.	32
Figure(II.18):Capteurs par concentration.	33
Figure (II.19) :Représentation schématique d'un capteur à concentration.....	33
Figure(III-1): Imagesatellitedelazone.	34
Figure(III-2): Configuration expérimentale(Étuve industrielle à convexion forcée)	36
Figure(III-3) : Configuration expérimentale (capteursolaire avec chambre de séchage)	37
Figure (III-4): Une balance électronique numérique	37
Figure(III-5):Un thermomètre modèle TPM-10).	38

Figure (III-6): pyranomètre	38
Figure(III-7):Représente de Moteur d'aspiration d'air.....	39
Figure(III-8):.compteur de consommation(kw/h) électrique,.....	39
Figure(III-9):petit pois humides et séchées (débit 0,004 Kg/et T=40°C).....	40
Figure (III-10) : petit pois humides et séchées, (débit 0,004 Kg/et T=50°C).....	40
Figure (III-11): petit pois humides et séchées (débit 0,004 Kg/et T=60°C).....	41
Figure (IV-1) - : Effet du débit d'air sur la teneur en eau (à base séché) du produit en fonction du temps de séchage. À une température 40°C.....	43
Figure (IV -2) - : Effet du débit d'air sur la teneur en eau (à base sèche)du produit en fonction du temps de séchage. à une température50°C.....	43
Figure (IV -3): Effet du débit d'air sur la teneur en eau(à base sèche)du produit en fonction du temps de séchage. à une température60°C.....	44
Figure (IV-4):variation de la teneur en eau (à base sèche) en séchage solaire.....	44
Figure (IV-5): Effet du débit d'air sur la teneur en eau(à base humide)du produit en fonction du temps de séchage. à une température40°C.....	45
Figure (IV -6): Effet du débit d'air sur la teneur en eau(à base humide)du produit en fonction du temps de séchage. à une température50°C.....	46
Figure (IV -7) : Effet du débit d'air sur la teneur en eau (à base humide) du produit en fonction du temps de séchage. À une température60°C	46
Figure (IV.8) : variation de la teneur en (à base humide) en séchage solaire.....	47
Figure (IV-9) : Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit en fonction du temps de séchage. à une température40°C	48
Figure (IV -10): Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit en fonction du temps de séchage. À une température50°C	48
Figure (IV -11) : Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit en fonction du temps de séchage. À une température60°C	49
Figure (IV -12) : Evolution de la perte de masse en fonction du temps sur un séchage solaire	49

Figure (IV -13): variation de vitesse de séchage a une température 40°C et débit 0.001kg/s	50
Figure (IV -14) variation de vitesse de séchage a une température 50°C et débit 0.001 kg/s.	51
Figure (IV -15) variation de vitesse de séchage a une température 60°C et débit 0.001 kg/s	51
Figure (IV -16) - variation de vitesse de séchage solaire en fonction de temps.....	52
Figure (IV -17) - : l'évolution de la consommation électrique en fonction du temps de séchage a température 40 ;50 ;60°C et débit 0.001 ;0.003 ;0.004kg/s.....	53

Nomenclature

M : masse de produit	(g)
\dot{m} : débit massique d'air	(Kg/s)
X: teneur en humidité initiale	(%, base humide)
MS : Masse sèche de produit	(g) ou (kg)
Xr : taux humidité d'équilibre	(%, base humide)
Mh: Masse humide de produit	(kg)
Mout: perte de masse liquide	(g)
MR : taux d'humidité	(%)
φ : humidité relative	(%)
t: temps de séchage	(s, min, h)
Ta: température ambiante	(°C)
Tch: température de la chambre de séchage	(°C)
dX/dt vitesse de séchage	(Kg eau / kg
θ : température	°C
V: vitesse de l'air	
χ : Humidité absolue d'un solide	(m/s)
χr : teneur en humidité sur une base humide	(kg/kg (Md))
η : efficacité du capteur solaire	(kg/kg (Mh))

Introduction Générale

Le séchage des produits agro-alimentaires est une technique connue depuis l'Antiquité, lorsque la plupart des civilisations et des cultures utilisaient le séchage dans divers domaines de la vie. Par exemple, certaines civilisations anciennes enterrent les aliments séchés avec les morts pour assurer une seconde vie selon à leurs croyances, ou embaument les morts pour empêcher leur corps de pourrir et de se décomposer.

Au fil du temps, de nombreux problèmes sont apparus qui entravent le processus de séchage et la qualité du produit, notamment [38]:

- Temps pris (long).
- La propagation d'insectes nuisibles sur le produit.
- Incapacité à contrôler la qualité des produits.
- Météo instable dans certaines régions.

Au milieu du XIXe siècle, le monde assiste à une révolution industrielle dans tous les domaines, en particulier dans le domaine du séchage (légumes et fruits). A la suite des recherches approfondies, les scientifiques et les chercheurs ont découvert des appareils et des machines industriels qui séchaient parfaitement les aliments. Ces appareils dépendent de différents types d'énergie (comme les combustibles fossiles, le gaz, l'électricité, l'énergie solaire ...), l'importance de ces dispositifs dépend du taux de séchage et de la qualité du produit, et leur importance réside dans le contrôle de la température et du débit d'air utilisé pour sécher le produit [39].

L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement lors du séchage d'un produit agroalimentaire jugé indispensable dans la cuisine Algérienne. Pour cela nous avons procédé à différents types de séchage : séchage industriel à l'aide d'un séchoir électrique indirect, séchage solaire et séchage naturel. Les expériences sont menées dans le Hall technologique de l'Université Mohamed Kheider de Biskra.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres :

- Le premier chapitre donne les notions fondamentales du séchage et l'activité de l'eau dans milieu poreux.

- Dans le deuxième chapitre nous présentant un aperçu général sur le séchage et les différentes techniques utilisées pour extraire l'eau d'un produit.

- Le troisième chapitre décrit les étapes du processus expérimental et les différents instruments de mesure utilisés.

- Le dernier chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats expérimentaux issus de cette étude.

I.1 Introduction :

Le séchage des produits agricoles, légumes et fruits, est l'une des plus anciennes méthodes de conservation des aliments connues de l'homme, en raison de son impact important sur la qualité des produits séchés. L'objectif du séchage du produit est de réduire la teneur en humidité à un niveau qui permet un stockage sûr sur une longue période. Il en résulte également une réduction du poids et du volume, ce qui réduit les coûts d'emballage, de stockage et de transport[1].

Le séchage des fruits, des légumes et de la viande est l'un des processus les plus énergivores de l'industrie alimentaire et constitue le meilleur moyen de réduire les dépenses et les pertes après récolte. Le séchage au soleil est pratiqué partout dans le monde depuis des siècles à l'air libre.

Plusieurs chercheurs ont étudié la modélisation de séchage solaire des produits agricoles et il y a également simulation des études sur les séchoirs solaires et le comportement de divers légumes et fruits, caractérisé par la cinétique de séchage. Les concepts de base, les différentes méthodes de séchage, et les différents types de séchoirs à ont été examinés par divers auteurs[2].

Ce chapitre a pour but de connaître la notion de séchage, et d'aborder les différents types et méthodes de séchage, de comprendre les mécanismes et principes de son fonctionnement.

I.2-Définition du séchage :

Le but de l'opération de séchage est d'éliminer ou bien évaporé l'eau qui se trouve à l'intérieur du produit, cette opération est assurée par plusieurs méthodes par exemple : l'exposition au soleil, le stockage dans un endroit sec, également par l'utilisation de l'air chauffé sous l'action du rayonnement solaire comme une source de chaleur, dont le procédé est effectué dans une chambre bien isolante thermiquement pour assuré l'opération de séchage[3].

I.3-Théories descriptives du phénomène deséchage :

De nombreux chercheurs ont avancé des théories pour expliquer le phénomène de séchage, qui étudie le transfert de masse et de chaleur au produit, qui sont représentées dans ce qui suit [4].

I.3.1. La théorie diffusion :

En 1830, Gram Hammer a mené une expérience dans le domaine de la diffusion, dans laquelle il a conclu que le flux de matière dû à la diffusion est proportionnel à la concentration dans le milieu.

Quelques années plus tard, Vik, qui avait fait d'importants progrès dans ce domaine, découvrit la symétrie entre diffusion et conductivité thermique, et en déduit ses lois mathématiques comme la loi de Fourier.

Rappelons que la loi de Fick traduit le phénomène de diffusion de la vapeur d'eau d'une forte concentration vers une faible concentration de la substance, c'est-à-dire de l'intérieur vers l'extérieur du produit à sécher.

La loi de Fick ne s'applique qu'à certains aliments et non à tous les produits alimentaires. Sa théorie a été critiquée pour avoir négligé le gradient thermique et le coefficient de diffusion constant d'un solide, qui ne conviennent pas à tous les produits.

La diffusivité dépend de nombreux facteurs comme la nature du solide et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température [5].

Coefficient de Diffusion Continue :

-betterave à sucre 5×10^{-11} ;

- blé $7,2 \times 10^{-11}$;
- maïs (2,6 à 8,2) $\times 10^{-11}$;
- pomme $3,6 \times 10^{-9}$;
- pomme de terre (0,9 à 1,5) $\times 10^{-10}$;
- feuilles de tabac $7,8 \times 10^{-13}$.

I.3.2 Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929) :

Cette théorie dit que la loi de Fick régit le mouvement de l'eau vers la surface d'un solide. Traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau d'une forte concentration à une faible concentration d'eau, avec une autre explication de l'intérieur du matériau à sécher vers la surface où il s'évapore sous l'effet d'une énergie extérieure[6].

I.3.3. La théorie de Luikov (1934) :

Cette théorie sur le phénomène de diffusion thermique de l'humidité dit que l'une des causes du transfert d'humidité est le gradient de température.

I.3.4 Théorie capillaire (1937)

Cette théorie dit que dans les matériaux poreux ou granulaires, le mouvement de l'eau est dû à l'effort d'aspiration plutôt qu'à la concentration, et son mécanisme a été étudiée par Goren. Lorsqu'un tube capillaire est placé dans un réservoir rempli d'eau, on observe la hauteur du fluide dans le tube par rapport au niveau du réservoir.

Ceaglske et Hougen disent que pour le premier séchage d'un produit granulaire, l'écoulement de l'eau est dû aux forces capillaires et n'a rien à voir avec la concentration. Krecher explique que la période de séchage est contrôlée par des capillaire[4].

I.3.5. La théorie de Krischer –Berger et Pei (1938)

Selon Krischer, le transfert de fluide est dû aux forces capillaires par rapport à l'humidité à l'état liquide.

Le gradient de concentration est dû à la diffusion de vapeur due au gradient de pression de vapeur selon Berger et Pei Relatif à l'humidité à l'état de vapeur[4].

I.3.6 Théorie de Philip et De Vries (1957)

Cette théorie dit que le mouvement de l'eau est dû aux capillaires et à la diffusion de la vapeur. Cette théorie décrit le transfert d'humidité et de chaleur dans les matériaux poreux en se basant sur le développement d'un système d'équations. Daoued Mihoubi, (2004) Déshydratations d'argile par compression et séchage[8].

I.4 Terminologie de séchage :

I.4.1 Humidité :

Ce terme fait référence au liquide qui se trouve dans un objet solide, et qui doit être éliminé lors du séchage.

$$M_h = M_e + M_s \quad (I.1)$$

I.4.2 Humidité absolue :

C'est la quantité d'eau, en grammes, contenue, sous forme de vapeur invisible, dans un volume de 1 mètre cube d'air. On dira par exemple que l'air a une humidité absolue de 10 g/m³

L'humidité est exprimée plus simplement par le liquide dans le produit par rapport à sa masse sèche[9].

Cette humidité que nous désignerons par H_a est donnée par la relation suivante : $H_a =$

$$\frac{M_e}{M_s} [\text{kgv. kgas}^{-1}] \quad ; \quad x = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \quad (I.2)$$

I.4.3 Humidité relative [10]:

L'humidité relative (φ) c'est le rapport entre la pression de la vapeur d'eau dans l'air (p_v) sur la pression de saturation (P_s) de cette vapeur d'eau à la température partielle de vapeur dans un mélange à sa pression de saturation dans le même mélange pris à la même température.

$$\varphi = \frac{p_v}{P_s} \quad (I.3)$$

P_v : pression partielle de la vapeur dans le mélange.

P_s : pression de saturation.

En pratique, on utilise beaucoup plus humidité absolue (X) que la pression P V. par conséquent on donne le rapport entre humidité absolue (X) de l'air pour une certaine Température et X_r humidité absolue correspondante à état de saturation pour la même température ; rapport appelée degré de saturation Ψ .

$$\Psi = \frac{X}{X_r} \quad (I.4)$$

I.4.4 Taux d'humidité

C'est la masse du liquide contenu dans l'unité de masse du matériau à sécher. , il est préférable d'exprimer la teneur en humidité de la substance anhydre.

I.4.5 Taux d'humidité à l'équilibre [11]:

C'est le processus consistant à placer un corps humide dans un grand récipient où la température et l'humidité sont constantes. Il convient de noter que le niveau d'humidité est stable à une valeur appelée valeur d'équilibre et qu'il est lié à la nature de l'humidité et de la température, comme ainsi que la pression partielle.

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (I.5)$$

I.5 CARACTERISTIQUES DES SOLIDES :

I.5.1 Humidité relative :

Humidité relative d'un solide appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

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

I.5.2 Humidité absolue :

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, ou plus simplement humidité s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

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

Où :

X : Humidité absolue d'un solide [kg /kg].

Mh : Masse humide de produit [kg].

Ms : Masse sèche de produit [kg].

I.6 États de siccité :

Un corps anhydre est un corps qui ne contient aucun pourcentage d'eau. Après séchage, le corps obtenu est en bonne compatibilité avec le produit. De plus, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

I.7 Corps hygroscopique

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit [4].

I.8 Les caractéristiques de Température :

I.8.1 Température sèche :

La température sèche correspond à la température classique donnée par un thermomètre mais protégée de l'humidité et des radiations [7].

I.8.2 Température humide du gaz :

La température de bulbe humide est la température à laquelle l'eau liquide s'évapore en vapeur d'eau. Si la température du bulbe humide est proche de la température ambiante, l'humidité relative est élevée [12].

I.8.3 Température de rosée :

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

I.9 Vitesse de séchage [13] :

La vitesse de séchage est le temps nécessaire pour éliminer la quantité d'eau dans le produit. La vitesse de séchage dépend d'un grand nombre de variables dont les plus importantes sont :

- La nature du produit, sa porosité, sa forme et son humidité.
- Température, et vitesse du gaz de séchage.

- Les conditions de contact ainsi que la méthode de transfert de chaleur.

I.10 Cinétique du séchage[14]:

La cinétique de séchage de nombreux produits différents a été étudiée au moyen de courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps $\left(-\frac{dx}{dt}\right)$.

I.10.1 Période de mise en température (Période 0) :

Pendant cette période, il y aura une légère différence d'humidité du produit et la température augmentera jusqu'à la température de bulbe humide correspondante (A - B) de l'environnement de séchage.

- ✓ Cette période apparaît dans les gros produits.
- ✓ La période de temps est petite.
- ✓ S'il y a une grande différence entre la température de l'air et le produit.

I.10.2 Période à vitesse constant :

Pendant cette période, la vitesse de séchage reste approximativement constante pour de nombreux produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide sous l'influence des forces capillaires, et un équilibre s'établit entre la diffusion dans la couche limite et les mécanismes de transfert d'humidité vers la surface. Cette période se termine lorsque les forces capillaires deviennent incapables de résister à l'évaporation des eaux de surface,

I.10.3 Période de ralentissement :

Pendant cette période, les forces capillaires ne sont plus en mesure de diriger l'eau à la surface du produit. La vitesse de séchage ne peut plus être maintenue constante et commence à diminuer.

