



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche**  
**Scientifique**

**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**Mémoire de fin d'étude**  
Présenté pour l'obtention du diplôme de  
**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique et Énergies renouvelables

**Thème**

**Etude expérimentale de séchage solaire de la  
pomme de terre**

Devant le jury composé de :

Présenté par :

M.KHALED

Président

- HECHIFA ABDELKADER

S.BOUSBIA

Examineur

- TAHRAOUI ABDELFATTAH

B.HOUDA

Examineur

BENHAOUA BOUBAKER

Encadreur

**2016-2017**

## *Remerciement*

*ON remercie Allah, notre créateur de pour nous donner les forces  
pour accomplir ce mémoire*

*Tous notre remerciements à mon encadreur Monsieur “  
BENHAOUA BOUBAKER” de sa collaboration et de sa  
patience avec moi.*

*ON remercie tous les orienteurs, tous ceux qui d'une façon ou  
d'une autre ont fait part de leur aide et ont participé de près et de  
loin à la réalisation de ce travail.*

*J'exprime mes remerciements aux jurys qui ont accepté de juger  
mon travail.*

*Enfin, merci A mon parents et toutes familles et nos amis qui  
par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous  
les obstacles.*

## Résumé

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale de séchage solaire par convection forcée d'un produit agro-alimentaire (la pomme de terre) dans un séchoir solaire indirect. L'objectif de ce travail vise d'une part à l'amélioration du capteur solaire plan à air. D'autre part, étudier des paramètres de l'air asséchant (température et vitesse) sur le produit (de pomme de terre) avec un séchoir solaire indirect par convection forcée pour la conservation de la pomme de terre.

**Mot clés** : séchage, capteur solaire, séchoir solaire, pomme de terre, température.

## ملخص

هذا العمل هو عبارة عن دراسة تطبيقية في إطار التجفيف الشمسي القسري للمواد الغذائية الزراعية (البطاطا كعينة) في مجفف شمسي غير مباشر. أما الهدف من هذه الدراسة هو من جهة تحسين اللاقط الشمسي ومن جهة أخرى دراسة تأثير عوامل هواء التجفيف (درجة الحرارة والسرعة) على العينة المدروسة (البطاطا) باستعمال مجفف غير مباشر قسري وهذا كحل مقترح لحفظ البطاطا عوض الطريقة الكلاسيكية (التبريد)

الكلمات المفتاحية: التجفيف، اللاقط الشمسي، المجفف الشمسي، البطاطا، درجة الحرارة.

## *Sommaire*

Remerciement.....	I
Résume.....	II
Sommaire.....	III
Liste de figure.....	V
Liste de tableau.....	VII
Liste des symboles.....	VIII
Introduction.....	1

### **Chapitre I : généralités sur le séchage**

I.1) Introduction.....	03
I.2) Séchage.....	03
I.3) Différents methods du séchage.....	04
I.4) les différents types des séchoirs solaires ...	05
I.5) Caractéristiques des solides humides.....	10
I.6) Transferts de chaleur.....	11
I.7) Transfert de masse d'un produit humide .....	13
I.8) Vitesse des séchage.....	13
I.9) Cinétique du séchage .....	14

### **ChapitreII : les capteurs solaires**

II.1) Types de capteurs solaires.....	15
II.1.1) Les capteurs solaires photovoltaïques .....	15
II.1.2) Capteurs solaires thermique.....	15
II.1.2.1) Capteurs plans.....	16
II.1.2.2) Capteurs par concentration .....	17
II.2) Les déférents types de structure de séchoirs solaire.....	18
II. 3) Classification des systèmes de séchage à énergie solaire.....	19
II.3.1) Systèmes de séchage à énergie solaire passifs.....	20
II.3.2) Systèmes de séchage à énergie solaire actifs «Les séchoirs hybrides» .....	21

### **Chapitre III : produite séchée (Pomme de terre)**

III.1) Pomme de terre .....	24
III.2) Origine et présentation générale .....	24
III.3) La plante.....	25

III.4) Production .....	26
III.5) Récolte, conservation.....	29
III.6) Composition chimique de la pomme de terre .....	28

## **Chapitre IV : Partie expérimental**

IV .1.1) Description du système de séchage .....	29
IV.1.1.1) Séchoir solaire indirect à convection forcée .....	29
IV .1.1) Mode opératoire .....	30
IV .1.2) Réalisation du capteur .....	30
IV .2.1) Construction des composent .....	31
IV .2.2)Préparation du produit .....	32
IV.2.3)Produit sèche .....	32
IV.2.1) Partie II : Les résultats obtenues .....	33
Conclusion générale.....	34
Référence.....	36
Annexe.....	41

