



FACULTE DES SCIENCES NATURE ET DE LA VIE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**Master**

**Spécialité** : Contrôle et analyse des produits alimentaires

**THEME**

*Séchage et qualité des aliments par  
le procédé de séchage solaire (indirecte)  
dans une zone aride*

**Présenté Par**

Dadda Maroua

Medjouri Rayhana

Soutenu le : 27/09/2020, devant le jury composé de :

Chouana Toufik	MCB	Président	UKM Ouargla
Saadi Sid Ahmed	MAA	Examineur	UKM Ouargla
Henni Abdellah	MCA	Encadrant	UKM Ouargla

## **Remerciement**

---

*Nous remercions en premier lieu Allah le tout puissant pour toute la volonté et le courage qu'il nous a donné pour achever ce travail.*

*Au terme de la réalisation de ce travail, nous exprimons notre très grande gratitude à notre encadrant Monsieur « Henni Abdellah », il a largement contribué à l'évolution de ce travail.*

*Nous remercions particulièrement tous nos enseignants durant notre cursus universitaire et également Dr. Chouana Toufik et Mr. Saadi Sid Ahmed d'avoir fait partie de jury.*

*Nous remercions tout spécialement à nos familles et nos amis, qu'ont sus nous supporter et encourager tout au long de notre vie ainsi que pour leur aide inestimable, leur patience et leur soutien indéfectible.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.*

## *Dédicace*

---

Ce mémoire représente donc l'aboutissement du soutien, du sacrifice et des encouragements qu'elle m'a prodigués tout au long de ma scolarité. J'espère qu'elle trouvera dans ce mémoire toute ma reconnaissance et mon amour.

Avant tout, nous remercions nos parents qui ne cessent d'orbiter et de sacrifier pour notre bonheur.

A ma mère qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Sans elle, je n'aurais certainement pas fait d'études longues.

A mon père qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir.

A notre encadreur MS. HENNI ABDELLAH qu'aide-moi moralement et pratiquement.

A mes sœurs: Hadia, Naoual, Somia, Fatima, Rima et Safa, Aya, Israa.

A mes frères: Soufiane, Md. El Habib et Djamel El Dinne.

A mon mari: Marouane.

A tous les membres de la famille *Medjouri* et *Dadda*, pour l'encouragement et le dévouement dont ils ont fait preuve.

A mes très chères amies: *Yousra, Nadja, Siham, Sirine, Souheila*.

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<i>Chapitre I. Généralités</i>	
<b>I.1 Définition de séchage.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Le but de séchage.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Les méthodes de séchage.....</b>	<b>3</b>
I.3.1 Différentes méthodes de séchage.....	3
<b>I.4 Caractéristiques de l'air de séchage.....</b>	<b>4</b>
I.4.1 Humidité.....	4
I.4.2 Degré de saturation.....	5
I.4.3 Température.....	5
<b>I.5 Caractéristiques des solides humides.....</b>	<b>5</b>
I.5.1 Humidité absolue.....	5
I.5.2 Humidité relative.....	6
I.5.3 Hygroscopicité.....	6
<b>I.6 Caractéristiques d'un solide poreux.....</b>	<b>6</b>
<b>I.7 Modes de séchage.....</b>	<b>6</b>
I.7.1 Séchage par conduction.....	6
I.7.2 Séchage par convection (ou par entraînement).....	7
I.7.3 Séchage par rayonnement infrarouge.....	7
I.7.4 Séchage sous vide.....	7
I.7.5 Séchage par lyophilisation.....	7
I.7.6 Séchage par perte diélectrique.....	8
I.7.7 Séchage solaire.....	8
<b>I.8 Choix du procédé de séchage.....</b>	<b>8</b>
<b>I.9 Vitesse de séchage.....</b>	<b>9</b>
<b>I.10 Cinétiques de séchage.....</b>	<b>9</b>
<b>I.11 Périodes du séchage.....</b>	<b>9</b>
I.11.1 Période de mise en température (région a).....	10
I.11.2 Période à allure constante (région b).....	10
I.11.3 Période de ralentissement (région c).....	10
<b>I.12 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage.....</b>	<b>11</b>
I.12.1. Influence de la température de l'air.....	11
I.12.2. Influence de la vitesse de l'air.....	11
I.12.3. Influence de l'humidité de l'air.....	11

<b>I.13 Types des modifications de la qualité du produit à sèche.....</b>	<b>11</b>
I.13.1 Modifications biochimiques dues à la température.....	12
I.13.2 Pertes d'arômes et de couleur.....	12
I.13.3 Modifications physiques et mécaniques.....	13
I.13.4 La qualité sensorielle.....	14
I.13.5 La qualité nutritive.....	14
<b>I.14 Les classifications des séchoirs.....</b>	<b>14</b>
I.14.1 Les séchoirs solaires directs.....	14
I.14.2 Les séchoirs solaires indirects.....	17
I.14.3 Les séchoirs solaires mixtes.....	19
<b>I.15 Généralité de pomme de terre.....</b>	<b>20</b>
I.15.1 Composition.....	20
I.15.2 La valeur nutritionnelle.....	21
I.15.3 Récolte et conservation de la pomme de terre.....	22
<i>Chapitre II. Dispositifs et techniques expérimentaux</i>	
<b>II.1 Description du séchoir solaire.....</b>	<b>24</b>
II.1.1 Capteur solaire expérimentale utilisée.....	24
II.1.2 Chambre de séchage.....	25
<b>II.2 Fonctionnement du séchoir solaire.....</b>	<b>26</b>
<b>II.3 Protocole expérimentale.....</b>	<b>26</b>
II.3.1 Forme de découpage des produits.....	27
II.3.2 La disposition du produit.....	27
<b>II.4 Appareillage de mesures.....</b>	<b>29</b>
II.4.1 Mesure du rayonnement solaire.....	29
II.4.2 Mesure de la vitesse et de la température de l'air dans le séchoir.....	29
II.4.3 Mesure de la température du produit.....	30
II.4.4 Mesure de l'humidité de l'air.....	30
<i>Chapitre III. Analyse et synthèse des résultats théorique</i>	
<b>III.1 La variation de la température d'ambiante et température de la chambre en fonction de temps.....</b>	<b>31</b>
<b>III.2 Variation de températures (entrée-sortie) du capteur et du rayonnement solaire en fonction de temps.....</b>	<b>32</b>
<b>III.3 Teneur en humidité.....</b>	<b>32</b>
<b>III.4 Effet du séchage sur le sucre réducteur.....</b>	<b>33</b>

<b>III.5 Effet du séchage sur le pH des tranches de pomme de terre.....</b>	<b>34</b>
<b>III.6 Effet du séchage sur le changement de couleur des tranches de pomme de terre...</b>	<b>35</b>
<b>III.7 Variation de la teneur en eau en fonction de temps.....</b>	<b>36</b>
<b>III.8 Vitesse de séchage au cours de temps.....</b>	<b>37</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>38</b>
<b>Références.....</b>	<b>39</b>

## Liste des figures

FIGURE I. 1 :PERIODES DU SECHAGE. ....	9
FIGURE I. 2 : EFFETS MECANIQUES DU SECHAGE. ....	13
FIGURE I. 3 :LE SECHOIR SOLAIRE COFFRE.....	16
FIGURE I. 4 :LE SECHOIR SOLAIRE INTEGRAL.....	16
FIGURE I. 5 :LE SECHOIR SOLAIRE COQUILLAGE A TROIS CLAIES.....	17
FIGURE I. 6 :SECHOIR SOLAIRE CABANE [51].....	17
FIGURE I. 7 :SECHOIR SOLAIRE ARMOIRE. ....	19
FIGURE I. 8 :SECHOIR SOLAIRE A CIRCULATION NATURELLE DE TYPE 1(A) ET DE TYPE 2(B).....	19
FIGURE I. 9 :LE POURCENTAGE DES GENERAUX COMPOSITIONS CHIMIQUES DE POMME DE TERRE [47]......	21
FIGURE I. 10 :LES DIFFERENTES COMPOSITIONS NUTRITIONNELLES DANS LA POMME DE TERRE.....	22
FIGURE II. 1 : SECHOIR SOLAIRE INDIRECTE. ....	24
FIGURE II. 2 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE CAPTURE PLANE. ....	25
FIGURE II. 3 :CHAMBRE DE SECHAGE.....	26
FIGURE II. 4 : DECOUPAGE DU PRODUIT.....	27
FIGURE II. 5 : DISPOSITION DU PRODUIT.....	28
FIGURE II. 6 :PRODUIT SECHE. ....	29
FIGURE III. 1 :LA VARIATION DE LA TEMPERATURE D'AMBIANTE ET TEMPERATURE DE LA CHAMBRE EN FONCTION DE TEMPS (POMME DE TERRE) [8].....	31
FIGURE III. 2 :VARIATION DE TEMPERATURE DE L'AIR D'ENTREE, SORTIE DU CAPTEUR SOLAIRE ET LES RAYONNEMENTS SOLAIRES EN FONCTION DU TEMPS [49].....	32
FIGURE III. 3CHANGEMENTS DE TENEUR EN HUMIDITE [36].....	33
FIGURE III. 4 :LA TENEUR EN SUCRE REDUCTEUR DES POMMES DE TERRE FRAICHES ET SECHES [41].....	34
FIGURE III. 5 : PH DE LA POMME DE TERRE FRAICHE ET SECHE [41].....	35
FIGURE III. 6 : EFFET DU SECHAGE SUR LE CHANGEMENT DE COULEUR TOTAL DE LA POMME DE TERRE SECHE [36].....	36
FIGURE III. 7 : LA VARIATION DE LA TENEUR EN EAU EN FONCTION DE TEMPS [46].....	36
FIGURE III. 8 : LA VITESSE AU COURS DE TEMPS [46].....	37

**Liste des tableaux**

TABLEAU I. 1: LES DIFFERENTES COMPOSITIONS DE POMME DE TERRE. ....22



# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

De nombreux produits agricoles, consommés en grandes quantités ne sont pas toujours disponibles au cours des saisons. Plusieurs solutions sont proposées pour pallier à ce handicap : Culture sous serre, congélation, conservation par séchage. Le recours au séchage s'avère une solution simple, sûre et adéquate pour un grand nombre de produits [16]. En Algérie, comme dans le reste du monde, le solaire apparaît comme une solution adéquate pour faire face à la croissance économique d'un pays.

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, dattes, henné, menthe...) se prête parfaitement à une conservation par séchage pour assurer une continuité dans leurs disponibilités et permettre leur transport à moindre coût [1].

Le séchage solaire est 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. L'opération de séchage est une opération dévoratrice d'énergie. Dans les pays développés environ 12 à 25% de la demande totale d'énergie primaire est consacrée au séchage. La perte des produits agricoles dans les pays en voie de développement due à une surproduction pendant la période des récoltes et au manque de moyen de stockage s'élève à l'environ de 30 à 40% de la production globale.