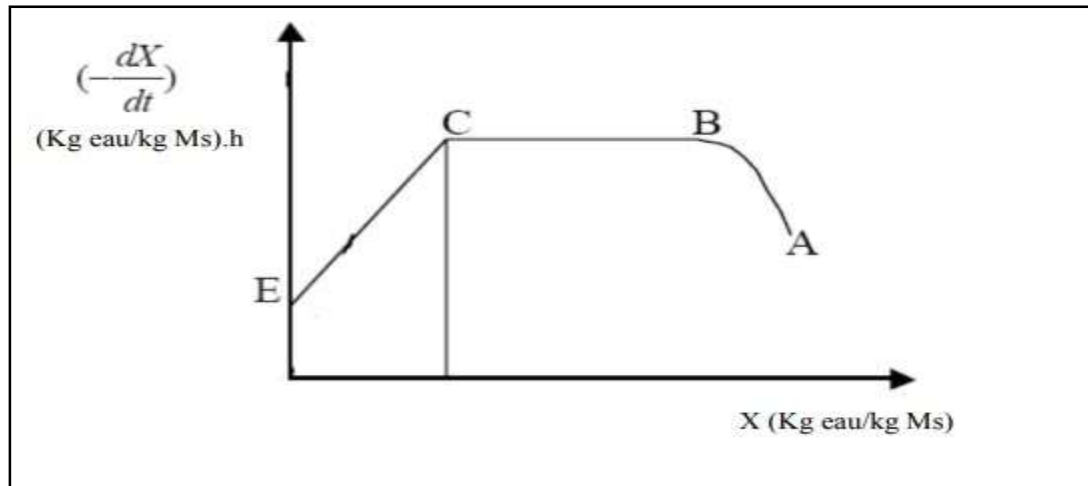


Figure (I.1) : Cinétique de séchage [14].

En réalité, le séchage est beaucoup plus complexe car le déplacement de l'eau est influencé par plusieurs phénomènes :

- Les forces de capillarité qui entraînent une migration de l'eau en sens inverse du gradient de température.
- Les différences de pression partielles qui entraînent un déplacement de l'eau sous forme vapeur.
- La migration des matières solubles (sucre, sels) à la surface qui entraînent une résistance supplémentaire.
- La résistance au déplacement est fonction de la structure cellulaire ou fibreuse du produit.
- La déformation du produit très importante pour les produits biologiques [9].

I.11 Les modes de séchages[15] :

I.11.1 Transfert de chaleur par conduction :

Le transfert de chaleur se fait par contact entre les molécules d'une substance afin que l'énergie soit transférée d'une molécule à une autre au moyen d'électrons.

L'énergie diffuse dans un milieu, la température augmente de proche en proche (par exemple, si une cuillère est dans un plat chaud et que sa queue dépasse dehors, la chaleur se transmet à la queue de la cuillère par conduction).

$$\frac{Q}{A} = - \frac{\lambda dT_s}{dl} \quad (I.8)$$

I.11.2. Le transfert thermique par convection :

La convection est le processus de transfert de chaleur d'un endroit à un autre qui est plus frais, et ce processus est effectué par des particules fluides.

A noter qu'il existe deux types de transport convectif :

- Convection forcée où le fluide est poussé par un appareilmécanique (pompe, ventilateur, etc.).
- Convection naturelle : Lorsqu'il y a une différence de température entre deux points

Le liquide chaud monte tandis que le liquide froid descend car sa densité est plus importante.

$$Q = h A (T_a - T_s) \quad (I.9)$$

Q (W) : la quantité de chaleur transférée par unité de temps,

A (m²) : surface d'échange,

$(T_a - T_s)$ (K) : l'écart entre la température du gaz de séchage (air) et la température superficielle du produit à sécher,

h (W / m² · K) coefficient d'échange par convection

I.11.3 transfert thermique par rayonnement :

Le soleil envoie des rayons électromagnétiques qui nous parviennent par des interactions entre atomes et molécules

C'est l'origine du faisceau. Ce rayon transmet la chaleur du Soleil à la Terre, il est transmis à travers le milieu transparent (verre, vide, gaz).

I.12 Transfert de Chaleur et de matière [16]:

I.12.1 Transfert de chaleur et matière dans le produit agricole :

On dit la diffusion de la chaleur dans un milieu s'il y a une différence de température entre deux points, plus précisément, pour un milieu stationnaire, on écrit la loi de Fourier, où le gradient de température intervient :

$$Q(x) = -A \cdot \lambda \cdot \frac{\delta T}{\delta x} \quad (I.10)$$

$Q(x)$ = Allure de transfert de chaleur dans le sens des (x) (W).

A = Surface d'échange compté perpendiculairement aux (x) (m^2).

$\delta T / \delta x$ = Gradient de température dans le sens des (x) ($^{\circ}C/m$).

De même, il y a transfert de matière lorsque dans un milieu existe un gradient de concentration en une substance susceptible de diffuser. La loi de Fick, pour un milieu immobile, dit [15] :

$$m(x) = -S \cdot D_c \cdot \frac{\delta c}{\delta x} \quad (I.11)$$

$m(x)$ = Allure de transfert de matière diffusante dans le sens des (x) (kg /s).

D_c = coefficient de diffusion ou diffusivité.

$\frac{\delta c}{\delta x}$ = Gradient de concentration de matière dans le sens des (x) (unités de concentration/m).

I.12.2 Transfert de chaleur et matière dans l'air entourant le produit :

Dans les travaux industriels et les expériences de séchage, l'air est souvent turbulent et forme alors une couche limite autour du produit d'une épaisseur d'environ 10 mm.

L'air adjacent au produit est considéré comme constant et équilibré en température et en humidité avec la surface du produit. Ces phénomènes caractérisent le transfert de chaleur et de matière, et c'est à partir de là que toutes les résistances du transport se situent dans cette région frontière.

I.12.3 Transfert de masse et les différentes étapes de séchage d'un produit humide

Dans le paragraphe qui suit, il ne sera fait mention que de l'eau, qui est un des liquides le plus couramment évaporés. Les mécanismes qui vont être décrits s'appliquent cependant aux autres solvants (séchage des peintures, par exemple).

I.12.3.1 Transfert de l'eau en séchage :

L'humidité peut être présente à l'extérieur du produit ainsi que dans les pores ou à l'intérieur du matériau lui-même [4].

Le séchage est le transfert d'eau combiné à un transfert de chaleur dans un matériau poreux insaturé. Le transfert d'eau interne des produits est souvent le phénomène limitant. La taille des pores du produit affecte l'hygroscopicité du produit (plus les pores sont petits, plus l'humidité est élevée). [12].

Le milieu extérieur fournit l'énergie nécessaire au séchage du produit en transférant l'eau de l'intérieur du produit vers le milieu environnant en vue de son évaporation. Le taux de transfert de ces substances varie dans le temps. Ceci est dû aux conditions ambiantes (température, humidité relative et vitesse des gaz en contact avec le produit).

Le transfert de masse implique le transfert d'une variété de composants par diffusion moléculaire naturelle ou convection forcée. La masse est transférée au moyen d'un gradient de concentration ou de pression partielle [4].

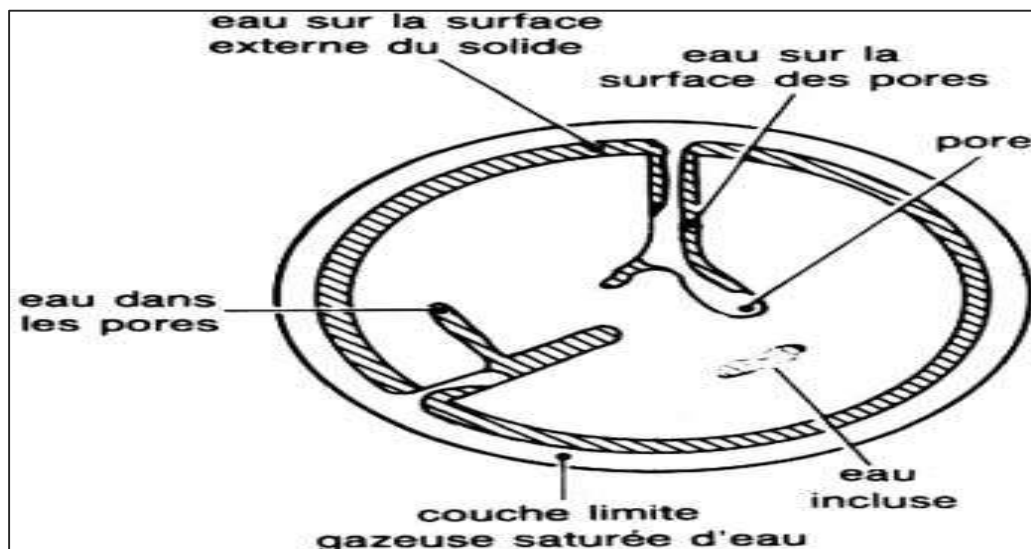


Figure (I.2) : schéma d'un solide humide.

I.13 Les Formes D'eau dans Les aliments :

L'eau dans un aliment peut généralement se présenter sous trois formes:

I.13.1 Eau d'hydratation:

L'eau humide est présente soit sous forme d'une membrane qui adhère à la surface externe de la substance solide, soit dans les pores par capillaires, et cette eau est dite « eau libre », et elle est facile à sécher ;

Ou de manière plus cohérente, par des forces de cohésion plus importantes avec la matrice solide et/ou avec d'autres molécules d'eau ; Cette eau est appelée « eau liée ».

I.13.2. Eau de constitution :

Constitution L'eau intervient dans la structure moléculaire d'un solide, comme l'eau dans les gels par exemple. Son élimination est plus difficile et peut affecter la structure et la qualité du produit, ce qui n'est pas notre objectif lors du séchage.

I.13.3 Vapeur d'eau :

C'est la quantité d'eau transformée d'un état liquide à un état gazeux, et combinée à une quantité d'air sec.

I.14 Activité de L'eau

L'activité de l'eau A_W est une grandeur classique, utilisée pour évaluer la capacité avec laquelle un produit dans une atmosphère donnée se dégrade d'un point de vue biologique. Elle correspond au rapport entre la pression de la vapeur d'eau de l'aliment (pression de la vapeur d'eau à la surface du produit) et la pression de la vapeur d'eau pure à la même température [34].

$$\Delta_W = \frac{\text{pression partielle de l'eau dans l'aliment } a\theta_0}{\text{pression partielle de l'eau pure } a\theta_0} \quad (\text{I.12})$$

I.15 Principes de séchage [17] :

La première idée qui vient à l'esprit pour sécher un produit est de la porter à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. En réalité, ce principe n'est pas le plus employé et l'on préfère souvent opérer à température moins élevée en utilisant l'air comme gaz d'entraînement.

I.15.1 séchage par Ebullition :

L'ébullition d'un liquide se produit lorsque sa température est telle que la pression de vapeur p de l'eau de ce liquide est égale à la pression totale ambiante P_t ;

$$P = P_t \quad (I.13)$$

- Pour l'eau pure, à pression atmosphérique, la température nécessaire est 100°C.
- Pour des corps aqueuses, la pression de vapeur d'eau est abaissée par la présence des corps dissous ; la température nécessaire est donc supérieure à 100 °C.
- Pour des solides humides enfin, les phénomènes sont analogues ; selon l'état de l'eau dans le produit, celle-ci bout à 100°C ou plus haut.

Dans tous les cas, la température d'ébullition dépend aussi de la pression, et en particulier est basse sous vide. Cette opération, utilisée en industries alimentaires et pharmaceutiques, s'effectue généralement sous vide, sur le produit préalablement congelé.

I.15.2 Séchage par entraînement :

On constate que lorsqu'un produit humide est placé devant un courant d'air chaud, il y a une différence de température et de concentration de la substance humide :

- La chaleur est transférée de l'air au produit sous l'influence de la différence de température.
- L'eau se déplace dans la direction opposée en raison de la différence de concentration d'eau dans l'air.

La figure suivante montre un produit hautement hydratant. Les concentrations d'air dans l'eau sont exprimées en pressions partielles d'eau. (P_a =Pascal).

Le séchage est égal si l'énergie nécessaire pour évaporer l'eau est égale à l'énergie fournie par l'air chaud. Nous notons que l'air agit comme moyen de chauffage et comme gaz vecteur pour les matériaux humides [17].

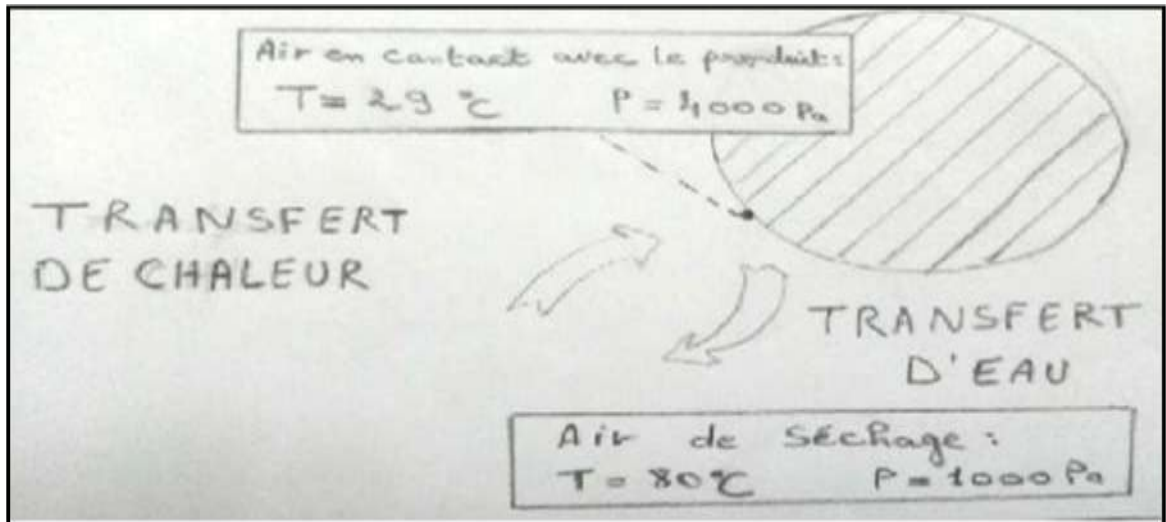


Figure (I.3) : Séchage isenthalpique par entraînement.

I.16 Séchage et qualité :

La destination alimentaire du produit rend nécessaire une attention particulière à la qualité du produit fabriqué.

I.16.1 Types de modification de la qualité :

I.16.1.1 Modifications biochimiques dues à la température :

Une température élevée pendant un certain temps provoque sur les produits biologiques des modifications, généralement considérées comme défavorables, dont les principales sont les suivantes :

- Réactions de Maillard (petit, 1964), c'est-à-dire brunissement non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides. Outre le brunissement, ces réactions entraînent une perte nutritionnelle, notamment de lysine.
- 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 (cas de l'utilisation d'additifs protéiques en charcuterie ou pâtisserie).
- Réactions enzymatiques : si les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable ou par la température au cours du séchage, elle produit leurs effets : brunissement des poly phénols, hydrolyse des liquides, ...Etc[17].

I.16.1.2 Pertes d'arômes :

Le séchage étant un procédé de séparation fondé sur la volatilité, il est normal que non seulement l'eau, mais tous les autres produits volatils soient également éliminés du produit. C'est le cas des arômes que contiennent naturellement les produits biologiques destinés à l'alimentation. En réalité toutefois, la perte d'arômes est moindre que celle à laquelle on pourrait s'attendre sur la base de leurs volatilités

I.16.1.3 Modifications physiques et mécaniques [17]:

Outre cette évaporation d'arômes, le séchage provoque diverses altérations physiques et mécaniques notamment :

- Fusion et migration de matières grasses.

Les solides se recroquevillent (exemple : morceaux de légumes), se craquèlent (cas des pâtes alimentaires) et ces déformations ne sont généralement pas annulées lors de la réhydratation. C'est l'avantage principal de la lyophilisation de conserver intégralement la forme et la dimension du produit, rendant en même temps sa réhydratation très facile.

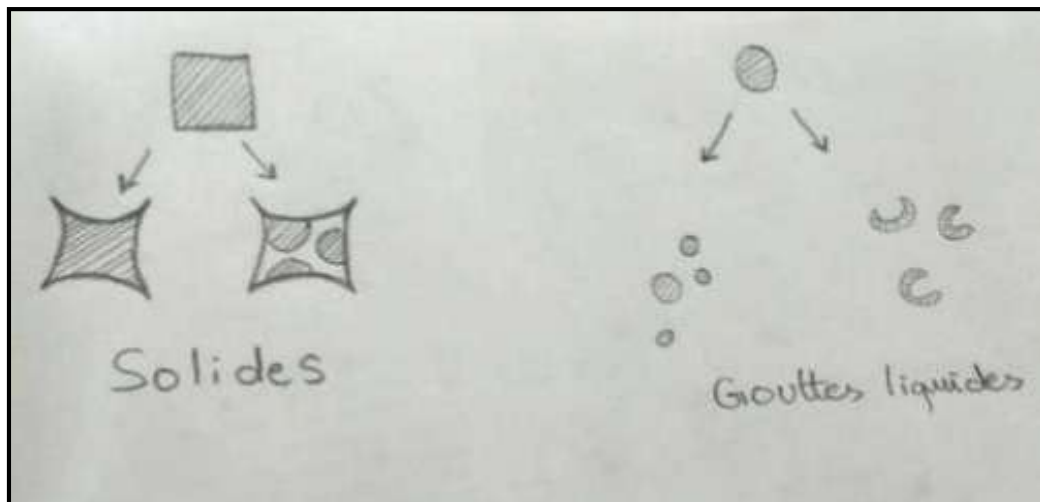


Figure (I. 4) : Effets mécaniques du séchage.