## Liste des figures

N° de figure	Désignation	Page
Figure(I.1)	schéma d'un séchoir solaire direct à convection	05
Figure(I.2)	schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle	06
Figure(I.3)	schéma d'un séchoir solaire tunnel	07
Figure(I.4)	Représentation schématique d'un solide humide	11
Figure(I.5)	Cinétique de séchage	13
Figure (II.1)	Panneaux photovoltaïque	14
Figure (II.2)	Représentation schématique d'un capteur plan	15
Figure (II.3)	Représentation schématique d'un capteur à concentration	16
Figure(II.4)	Séchoir solaire tente en polyéthylène	19
Figure(II.5)	Séchoir solaire indirect	20
Figure (III.1)	La pomme de terre, cinquième produit agricole au niveau mondial.	27
Figure (III.2)	Répartition des surfaces cultivées par continent	27
Figure (III.3)	Composition chimique de la pomme de terre épluchée crue	28
Figure (IV.1)	Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à convection forcée	29
Figure (IV.2)	Schéma descriptif de capteur solaire réalisé	31
Figure (IV.3)	Chambre de séchage	31
Figure (IV.4)	Capteur réalisée	32
Figure (IV.5)	Préparation du produit	32
Figure (IV.6)	Produit séché	32
Figure (IV.7)	Variation de teneur en eau en fonction de temps	33
Figure (IV.8)	Variation de température d'entrée, sortie, avant et après de claie, température de produite et rayonnement solaire en fonction de temps	33
Figure (IV.9)	Variation de température dans le tube en cuivre de capteur en fonction du temps avec simple verre	35
Figure (IV.10)	Variation de température dans le tube en cuivre de capteur en fonction du temps avec double verre temps avec double verre du temps	35
Figure (V.11)	Variation de températures d'entrée et la sortie du capteur	36
Figure (IV.12)	Variation de gradient de température de capteur en fonction de temps	37

## Liste des tableaux

N° de tableau	Désignation	Page
Tableau(II.1)	Structure de quelques séchoirs solaire	17
Tableau (III.1)	Principaux producteurs mondiaux de la pomme de terre en 2007	23
Tableau (III.2)	Principales wilayas productrices de pomme de terre en Algérie	23
Tableau (III.3)	Principaux pays producteurs de pommes de terre	25

## Liste des symboles

Symboles	Désignations	Unités
$\alpha$	Coefficient de convection thermique	$W/ m^2.K$
$\lambda_a$	Conductivité thermique	$W/m.K$
$\varphi_a$	Flux absorbant	$W$
$H_a$	Humidité absolue	$Kg \text{ eau} / kg \text{ as}$
$X_{eq}$	Humidité d'équilibre	$kg \text{ eau} / kg \text{ Ms}$
$H_r$	Humidité relative	$\%$
$M_e$	Masse de l'eau	$Kg$
$M_a$	Masse du gaz	$Kg$
$M_h$	Masse humide du produit	$Kg$
$M_S$	Masse sèche du produit	$Kg$
$P_s$	Pression de saturation	Pascal
$\varphi_p$	Puissance perdue par convection et conduction	$W$
$\varphi_s$	Puissance stockée sous forme de chaleur	$W$
$\varphi_t$	Puissance thermique utile par $m^2$ du capteur	$W$
$\varphi_u$	Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur	$W$
$Q$	Quantité de chaleur transférée par unité de temps	$W$
$\eta$	Rendement de capteur	$\%$
$S$	Surface	$m^2$
$T_1$	Température	$K$
$T_2$	Température	$K$
$X_r$	Teneur en eau du produit à base humide	$kg \text{ eau} / kg \text{ Mh}$
$X$	Teneur en eau du produit à base sèche	$kg \text{ eau} / kg \text{ Ms}$
$P_v$	Tension de vapeur	Pascal
$-dx/dt$	Vitesse de séchage du produit	$kg \text{ eau} / kg \text{ Ms.S}$



# *Introduction générale*

## Introduction générale

L'utilisation des sources d'énergie conventionnelles (charbon, pétrole, gaz naturel ou uranium) est l'un des fondements principaux de nos sociétés industrielles.