L'objectif principal du séchage des aliments est la réduction de leur teneur en eau pour prolonger leur conservation, réduire les besoins d'emballage et réduire le poids pour diminuer les coûts du transport .

Le séchage ou déshydratation est une étape importante dans l'industrie chimique et alimentaire. Elle a été l'un des processus les plus communément utilisés pour améliorer la stabilité des aliments, par la diminution de l'activité de l'eau du produit, la réduction de l'activité microbologique, et la minimisation des changements physiques et chimiques intervenant pendant le stockage.

Le séchage des fruits et légumes est l'un des processus des grands consommateurs d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduire des pertes après la récolte. D'un point de vue économique, l'utilisation des séchoirs solaires est la solution préférée car ils sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles et peuvent fonctionner par convection forcée ou naturelle.

Le séchage solaire des récoltes fruits et légumes offre une alternative intéressante pour la valorisation des surplus dans les pays en voie de développement car les marchés locaux sont souvent saturés en période de pleine production.

Le présent manuscrit comporte trois chapitres :

Le premier chapitre présente des notions théoriques de généralité sur le séchage et les paramètres d'influence sur ce phénomène, généralité sur le produit étudié (pomme de terre) ainsi que les différents modes de séchoir solaire.

Le deuxième chapitre traite le séchoir solaire et son comportement : La forme, la masse, la disposition des produits.

Le troisième chapitre est consacré aux essais expérimentaux effectués sur le capteur solaire déjà réalisé sur la pomme de terre dans un séchoir solaire indirecte naturel ou forcée .

Enfin, ce travail s'achève par une conclusion générale qui récapitule l'essentiel des résultats obtenus au cours de cette étude.

# **Chapitre I. Généralités**

## **PARTIE 1 : GENERALITE DE SECHAGE**

### **Définition**

Le séchage est une opération importante dans le secteur agro-alimentaire et industriel, il consiste à l'évaporation partielle ou totale de l'eau d'un produit humide [39]. Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide [5].

Il s'agit d'une technique faisant intervenir des transferts simultanés de chaleur et de masse entre le produit et l'air environnant [17].

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année). L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique [53].

### **Le but**

Le but de séchage pour éliminer ou bien évaporé la teneur en eau sous l'action de la chaleur [24]. Le liquide qui accompagne un solide, soit de rendre ses qualités mécaniques ou physico-chimiques initiales, soit de faciliter son stockage et sa conservation dans les conditions ambiantes [12].

### **Les méthodes de séchage**

Cette opération est assurée par plusieurs méthodes par 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 isolé thermiquement pour assurer la continuité de l'opération de séchage [27].

#### **II.1.1 Différentes méthodes de séchage**

- a) Séchage mécanique :** C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation, compression et filtration) [55].
- b) Séchage chimique :** C'est un procédé basé sur l'utilisation des produits déshydratants par équilibre osmotique pour extraire l'eau (chlorure de calcium, ...) [2].
- c) 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 externe, 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 [26].

## Caractéristiques de l'air de séchage [53]

### II.1.2 Humidité

L'humidité de l'air de séchage a une influence directe sur la cinétique de séchage. Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, qui doit être éliminé au cours du séchage pour la stabilisation des aliments et la réduction de l'activité microbiologique.

#### a) Humidité absolue

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

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (I.1)$$

#### b) Humidité relative

Les principaux facteurs qui influencent la qualité d'un produit sec sont le temps de séchage, la température et l'humidité relative de l'air de séchage. Après le passage d'elle sur le produit reste comprise entre 60-80 % pour éviter le croûtage d'un côté et le développement microbien de l'autre. L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport suivant pris à la même température.

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

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

$P_s$  : Pression de saturation.

### II.1.3 Degré de saturation [29]

Soit  $H_a$  la valeur de l'humidité d'un gaz pour une certaine température et  $H_{as}$  la valeur de l'humidité correspondant à l'état de saturation pour la même température; on appelle degré de saturation d'un gaz, le rapport :

$$\psi = \frac{M_a}{M_{as}} \quad (I.3)$$

### II.1.4 Température

Le temps de séchage est largement réduit par l'élévation de la température de l'air du séchage, mais il existe une température maximale pour chaque produit qui ne pas être dépassée sinon elle provoque une dégradation importante de la qualité attribuée aux aliments tel que : *La couleur, les nutriments, la flaveur, la texture.*

**a) Température sèche :** Elle est définie comme étant la température réelle de l'air humide, observée à l'aide d'un capteur, une sonde de température ou par un thermomètre non affecté par l'humidité d'air. Il s'agit de la température d'un gaz au sens courant [2].

**b) Température humide du gaz :** La température humide (ou température de bulbe humide) c'est la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. La température humide dépend de la température sèche de l'air et de l'humidité comprise dans cet air [2].

### Caractéristiques des solides humides

#### II.1.5 Humidité absolue

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau ou humidité à base sèche s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche [44].

$$H_a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (I.4)$$

Pour chaque produit, il est possible de définir une valeur optimale de  $X_{fin}$  pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles et organoleptiques.

### II.1.6 Humidité relative

L'humidité relative d'un solide appelée aussi teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide [44].

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

### II.1.7 Hygroscopicité

C'est la capacité de certain corps à absorber facilement les molécules d'eau ; donc une substance hygroscopique est une substance qui a tendance à absorber l'humidité de l'air par absorption ou adsorption [59].

### Caractéristiques d'un solide poreux

Les caractéristiques du solide sont liées à la taille et la distribution des pores ou des canaux poreux, cette taille va conférer au matériau des caractéristiques mécaniques et thermo-physiques particulières. Donc il est nécessaire de bien connaître l'état du produit à sécher, au cours de séchage, pour infléchir les contraintes liées à l'environnement séchant et pour permettre au produit d'arriver au bout de l'opération tout en ayant gardé ses qualités [19].

### Modes de séchage

Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur [11], ou bien selon le mode de chauffage de la matière à sécher par les types de séchage suivants :

### II.1.8 Séchage par conduction

Le produit à sécher est mis en contact direct avec une paroi solide chaude où la chaleur est apportée au produit par conduction à travers cette paroi, puis par conduction dans le produit. Ce mode de séchage est très utilisé dans l'industrie du textile et de la papeterie [33].



### **II.1.9 Séchage par convection (ou par entrainement)**

Elle consiste à transférer la chaleur au produit à l'air d'un courant d'air chaud. Ce mode de séchage représente plus de 85% des séchoirs industriels [10] et il est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

### **II.1.10 Séchage par rayonnement infrarouge**

Un rayonnement infrarouge IR est appliqué sur le produit. Il permet un chauffage rapide des produits en couches minces (500 $\mu$ m). La génération du rayonnement se fait soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes qui est spécifique au transfert de chaleur, se fait par propagation d'une onde électromagnétique et par le générateur de micro-onde) soit par élévation de la température d'un émetteur IR. Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible [48]. Ce mode est très appliqué dans l'industrie des peintures.

### **II.1.11 Séchage sous vide**

Le point d'ébullition d'un liquide s'abaissant lorsqu'on diminue la pression, le séchage réalisé sous vide provoque l'ébullition rapide du liquide à éliminer. L'opération qui s'effectue alors par vaporisation s'en trouve accélérée et la durée du séjour de la matière dans le séchoir écourtée. Ce mode opératoire rend ainsi possible le séchage de substances thermosensibles, difficile à traiter sous pression normale, en raison du séjour plus ou moins long qu'elles devraient subir à température élevée [54].

### **II.1.12 Séchage par lyophilisation**

La lyophilisation est un séchage s'effectuant sous une pression très réduite, elle combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation. Cette méthode de séchage étant évidemment très onéreuse ne peut s'appliquer qu'à des matières bien déterminé en raison de leur fragilité à la chaleur et donc ne supportent pas les méthodes habituelles de séchage, par exemple : *Les substances biologiques* (plasma sanguin, cellules...), *produits pharmaceutiques* (antibiotiques) et *produits alimentaires* (café, lait, jus de fruit...) [54].

Les cristaux de glace sont ensuite enlevés de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur [33].

### II.1.13 Séchage par perte diélectrique

Le séchage par pertes diélectriques est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectrique). On l'obtient en plaçant la matière à sécher dans un champ électrique alternatif à très haute fréquence (1 à 30MHz). Un tel champ existe entre les armatures d'un condensateur plan relié à un générateur. Sous l'action de ce champ, les molécules du diélectrique se polarisent et sont contraintes de changer de polarité à chaque alternance. Ce changement de polarité provoque des vibrations mécaniques des dipôles moléculaires qui causent des frictions inter atomiques et intermoléculaires engendrant de la chaleur qui sert à l'échauffement régulier de la matière [54].

### II.1.14 Séchage solaire

Il s'agit simplement de chauffer le produit par le rayonnement solaire direct (séchage direct) ou par l'intermédiaire d'un capteur solaire qui sert à capter et/ou concentrer le rayonnement solaire afin d'augmenter la température de l'air (séchage indirect). Ce mode de séchage est plus utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

Les différents modes de séchage cités ci-dessus, à l'exception du séchage solaire, sont de grands consommateurs d'énergie (10-15% de la consommation d'énergie industrielle mondiale [35]). De plus, ces processus sont difficiles à réaliser notamment dans les zones rurales où l'alimentation en sources d'énergie (l'électricité, gaz...) est souvent difficile. Donc l'utilisation de l'énergie solaire gratuite est utile et permet de réduire le coût du processus notamment dans les pays en développement.

### Choix du procédé de séchage

Les types des séchoirs utilisés pour sécher un produit donné sont basés sur le choix de l'appareil adéquat qui se fait alors en fonction de certain facteur [60] :

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

## Vitesse de séchage

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporée par unité de temps et de masse de solide sec ou tout simplement la limite du quotient de la différence de teneur " $\Delta m$ " par l'intervalle de temps " $\Delta t$ ". C'est la grandeur qui caractérise pratiquement l'allure du transfert. La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont [9]:

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse de l'air sécheur.
- Les conditions de mise en contact des deux phases ainsi que du mode de transfert de la chaleur [21].