Chapitre II :
Séchage solaire

II.1 Introduction

Le séchage solaire est l'un des procédés les plus anciens de conservation des produits agricoles utilisés par les humains. Le séchage solaire est souvent différencié du «séchage au soleil» par l'utilisation d'équipements de collecte du rayonnement solaire pour l'utiliser pour le séchage des produits agricoles.

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide.

II.2 Séchage solaire :

II.2.1 Technologies de séchage solaire:

Le séchage solaire est un processus de transfert de chaleur et de masse pour lequel il est nécessaire de fournir de l'énergie. Plusieurs méthodes de séchage ont été adaptées à différentes situations, faciles et pratiques à utiliser, et les paramètres de fonctionnement des opérations de séchage peuvent être facilement contrôlés. Ces procédés classiques, notamment le séchage au soleil et le séchage à l'air chaud [18].



Figure (II.1) : le séchage à l'air.

II.3 Domaines d'utilisation :

II.3.1 Industrie agro-alimentaire [19]:

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.

II.3.2 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 [20].



Figure (II.2) : séchage de bois.

II.3.3 Industries alimentaires et pharmaceutiques :

Séchage de certaines herbes médicinales utilisées dans le traitement de certaines maladies, ainsi que de certains médicaments modernes tels que les comprimés.



Figure (II.3) : séchage des produits alimentaires et pharmaceutiques

II.4 Différentes méthodes de séchage :

II.4.1 Séchage mécanique [21] :

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, Centrifugation, compression et filtration) par exemple :

II.4.1.1 Séchage mécanique (Laveur centrifuge) :

Ce séchoir fonctionne sur le séchage du produit par méthode centrifuge (séparation de l'eau du plastique) car il économise beaucoup d'énergie par rapport au séchage thermique.

Ce principe peut être assimilé à la fonction d'essorage d'une machine à laver.



Figure (II.4) : Sécheur mécanique T 2016

II.4.2 Séchage chimique [12]:

Il existe de nombreuses méthodes de séchage dans ce domaine, dont la plus importante est le procédé qui repose sur l'utilisation de produits de séchage (osmotiques) (chlorure de calcium, ...) pour extraire l'eau, ainsi que des appareils qui stérilisent les instruments de laboratoire, et beaucoup d'autres par exemple [12].

II.4.2.1 Pompe à vide chimique [22]:

Cette pompe peut être utilisée dans de nombreuses applications dans les laboratoires, par exemple, elle peut être utilisée dans des salles de séchage sous vide ou de traitement thermique de matériaux et de composants, ou avec un autoclave à vapeur. Vapeur pour stériliser les outils, les récipients et les filtres ou lors du pompage de gaz humides.



Figure (II.5) : pompe à vide.

II.4.3 Séchage thermique [11] :

Ce type de séchage fonctionne sur l'échange de chaleur entre le corps chaud et le corps humide, en retour, l'échange de la substance humide du corps humide vers le corps chaud.

Les deux transformations sont divisées en une étape externe et une étape interne :

- Transfert de chaleur interne de la source de chaleur à la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne de la surface vers le cœur du produit.
- Le transfert interne de masse, du cœur du produit vers sa surface.
- Transfert de la masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur .

Par exemple :

II.4.3.1 Séchage au soleil :

Le soleil est la source de chaleur qui sèche le produit. Le séchage se fait au sol, sur des tapis ou sur des surfaces où le soleil apporte la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau à l'intérieur du produit [18].



Figure (II.6) : séchage au solaire.

II.5 Les séchoirs solaires :

II.5.1 Définition [23] :

Auparavant, le produit était placé sur des nattes, sur des surfaces ou sur le sol pour le séchage. Avec l'apparition de nombreux obstacles, cela a conduit à utiliser des capteurs solaires, qui se composent des ouvertures qui laissent passer l'air, et aussi de deux chambres:

Une chambre au sommet avec un verre transparent ou un couvercle en plastique qui permet à la lumière du soleil de traverser le verre jusqu'au film noir pour absorber la chaleur.

Une chambre au fond dans laquelle le produit à sécher est placé.

Le passage d'air permet à la chaleur d'être transférée de la première chambre au produit pour le séchage.

II.5.2 Principe de fonctionnement :

Le séchoir solaire indirect convertit le rayonnement solaire en chaleur. L'air collecté entre et est chauffé. L'air chauffé est transmis par convection à la chambre de séchage, cet air sèche les produits. Le temps de séchage varie selon les conditions climatiques [6].

II.5.3. Les types de séchoir :

Il existe deux types de séchage, le séchage industriel et le séchage solaire :

II.5.3.1. Séchoir industriel :

Si dans le séchage solaire, nous comptons sur le soleil pour fournir de la chaleur qui fonctionne pour sécher le produit, dans le séchage industriel, nous comptons sur l'électricité ou les combustibles fossiles, qui sont convertis en énergie thermique utilisée pour le séchage. Par exemple :

a. Séchoir par étuve :

Dans ce type de séchage, le produit à sécher entre en contact avec de la chaleur, qui est transmise par de l'air entraîné par un ventilateur.

La température et le débit doivent être ajustés en tenant compte du temps de séchage [24].



Figure (II.7) : séchoir par étuve.

II.5.3.2 Classifications des séchoirs industriels :

Les séchoirs industriels sont classés selon :

a) Propriété physique de la matière :

Les propriétés physiques de la matière à sécher sont le facteur le plus important pour le choix du séchoir.

b) Méthode d'approvisionnement en énergie :

Le sèche-linge est classé par type d'économie d'énergie :

Si l'énergie est fournie par convection dans l'air, il s'agit alors d'un type de convection.

S'il s'agit de fournir et de transférer de la chaleur au produit par contact direct, il s'agit alors d'un type conducteur.

c) la gamme de température :

Le sècheur peut être classé en fonction de la température de fonctionnement, il existe des sècheurs qui fonctionnent à haute température et il y a des sècheurs qui fonctionnent à une température inférieure à 100 °C [4].

II.5.3.3 Types Les séchoirs solaires :

Il existe plusieurs types de séchoirs solaires développés pour différents processus de séchage des produits alimentaires selon les besoins. Les séchoirs peuvent être classés selon leur utilisation du rayonnement solaire en deux types : les séchoirs naturels et les séchoirs forcés, directs et indirects. Le séchoir est dit direct, si le rayonnement solaire atteint directement les produits, et indirect, lorsque les produits sont à l'abri du rayonnement, c'est-à-dire à travers un fluide. [25].

a) Les séchoirs naturels :

Le processus de séchage naturel est facile et simple dans son principe, où le produit est placé sur des tapis, des plafonds ou sur le sol afin qu'il soit directement exposé au soleil ou à l'air [4].

b) Séchoirs solaires directs :

Les séchoirs diffèrent d'un séchoir à l'autre selon leur principe de fonctionnement. Le séchoir solaire direct est constitué d'une seule pièce qui fait office de chambre de séchage. De la peinture noire est placée au fond de la chambre de séchage pour augmenter la capacité d'absorption de la chaleur, et une feuille de plastique ou de verre transparent sert de toit pour laisser passer les rayons. Cependant, l'interaction directe entre « le rayonnement solaire et le produit » dégrade la qualité du produit [26].

➤ **Les Avantages :**

-Bien meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux et la pluie Par rapport au séchage conventionnel.

-Réduire le nombre de travailleurs.

➤ **Inconvénients :**

- Détérioration de la qualité par exposition directe au soleil,
- Destruction des vitamines A et B,
- Changement de couleur du produit.
- La fragilité des matériaux en polyéthylène qui doivent être changés régulièrement.

- Mauvaise circulation d'air qui limite la vitesse de séchage et augmente le risque de moisissure.

c) Séchoirs solaires indirectes :

L'air entrant dans le capteur solaire transfère la chaleur apportée par le soleil de la partie supérieure vers la partie inférieure où se trouve le produit à sécher. L'échange de chaleur et de matière humide entre le produit et l'air a lieu, l'air humide sort par le trou de sortie [27].

➤ **Avantages :**

- N'exposez pas le produit à la lumière directe du soleil.
- Il a l'avantage de mieux préserver les propriétés des aliments : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive.

- Il ne nécessite ni électricité ni énergie fossile pour fonctionner.

➤ **Inconvénients :**

- Le soleil doit être disponible longtemps,
- Qualité et design du produit.
- L'effet du climat sur la vitesse de séchage du produit.

d) Séchoir solaire forcé [28]:

Le séchoir solaire, qui est basé sur la méthode de séchage par convection forcée, se compose de trois parties principales, le capteur solaire, la salle de séchage et le ventilateur, qui fonctionne pour pomper l'air dans le capteur.

II.5.4. Classification des types de séchoirs solaires :

Selon la forme d'énergie consommée, il y a des séchoirs électriques, des séchoirs à gaz et des séchoirs hybrides. Plusieurs gammes de séchoirs solaires existent : les séchoirs directs, indirects et mixtes[24].

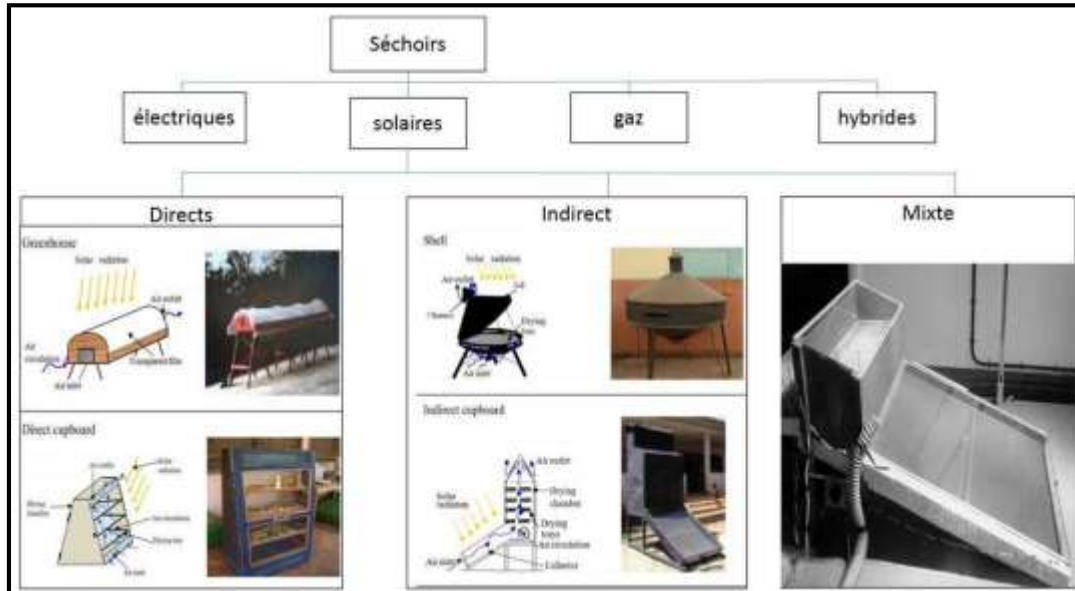


Figure (II.8) : Classification des types de séchoirs solaires.

II.6. LES DIFFERENTS TYPES DE SECHOIRSSOLAIRESA CONVECTION NATURELLEET FORCEE :

II.6.1 Le séchoir solaire "coquillage" :

Il s'agit d'un séchoir direct basé sur l'énergie solaire et l'air appelé séchoir à placage. Il se compose de deux cônes métalliques reliés par une charnière. Le panneau est peint en noir pour augmenter l'absorption de la lumière du soleil. Il a des trous en bas. Il permet à l'air de circuler et est utilisé par de nombreuses familles pour sécher les produits alimentaires [37].



Figure (II.9) : Le séchoir solaire coquillage à trois claies.

II.6.2. Séchoirs directs :

Le séchage intégral est un type de séchage qui combine le séchage solaire et le séchage à l'air, dans lequel le produit est placé au milieu d'une pièce transparente qui laisse passer la lumière du soleil.

La pièce a une entrée et une sortie pour le mouvement de l'air [29].

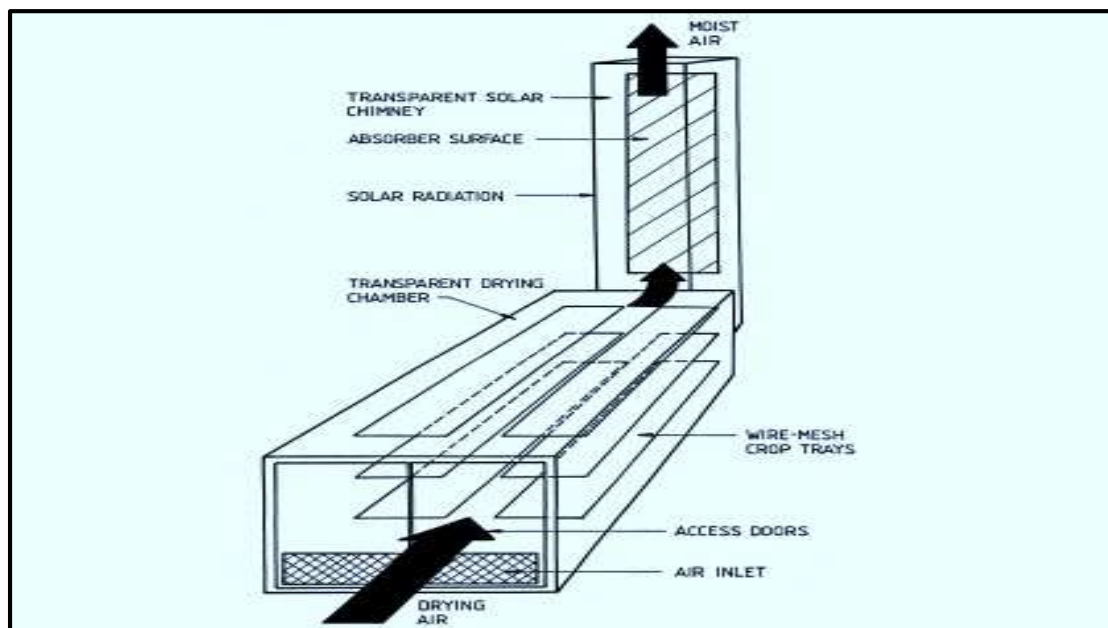


Figure (II.10) : séchoirs directs.

II.6.3 Le séchoir solaire par convection forcée :

Ce type de séchoir fonctionne pour pousser l'air dans le complexe de séchage par un ventilateur, où l'air transfère la chaleur acquise du soleil vers le produit à sécher.

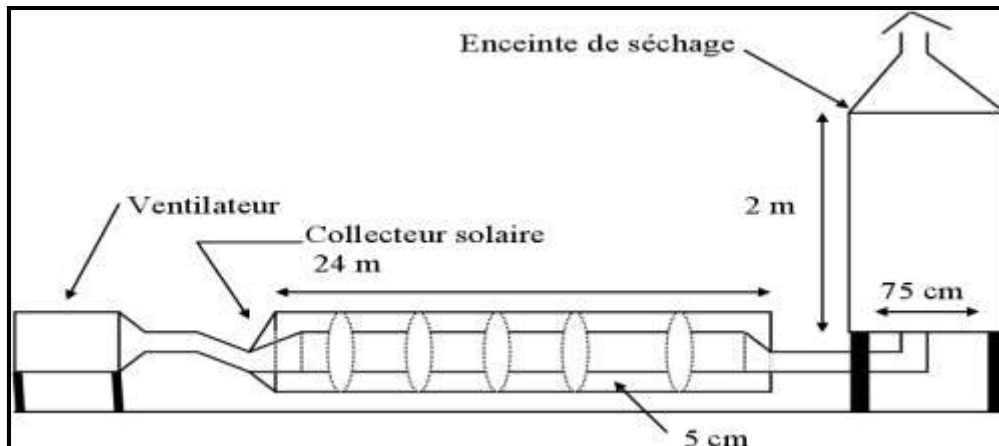


Figure (II.11) : Le séchoir solaire par convection forcée.

II.6.4 Les séchoirs solaires tunnels [30]:

Le type de séchoir est un séchoir direct qui se compose d'un couvercle en forme de V recouvert d'un couvercle en plastique qui permet le passage de la lumière du soleil et est équipé d'une ouverture pour le passage de l'air. Conçu pour le séchage des fruits et légumes.



Figure(II.12) : Un séchoir tunnel.