Cependant nous sommes confrontés avec elles à deux problèmes insurmontables : [1]

1. Elles produisent divers types de pollutions, aussi bien à l'échelle locale que planétaire : si nous n'y prenons garde, la pollution atmosphérique, le changement climatique ou les déchets nucléaires peuvent remettre en cause les conditions mêmes de la vie sur Terre.
2. Elles sont issues de stocks limités de matières qui doivent être extraites du sous-sol de la terre et vont inexorablement s'épuiser d'ici quelques décennies (un siècle pour le charbon). Elles ne peuvent donc pas garantir la sécurité d'approvisionnement énergétique à long terme.

Le soleil est gratuit et la source d'énergie solaire, il brille pour tout le monde et il est aussi le moteur de toutes les grandes sources naturelles.

L'Algérie dispose d'un important ensoleillement durant la majeure partie de l'année. Elle bénéficie d'une durée annuelle moyenne d'ensoleillement de l'ordre de 2500 heures, et reçoit une énergie solaire moyenne quotidienne de 16.2 à 27 MJ/m<sup>2</sup> sur le plan horizontal. Cette énergie est suffisante, particulièrement en été, pour satisfaire toute la demande énergétique en séchage des produits agricoles. [19]

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits, légumes et viandes est l'un des processus des grandes consommations d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduire des dépenses et pertes après les récoltes.

L'augmentation de la production de la pomme de terre dans la région de 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. Donc la question qui posée quelle est les techniques et les procédés qui donne des solutions de cette problème ?

Les capteurs solaires plans à air transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans le capteur. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires, comme par exemple, le séchage des grains ou du bois, le chauffage des locaux, ainsi que dans la réfrigération solaire. Plusieurs types de capteurs à air ont été construits et testés à travers le monde.

La sélection d'un séchoir solaire pour sécher des produits spécifiques est déterminée par les qualités requises, les caractéristiques du produit et le facteur économique.

Les objectifs de ce travail étant d'une part l'étude de l'amélioration d'un capteur solaire, et d'autre part l'étude de la cinétique de séchage solaire de pomme de terre de la région de El-Oued.

Le présent travail comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre présente de généralité sur le séchage et les phénomènes du transfert de chaleur et de matière.

Le deuxième chapitre comporte une description générale du capteur solaire plan à air utilisée et le différent mode de séchoir solaire.

Un ensemble de connaissance sur la pomme de terre : origine, la plante, facteur d'environnement, production et composition chimique. Sont illustrés dans le troisième chapitre.

Le cinquième chapitre est consacré aux essais expérimentaux effectués sur le capteur solaire réalisé et vos résultats trouvés et discutés d'une part à notre part on a suivi la cinétique de séchage de la pomme de terre dans un séchoir solaire directe et indirecte forcée.

Enfin nous avons terminé ce travail par une conclusion qui englobe une interprétation générale de l'étude.



# Chapitre I : Généralités sur le séchage

---

## *Chapitre I : Généralités sur le séchage*

### **I.1) Introduction:**

Le séchage et tout particulièrement le séchage au soleil est l'une des plus anciennes techniques de conservation des produits agroalimentaires utilisée par l'homme. Elle consiste en l'exposition du produit aux rayons du soleil et à l'air libre.

### **I.2) Séchage :**

#### **I.2.1) Définition:**

C'est l'opération unitaire ayant pour but d'éliminer par évaporation un liquide imprégnant un solide ou un liquide. Le terme déshydratation a un sens plus restrictif : il ne concerne que l'élimination de l'eau dans un solide ou dans un liquide.

Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, jusqu'au seuil en deçà duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des microorganismes. [2]

#### **I.2.2) Historique:**

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figes, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois,...), ou pour les textiles (lavage, teinture,...) et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [3]

#### **I.2.3) 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**

Lorsque l'énergie est fournie au produit (transfert de chaleur par convection) par l'air chauffé, le séchoir est classé de type convectif. Si la chaleur est transférée au produit avec un

# Chapitre I : Généralités sur le séchage

---

contact direct, le séchoir est classé de type conductif.

## c) La gamme de température

Les systèmes de séchage peuvent être classifiés selon la gamme de température de fonctionnement, soit à hautes températures ou à basses températures. Les types de séchoir à hautes températures, sont employés lorsque le produit nécessite un gaz très chaud, et reste en continuité jusqu'à ce que le produit soit séché (le bois par exemple). Pour les types de séchoir à basses températures, ces dernières soient inférieures à 100°C.

## d) mode de répartition des nourritures

### - Séchage en couche mince:

Les fruits et légumes sont posés sur des claies, et séchés en couche mince lorsque l'air chaud traverse les produits de bas vers le haut.