## Cinétiques de séchage [17]

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

## Périodes du séchage

Si dans une opération de séchage on procède à la mesure de la masse du produit à intervalles réguliers, on obtiendra ce qu'on appelle courbe de vitesse de séchage. Sur cette courbe figure I.1, on distingue trois régions :

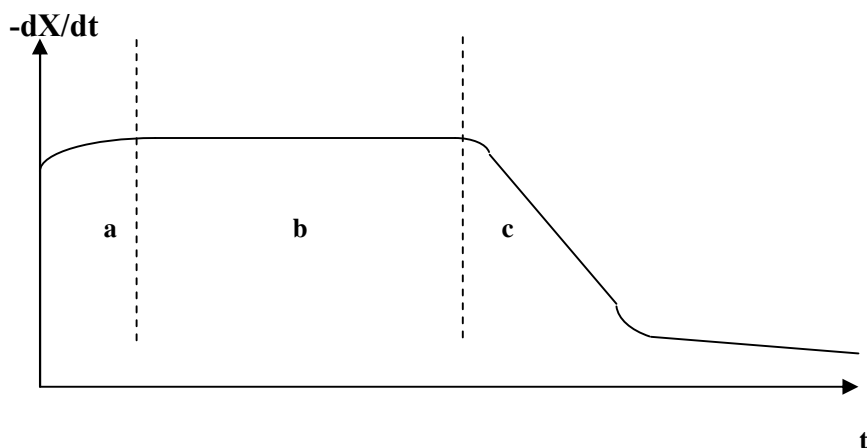


Figure I. 1 :Périodes du séchage.

### II.1.15 Période de mise en température (région a)

Quand un produit d'une température de surface  $T_s$  et d'une pression partielle de vapeur d'eau  $P_s$  est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur, si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement de produit. La période de mise en température est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grandes tailles, ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante [17].

### II.1.16 Période à allure constante (région b)

Cette période n'existe que si l'eau libre s'évapore en surface ; l'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide ; l'activité de l'eau ( $A_w$ ) à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaires à l'évaporation de l'eau sortant du produit [17,31].

### II.1.17 Période de ralentissement (région c)

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage, le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants [17] :

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

**b) L'épaisseur du produit :** Si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage.

**c) La diffusivité de l'eau dans le produit :** Elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

**d) La résistance mécanique des parois cellulaires intactes :** Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

**e) Le croutage :** Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région b) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

### **Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage [17]**

#### **II.1.18 Influence de la température de l'air**

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

#### **II.1.19 Influence de la vitesse de l'air**

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. La vitesse de l'air doit être suffisante pour assurer un bon séchage. Son influence sur la cinétique du séchage est compliquée, elle dépend de l'état du produit, de sa forme, de la section de brassage entre l'air et le produit, de la disposition du produit par rapport à la direction d'écoulement et de l'épaisseur de la couche de produit à sécher [58].

#### **II.1.20 Influence de l'humidité de l'air**

L'humidité de l'air de séchage a une influence directe sur la cinétique de séchage. Un air très humide limite le séchage et peut même conduire à une réhydratation du produit à sécher ; par contre, une hygrométrie très basse facilite l'élimination de l'eau [40].

### **Types de modifications de la qualité du produit à sécher**

L'opération de séchage doit être menée de telle façon que la qualité du produit ne sera pas fortement altérée à la fin de l'opération. La majorité des produits agroalimentaires sont modifiés par le séchage, le produit réhydraté diffère du produit initial et cela pour plusieurs raisons élucidées ci-dessous [54].

### II.1.21 Modifications biochimiques dues à la température

Une température élevée pendant un certain temps provoque sur les produits agroalimentaires ou biologiques des modifications, généralement considérées comme défavorables [53] et nuisibles à la qualité du produit [30], et sont nombreuses. Mais les principales modifications sont les suivantes :

- Réactions de Maillard (petit, 1964) : C'est une réaction biochimique (brunissement) non enzymatique résultant de combinaisons entre protéines et glucides en donnant un produit brun ou noirs et par des modifications du goût et de l'odeur de l'aliment. Outre le brunissement, ces réactions entraînent une perte nutritionnelle, notamment de lysine, il est en général indésirable à cause de la couleur qu'il donne au produit.
- Oxydations et dégradation des lipides qui vont s'oxyder, donnant un mauvais goût de rance et abaissant la qualité nutritionnelle de l'aliment. Ce phénomène est influencé par divers facteurs : L'oxygène, la lumière, le sel, le sang et certains métaux (fer, cuivre...) favorisent le rancissement.
- Destruction de vitamines : Notamment destruction de l' $\alpha$  et du  $\beta$ - carotènes.
- 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) [53].
- Réactions enzymatiques : Au cas où les enzymes n'ont pas été inactivées par un traitement préalable, genre blanchiment ou par réduire la température au cours du séchage, elle produit leurs effets de brunissement des polyphénols des produits séchés, hydrolyse des liquides, .... Etc [30].

### II.1.22 Pertes d'arômes et de couleur

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 qui est également éliminés du produit. Dans la plupart des cas, il s'agit des arômes que contiennent naturellement les produits biologiques destinés à l'alimentation [37]. En réalité toutefois, la perte d'arômes est moins important que celle à laquelle on pourrait s'attendre sur la base de leurs volatilités [53].

La couleur c'est l'apparence la plus importante attribuée aux aliments, puisqu'elle influence l'acceptabilité du produit par le consommateur. Beaucoup de réactions peuvent affecter la couleur durant le processus thermique des fruits et leurs dérivées. Les plus communes sont : La dégradation des pigments, le pH des fruits, l'acidité, la température, la durée du processus, la variété du fruit et la contamination par les métaux lourds [38].

### II.1.23 Modifications physiques et mécaniques

Le départ de l'eau du produit engendre un effondrement de celui-ci sur lui-même. La forme du produit séchée finale différent du produit initial [54]. Le séchage provoque chez la plupart des plantes des altérations physiques et mécaniques caractérisées par :

- 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 réhydrater.
- 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 [29].

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, et ces déformations ne sont généralement pas annulées lors de la réhydratation [53]. La rétraction est préjudiciable à la qualité du produit [54].

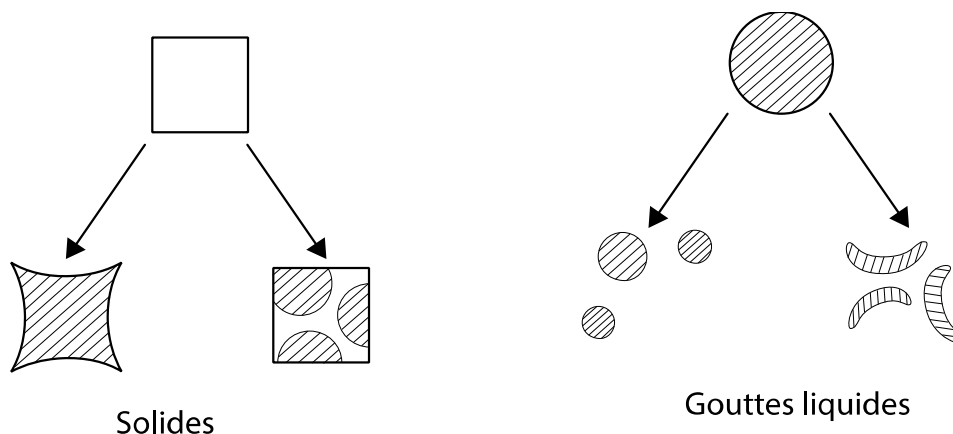


Figure I. 2 : Effets mécaniques du séchage.

### II.1.24 La qualité sensorielle

C'est une combinaison de différents sens de conception obtenu dans le choix et la consommation du produit. L'aspect jugé par l'œil, par exemple : *Couleur, taille, forme, uniformité et absence des déformations*. C'est un aspect important dans l'évaluation de la qualité du produit. Le sens du goût est limité à : *Doux, aigre, salé et amer*. La saveur implique les sens du goût, de l'arôme et de la sensation. La perte de saveur en produit sec est souvent due aux pertes volatiles. De même les réactions chimiques d'oxydation contribuent à la détérioration de la saveur [37].

### II.1.25 La qualité nutritive

Ceux-ci incluent des paramètres chimiques tels que le contenu de sucre, l'acide ou la vitamine C ascorbique, le contenu de bêta-carotène, et le contenu d'acidité avant et après le séchage. La vitamine C est infectée par les températures élevées ; la qualité nutritive inférieure indique la perte nutritive due aux températures de séchage plus élevées et à de plus longues périodes de séchage ; une acidité plus élevée indique la détérioration de qualité due à la fermentation [30].

### Les classifications des séchoirs

Le soleil est toujours considéré comme la source d'énergie renouvelable la plus importante au monde. Selon la forme d'énergie consommée, il y a des séchoirs électriques, des séchoirs à gaz, des séchoirs solaires et des séchoirs hybrides [12].

Il y a plusieurs types des séchoirs solaires développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité [42]. Elles sont classées généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement [52] en plusieurs catégories :

- Les séchoirs solaires directs.
- Les séchoirs solaires indirects.
- Les séchoirs solaires mixtes.

### II.1.26 Les séchoirs solaires directs

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples. Le rayonnement solaire est amplifié par l'utilisation d'un film plastique qui recouvre les fruits placés dans des claies



superposées. Ces séchoirs sont souvent fragiles à cause du film plastique qui se déchire facilement. Dans certains cas, il y'aura dégradation des qualités nutritionnelles et organoleptiques du fruit séché à cause de des températures élevées [6] [40].

### **Principe de fonctionnement**

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.

Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent, sert généralement de toit mais en peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles) [19]. Néanmoins l'interaction directe « rayonnement solaire – produit » engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments [7].

Les avantages de ce type de séchage:

- Bien meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Par besoin de main d'œuvre qualifiée.
- Grandes possibilités de conception [3].
- Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit [15].
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles [28].

Les inconvénients de ce type de séchage :

- Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et B, flétrissement, décoloration [7].
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.
- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments [56].

Il existe plusieurs types de séchoirs solaires directs :

a) **La boîte de séchage ou séchoir coffre** : Le séchoir à coffre est un simple séchoir facile à construire, il est destiné généralement pour la préservation des fruits, légumes, poissons et de la viande [20]. Un séchoir a généralement la forme d'une boîte rectangulaire contenant des claies de séchage. Ce type de séchoir leur usage a petit échelle (familial, petits groupements villageois) et aussi constructible par les producteurs.

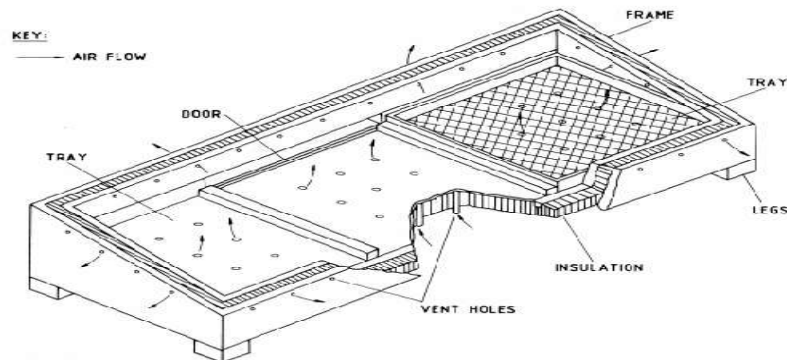


Figure I. 3 :Le séchoir solaire coffre.

b) **Le séchoir intégral à convection naturelle** : Le séchoir intégral (figure I.4) est un séchoir direct dont le produit est placé dans une chambre de séchage avec des parois transparentes. L'exposition directe au rayonnement solaire au produit augmente la maturation appropriée de couleur des fruits verdâtres, et permettant la décomposition de la chlorophylle dans le tissu [50].