II.6.5 séchoirs solaires hybrides [31]:

La recherche scientifique a conduit à la découverte d'une sorte de séchoirs hybrides et mixtes, qui, en plus de l'énergie solaire, dépendent de l'énergie du combustible, électricité, gaz, bois...etc.

- Le combustible, l'électricité ou la combustion du bois contribuent tous à maintenir la température constante. Dans ce cas, le soleil est une source secondaire, car il préchauffe l'air.

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

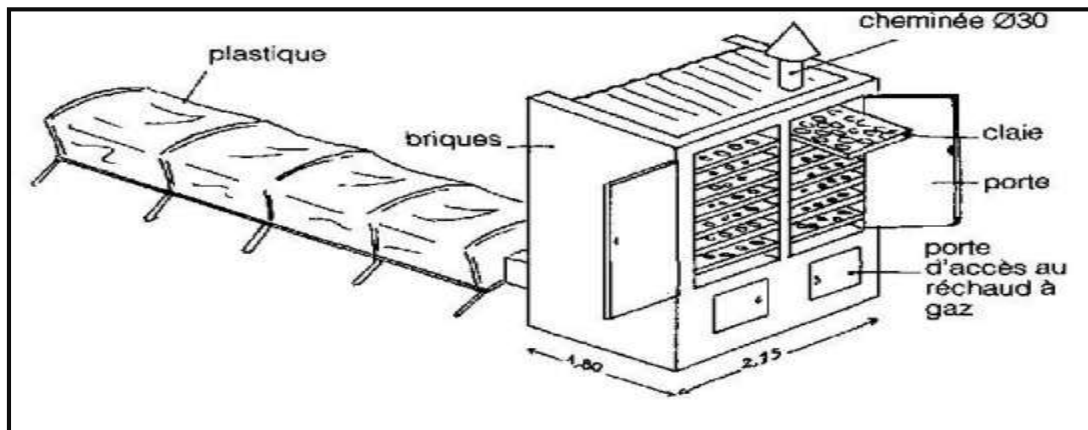


Figure (II.13) : Séchoir solaire hybride solaire-gaz.

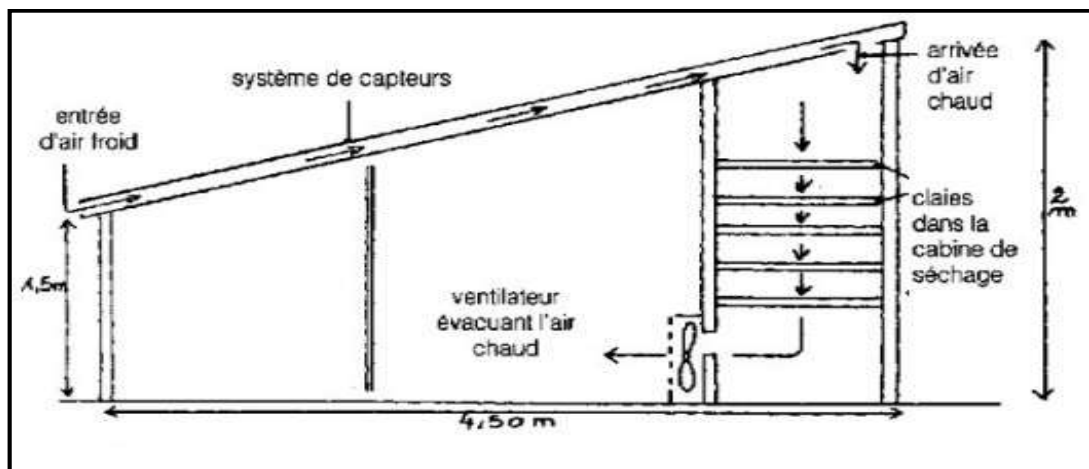


Figure (II.14) : séchoir solaire hybride à convection forcée.

II.6.6. Séchage à 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 [2].



Figure (II.15) : Séchage a l'air libre.

II.6.7 Les séchoirs solaires mixtes :

Ces sécheurs combinent les caractéristiques des sécheurs directs et indirects. Dans ce type de séchoir, l'action combinée du rayonnement solaire direct avec un flux d'air sur le produit à sécher et le capteur solaire consiste à fournir la chaleur nécessaire au processus de séchage. Ce séchoir se compose des mêmes dispositifs structurels que le séchoir indirect (capteur solaire, salle de séchage et cheminée) mais les murs sont équipés de panneaux de verre afin que le rayonnement solaire affecte directement le produit [29].

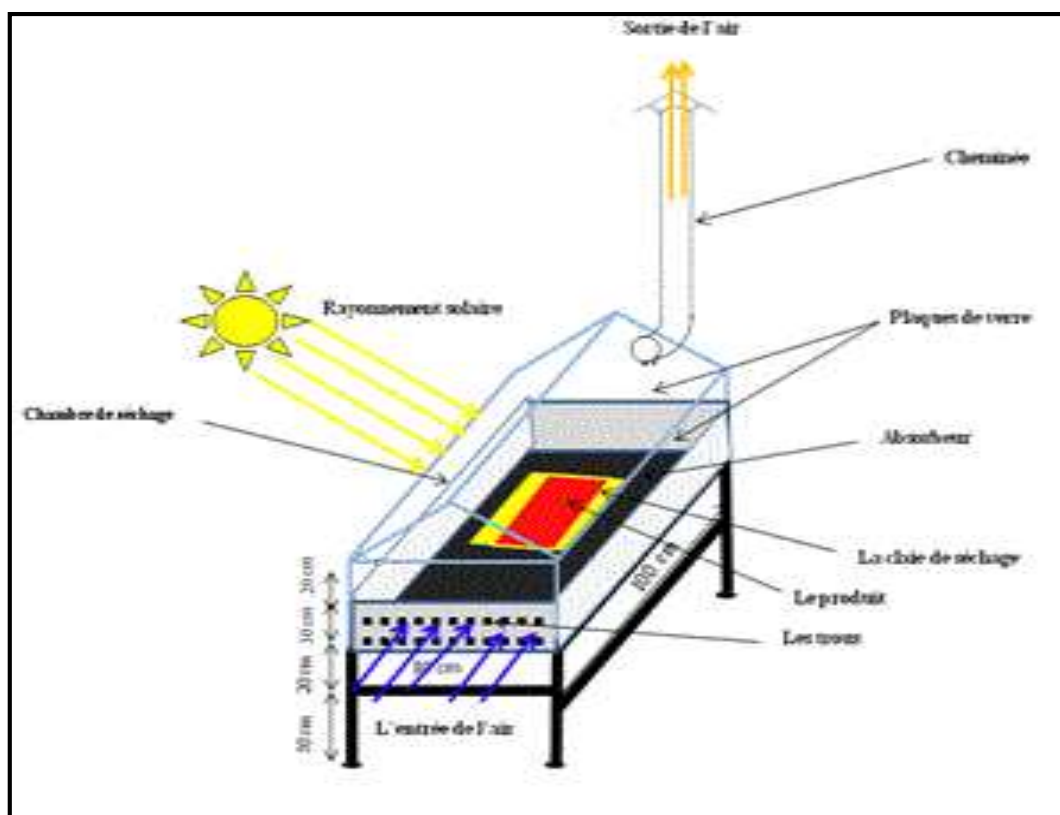


Figure (II.16) : Les séchoirs solaires mixtes.

II.7 Les capteurs solaires :

II.7.1 Capteurs solaires thermiques :

Les capteurs solaires thermiques sont des dispositifs qui permettent de convertir l'énergie solaire en énergie thermique, car le verre ou le plastique transparent laisse passer la lumière du soleil jusqu'à la couche noire qui absorbe cette énergie et la convertit en énergie thermique [14].

II.7.1.1 L'énergie solaire thermique :

Les capteurs solaires garantissent l'énergie thermique nécessaire qui est utilisée dans de nombreux domaines de la vie quotidienne. Ils peuvent être utilisés pour chauffer de l'eau, chauffer des maisons ou sécher des produits alimentaires.

Les capteurs solaires sont nécessaires en raison de leur grande importance et de leurs avantages dans divers domaines.

Il existe deux principaux types de capteurs solaires :

- Les capteurs plans.
- Les capteurs par concentration.

II.7.2 Capteurs plans :

Le capteur solaire plan est tout système exposé au rayonnement solaire afin de le capter et de le transformer en énergie thermique.

Les capteurs solaires à plaque plane ont une plaque revêtue de noir qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur en raison du réchauffement climatique.

Le verre est recouvert d'un substrat qui empêche le rayonnement de sortir de la chambre de chauffe (séchage), et la chaleur générée peut chauffer les fluides traversant la chambre de chauffe à environ 80°C.

Les principaux composants des capteurs solaires sont :

-Verre : Le matériau le plus utilisé est le verre, car il laisse passer une bonne lumière solaire.

- **Absorbeur** : C'est une plaque noire qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en énergie thermique. Cette plaque doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne conductivité thermique ;
- Les matériaux utilisés comme absorbeur sont : le cuivre, les aciers, l'aluminium ...etc.
- Isolation : Le rôle de l'isolation est de réduire les déperditions de chaleur. Les matériaux utilisés comme isolants sont le bois, la laine de verre et autres

Fluide caloporteur : Un fluide caloporteur est un moyen de transfert de la chaleur collectée par un absorbeur. Les fluides caloporteurs utilisés sont :

- L'air : C'est un fluide gratuit mais il possède une faible capacité calorifique en comparaison avec celle de l'eau.
- L'eau : Elle possède les avantages suivants : une grande chaleur massique, et une faible viscosité.

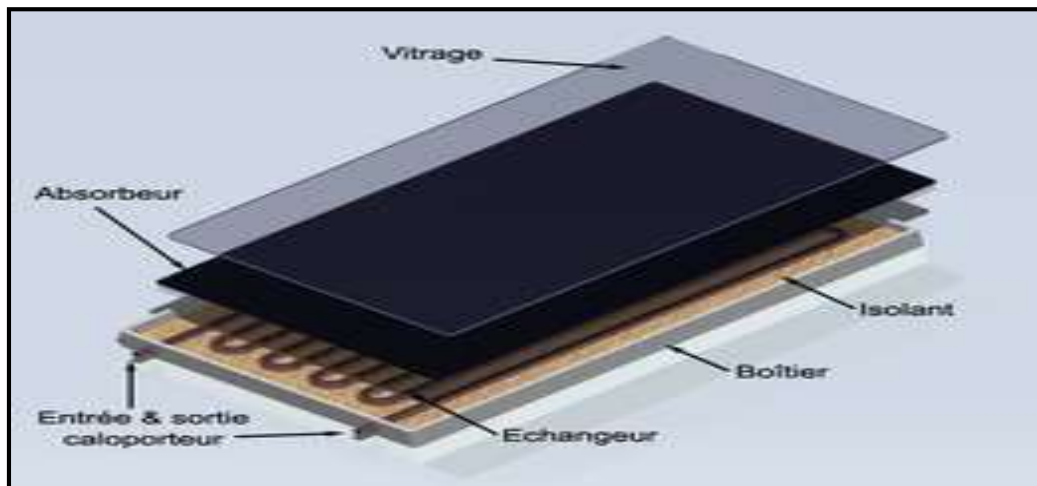
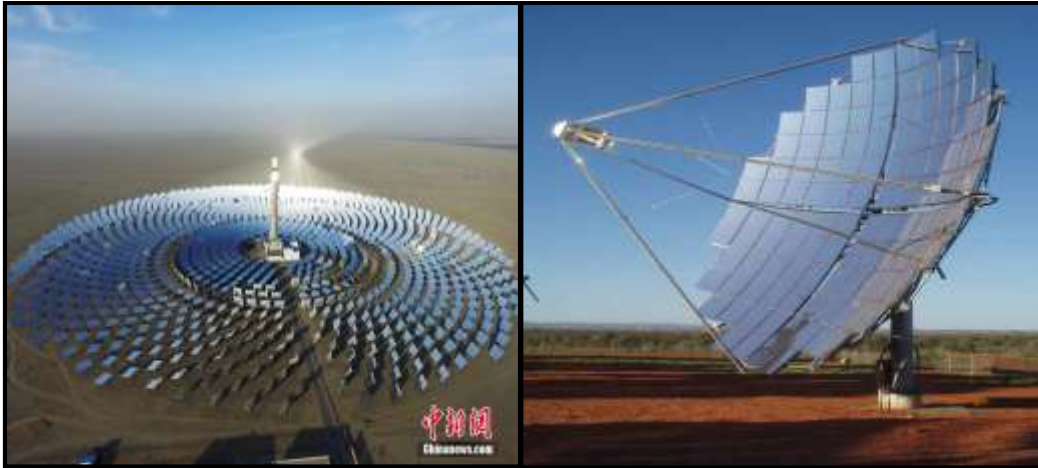


Figure (II.17) : Capteurs solaire plans.

II.7.3 Capteurs par concentration [32]:

C'est un appareil qui peut être une alternative aux capteurs solaires afin d'atteindre des températures élevées pouvant atteindre quelques centaines de degrés Celsius. Il fonctionne en recevant un groupe de rayons solaires et en les concentrant sur une cible, comme un tube à travers lequel passe un liquide

La position optimale (inclinaison) d'un capteur assure un bon rendement et moins des pertes thermiques.



Figure(II.18):Capteurs par concentration.

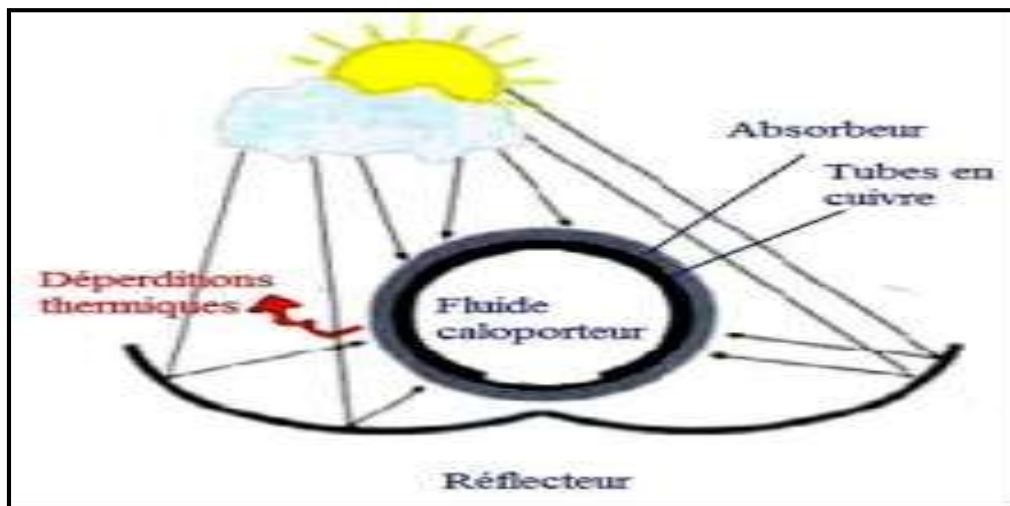


Figure (II.19) : Représentation schématique d'un capteur à concentration.

I.7.3.1. Les systèmes de concentration [33]:

L'énergie solaire n'étant pas assez dense, les scientifiques ont touché à certains dispositifs qui augmentent l'intensité de la concentration d'énergie sur la cible à chauffer

Chapitre III :

Protocol expérimental

III.1 Introduction :

Le séchage est l'un des processus qui a pris d'importance en Algérie, où autrefois les aliments étaient séchés une fois par exposition au soleil et au fil du temps, il est devenu facile de les sécher au four et il est devenu possible d'utiliser n'importe quel produit en saison ou hors saison de saison.

Dans notre expérience, nous nous sommes concentrés sur le séchage d'un produit agricole consommé dans la cuisine algérienne, le petit pois. En utilisant un capteur solaire, et en raison des mauvaises conditions météorologiques durant les mois de mars et avril nous avons utilisé une étuve électrique de séchage situé dans le laboratoire de l'Université de Biskra.

III.2 Lieu des expériences :

Les expériences ont été réalisées depuis le laboratoire technologique d'un département de l'Université de Biskra situé à $34^{\circ} 48'$ de latitude et $5^{\circ} 44'$ de longitude sud-est de l'Algérie, à une altitude de 120 m au-dessus du niveau de la mer. La superficie de la ville est d'environ 400 km d'Alger [36].



Figure(III-1): Image satellite de la zone [36]

III.3 Caractéristiques de la zone expérimentale

La ville de Biskra est située dans une oasis fertile au sud-ouest du massif de l'Aurès. Biskra est un centre de commerce pour les nomades de la région. La culture des fruits (dattes, olives, abricots et grenades) représente une activité dominante. Son climat doux en a fait une station thermale populaire. Biskra se situe au sud-est de l'Algérie [35].