### - Séchage en couche épaisse:

Ce mode de séchage est généralement utilisé pour les fourrages, les céréales, le café etc. l'air chaud est soufflé dans un amas des produits, reposant sur une grille perforée

## I.3) Différents méthodes du séchage :

### I.3.1) Séchage mécanique:

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, Centrifugation, compression, décantation et filtration). [4]

### I.3.2) Séchage chimique:

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

### I.3.3) Séchage thermique:

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

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

- Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur du produit.
- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface du produit.
- Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur.[5]

# Chapitre I : Généralités sur le séchage

---

## **I.4) les différents types des séchoirs solaires:**

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 [14]. On peut classer les séchoirs suivant la façon, dont ils utilisent le rayonnement solaire, en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects.

- Un séchoir est dit direct, si le rayonnement solaire atteint directement le produit, le séchoir indirect lorsque les produits sont à l'abri du rayonnement.

- Un séchoir est dit à convection naturelle si la circulation d'air est assurée par thermosiphon et un séchoir en convection ventilée (forcée) si elle est assurée par une action mécanique.[15]

### **I.4.1) Les séchoirs naturels**

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposés même au sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant (figure I.5.a).

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessitent une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher.

Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation.

Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières).

### **I.4.2) Les séchoirs solaires directs**

Par définition, les rayons du soleil frappent directement les séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes.

Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet de cheminée) (figure I.5.b), ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur (figure I.5.c), du fait de la rusticité des modèles.

Ce type de séchage présente deux avantages :

- les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes,

## Chapitre I : Généralités sur le séchage

---

- ils sont soumis à un effet de serre, au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température du produit à sécher, ce qui permet de diminuer notablement, les temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels. Parmi les inconvénients de ce type d'appareil, on peut noter la destruction de certaines vitamines et la photo-oxydation du produit, dues à la partie des ultra-violets transmise par la couverture, et au risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

Pour la construction de ces séchoirs, on dispose d'une gamme variée de possibilité. Les matériaux et techniques employés doivent être compatibles avec l'air chaud humide et les produits à sécher. S'il s'agit d'améliorer des procédés traditionnels, ceux-ci fourniront une base de solutions classiques et adaptées.

Ces appareils conviennent bien à une production artisanale, dispersée et diversifiée. Leur productivité est assez faible, de l'ordre de 5 à 10 kg de produits frais par mètre carré de claies. Les durées d'exposition, selon les conditions météorologiques locales et les produits à traiter, varient entre quelques heures, et trois à quatre jours.

Les bottes de séchage sont de petites unités, transportables, destinées le plus souvent à la cellule familiale, pour la conservation de ses produits. Des surchauffes peuvent y apparaître du fait de leur faible volume et du faible débit d'air qui les traverse en convection naturelle.

Les séchoirs "serres", sont une version à grande échelle des bottes de séchage ; leur utilisation est à envisager lorsqu'il faut sécher une grande quantité de produits frais. Pour être efficaces, les surfaces de séchage doivent être limitées à quelques mètres carrés.

### **I.4.3) Les séchoirs solaires indirects**

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher (figure I.6).