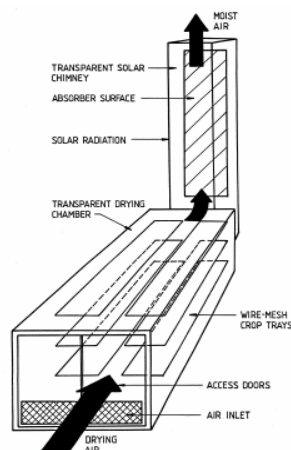


Figure I. 4 :Le séchoir solaire intégral.

c) **Le séchoir solaire "coquillage"** : Le séchoir coquillage est un séchoir solaire direct à convection naturelle, destinée à l'autoconsommation et à la vente locale. Il est essentiellement utilisé par les familles, les coopérations et les groupes de femmes. Ce type de séchoir leur efficacité dépend des conditions climatiques [19].

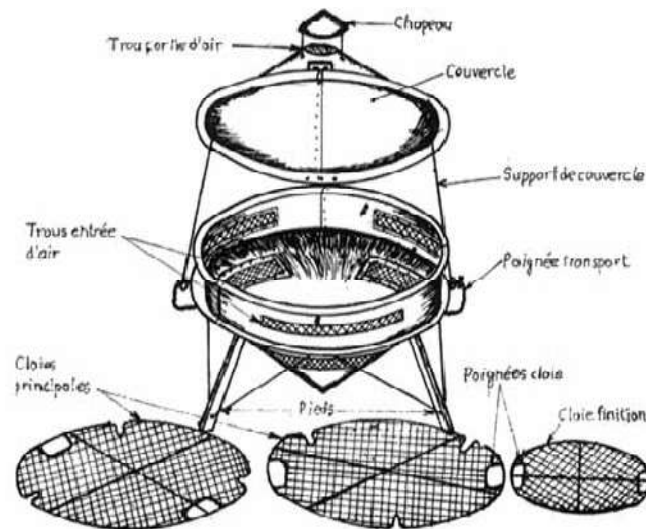


Figure I. 5 :Le séchoir solaire coquillage à trois claies.

**d) Le séchoir cabane :** Le séchoir cabane est caractérisé par une capacité de 35 kg de produit frais pour une surface de 7m<sup>2</sup> [51]. Il est caractérisé aussi par une meilleure protection contre les insectes, équipement démontable à la saison des pluies et une simple construction et fonctionnement, parmi les inconvénients de ce séchoir : Le coût est assez important, la nécessité d'une grande surface de polyéthylène et la prise au vent.

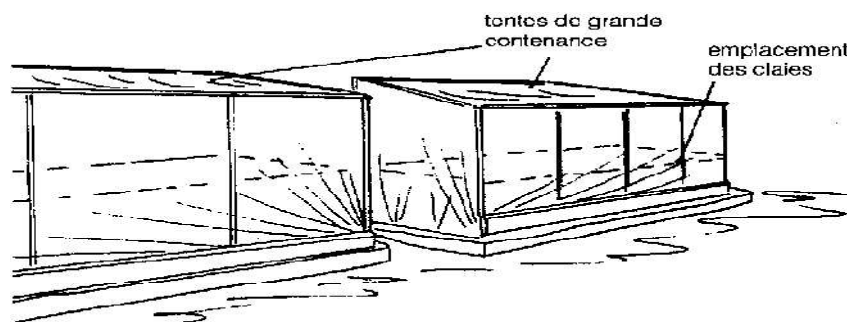


Figure I. 6 :Séchoir solaire cabane [51].

### II.1.27 Les séchoirs Indirects

Ce type des séchoirs est souvent plus compliqué que le séchoir direct, elles se composent essentiellement de deux parties : Un capteur solaire séparé et une unité de séchage.

Ce type des séchoirs peut être réalisé à des échelles diverses et il est surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire et particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont même mis à l'abri de la lumière entraînant une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment.

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.

Le séchoir solaire indirect consiste à faire circuler l'air chaud qui monte par convection naturelle ou forcée jusqu'à la chambre de séchage contenant les produits à sécher où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air [54], cet air est ensuite utilisé pour sécher les produits.

La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques [51] [3].

Les avantages de ce type de séchage:

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur, son aspect, et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit [15].
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles [28].

Les inconvénients de ce type de séchage :

- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Plus compliqué à réaliser [6].
- Cout important [53].

Il existe plusieurs types de séchoirs solaires indirects :

#### **a) Le séchoir armoire**

Ce modèle se compose d'un collecteur solaire et d'une chambre de séchage contenant des claies superposées ; l'air chaud s'élève jusqu'à la chambre de séchage où les produits sont disposés. La chambre de séchage protège les produits du soleil préservant aussi leur qualité [19].



Figure I. 7 :Séchoir solaire armoire.

### I.14.3 Les 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 [19].

Un séchoir mixte à circulation naturelle (figure I.9) aux mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect, mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empiète directement sur le produit comme le séchoir intégral [50]. Il ya aussi une autre conception se compose d'un capteur à air avec une pile de granit (joue le rôle d'un absorbeur et stockage d'énergie), recouvert d'une plaque de verre.

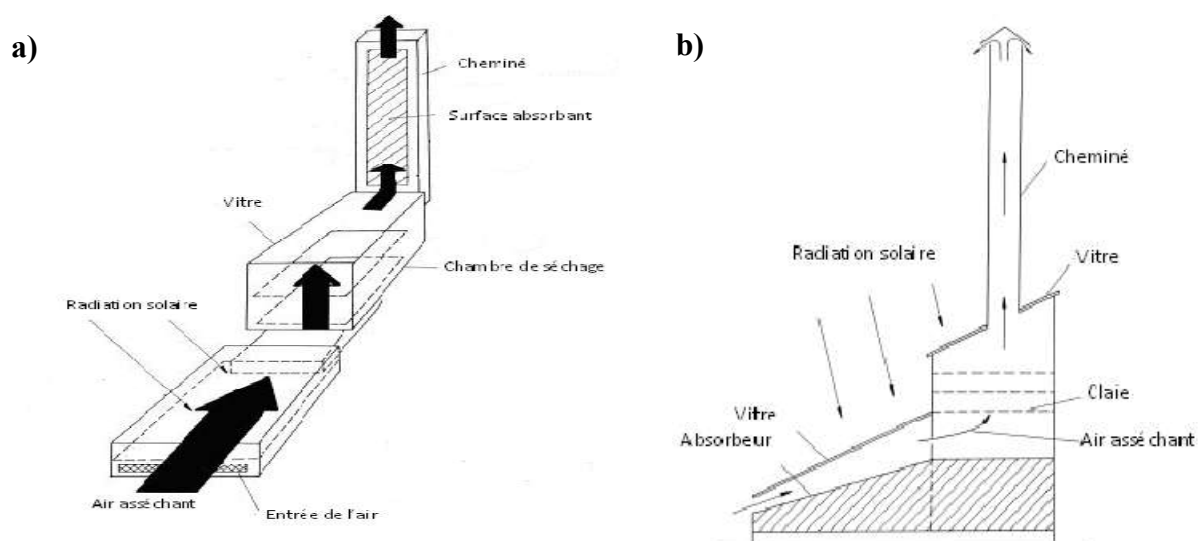


Figure I. 8 :Séchoir solaire à circulation naturelle de type 1(a) et de type 2(b).

## **PARTIE 2 : GENERALITE DE PRODUIT ETUDIE (POMME DE TERRE)**

### **Généralité de pomme de terre**

La pomme de terre est une plante très accommodante et adaptable, il est une plante herbacée de la famille des Solanacées. Elle est cultivée essentiellement, pour ses tubercules souterrains, charnus, jaunes, roses, rouges, violets ou presque noirs ; de formes différentes ; sphériques, longs, ovales, aplatis, en rognon. Les tubercules sont très riches en amidon, principalement utilisés en alimentation humaine, mais aussi en alimentation animale [2].

Si elle représente une bonne source de glucides complexes, elle offre également de bonnes teneurs en vitamine C et minéraux. La cuisson est par ailleurs nécessaire à la bonne assimilation de son amidon.

La zone originaire de la culture de pomme de terre se situe sur le haut plateau de la cordillère des Andes où les incas les cultivaient largement pour leur alimentation, ils la dénommaient Papa et conservaient d'une récolte à l'autre des tubercules séchés au soleil. C'est Francisco Pizarro, conquérant espagnol du Pérou, qui le découvre pour l'occident ; les premiers tubercules arrivent en Espagne au milieu du 16<sup>e</sup> siècle. La pomme de terre restent cependant encore longtemps une curiosité botanique pour les européens et ce sont entre autre des efforts de vulgarisation de Antoine Augustin Parmentier qui feront d'elle à partir des années 1780 un produit de consommation courante et fort utile en ces périodes des disettes en Europe. En Afrique, la pomme de terre a tout d'abord était importé d'Europe à la fins du 19<sup>e</sup> siècle par le missionnaire et ensuite par les administrations coloniales. Introduction des clones sud-américains est plus récente, les Centro International de la Papa (CIP) au Pérou jouent un rôle important en cet égard [13].

### **II.1.28 Composition**

La pomme de terre renferme 77% d'eau, contre plus de 90% pour les légumes verts. Son taux de glucides est de 3 à 5 fois plus important que celui de la plupart des légumes frais. Ces glucides sont essentiellement constitués d'amidon (90%), et de petites quantités de glucose, saccharose et fructose. Les protéines sont également bien représentées. Les lipides en revanche ne sont présents qu'à l'état de traces. La pomme de terre est source de vitamine C et de vitamines du groupe B, notamment *B1* et *B3*. Elle apporte aussi une quantité importante de minéraux : *Potassium*, *phosphore*, *magnésium* ; ainsi que de nombreux oligo-éléments : *Fer*, *zinc*, *cuiivre*, *manganèse*...

Ses fibres sont peu abondantes (1 g aux 100 g, contre 2,5 à 3,5 g pour les légumes verts). Elles se composent d'hémicelluloses et de pectines. Les pommes de terre rouges et violettes renferment également des antioxydants : Flavonoïdes (anthocyanines), lutéine et zéaxanthine [32].



Figure I. 9 : Le pourcentage des généraux compositions chimiques de pomme de terre [47].