III.4 Méthode expérimentale :

Les expériences sont menées au niveau du hall technologique de l'Université de Biskra durant le mois de mars 2022 entre 8h00 - 16h00.

Des observations expérimentales ont été enregistrées sur un bloc fixe de pois à trois températures différentes 40 ; 50 et 60°C et trois débits d'air différents 0.001kg/s ,0.003kg/s ,0.004kg/s. Nous le posons sur un plateau en treillis métallique pour contenir la masse à sécher et pesons sur une balance électronique numérique pour peser l'échantillon toutes les demi-heures et éliminer la teneur en humidité.

Après quatre heures du soir, les échantillons sont stockés dans des sacs en plastique et placés au réfrigérateur pour éviter la fermentation et maintenir leur état pour la poursuite du processus de séchage le lendemain. À la fin du processus, les échantillons secs sont laissés refroidir à température ambiante puis scellés dans des sacs en plastique.

III.5 étuve de séchage:

III.5.1 Définition :

Appareil à étuve : C'est un appareil qui a de nombreuses utilisations, dont la plus importante est le séchage des produits alimentaires, car il convertit l'énergie électrique en énergie thermique qui est transmise par l'air poussé par le ventilateur vers le produit à sécher, et le pétrissage en enlevant le matériau humide. La température des fours oscille souvent entre 5°C et 300°C.

III.5.2 Composants du sécheur étuve :



1

2

3

4

1-Bouton de lecture

2-Affichage

3-Bouton de contrôle du débit d'air

4-Salle de séchage

➤ Les avantages

- Non affecté par la météo
- Il peut être utilisé à tout moment

➤ Négatifs :

- Le besoin d'énergie électrique
- Le coût élevé de l'électricité dans certains pays



Figure(III-2): Configuration expérimentale(Étuve industrielle à convection forcée)



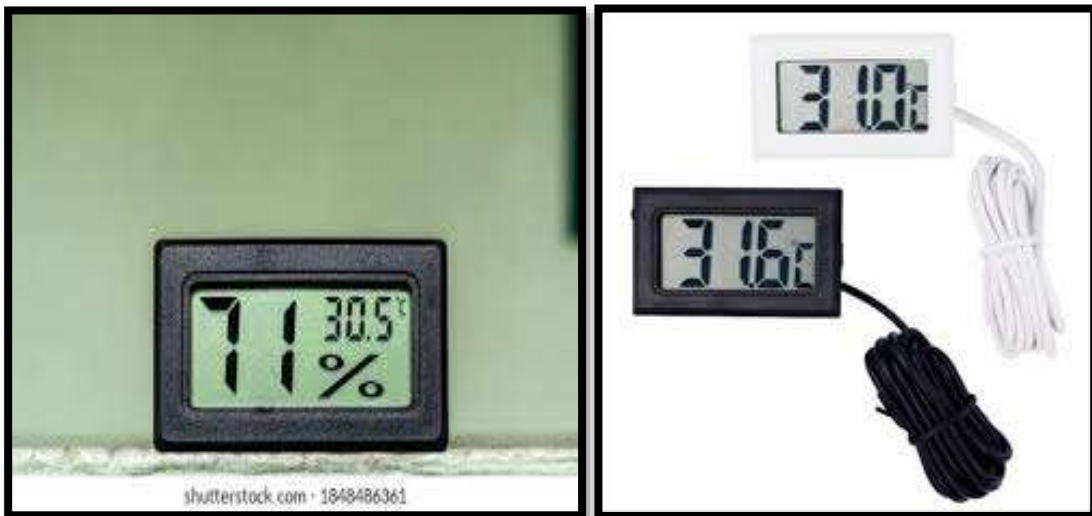
Figure(III-3) : Configuration expérimentale (capteur solaire avec chambre de séchage).

II.6 Outils de mesure :



Figure (III-4): Une balance électronique numérique

Contrôleur(TPM-10), (voir la figure), a été placé dans la position de sortie d'air chaude dans la salle de séchage pour mesurer la température et l'humidité



Figure(III-5) :Un thermomètre modèle TPM-10).

Un pyranomètre (modèle Volt raftPL-110SM) appareil robuste et facile à utiliser pour mesurer l'intensité du rayonnement solaire par unité de W / m^2 comme le montre la figure(III6).



Figure (III-6

);pyranomètre

Le Moteur d'aspiration d'air qui permet au flux forcé de convertir la température chaude dans la chambre de séchage vers l'extérieur



Figure(III-7): Représente de Moteur d'aspiration d'air.



Figure (III-8):.compteur de consommation(kw/h) électrique,

Les figures suivantes montrent des pois secs avant et après séchage :



Figure(III-9):petit pois humides et séchées (débit 0,004 Kg/et T=40°C)



Figure (III-10) : petit pois humides et séchées, (débit 0,004 Kg/et T=50°C)



Figure (III-11): petit pois humides et séchées (débit 0,004 Kg/et T=60°C)

Chapitre IV :

Résultats et discussion

IV.1 Introduction

Afin de comparer les différents résultats de cette étude et de déterminer l'effet de certains facteurs différents sur le temps de séchage et la cinétique, nous présentons les résultats d'une série d'expériences réalisées au cours du mois de mars 2022.

IV.2 Résultats expérimentaux :

Pour étudier l'effet du débit d'air sur le temps de séchage, nous avons utilisé deux systèmes de séchage, 1) séchoir solaire mono-bloc, 2) étuve de séchage à trois températures différentes : 40°C, 50°C et 60°C, ceci en utilisant trois débits d'air 0,001, 0,003 et 0,004 kg/sec pour chaque température

IV.3 Teneur en eau :

Les figures (IV -1) (IV -2) (IV -3) montrent l'évolution de la teneur en eau (base sèche) en fonction du temps de séchage, Où l'on note que le séchage a commencé avec la valeur de la teneur en eau initiale 2,703 kg d'eau/kg et poursuivi jusqu'à la teneur en eau finale des échantillons ; elle variait de 0,25 à 0,03 kg d'eau/kg obtenu après 12 heures comme temps maximum. La teneur en eau décroît sans interruption avec le temps de séchage.

Le temps mis pour atteindre une certaine teneur en eau à partir de la teneur en eau initiale diminue Avec un débit croissant d'air de séchage, Par exemple à une température de 40°C Conduire à la valeur de la teneur en eau 0,25 kg d'eau/kg comme temps de séchage le plus long (12 h 00 min) avec le premier débit d'air (0,001 kg/sec) avec l'arrivée du temps de séchage (9 heures) avec un débit d'air (0,003 kg/s) 8 heures 30 minutes avec un débit d'air de 0,004 kg/s.

Dans la figure (IV-2) a une température de 50°C conduit à une valeur de teneur en eau de 0,25 kg d'eau/kg comme un temps de séchage minimum (7 h 00 min) avec un débit d'air (0,003 kg/sec) avec le temps de séchage atteignant (8 h 00 min) avec un débit d'air (0,001 . 0.004 kg/sec) avec une valeur de 0,22 et 0,03 respectivement.

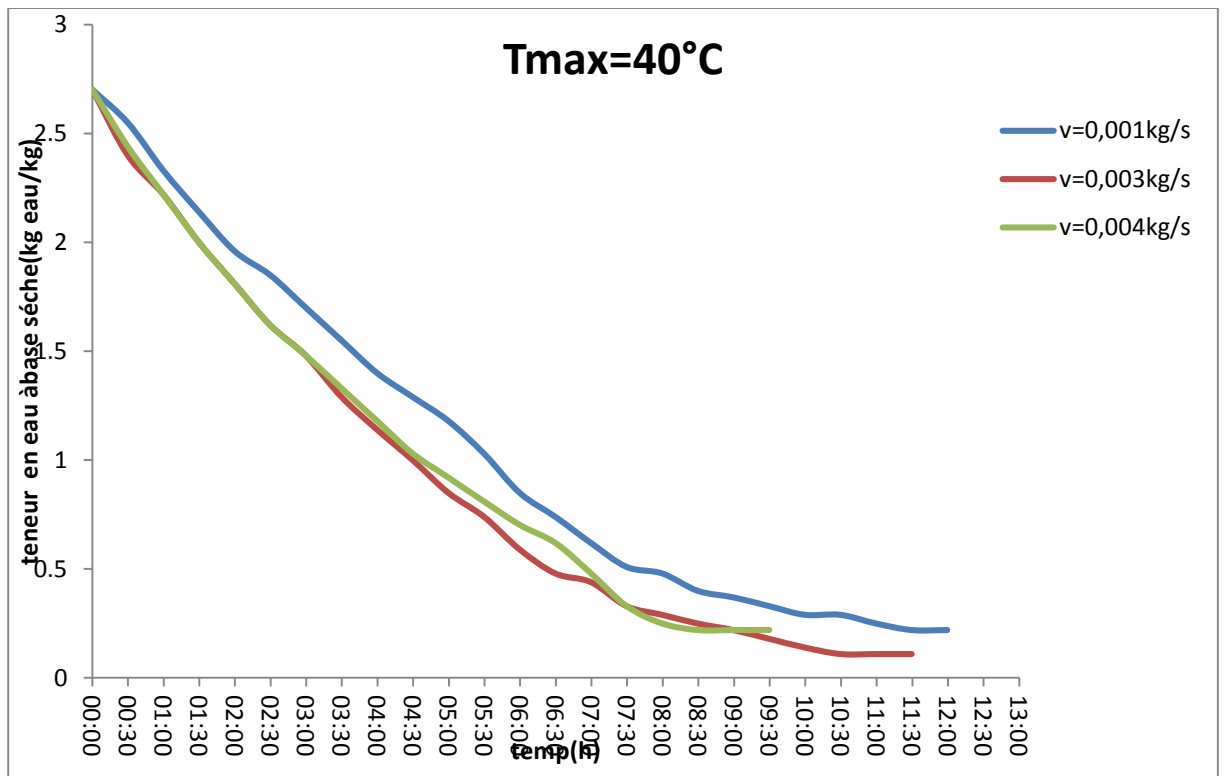


Figure (IV-1) - : Effet du débit d'air sur la teneur en eau (à base séché) du produit en fonction du temps de séchage (T= 40°C)

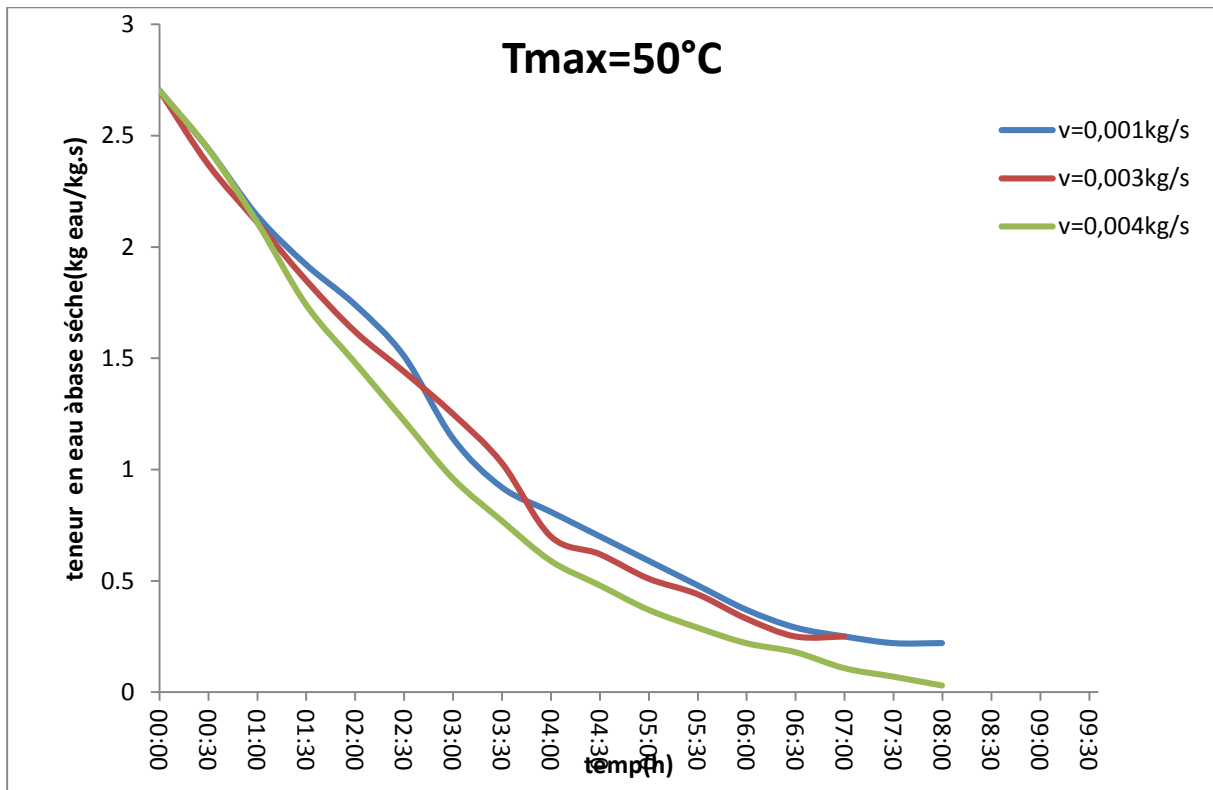


Figure (IV-2) - : Effet du débit d'air sur la teneur en eau (à base sèche) du produit en fonction du temps de séchage (T=50°C)

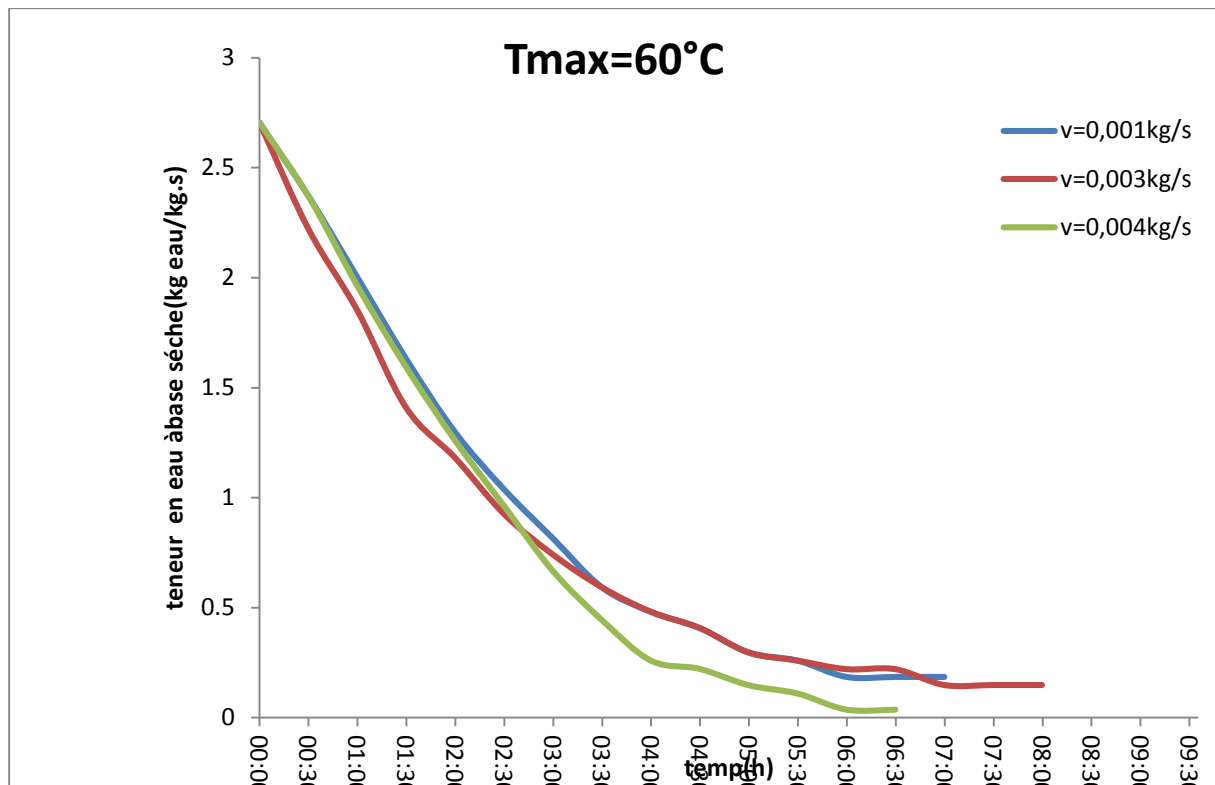


Figure (IV -3): Effet du débit d'air sur la teneur en eau(à base sèche)du produit en fonction du temps de séchage. ($T=60^{\circ}c$)

La figure (IV-4) représente l'évolution de la teneur en eau (à base séché) en fonction du temps de séchage dans un séchage solaire, où l'on observe que le temps de réduction de la teneur en eau est de 9 h 36 min à fort débit d'air.