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

# Chapitre I : Généralités sur le séchage

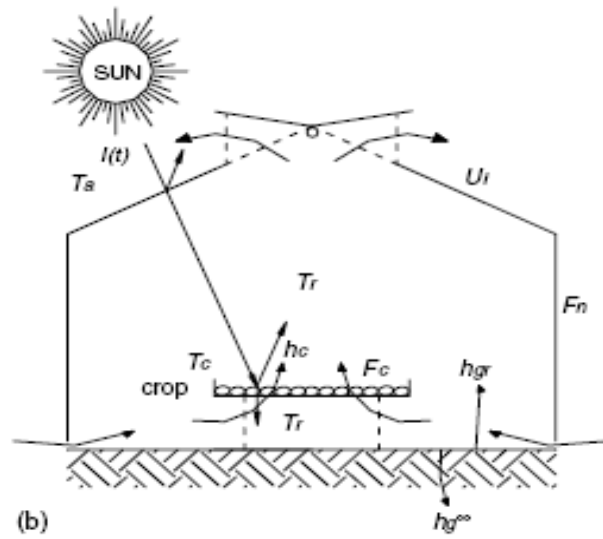


Figure I.1.b : schéma d'un séchoir solaire direct à convection naturelle

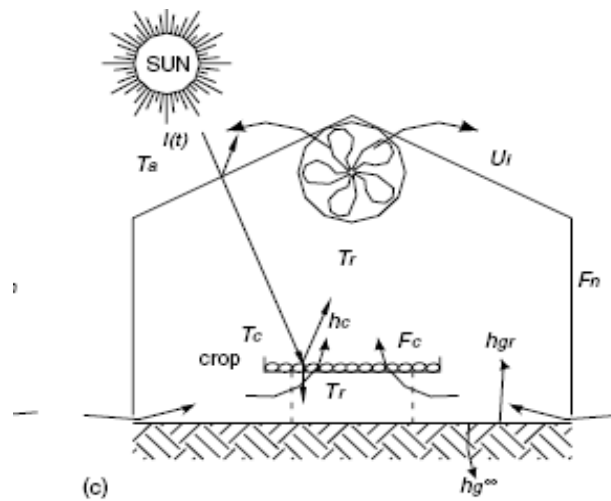


Figure I.1.c : schéma d'un séchoir solaire direct à convection forcée

# Chapitre I : Généralités sur le séchage

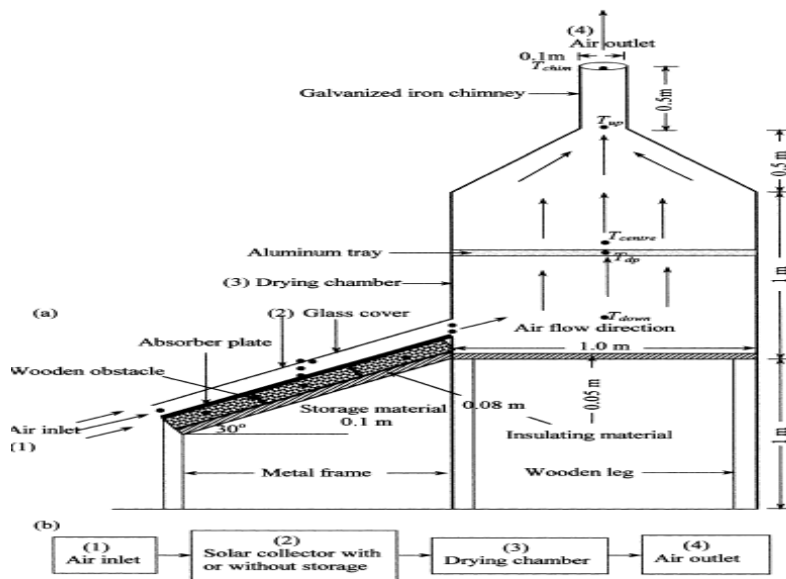


Figure I.2 : schéma d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle

## I.4.4) Les séchoirs solaires tunnels:

Dans un séchoir tunnel, il y a sur la longueur du séchoir, une succession d'états de température et d'humidité.

Ils sont tous à ventilation mécanique, soit à l'aide d'un simple ventilateur, placé en dehors du séchoir, soit par des ventilateurs multiples placés à l'intérieur de celui-ci (figure I.7)

Il existe des séchoirs tunnels, non seulement pour les industries du bois mais aussi pour le séchage de peinture, de vernis, et le séchage avant cuisson des produits céramiques (tuiles, briques, poteries culinaires, assiettes, etc..).