### II.1.29 La valeur nutritionnelle

Dans sa présentation la plus simple, la pomme de terre apporte des principes nutritifs qui en font un produit presque indispensable à notre alimentation, et la base du régime alimentaire de plusieurs groupes culturels, la valeur nutritionnelle peut être affectée par les modes de préparation culinaires. C'est un aliment polyvalent, riche en hydrates de carbone, très populaire dans le monde entier. Fraichement cueillie, la pomme de terre contient environ 80 pour cent d'eau et 20 pour cent de matière sèche, dont 60 à 80 pour cent environ d'amidon. Sa teneur en protéines (en poids sec) est semblable à celle des céréales et très élevée par rapport aux autres racines et tubercules. En outre, la pomme de terre est pauvre en lipide (Anonyme, 2000b). C'est un légume riche en micronutriments, en particulier en vitamine C consommée avec sa peau, une pomme de terre de taille moyenne de 150 g couvre près de la moitié des besoins quotidiens d'un adulte (100 mg). C'est une source modérée de fer et son fort en teneur en vitamine C en favorise l'absorption. Les pommes de terre renferment des antioxydants, utiles dans la prévention des maladies liées au vieillissement, et des fibres alimentaires, essentielles au métabolisme. Leur valeur calorique est modeste, s'établissant entre 80 et 90 kcal (334 à 376 kJ) pour 100 g de pommes de terre.

Calcium	10 mg
Phosphore	50 mg
Magnésium	25 mg
Potassium	450 mg
Protéine	2000 mg
Amidon	15000 à 16000 mg
Sucres	500 mg
Lipides	100 mg

Tableau I. 1: Les différentes compositions de pomme de terre.

a) **Vitamine B** : Comme tous les aliments faisant partie des féculents, la pomme de terre contient des quantités notables en vitamines du groupe B.

b) **Vitamine C** : Elle en contient de 5 mg à 10 mg. La teneur en vitamine C dépend de la maturité de la pomme de terre. Plus on la conserve longtemps, plus sa vitamine C diminue (Anonyme, 2001a).

c) **Fibres** : La pomme de terre en apporte environ 2 g par ration de 100 g, ce qui équivaut à 15% des besoins quotidiens de fibres. Ce pourcentage peut se situer entre 20 et 25% si la peau est consommée (Anonyme, 2000b) [45]



Figure I. 10 :Les différentes compositions nutritionnelles dans la pomme de terre.

### II.1.30 Récolte et conservation de la pomme de terre

Le temps entre l'installation et la récolte ; 2 à 3 mois après plantation pour les hâtives, 4 à 5 mois pour les variétés tardives destinées à la conservation hivernale.

a) **Récolte** : Les tubercules de grande consommation ne doivent être arrachés qu'à maturité complète (fanes desséchées, peau surépaissie), sinon ils se conservent mal. Les variétés hâtives peuvent être récoltées à la mi-juillet, et les plus tardives à la fin de septembre ou au début



d'octobre. Celles destinés à la conservation se ramassent à maturité, lorsque les tiges sont séchées.

**b) Conservation :** Comme les tubercules fraîchement récoltés sont des tissus vivants, et par conséquent périssables, les conditions de stockage sont déterminantes : Elles doivent permettre d'éviter les pertes après récolte des pommes de terre, qu'elles soient destinées à être consommées fraîches ou à être transformées, et assurer des semences pour la prochaine saison de culture. Que les tubercules soient consommés frais ou transformés, ils doivent être stockés à l'abri de la lumière, sinon ils produisent de la chlorophylle (ils deviennent verts) et un alcaloïde toxique, la solanine. Les tubercules doivent être stockés à une température comprise entre 6 et 8 °C, dans un endroit obscur, bien aéré dont le taux d'humidité est relativement élevé, entre 85 et 90 pour cent. Les semences, en revanche, doivent être stockées à la lumière diffuse afin de pouvoir germer et former des bourgeons vigoureux [25]. L'augmentation de la production de la pomme de terre dans la région d'Oued Souf s'est réalisée en un temps très court, les capacités de stockage par les chambres froides n'ont pas suivi le même rythme. Pour prendre une solution de ce problème on propose le séchage thermique comme une solution de conservation ou de stockage de pomme de terre.

## **Chapitre II. Dispositifs et techniques expérimentaux**

## Description du séchoir solaire

Le séchoir solaire utilisé se divise 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 assurer que l'air chaud sortant du capteur entre directement dans la chambre de séchage [27].

Le séchoir solaire est une construction qui capte les rayons solaires pour sécher les aliments disposés à l'intérieur. Il a un potentiel important dans le secteur agricole, où il est utilisé pour déshydrater et sécher des légumes, des fruits et des plantes médicinales. Ainsi minimiser la dépendance sur le séchage au soleil et le séchage industriel, d'où économiser d'énormes quantités de fossiles [43].



Figure II. 1 : Séchoir solaire indirecte.

### II.1.31 Capteur solaire expérimental utilisé

Les capteurs solaires sont des appareils transformant l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique, on peut ensuite utiliser cette chaleur comme celle de toutes les sources usuelles de chaleur. Il existe deux principaux types des captures solaires [2]:

- Captures planes.
- Capture par concentration.

Pour notre séchoir, la capture solaire expérimentale utilisé est la capture plane « qui absorbent le rayonnement solaire au moyen d'un plaque (la longueur 60 cm, largeur 34 cm et la hauteur 22 cm) et des fines conduites, lorsqu'il traverse les conduit sa températures augment en raison de la chaleur reçue par l'absorbance » [2] [14].



Figure II. 2 : Représentation schématique d'une capture plane.

### II.1.32 Chambre de séchage

C'est une armoire qui abrite les produits et qui sert à les sécher. Elle est construite en contre-plaqué et elle est de hauteur de 55 cm, de largeur de 28 cm et de longueur de 38 cm.



Figure II. 3 :Chambre de séchage.

Cette chambre se termine par une cheminée (5 cm) servant à évacuer l'air humide extrait des aliments séchés. La chambre comporte aussi deux tiroirs qui servent à porter le produit à sécher [14].

Pour notre cas, nous avons choisi des plateaux de four (plat d'aluminium) pour éviter la déformation en cas de température élevées, ils sont de dimension 37,7 cm sur 20,8 cm avec des claies de dimension 6 cm.

### Fonctionnement du séchoir solaire

L'air frais capté de l'extérieur circule dans le capteur solaire par convection naturelle, il est chauffé avant d'arriver à l'entrée de la chambre de séchage, puis il continue son chemin (5 cm) à travers les claies superposées. Enfin l'air asséchant est évacué vers l'extérieur à travers la cheminée solaire.

### Protocole expérimentale

Notre travail consiste à déterminer la variation de la masse de produit (pomme de terre) durant le séchage, afin de suivre l'évolution des courbes de la variation de l'humidité relative des produits à sécher et la cinétique de séchage. D'autre part, pour mesurer la température de l'air asséchant à l'entrée et la sortie du capteur solaire.

La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale.

### II.1.33 Forme de découpage des produits

Avant le démarrage de l'opération de séchage, les tubercules de pomme de terre ont été pelés et lavés une première fois avec l'eau de robinet, puis une deuxième fois avec de l'eau distillée, puis coupées en rondelles d'une épaisseur de 0.2 cm, et elles ont été répartir sur la claie de séchage.



Figure II. 4 : Découpage du produit.

La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale souhaitée à une température de séchage inférieure ou égale à la température maximale tolérée par le produit ou la manipulation est arrêtée.

Les mesures de température, du rayonnement, et de la vitesse de l'air sont effectuées chaque 30 minute.

Le protocole expérimental consiste à réaliser quotidiennement le séchage de produit entre 9h et 17h. A la fin de chaque journée le produit est stocké dans un endroit sec pour prévenir toute réhydratation.

### II.1.34 La disposition du produit

Après le découpage de pomme de terre les échantillons sont posés sur des étagères où on' ont étalé sur les claies de la chambre de séchage. Elles ont été répartir à parts égales sur la claie de séchage.

L'air préchauffé au niveau du capteur solaire traverse les claies où est déposé le produit et le réglage de la position est assuré par l'utilisation d'une claie mobile. D'autre part, pour étudier l'effet de disposition du produit, par rapport à l'entrée de la chambre de séchage.



Figure II. 5 : Disposition du produit.

Après un temps nécessaire (3 Jours), nous avons obtenu de pomme de terre séchée avec une teneur en eau à base sèche.





Figure II. 6 :Produit séché.

## Appareillage de mesures

### II.1.35 Mesure du rayonnement solaire

Le capteur solaire à air est incliné pour un angle de  $31^\circ$ , et orienté en plein sud, le rayonnement solaire global reçu sur ce plan horizontal est mesuré en  $\text{kW/m}^2$  à l'aide d'un polarimètre.

### II.1.36 Mesure de la vitesse et de la température de l'air dans le séchoir

La vitesse et la température de l'air sont mesurées dans plusieurs endroits du séchoir solaire :

Entrée du capteur solaire : La mesure de la vitesse de l'air s'effectue à l'aide d'un anémomètre connecté à un appareil testo 435, et la mesure de la température à l'aide d'un thermomètre.

Sortie du capteur solaire : Les mesures sont effectuées à l'aide d'un appareil testo 445 muni d'un anémomètre pour la mesure de la vitesse de l'air, et d'une sonde pour la mesure de la température. Les résultats obtenus sont enregistrés sur un ordinateur.

Centre de la chambre : Les mesures sont effectuées à l'aide d'un appareil testo 425 muni d'une sonde pour la mesure de la température et de la vitesse de l'air.

Sortie du séchoir solaire : Les mesures de la vitesse et de la température de l'air sont effectuées à l'aide d'un anémomètre fixé à la sortie du séchoir solaire.



**II.1.37 Mesure de la température du produit**

Pour suivre l'évolution de la température à l'intérieur du produit, nous avons utilisé un appareil testo 945 muni d'un thermocouple piqué dans le produit, les résultats de mesures sont sauvegardés sur un P.C.

**II.1.38 Mesure de l'humidité de l'air**

Pour la mesure de l'humidité de l'air dans la chambre de séchage et à l'extérieur du séchoir solaire nous avons utilisé un hygromètre.

# **Chapitre III. Analyse et synthèse des résultats théorique**

Ce travail présente les résultats d'une étude théorique du séchage de pomme de terre dans un séchoir solaire indirect à convection naturelle, ce travail est déjà validé par plusieurs études sur la pomme de terre qu'après être sécher et broyée qui présentent un grand intérêt pour l'industrie alimentaire notamment pour la fabrication de farine [4].

Pour connaître le comportement du séchage de la pomme de terre dans un séchoir solaire indirect à convection naturelle [49] ; une synthèse bibliographique a été réalisée sur la distribution de température, la teneur en eau et l'humidité relative de l'air asséchant dans des zones arides.

### La variation de la température d'ambiante et température de la chambre en fonction de temps

La figure III.1 présente la variation de la température ambiante et température de la chambre de séchage en fonction de temps lors du séchage de la pomme de terre. D'après la figure, on observe que le séchoir solaire indirect à convection naturelle n'a pas une température de séchage stable, elle change sous la variation des conditions climatiques durant l'année (insolation, température ambiante ...).