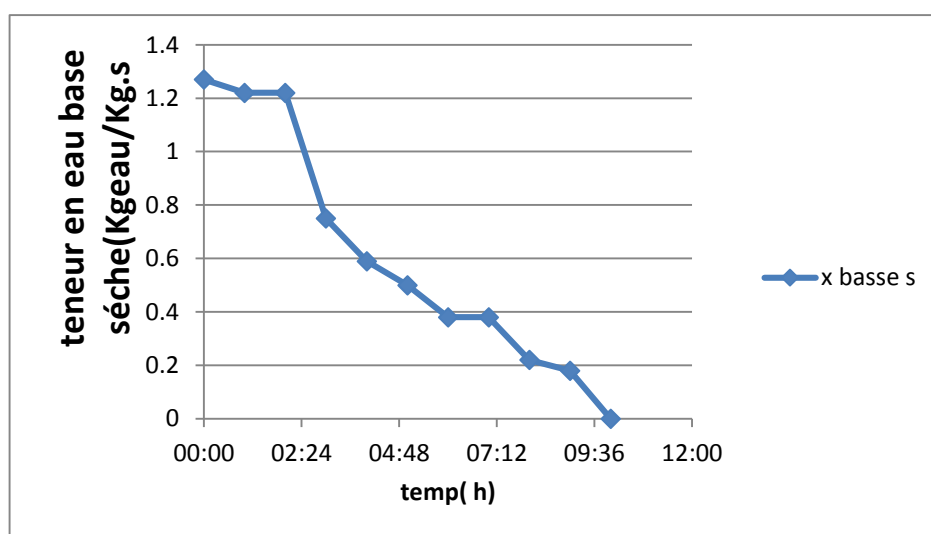


Figure (IV-4): variation de la teneur en eau (à base sèche) en séchage solaire

Les figures (IV -5) (IV -6) (IV -7) montrent l'évolution de la teneur en eau (base humide) en fonction du temps de séchage, Où l'on note que le séchage a commencé avec la valeur de la teneur en eau initiale 1 kg d'eau/kg et poursuivi jusqu'à la teneur en eau finale des échantillons.

Elle variait de 0.08 à 0,01 kg/s d'eau/kg obtenu après 12 heures comme temps maximum.

La teneur en eau décroît sans interruption avec le temps de séchage. Le temps mis pour atteindre une certaine teneur en eau à partir de la teneur en eau initiale diminue Avec un débit croissant d'air de séchage, Par exemple à une température de 40°C Conduire à la valeur de la teneur en eau 0.08 kg d'eau/kg comme temps de séchage le plus long (12 h 00 min) avec le premier débit d'air (0,001 kg/s) avec l'arrivée du temps de séchage (9 heures) avec un débit d'air (0,003 kg/s) 8 heures 30 minutes avec un débit d'air de 0,004 kg/s.

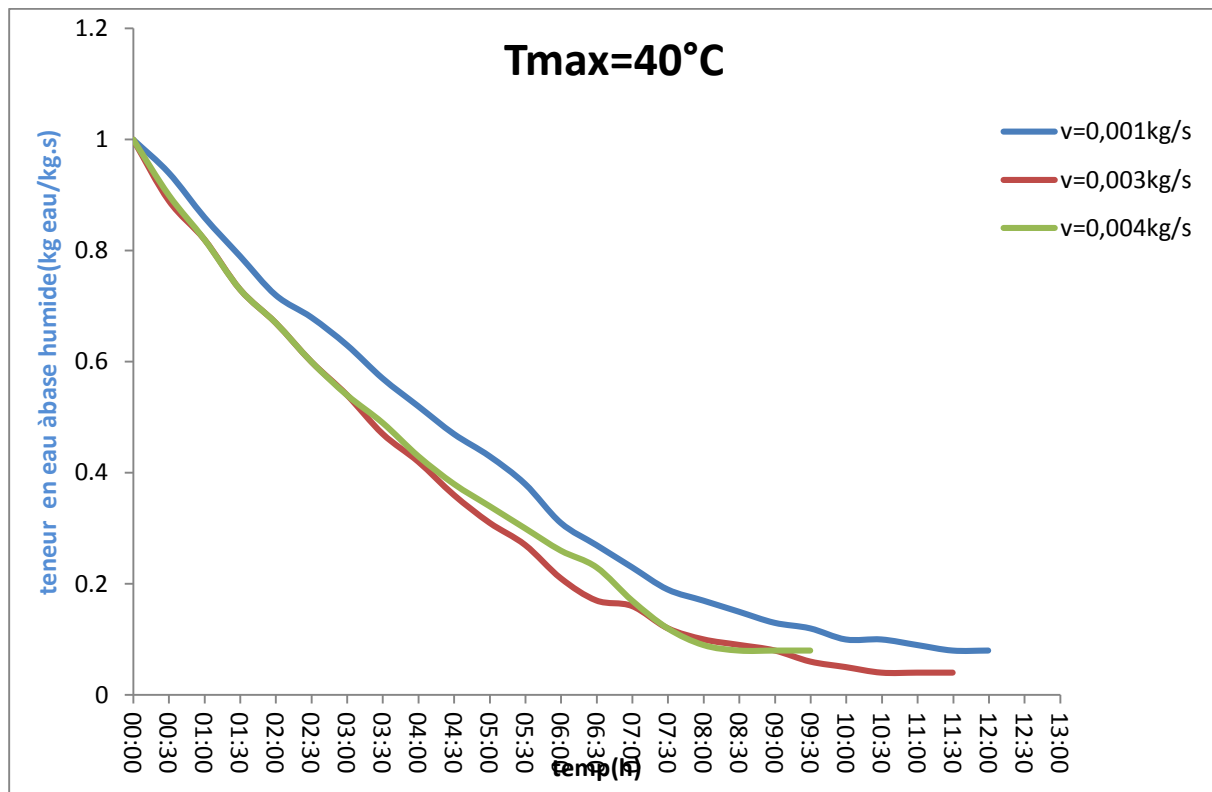


Figure (IV-5): Effet du débit d'air sur la teneur en eau (à base humide) du produit en fonction du temps de séchage. À une température 40°C

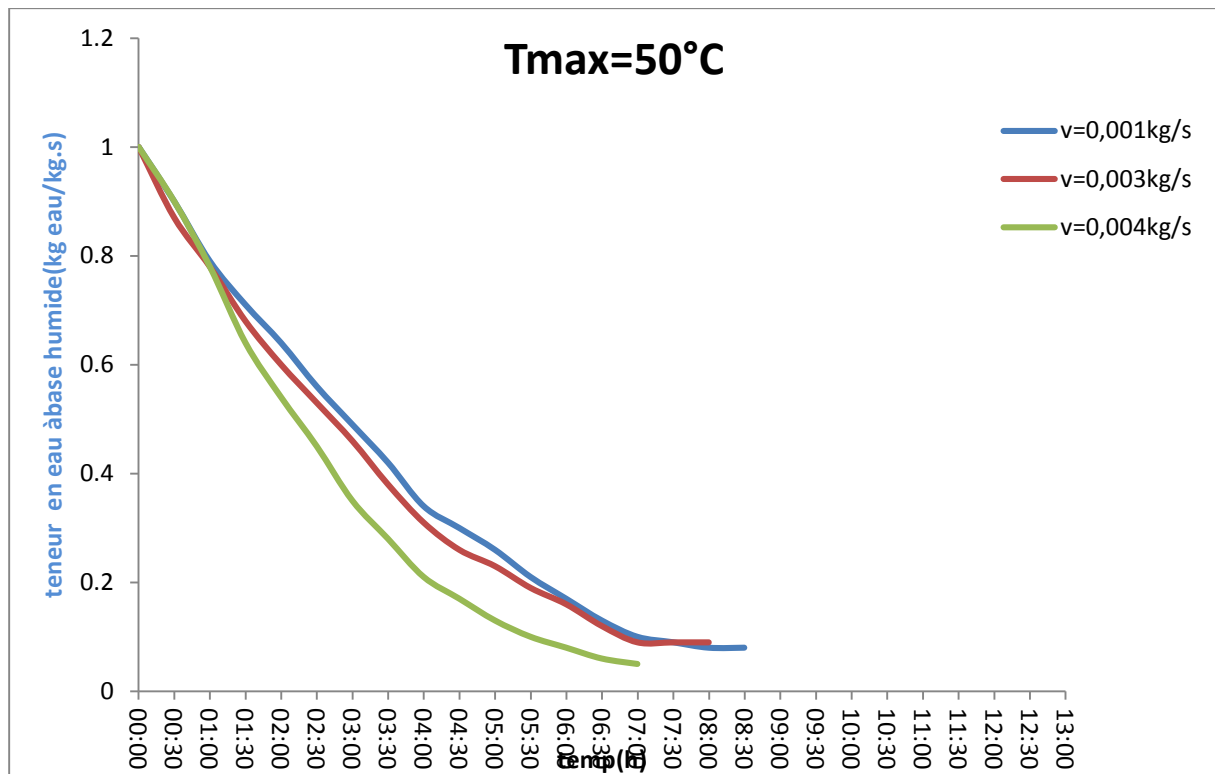


Figure (IV -6):Effet du débit d'air sur la teneur en eau(à base humide)du produit en fonctiondu temps de séchage. à une température50°c

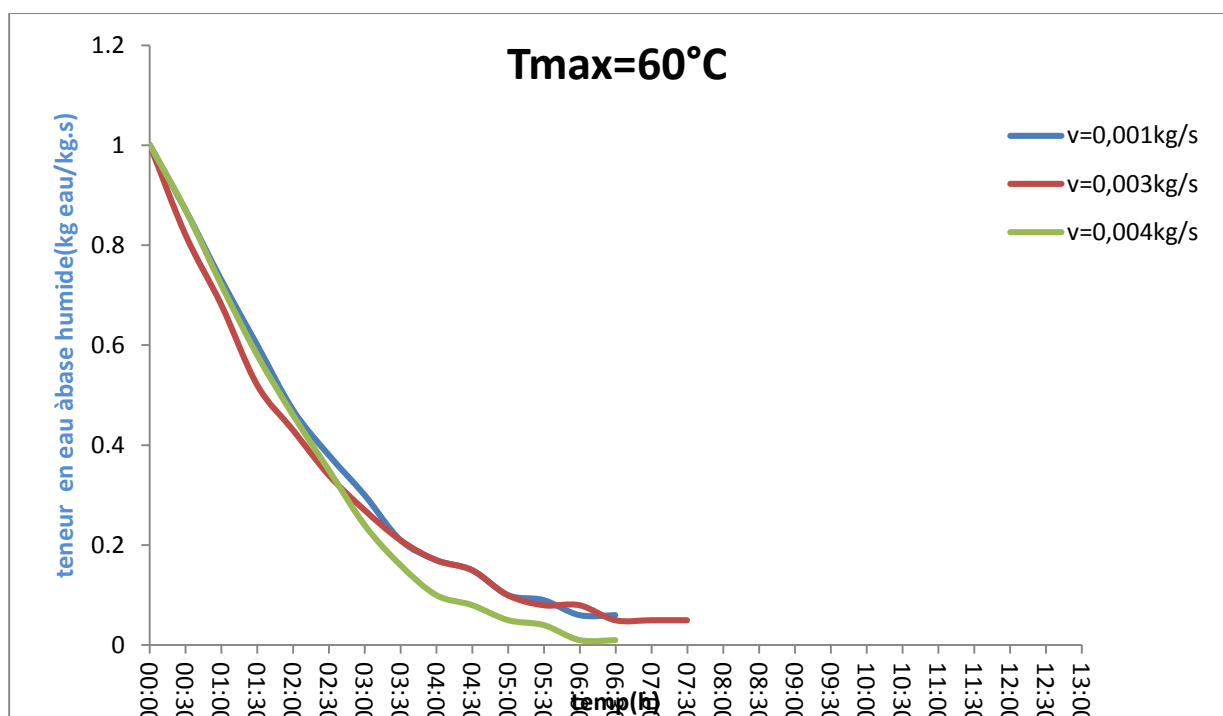


Figure (IV -7) : Effet du débit d'air sur la teneur en eau (à base humide) du produit en fonction du temps de séchage. À une température60°c

La figure (IV -8) représente l'évolution de la teneur en eau (à base humide) en fonction du temps de séchage dans un séchage solaire, où l'on observe que le temps de réduction de la teneur en eau est de 9 h 36 min à fort débit d'air.

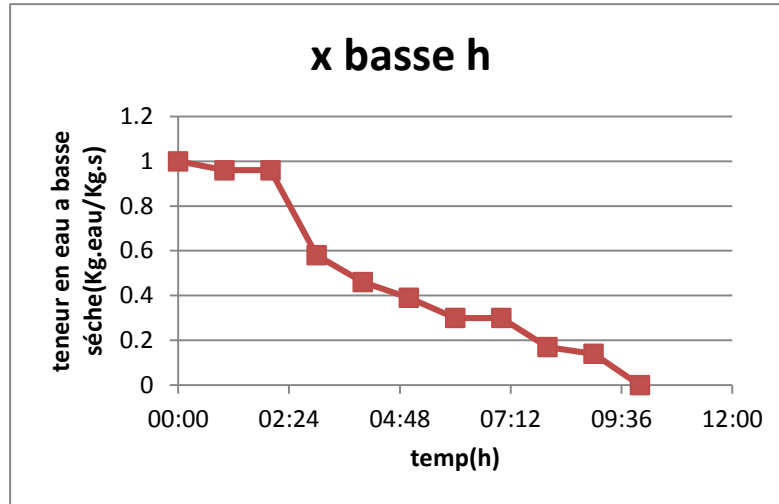


Figure (IV.8) : variation de la teneur en (à base humide) en séchage solaire

-Les figures ci-dessous (IV -9) (IV -10) (IV -11) montrent les courbes d'évolution de la perte de masse en fonction du temps, à différentes températures 40 50 60 °C avec trois débits d'air différents 0,001 0,003 0,004 kg/s, Il y a une augmentation de la perte de masse pendant le temps de séchage puis elle se stabilise au bout d'un certain temps en fin de séchage.

III.4 La perte de masse

Sur la figure (IV -9), une augmentation de la perte de masse jusqu'à 70 g peut être observée. En fin de séchage, le temps est au débit d'air 0,001 kg/s est le plus long (11 h 30 min) à 67 g et (9 h 00 min) à un débit d'air de 0,004 kg/s, tandis que le temps de séchage est de (11 h 00 min) avec un débit d'air de 0,003 kg/s contre 70 g.

Sur la figure (IV -10), on observe la perte de masse à température 50 °C, où l'on note qu'à 0,001 débit d'air, le temps le plus long est (8 h 30 min) avec une masse de 67 g et (7 h 30 min) avec 0,003 débit d'air et 0,004 kg/s.

Sur la figure (IV -11), nous présentons la courbe de la perte de masse à température 60°C, où l'on note qu'à 0,003kg/s débit d'air, le temps le plus long est (8 h 30 min) avec une masse de 69 g et (6 h 30 min) avec débit d'air 0,004 kg/s.