# Chapitre I : Généralités sur le séchage

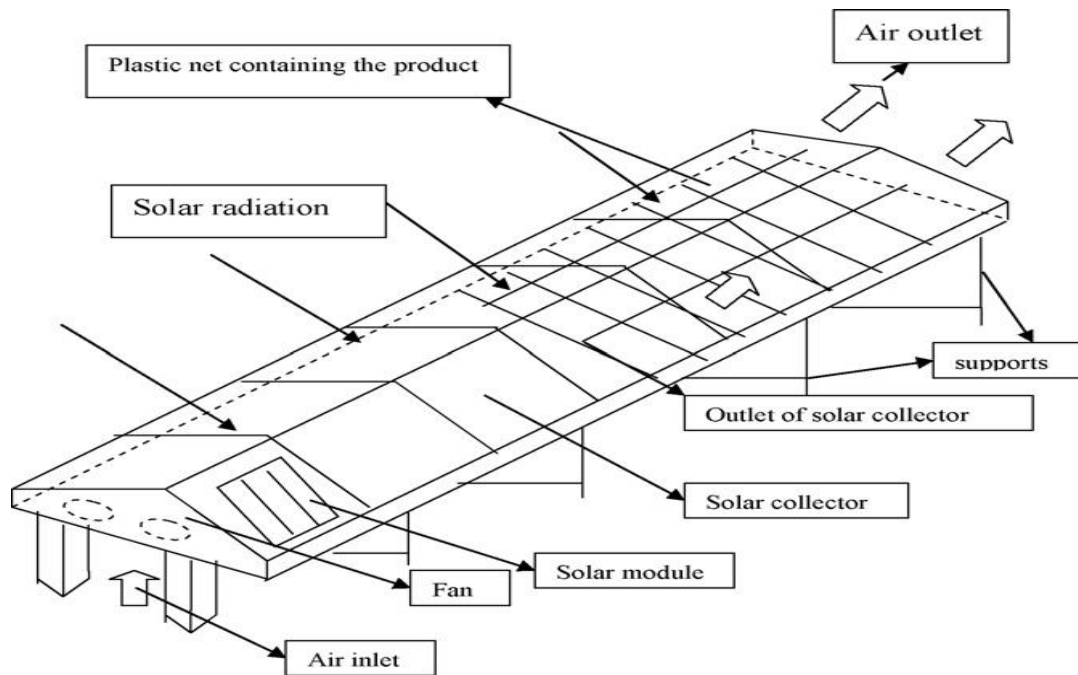


Figure I.3 : schéma d'un séchoir solaire tunnel

## I.5) Caractéristiques des solides humides :

Le solide à un film d'eau adhère à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température.

Soit une masse  $M_h$  de matériau humide contenant une masse  $M_e$  d'eau et une masse  $M_s$  de matière sèche:

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

### I.5.1) Humidité absolue:

L'humidité autoritaire ou taux d'humidité ou teneur (kgav/kgas) en eau à base sèche, où plus simplement humidité s'exprime par liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

$$X = M_e/M_s = (M_h - M_s)/(M_s) \quad (I.2)$$

### I.5.2) Teneur en eau à base humide:

L'humidité relative où titre en eau (%), ou teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

## Chapitre I : Généralités sur le séchage

---

$$X_r = \frac{M_e}{M_e + M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (I.3)$$

### I.5.3) Taux d'humidité:

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre.

### I.5.4) États de siccité:

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul.

Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur.

Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

### I.5.5) Taux d'humidité à l'équilibre:

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température. [5]

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} = M_e / M_s \quad (I.4)$$

# Chapitre I : Généralités sur le séchage

---

## I.6) Transferts de chaleur:

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit.

Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur .

### I.6.1) Séchage par convection:

En séchage, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques.

Ce type de transfert obéit à l'équation suivante :

$$Q = \alpha S (T_a - T_s) \quad (I.5)$$

Avec :

- $Q$  (W) : la quantité de chaleur transférée par unité de temps.
- $S$  ( $m^2$ ): surface d'échange.
- $(T_a - T_s)$  ( $^{\circ}K$ ) : l'écart entre la température d'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher.
- $\alpha$  ( $W / m^2 \cdot K$ ) : coefficient d'échange par convection.[2]

### I.6.2) Séchage par conduction:

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Les vapeurs libérées par le séchage sont aspirées (séchage par ébullition) ou entraînées par un gaz de balayage dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage convectif.

Plus le gradient de température entre la paroi et le produit sera faible et plus la surface d'échange devra être importante.

Le flux thermique (en  $W/m^2$ ) est donné par la relation :

$$\frac{Q}{S} = -\lambda \frac{dT_s}{dl} \quad (I.6)$$

# Chapitre I : Généralités sur le séchage

---

Avec:

- $\lambda$  (W / m·K) conductivité thermique de la pellicule de produit ou de gaz à travers laquelle s'effectue le transfert,
- $dt_s/dl$  : Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

## I.6.3) Séchage par rayonnement:

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement.

Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible.