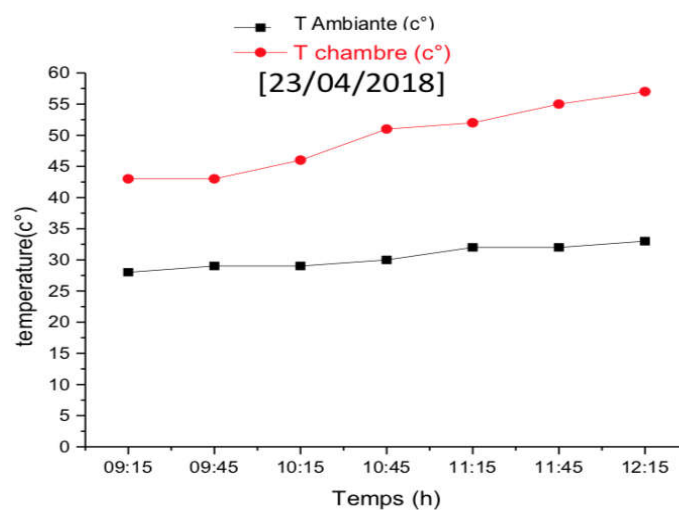


Figure III. 1 :La variation de la température d'ambiante et température de la chambre en fonction de temps (pomme de terre) [8].

D'après la figure III.1, on observe que la température de la chambre est supérieure de la température ambiante. Ainsi, on remarque augmentation relative dans les deux températures, par exemple, la température dans la chambre de séchage atteint 57° après 3 heures, alors que la température ambiante atteint seulement 33°.

### Variation de températures (entrée-sortie) du capteur et du rayonnement solaire en fonction de temps

La figure III.2 montre la variation de la température de l'air à l'entrée ( $T_e$ ) et à la sortie ( $T_s$ ) du capteur solaire, Ainsi que les rayonnements solaires.

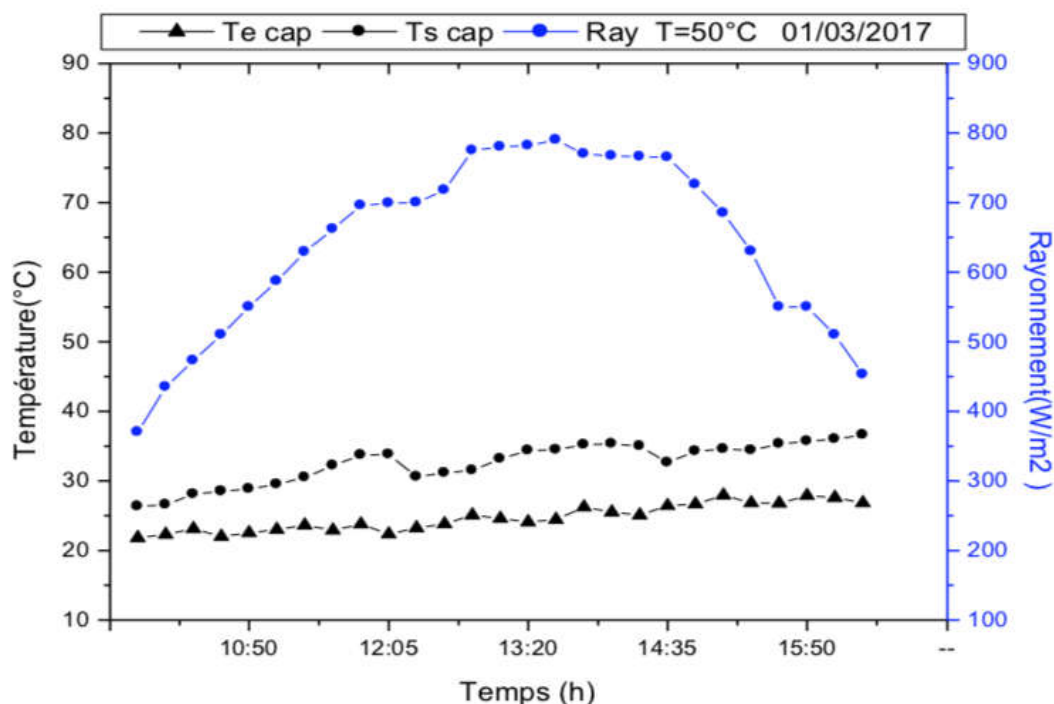


Figure III. 2 :Variation de température de l'air d'entrée, sortie du capteur solaire et les rayonnements solaires en fonction du temps [49].

L'évolution des rayonnements solaires globale sur la surface de captation est présentée sur figure III.2. On remarque que la puissance incidente augmente progressivement jusqu'à atteindre la valeur maximale de  $785 \text{ W/m}^2$  à 13h20, ensuite diminue.

Une différence entre  $T_e$  et  $T_s$  est expliquée rayonnement solaire transmis par la vitre et transformé en énergie thermique qui permet d'augmenter la température de l'air de séchage et donc la température de l'air à la sortie.

### Teneur en humidité

La teneur en eau a été déterminée à l'aide d'un analyseur d'humidité. L'appareil s'arrête automatiquement une fois que le poids de l'échantillon déshydraté devient constant. Les valeurs de masse de chaque échantillon avant et après déshydratation ont été mesurées par gravimétrie.

La teneur en humidité des échantillons a été calculée en utilisant l'équation III.1.

$$X_{t= \frac{M_t - M_d}{M_d}} \quad (III.1)$$

Où,  $X_t$  est la teneur en humidité sur une base sèche à l'instant  $t$ ,  $M_t$  est la masse (g) de matériau à l'instant  $t$  et  $M_d$  est la masse sèche du matériau (g).

La figure III.3 montre la variation de la teneur en humidité avec le temps pendant le processus de séchage. La teneur en humidité, mesurée était d'environ 82% (4,44 d.b), la teneur finale en eau de la pomme de terre était de 0,13 d.b. Le poids total moyen des produits séchés était de 400 g sur la grille pour chaque expérience. Le taux élevé de perte d'eau a été observé au cours des trois premières heures de séchage entre 9h00 et 12h00. A partir de 12h00, la perte d'eau est devenue moins importante jusqu'à la fin du processus de séchage [36]. La teneur en humidité à l'équilibre est une caractéristique du produit, qui dépend notamment des paramètres de l'air ambiant [34].

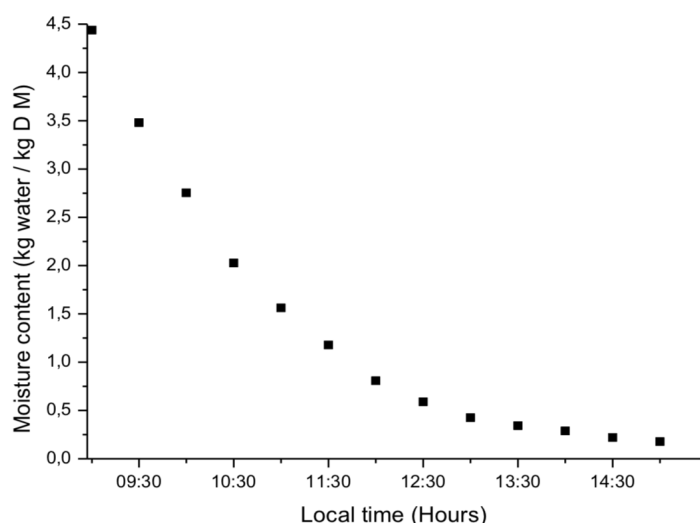


Figure III. 3 Changements de teneur en humidité [36].

### Effet du séchage sur le sucre réducteur

La teneur en sucre réducteur des pommes de terre est généralement déterminée par des méthodes chimiques très précises, comme la méthode de Bertrand [18]. Les valeurs obtenues sont présentées dans la figure III.4.

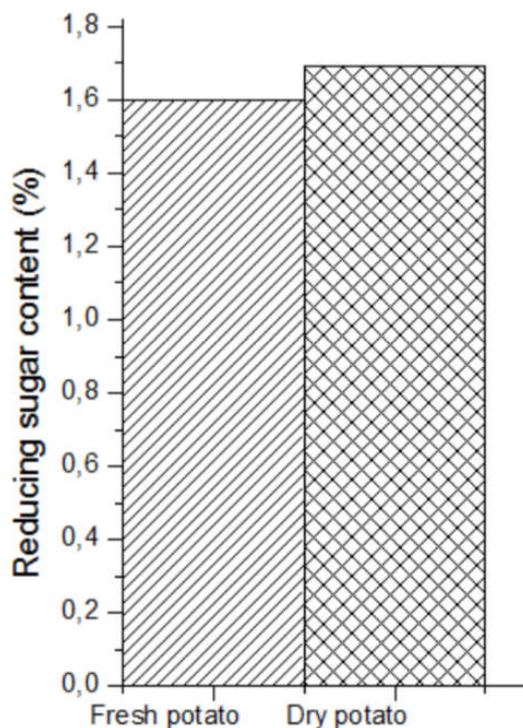


Figure III. 4 :La teneur en sucre réducteur des pommes de terre fraîches et sèches [41].

Les valeurs ont révélé que la teneur en sucre réducteur (fructose et glucose) était affectée par le processus de séchage. Il a été constaté que la teneur en sucre réducteur de la pomme de terre séchée (1,69 g / 100 g MS) est plus élevée que celle fraîche (1,60 g / 100 g MS).

#### Effet du séchage sur le pH des tranches de pomme de terre

Un autre paramètre de qualité a été déterminé à l'aide d'un pH-mètre. Une petite portion (4 g) de pomme de terre fraîche/séchée a été placée dans 200 ml d'eau distillée.

La figure III.5 représente la valeur du pH de la pomme de terre fraîche et de la pomme de terre sèche. On observe que le pH est similaire pour les deux cas (6,01).

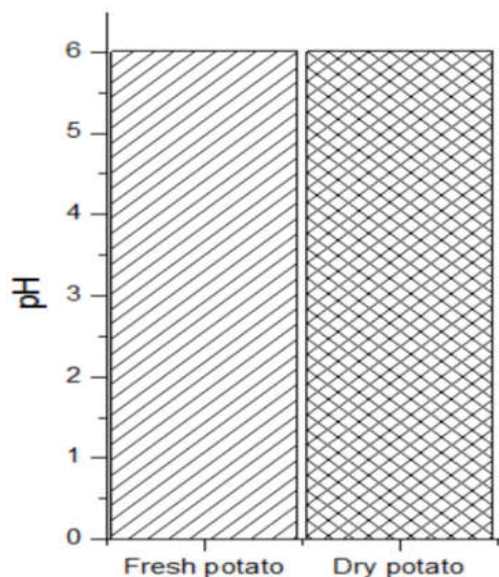


Figure III. 5 : pH de la pomme de terre fraîche et sèche [41].

### Effet du séchage sur le changement de couleur des tranches de pomme de terre

La couleur est visuellement considérée comme l'un des paramètres les plus importants dans la définition de la qualité des pommes de terre frites et est le résultat de la réaction de Maillard qui dépend de la teneur en sucres réducteurs et en acides aminés ou en protéines à la surface [23].