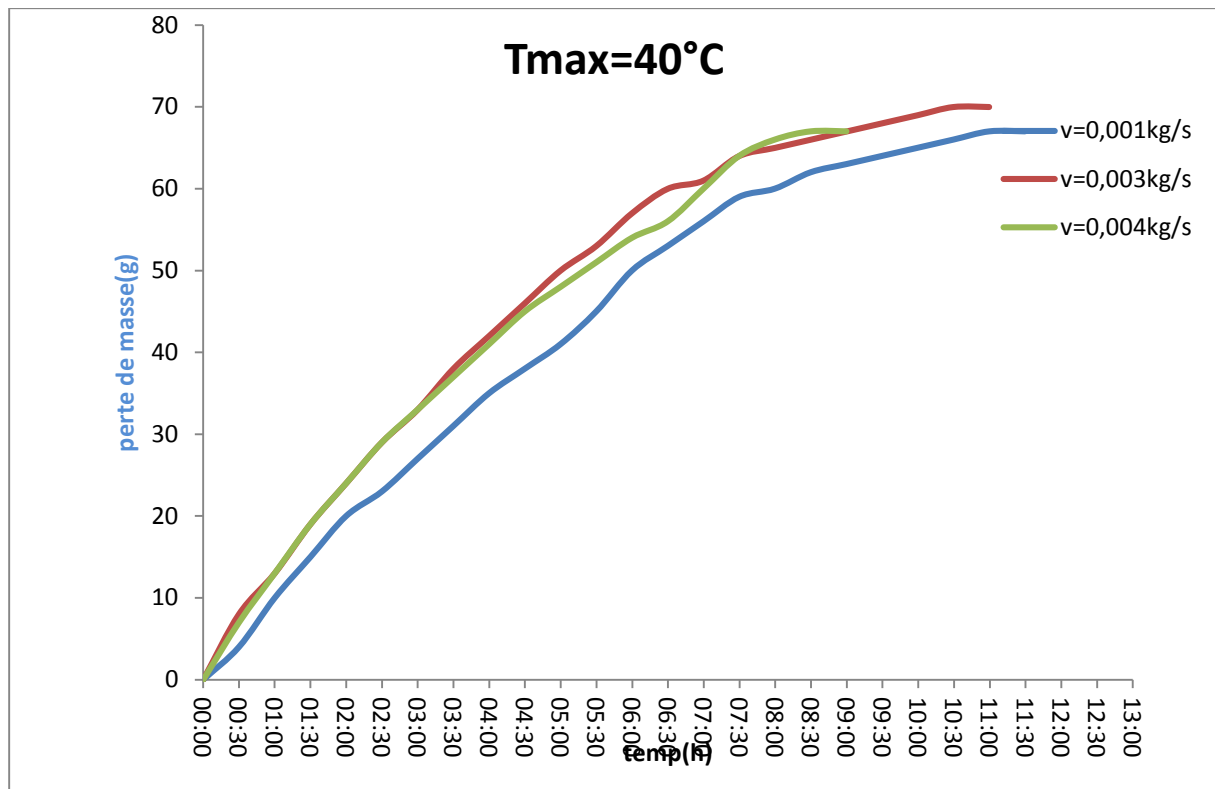


Figure (IV-9) : Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit en fonction du temps de séchage. À une température 40°C

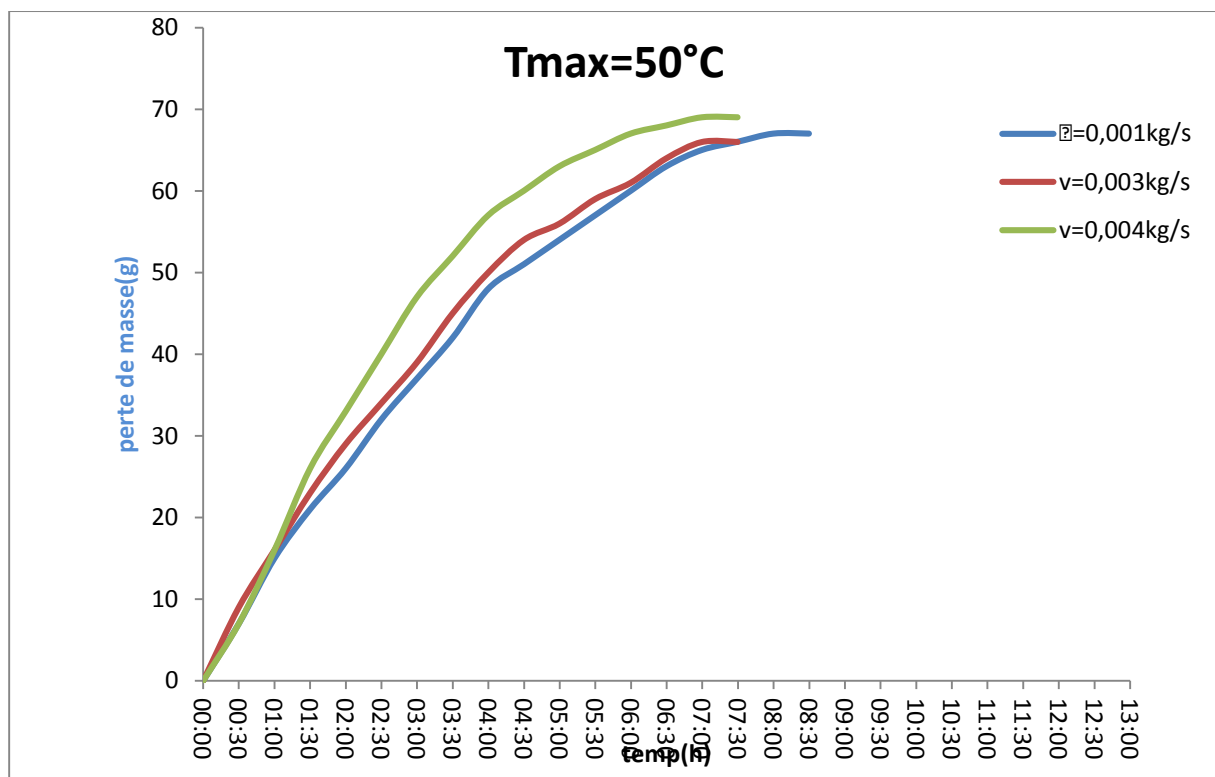


Figure (IV -10): Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit en fonction du temps de séchage. À une température 50°C

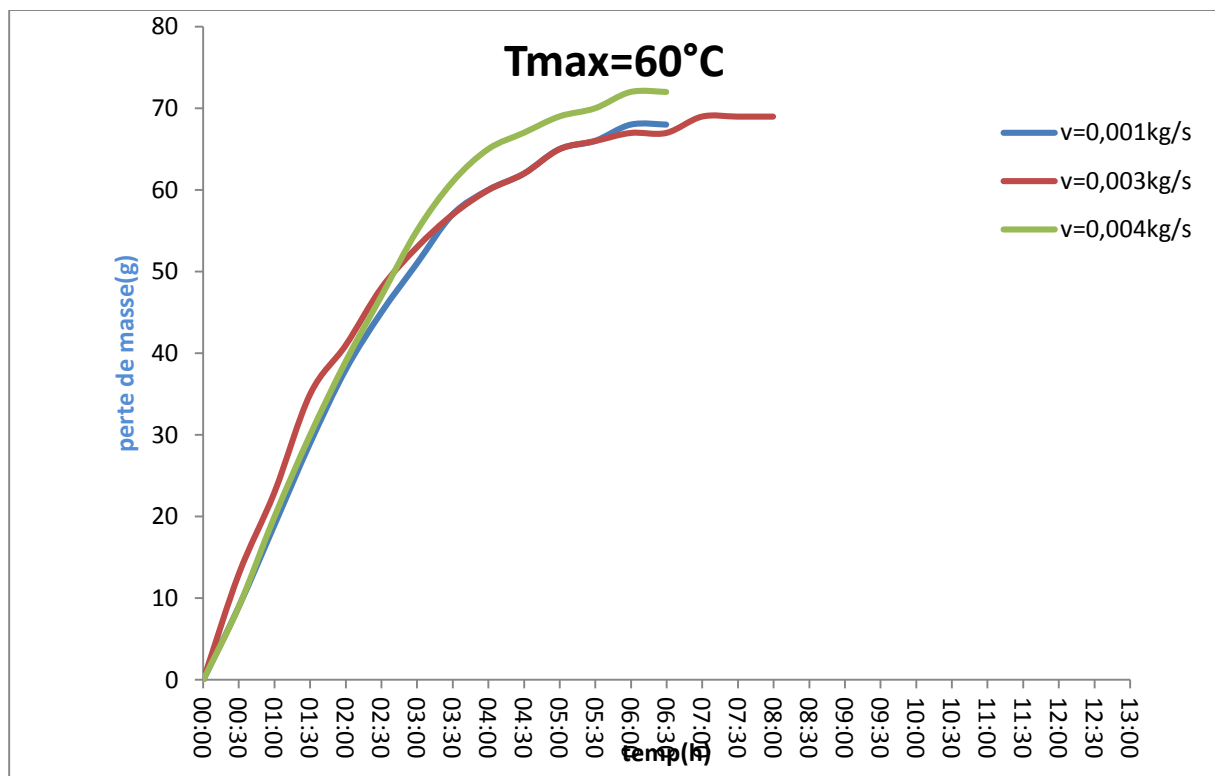


Figure (IV -11) : Effet du débit d'air sur la perte de masse du produit en fonction du temps de séchage. À une température 60°C

La perte de masse dans un séchoir solaire est présentée dans la figure 12, où l'on constate que le temps de séchage atteint (9 heures et 37 minutes) avec une masse de 56 g.

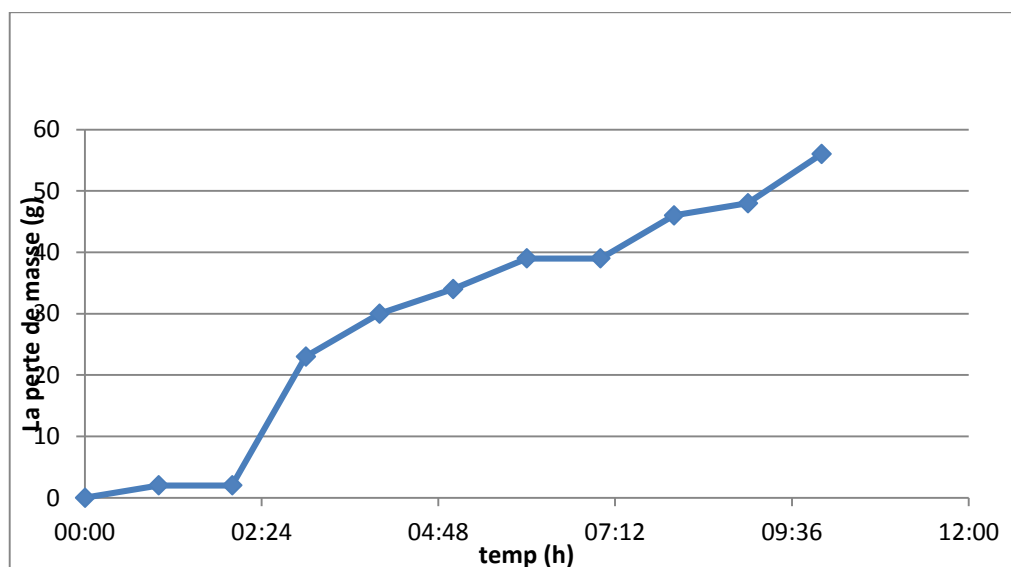


Figure (IV -12) : Evolution de la perte de masse des petits pois en fonction du temps dans un séchoir solaire

Les figures ci-dessous présentent l'évolution de la vitesse de séchage en fonction (à base sèche) du temps de séchage a trois températures différentes 40 50 60 °C avec trois débits d'air différents pour chaque température 0,001 0,003 0,004 kg.

La forme de la courbe de vitesse de séchage par rapport aux courbes normales ne contient pas directement les phases de montée et de stabilité, partant directement de la valeur et décroissant jusqu'à leur disparition.

Dans la figure (IV -13), nous remarquons que la vitesse de séchage pour des débits différents est fluctuante pendant les 6 premières heures, et elle est plus élevée avec un débit de 0,004 jusqu'à la fin de l'expérience

Dans la figure (IV -14), on remarque qu'au début de l'expérience, la vitesse de séchage est élevée pour un débit de 0,004 kg/s et au milieu de l'expérience (4 heures) elle est plus élevée avec un débit de 0,003 kg/s.

Sur la figure (IV -15), la vitesse de séchage est supérieure avec un débit de 0,004kg/s et après environ 5 heures elle est presque la même pour les débits : 0,001 et 0,004Kg/s.

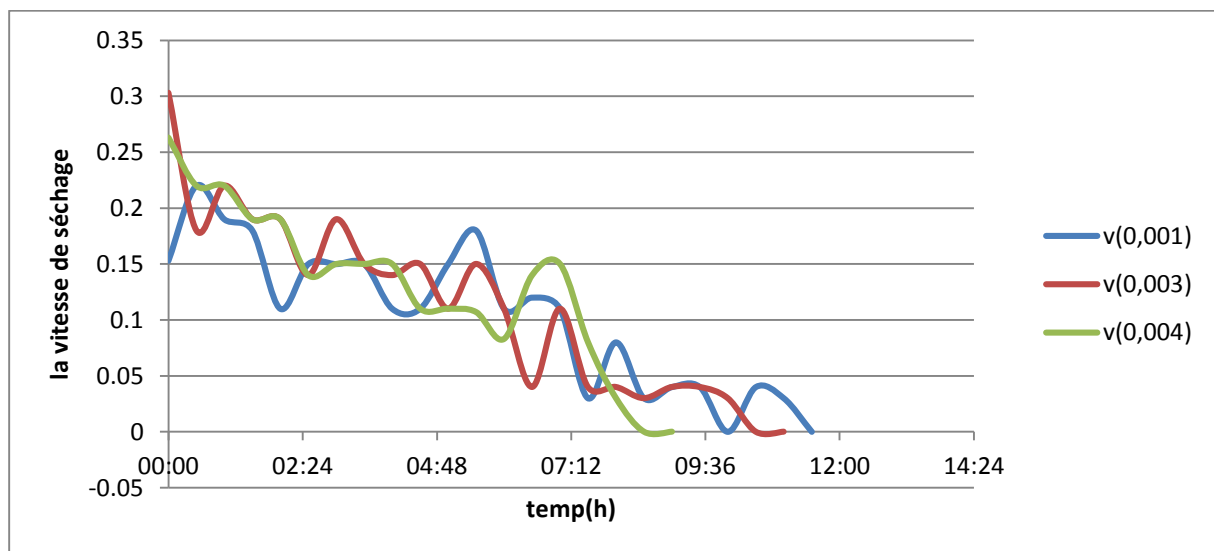


Figure (IV -13): variation de vitesse de séchage pour différents débits ($T= 40^{\circ}c$)

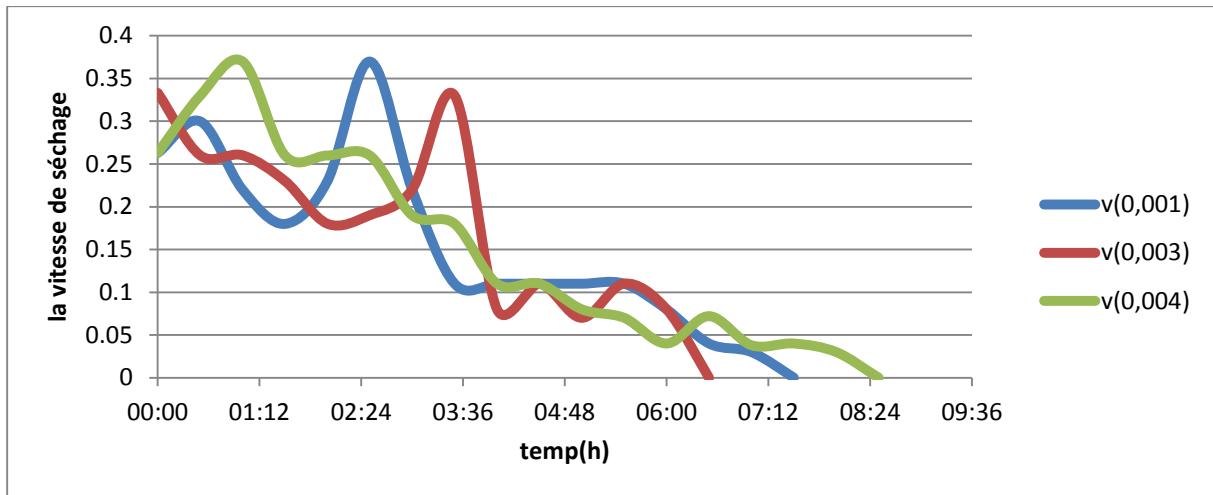


Figure (IV -14) variation de la vitesse de séchage pour différents débits d'air ($T= 50^{\circ}c$)