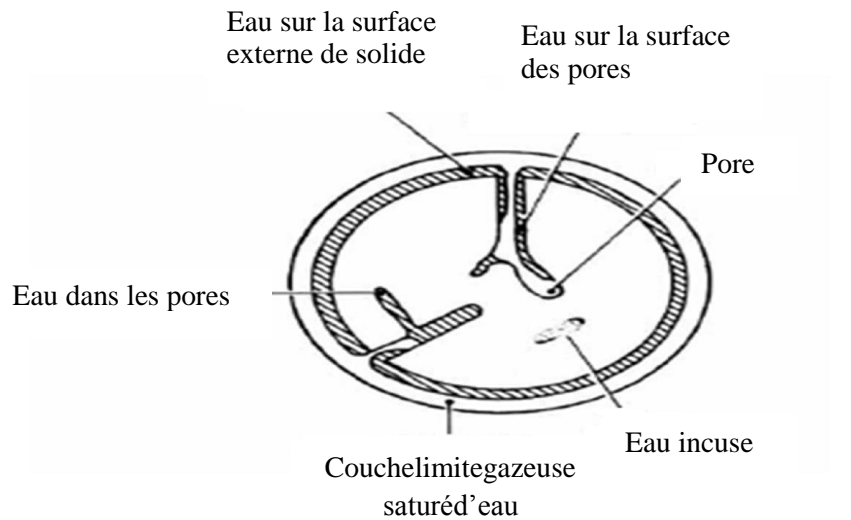
Les sources chaudes émettrices peuvent être des émetteurs au gaz combustible, des émetteurs électriques, ou le soleil.

## I.6.4 ) Transfert de masse d'un produit humide:

On peut imaginer la plupart des corps à sécher comme étant constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière.

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique au produit à sécher et dont la source est extérieure à celui-ci. Simultanément se produit la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau. [2]

# Chapitre I : Généralités sur le séchage



Figure(I.4) : Représentation schématique d'un solide humide

## I.8)-Vitesse de séchage:

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporée de solide séché 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 :

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse de l'air.[7]

## I.9) Cinétique du séchage :

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps, ou celle donnant la vitesse de séchage  $(-\frac{dX}{dt})$  en fonction de X. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Sur la courbe schématisée présentée à la Figure (I.5), on peut distinguer trois phases:

# Chapitre I : Généralités sur le séchage

---

## **I.9.1) Période de mise en température (Période 0):**

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

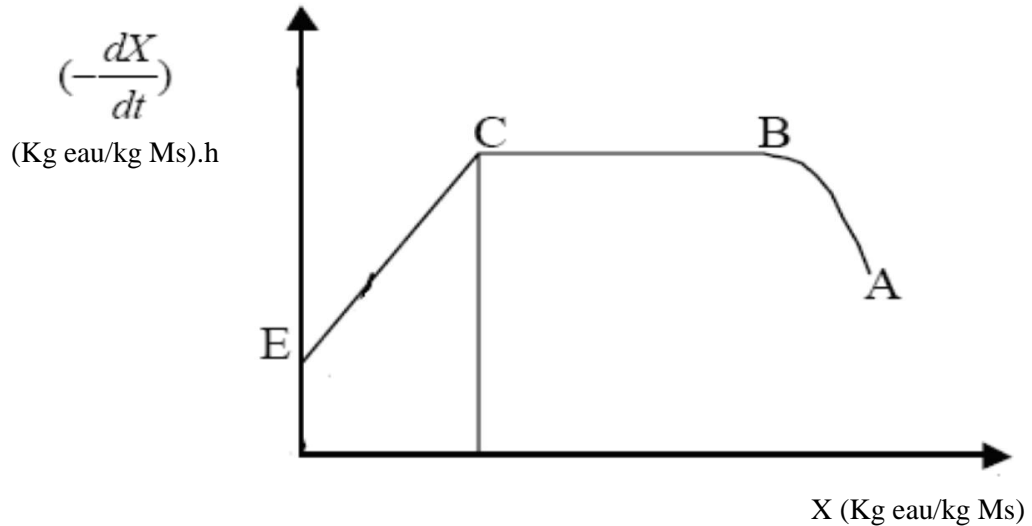
## **I.9.2) Période à vitesse constant:**

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

# Chapitre I : Généralités sur le séchage

## I.9.3) Période de ralentissement:

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



Figure(I.5) : Cinétique de séchage

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.[7]

### Chapitre II : Les capteurs solaires

#### II.1)Types de capteurs solaires:

Principalement il y a deux types de capteurs solaires.