Les attributs de couleur des pommes de terre séchées en termes de valeurs L, a et b ont été mesurés en utilisant un colorimètre CR-400. Les paramètres de couleur pour le changement de couleur des aliments ont été quantifiés par Hunter [22]. La différence de couleur ( $\Delta E$ ) a été utilisée pour décrire le changement de couleur pendant le séchage et a été calculée en utilisant les valeurs de couleur des pommes de terre fraîches comme témoin.

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (\text{III.2})$$

Les paramètres de couleur L, a et b représentent respectivement la luminosité à l'obscurité, la rougeur (+) au vert (-) et le jaune (+) au bleu (-). Les paramètres de couleur rapportés sont les valeurs moyennes de 10 mesures. L représente les valeurs (blancheur / obscurité), a (rougeur / vert) et b (jaune / bleu). Ces valeurs ont également été utilisées pour le calcul du changement de couleur total ( $\Delta E$ ).

Sur la base de l'équation III.2, le changement de couleur total ( $\Delta E$ ) des tranches de pomme de terre a été calculé et le résultat est affiché sur la figure III.6.

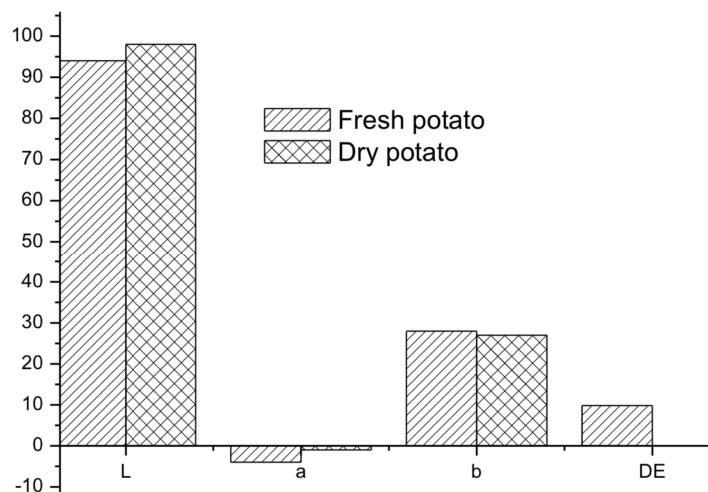


Figure III. 6 : Effet du séchage sur le changement de couleur total de la pomme de terre sèche [36].

La figure III.6 montre les valeurs L, a, b et le changement de couleur total ( $\Delta E$ ) entre la pomme de terre fraîche et la pomme de terre séchée. Il montre que la valeur L est passée de 94 à 98, également de -4 à -1. Mais b est passé de 28 à 27. Dans l'ensemble, le changement de couleur total des tranches de pomme de terre est d'environ 9,82.

#### Variation de la teneur en eau en fonction de temps

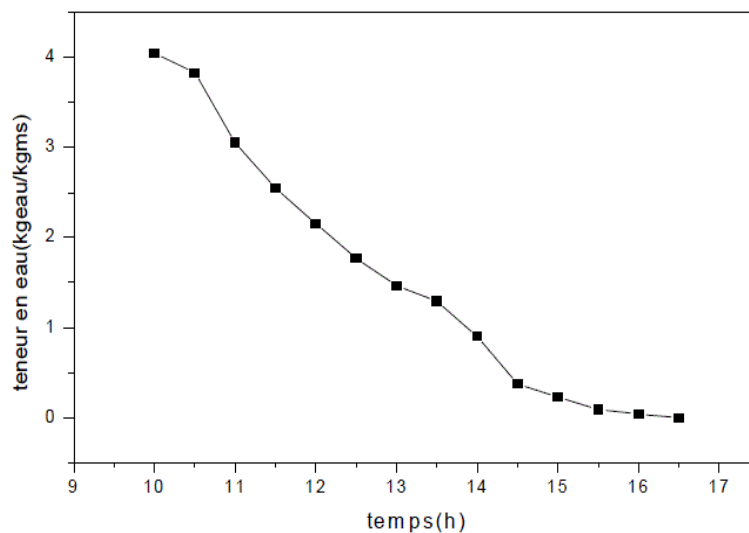


Figure III. 7 : La variation de la teneur en eau en fonction de temps [46].

La figure III.7 présente la variation de la teneur en eau en fonction de temps. On observe une décroissance relative parmi l'épaisseur des rondelles de pomme de terre donc l'évolution de la teneur en eau du produit pour les épaisseurs des tranches. Elle montre que l'augmentation d'épaisseur du produit provoque l'augmentation de sa teneur en eau, l'eau



libre du produit s'évapore plus facilement par contre à l'eau liée. C'est pourquoi la diminution d'épaisseur du produit conduit à un séchage plus rapide.

### Vitesse de séchage au cours de temps

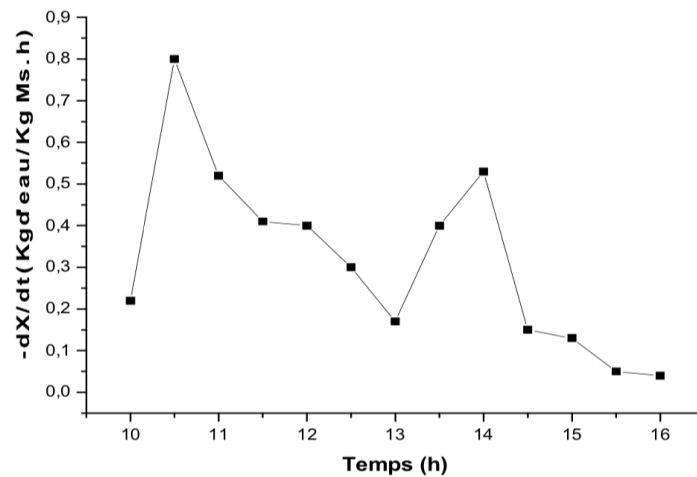


Figure III. 8 : La vitesse au cours de temps [46].

La figure III.8 présente que la vitesse du séchage augmente jusqu'à une valeur maximale, puis on observe une diminution progressivement après une légère augmentation, donc en résulte que la durée de vitesse de séchage dépend de plusieurs facteurs.

## **Conclusion générale**

Il existe plusieurs types de traitements des fruits et végétaux permettant de les stocker pendant de longues durées tout en préservant leur qualité nutritive. Citons ; la réfrigération, le traitement chimique et le séchage.

Pendant les périodes non ensoleillées, pour maintenir le processus de séchage avec une température d'air asséchant assez élevée, certains utilisent un procédé de stockage de la chaleur dans des galets pour s'en servir durant les périodes à faible intensité d'ensoleillement [56].

Le séchage des aliments améliore leur durée de vie et minimise les pertes durant le stockage, et diminue leur coût de transport. Dans le but de bien maîtriser les techniques de séchage, nous avons procédé à la réalisation d'un séchoir solaire et dans le but d'avoir les critiques sur cette réalisation et de connaître les modifications et les corrections qu'il faut apporter à cette réalisation. Nous avons dans la première partie qui était consacré à la fabrication du séchoir solaire indirecte à l'université (UKM). Pour la deuxième partie description de notre séchoir solaire et leur fonction.

Après une comparaison des différents types de séchoirs solaires, nous avons opté pour le séchoir solaire indirect, vu les avantages qu'il présente et essentiellement sa caractéristique de conserver la qualité du produit séché telles que sa couleur, saveur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C) [47].

Dans ce manuscrit, nous avons exposé toutes les étapes suivies dans la réalisation du séchoir solaire, avec le choix des matériaux et des dimensions.

Nous estimons que le séchage solaire par convection naturelle donne d'assez bons résultats.

## Références

- [1] **A. Mohammed Essaleh**, « Modelisation des isothermes de désorption du produit agroalimentaire ». Mémoire de Master, Université Adrar (2018).
- [2] **A. Bahadj**, « Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre ». Mémoire de master, Kasdi Merbah de Ouargla (2014).
- [3] **A. Ben Lahbib, N. Saouli**, « Contribution à l'amélioration du rendement thermique des capteurs solaires plans à air dans la région su sud Algérien (Ouargla) ». Mémoire de Master, Kasdi Merbah d'Ouargla (2016).
- [4] **A. Boubeghal, M. Benhammou, B. Omari, S. Amara, L. Amer, H. Moungar et S. Ouejdi**, « Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection naturelle ». Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, 'URERMS' B.P.478, Route de Reggane, Adrar, Algérie, Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007).
- [5] **A. Charreau, R. Cavaille**, « Séchage : Théorie et calculs ». Document de Technique de l'ingénieur, génie des procédés, J 2480,1-23, (1991).
- [6] **A. Degla, R. Sioued**, « Séchage Solaire des Dattes Deglet-Nour : Simulation Numérique ». Mémoire Master Académique, Université Kasdi Merbah d'Ouargla (06/06/2015).
- [7] **A. Madhlope, S. A. Jones, and J. D. Kalenga Saka**, « A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration ». *Renewable Energy*, 27, 27-37 (2001).
- [8] **A. MESAI AHMED, B. TEMACINI**, « Etude expérimentale du séchage solaire des produits agro-alimentaires de la région d'el-oued ». MASTER ACADEMIQUE, spécialité Energies renouvelables en mécanique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued (2018).
- [9] **A. Mouafki**, « Modélisation et Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe ». Mémoire de Magister, Université d'Ouargla, (2004).
- [10] **A. S. Mujumdar**, « *Guide pratique du séchage industriel Application, principes, équipements et nouveau développement* ». Sakamon Devahastin, Montréal Exegex Corporation, Quebec., (2000).
- [11] **A. S. Mujumdar, A.S. Menon**, « *Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers* ». Handbook of industrial drying, 1: p. 1-39 (1995).
- [12] **A. Saf, S. Reddam**, « Technologies de séchage. Etude de cas: séchage de deux matrices végétales par étuve ». Mémoire de master qualité des produits et sécurité alimentaire, Université A. MIRA de Bejaia (2018).
- [13] **Aldo Leopold 1949, A Land County Almanac**, « Chap. 2. GENERALITE SUR LA POMME DE TERRE ». Afric mémoire, Copyright © Afric Mémoire, Disponible sur : « [africmemoire@gmail.com](mailto:africmemoire@gmail.com) » (2015-2020).
- [14] **B. Dadda, S. Kherrou et L. Serir**, « Réalisation d'un séchoir solaire indirect ». Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable, 'URAER' B.P.88, Garet Etaam, Ghardaïa, Algérie, Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger (2008).
- [15] **B. K. Bala, M. R. A. Mondol, B. K. Biswas, B. L. Daschowdury and S. Janjai**, « Solar drying of pineapple using solar tunnel drier ». *Renewable Energy* 28(183-90) (2003).
- [16] **B. Touati**, « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe vertes (*Mentha viridis*) ». Mémoire de Doctorat, Université de Tlemcen (2008).
- [17] **B. Touati**, « Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe ». Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie (2001).