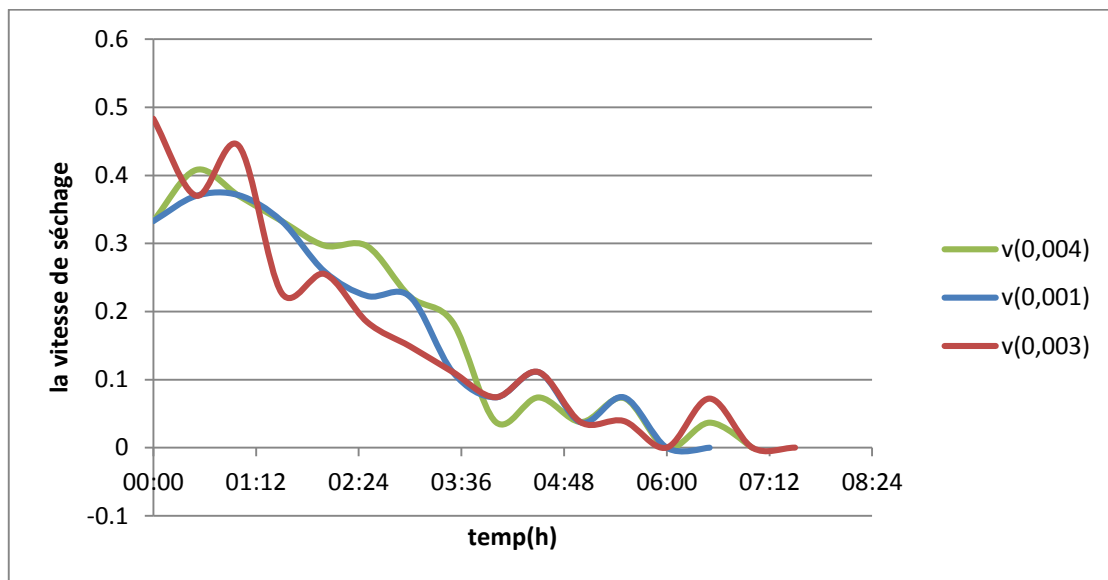


Figure (IV -15) variation de la vitesse de séchage pour différents débits d'air ($T= 60^{\circ}c$)

La figure (IV-16) représente l'évolution de la vitesse de séchage dans un séchoir solaire sur un débit de 0,004, où l'on constate une fluctuation de la vitesse de séchage

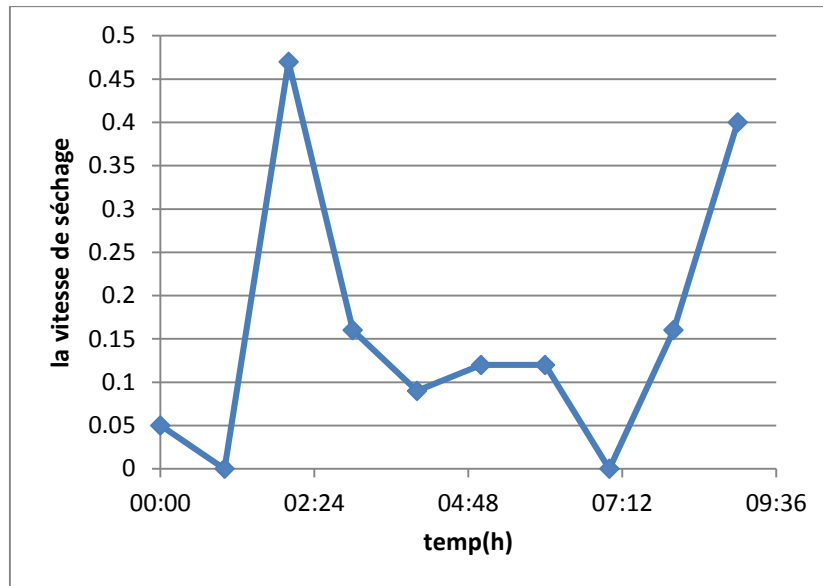


Figure (IV -16) - variation de la vitesse de séchage solaire en fonction de temps.

Les figures (IV-17) (IV-18) (IV-19) montrent l'évolution de la consommation électrique en fonction du temps de séchage

Nous constatons qu'il existe une relation directe entre la consommation et le temps de séchage Car il s'avère que la consommation d'électricité augmente avec l'augmentation de la température et du débit d'air

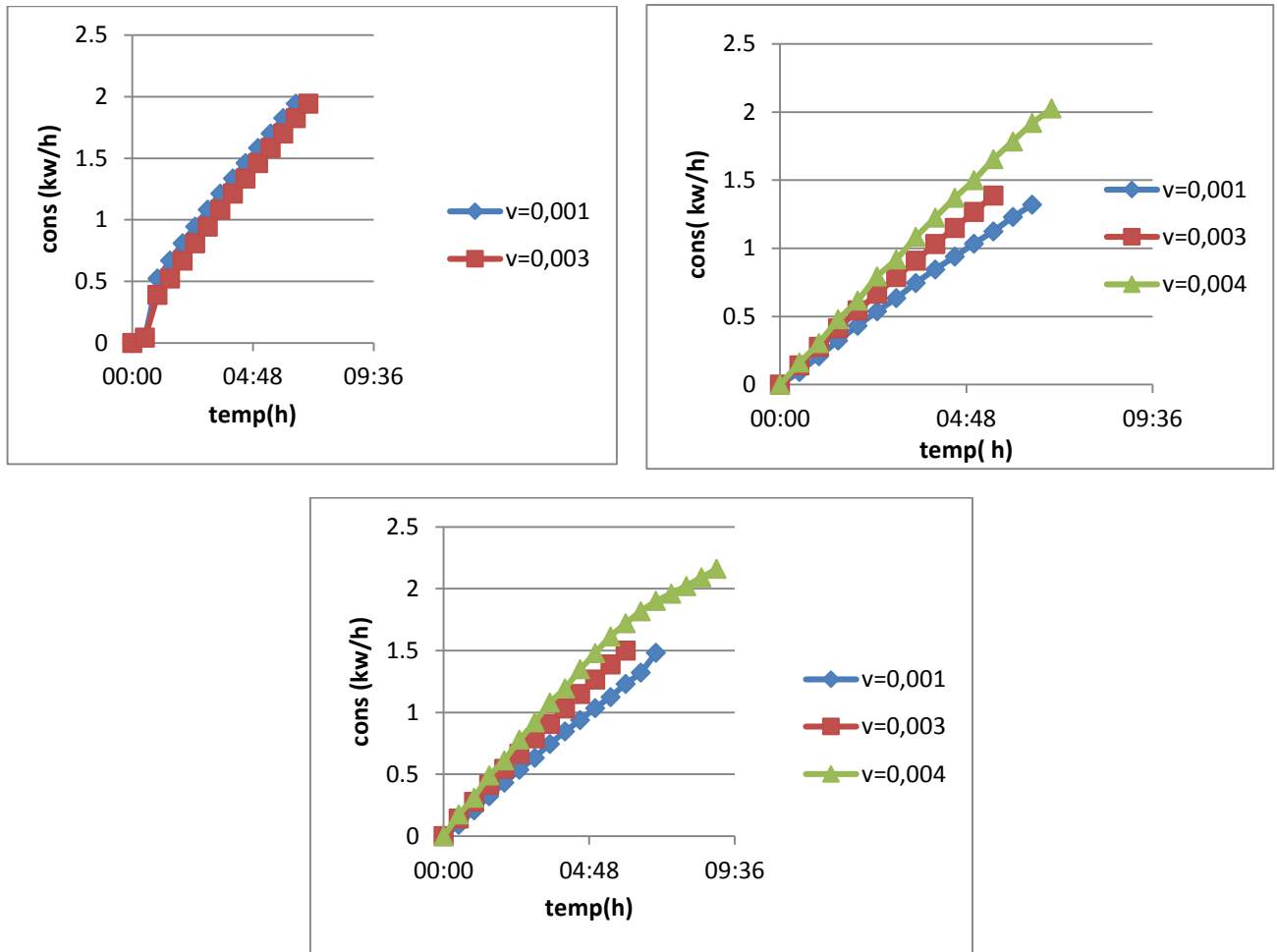


Figure (IV -17) - : Evolution de la consommation électrique en fonction du temps de séchage a température 40 ;50 ;60°C et débit 0.001 ;0.003 ;0.004kg/s

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons comparé un ensemble de courbes qui reflètent les facteurs les plus importants influençant le processus de séchage et qui évoluent progressivement dans le temps. L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier les différents changements qui se produisent dans les facteurs initiaux depuis le début du processus de séchage jusqu'à sa fin et de fournir des explications appropriées.

Il a été observé que ces facteurs s'influencent d'une façon synchronisée tels que la température et l'air chaud dans la chambre de séchage. D'autre part, nous avons constaté que la teneur en eau extraite est liée étroitement à ces deux paramètres, elle est le facteur principale pour déterminer le comportement de séchage.

Conclusion Générale

D'après l'étude et les résultats obtenus, on peut dire que le séchage au four permet d'améliorer les méthodes traditionnelles en protégeant les produits et en préservant leurs propriétés. Cette technologie est un procédé qui peut être utilisé aussi bien pour les besoins domestiques qu'industriels.

A l'issue de notre étude, nous pouvons conclure ce qui suit :

L'étude de la cinétique des pois secs a montré l'absence totale des étapes de montée et de stabilité qui partent directement de la valeur et de la courbure, comme c'est le cas pour la plupart des produits agricoles.

La teneur en eau et la vitesse de séchage ont été affectées par plusieurs paramètres (la température de l'air, la vitesse d'air).

L'augmentation de la température de l'air de séchage fait diminuer le temps de séchage et augmente la vitesse de séchage.

L'effet de la vitesse de l'air est moindre en comparaison avec l'effet de la température, ceci est dû à la baisse de température du produit (refroidissement) causée par l'augmentation de la vitesse de l'air asséchant.

Ces résultats expérimentaux nous ont permis de choisir les conditions optimales de séchage de 60°C et le débit d'air 0,004Kg/s.

Le séchage par étuve est meilleur que le séchage au soleil à l'air libre car il n'est pas affecté par les conditions climatiques.

Références Bibliographiques

- [1] Heldman, D. R., D. B. Lund, et al. (2006). Handbook of food engineering, CRC press.
- [2] Lahmari et al., 2012: "Influence des méthodes de séchage sur la qualité des tomates séchées (variété Zahra)."
- [3] agricultureegypt.com موسوعة عالم الزراعة المصرية
- [4] Boussalia Amar Contribution a l'étude de séchage solaire de produits agricoles Locaux. . Mémoire de magister. Université Mentouri - constantine(2010)
- [5] Techniques de l'ingénieur – génie des procédés Séchage Théorie et calculs. Par André charreau et Roland cavailé, j 2480-2 ; 2480-22.[6] A. Bondil, J. Hrabovsky Isolation thermique, tome ,edition Eyrolles Cité par N. Chalal
- [7] LyesBennamoun. (2001) Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local Magister, Université de Mentouri Constantine, Faculté des Sciences, Département de physique
- [8]Aspects de modélisation et de simulation. Thèse de doctorat, université de Pan et des pays de l'Adour, école doctorale des sciences exactes et de leur application
- [9]https://www.academia.edu/31550977/D%C3%89FINITION_DE_LHYGROM%C3%89TRIE_a_-Humidit%C3%A9_absolue
- [10] W. Belachi, Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires. Mémoire de magister. Université KasdiMerbah- Ouargla(2009).
- [11] H. Ben cheikch,M.OuldSidimed et Y.Draoui, Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif. Mémoire de l'ingénieur d'état. Université KasdiMerbah – Ouargla. (juin 2011).
- [12] Bahadj Ahmed Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre. Mémoire de master, KasdiMerbah- Ouargla(2014).
- [13] D. SCHNELL Technique du séchage.
- [14] N.Nadir, Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire. Mémoire de magister, université KasdiMerbahOuargla(2009)

[15] <http://www.legi.grenoble-inp.fr/people/Philippe.Marty/cours-thermique->

[16] <https://bu.umc.edu.dz/theses/gclim/CHA4972.pdf>

[17] J.J.Bimbonet Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires.

[18] Nguyen, 2016: "Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux."

[19] ABensedik, Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée. Mémoire de magister. Université Abou-BekrBelkaid-Tlemcen. (2011)

[20] BEN LAHBIB ALAEDDINE - SAOULI NADIR Contribution à l'amélioration du rendement thermique des capteurs solaires plans à air dans la région sud Algérien (Ouargla) . Mémoire de master, KasdiMerbah- Ouargla(2016).

[21] S.Chouicha, Etude expérimentale du séchage solaire Des dattes humides et impact Sur la qualité. Mémoire de magister. Université KasdiMerbah- Ouargla(2010 - <HTTPS://WWW.B2BPLAST.FR/SECHAGE/>

[22]

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ffr.vwr.com%2Fstore%2Fproduct%2F599351%2Fpompe-a-vide-chimique-a-membrane-a-sechage-automatique-pour-gaz-humides-sd-820&psig=AOvVaw0bymUS1aLH1UwRCVWikKVn&ust=1653170075313000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKEwjbiYHKiO_3AhVO4BoKHYkIC5EQr4kDegUIARD-AQ.

[23] http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=S%C3%A9choir_solaire.

[24] Vasseur, 2009 : "Séchage: principes et calcul d'appareils-Séchage convectif par air chaud (partie 1).

[25] CHAFOU Noura, KHABBAR Omnia Etude expérimentale de séchage Solaire de tomate dans un séchoir Indirect à convection naturelle. Mémoire de master, Université KasdiMerbah- Ouargla(2016).

[26]: BEN LAHBIB ALAEDDINE - SAOULI NADIR Contribution à l'amélioration du rendement thermique des capteurs solaires plans à air dans la région sud Algérien (Ouargla) .Mémoire de master, Kasdi Mer bah- Ouargla(2016).

[27] <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/18607/1/BENAMMAR-GOURI.pdf>

[28] H.R. Bolin, C.C. Huxsoll and D.K. Salunkhe, 'Fruit Drying by Solar Energy', Confructa, Vol. 25, N°3/4, pp. 147-160, 1980.

[29] Ekechukwu, O. V. et B. Norton, 1999 : "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology." Energy conversion and management 40(6): 615-655.

[30] [https://www.ceas.ch/boutique/technologie/s%C3%A9choir-tunnel-](https://www.ceas.ch/boutique/technologie/s%C3%A9choir-tunnel-detail.html) detail.html

[31] A. P.Dudez, Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : Expériences et procédés., Paris (FRA): Guide Pratique - GRET (FRA), 1996, p. 159.

[32] N.Chalal, Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect. Mémoire de magister. Université Mentouri-Constantine(2007).

[33]<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/5124/5124-principe-solaire-thermodynamique.pdf>

[34] Boughali Slimane Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques 2010 université Hadj lakhder BATNA

[35] S,Babalis, &V, Belessiotis. Influence of drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. Journal of Food Engineering (65), 449–458. (2004).

[36] (GoogleErth 2022-05-15)

[37] Mennouche, 2006 : "Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire." Mémoire de Magister, Université de Ouargla

[38] Saf Anis &Reddam Souad : Mémoire Technologies de séchage. Etude de cas : séchage de deux matrices végétales par étuve. Soutenu le : 20 juin 2018.

[39] [https://www.binder-world.com/fr/bon-a-](https://www.binder-world.com/fr/bon-a-savoir/etuve-de-sechage) savoir/etuve-de-sechage.

ملخص: هدفت دراستنا التجريبية إلى دراسة سلوك التجفيف لمنتج غذائي باستخدام فرن موجود في البهو التكنولوجي جامعة بسكرة. تتعلق هذه الدراسة بتجفيف كمية معينة من البازلاء، ونحن مهتمون بتأثير العوامل (تغير تدفق الهواء ودرجة الحرارة) على معدل التجفيف. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة سلوك التجفيف من خلال تأثير بعض العوامل المذكورة سابقاً. تم اختيار الظروف النهائية لمعدل التجفيف ودرجة الحرارة 60 درجة مئوية وتدفق الهواء 0.004 كجم / ثانية. أظهرت النتائج أن حركيات التجفيف تعتمد على تطور تدفق الهواء ودرجة الحرارة .

الكلمات المفتاحية: التجفيف مجفف شمسي، حساس طاقة شمسية ، درجة حرارة

Abstract: Our experimental study aimed to investigate the drying behavior of a food product using an oven located in the laboratory of the University of Biskra. This study concerns the drying of a certain quantity of peas, and we are interested in the influence of the factors (change of airflow and temperature) on the drying rate. The main objective of this work is to study the drying behavior through the influence of some previously mentioned factors. Final conditions were chosen for drying rate, temperature of 60°C and air flow of 0.004 kg/sec. The results showed that the drying kinetics depend on the evolution of the air flow and the temperature.

Keywords: Drying, solar dryer, solar air heater, temperature.

Résumé : Notre étude expérimentale visait à étudier le comportement au séchage d'un produit alimentaire à l'aide d'un étuve situé dans le laboratoire de l'Université de Biskra. Cette étude porte sur le séchage d'une certaine quantité de petits pois, et nous nous intéressons à l'influence des facteurs (débit d'air et température) sur la vitesse de séchage. L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement de séchage à travers l'influence de certains facteurs mentionnés précédemment. Les conditions finales ont été choisies pour la vitesse de séchage, la température de 60 °C et le débit d'air de 0,004 kg/sec. Les résultats ont montré que la cinétique de séchage dépend de l'évolution du débit d'air et de la température.

Les mots clés : séchage, séchoir solaire, teneur en eau, vitesse de séchage, température, humidité.