- [18] **C. S. C. Kumar, R. Mythily, R. Venkatachalapathy and S. Chandraju**, « Bio-mimic conversion of Maida (polysaccharides) to reducing sugars by acid hydrolysis and its estimation using standard methods ». *International Food Research Journal*, Vol. 21(2), pp 523-526 (2014).
- [19] **D. Mennouche**, « Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire ». Mémoire de magister de Génie des Procédés, Université Kasdi Merbah d'Ouargla (21/06/2006).
- [20] **D. R. Pangavhane, R. L. Sawhney**, « Review of research and development work on solar dryers for grape drying ». *Energy Conversion and Management*, 43(45 - 61) - (2002).
- [21] **D. Schnell**, « Technique du séchage ». Traduit de l'allemand, GMBH, Eschborn, (1983).
- [22] **E. Demiray and Y. Tulek**, « Color degradation kinetics of carrot (*daucuscarota l.*) slices during hot air drying ». *Journal of Food Processing and Preservation* (2014).
- [23] **F. Pedreschi, J. Leon, D. Mery, P. Moyano, R. Pedreschi, K. Kaack, K. Granby**, « Color development and acrylamide content of pre-dried potato chips ». *Journal of Food Engineering* 79 (2007) 786–793.
- [24] **G. Arditti**, « Technologie chimique industrielle, tome III ». Edition Eyrolles, Paris, France, (1972).
- [25] **G. Thomas, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture**, « L'Année internationale de la pomme de terre », Disponible sur : « [www.potato2008.org](http://www.potato2008.org) » (2008).
- [26] **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 Kasdi Merbah d'Ouargla (juin 2011).
- [27] **H. Houhou**, « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaire ». Mémoire de Magister en génie mécanique, Université Mohamed Khider – Biskra (Décembre 2012).
- [28] **I. N. Simatc**, « Optimization of mixed mode and indirect mode natural convection solar dryers ». *Renewable Energy*, 28 (435 - 453) - (2003).
- [29] **J. Castaing-Lavignottes**, « Air humide : propriétés thermodynamiques, opérations unitaires et technologie associées à son emploi ». Université de Pau et des Pays de l'Adour, France, (2003).
- [30] **J. J. Bimbenet.**, « Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires ». Génie des procédés alimentaires RIA édition Dunod, Paris (2002).
- [31] **J. P. Nadeau, J. R. Puiggali**, « Séchage des processus physiques aux procédés industriels ». Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, France, (1995).
- [32] **Journal de LE FIGARO** (sans la liberté de blâmer, il n'est point d'éloge flatteur, Beaumarchais), « POMME DE TERRE », Disponible sur : « [sante.lefigaro.fr](http://sante.lefigaro.fr) ».
- [33] **K. Souheyla**, « Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie ». Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Algérie (2018). Français.
- [34] **Kiranoudis, C. T., Maroulis, Z. B., Tsami, E., Marinos-Kouris, D.**, « Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables ». *J. Food Eng.* 20,55e74 (1993).
- [35] **L. Bennamoun**, « *Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers* ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7): p. 3371-3379 (2011).
- [36] **Lati, M., Boughali, S., Bouguettaia, H., Mennouche, D., Bechki, D., Khemgani, M., & Ben, Z.**, « Effect of solar drying on the quality of potato ». In *International Conference on Green Energy and Environmental Engineering (GEEE-2017)*.

- International Journal of Scientific Research and Engineering Technology (Vol. 5, pp. 1-4). (2017).
- [37] **M. A. Leon, S. Kumar, S. C. Bhattacharya**, « A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 367-393 (2002).
- [38] **M. CHEKROUNE**, « Etude comparative de deux techniques de séchage (convection et micro-onde) par application des plans d'expérience. Cas du fruit de datte ». Résumé de magister, Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES (2008/2009).
- [39] **M. Daguenet**, « Les séchoirs solaires : théorie et pratique ». Publication de l'UNESCO, Paris, France (1985).
- [40] **M. Goudjal Yacine**, « Séchage solaire du raisin, variété Sultanine ». Diplôme de magister en sciences agronomiques, Sciences alimentaires. Institut National Agronomique-Alger (2004/2005).
- [41] **M. Lati**, « Valorisation de la pomme de terre de la région d'El-Oued par le procédé de séchage solaire ». Thèse de Doctorat, Université d'El-Oued (2019).
- [42] **M. V. Ramana Murthy**, « A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers ». *Renewable and sustainable energy reviews RSER-548*; pp 10-548 (2008).
- [43] **Mann, Harris et al.**, « The development of urban renewable energy at the existential technology research center (ETRC) in Toronto, Canada ». *Renewable and sustainable energy reviews*, (2004).
- [44] **McCabe, L., C. Smith, et al.**, Livre de « Unit opérations of chemical engineering » (1956).
- [45] **MIHOUBI MAHDIA**, « La déshydratation osmotique de la pomme de terre ». Mémoire de Magister en Sciences Agronomique, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie- El Harrach-Alger (2012).
- [46] **Moukhtari Lati, Slimane Boughali, Hamza Bouguettaia, Djamel Mennouche et Djamel Bechki**, « Etude expérimentale de la cinétique de séchage de la pomme de terre ». 5<sup>ème</sup> Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage (SMSTS2015), Ouargla (Algérie). Laboratoire de développement des Energies Nouvelles et Renouvelables en Zones Arides –LENREZA, Université Kasdi Merbah, Route de Ghardaïa, 30000, Ouargla, Algérie (22 au 24 Novembre, 2015).
- [47] **N. BADIDJA et Z. BENMIR**, « Influence de la température de séchage sur la qualité de la pomme de terre ». Mémoire de Master, Université de Kasdi Merbah d'Ouargla (2016).
- [48] **N. Chalal**, « Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect ». Mémoire du diplôme de magister en génie climatique, Université Mentouri de Constantine (2008).
- [49] **NOUHA Chaima et GAGUI Mounira**, « Modélisation de séchage solaire de pomme de terre et Amélioration de rendement thermique ». Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie des Procédés, Université Kasdi Merbah d'Ouargla (05/06/2017).
- [50] **O. V. Ekechukwn, B. Norton**, « Review of solar energy systems II: an overview of solar drying technology ». *Energy Conversion and Management*, 40 (6): (615 - 655) - (1999).
- [51] **P. Dudez**, « Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés ». Edition du Gret, France (1999).
- [52] **P. H. Communay**, « Héliothermique, le gisement solaire, méthode et calculs ». Groupe de Recherche et D'édition, France (2002).
- [53] **R. Benammar, K. Gouri**, « Séchage Solaire des Produits Agricoles ». Mémoire de master académique, Université Kasdi Merbah d'Ouargla (2018).

- [54] **S. Boughali**, « Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques ». Mémoires de doctorate, Université de Haj Lakhdar Batna (2010).
- [55] **S. Chouicha**, « Etude expérimentale du séchage solaire Des dattes humides et impact Sur la qualité ». Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah d'Ouargla (2010).
- [56] **S. Lahsani, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A. Jamali**, « Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel ». Energy 29 (211 - 244) - (2004).
- [57] **S. Youcef Ali, N. Moummi**, « Etude expérimentale des séchoir solaire à plusieurs claies ». Etudes techniques Tous Corps d'Etat, Université Constantine, Alger (2008).
- [58] **Thu Ha Nguyen**, « Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux ». Mémoire de Doctorat de Génie des procédés, Université de Bretagne Sud, (2015). Français.
- [59] **V. Michaud**, « Etude des propriétés hygroscopiques des aérosols atmosphérique ». Titular master, Université BLAISE PASCAL, U.F.R. de Recherche Scientifique et Technique (10 décembre 2009).
- [60] **Y. Jannot**, « Isothermes de sorption : Modèles et détermination ». LEPT-ENSAM, (1-5), (2003).

## Résumé

Le séchage est l'un des principales techniques de préservation des produits agricoles et alimentaires dans le but de lui garantir une longue conservation, faciliter son transport et assurer la disponibilité des produits en cas de pénurie de ce produit fraîche sur le marché national.

Dans ce travail, nous intéressons au séchage solaire des légumes (pomme de terre) sur un séchoir solaire indirect dans les zones arides.

Ce type des séchoirs peut être réalisé à des échelles diverses et il est surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire et particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment.

L'objectif de ce travail à travers ces expériences d'une part l'étude de la cinétique de séchage et d'autre part l'effet de la température du séchage sur la qualité d'un produit agroalimentaire (la pomme de terre).

Au terme de cette étude, nous avons conclu que la température de l'air asséchant représente le paramètre le plus important agissant sur la cinétique du séchage.

**Mot clés :** Séchage, séchoir solaire indirect, aliment, pomme de terre.

---

## Summary

Drying is one of the main techniques for preserving agricultural and food products in order to guarantee long shelf life, facilitate transport and ensure product availability in the event of a shortage of this fresh product on the national market.

In this work, we are interested in the solar drying of vegetables (potato) on an indirect solar dryer in arid zones.

This type of dryer can be produced on various scales and it is especially used for products very sensitive to solar radiation and particularly suitable for drying food products, they have the advantage of better preserving the characteristics of the food.

The objective of this work through these experiments on the one hand the study of drying kinetics and on the other hand the effect of the drying temperature on the quality of an agri-food product (potato).

At the end of this study, we concluded that the temperature of the drying air represents the most important parameter acting on the kinetics of drying.

**Keywords:** Drying, indirect solar dryer, food, potato.

---

## ملخص :

التجفيف هو أحد الأساليب الرئيسية للحفاظ على المنتجات الزراعية والغذائية من أجل ضمان مدة صلاحية طويلة وتسهيل النقل وضمان توفر المنتج في حالة حدوث نقص في هذا المنتج الطازج في السوق الوطنية.

في هذا العمل ، نهتم بالتجفيف الشمسي للخضروات (البطاطس) على مجفف شمسي غير مباشر في المناطق الجافة. يمكن إنتاج هذا النوع من المجففات بمقاييس مختلفة ويستخدم بشكل خاص للمنتجات الحساسة جدًا للإشعاع الشمسي ومناسب بشكل خاص لتجفيف المنتجات الغذائية، وله ميزة الحفاظ على خصائص الطعام بشكل أفضل.

الهدف من هذا العمل من خلال هذه التجارب من جهة دراسة حركية التجفيف ومن جهة أخرى تأثير درجة حرارة التجفيف على جودة المنتج الغذائي الزراعي (البطاطس).

في نهاية هذه الدراسة خلصنا إلى أن درجة حرارة هواء التجفيف تمثل أهم عامل مؤثر على حركية التجفيف.

**الكلمات المفتاحية:** التجفيف ، التجفيف الشمسي غير المباشر ، غذاء ، البطاطس.