##### II.1.1)Capteurs solaires photovoltaïques:

Qui transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique. L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. [1]

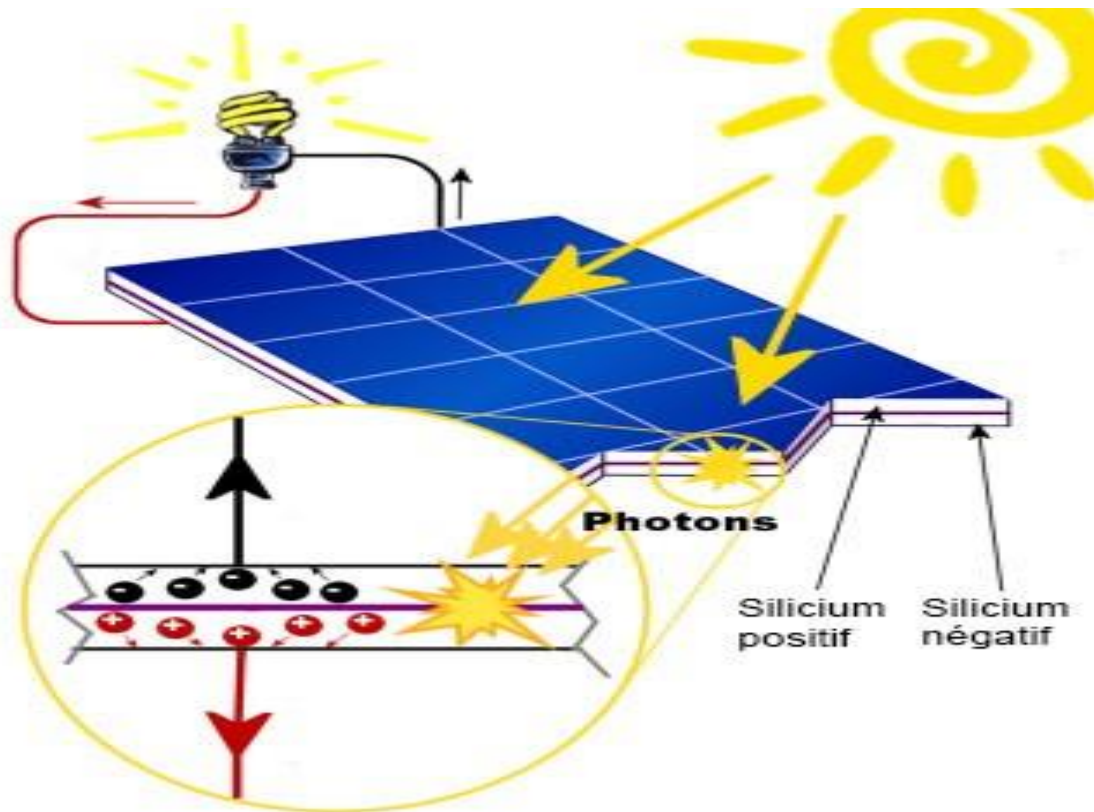


Figure (II.1) : Panneaux photovoltaïque

##### II.1.2)Capteurs solaires thermiques:

Les capteurs solaires thermiques sont des appareils permettant la conversion de l'énergie de rayonnement en énergie thermique, en se basant sur l'effet de serre, s'explique par le fait que le verre est un matériau quasiment transparent au rayonnement solaire alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge, un flux solaire traversant une vitre et venant chauffer un corps derrière cette vitre se trouve donc piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser la vitre.[7]

Il existe deux principaux types de capteurs solaires :

- les capteurs plans.
- les capteurs par concentration.
- Bilan thermique du capteur

### II.1.2.1) Capteurs plans:

Les capteurs plans absorbent le rayonnement solaire au moyen d'une plaque peinte en noir et munie de fines conduites destinées au fluide caloporteur. Lorsqu'il traverse les conduits, sa température (liquide ou air) augmente en raison de la chaleur reçue par la plaque absorbante. Comme une serre, les capteurs plans sont munis d'un vitrage transparent, qui piège le rayonnement calorifique s'échappant de la plaque absorbante. Ils peuvent chauffer les fluides caloporteurs à des températures légèrement supérieures à 80°C, avec un rendement variant entre 40 et 80%.

Dans l'hémisphère nord ils sont orientés vers le sud, et dans l'hémisphère sud, vers le nord. L'efficacité des capteurs dépend de l'angle qu'ils forment avec le plan horizontal. Leur inclinaison optimale varie selon la latitude de l'installation.

Les principaux composants des capteurs solaires sont :

**La vitre** : la matière la plus utilisée est le verre.

**L'absorbeur** : C'est une plaque noire qui absorbe le rayonnement solaire et le transforme en chaleur thermique ; cette plaque doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne conductivité thermique;
- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité;

Les matériaux utilisés comme absorbeur sont : le cuivre, les aciers, l'aluminium ...etc.

**L'isolant** : L'isolant a pour rôle de limiter les déperditions calorifiques. Les matériaux utilisés comme isolant sont le bois, les cendres de végétaux, la laine de verre et ...

**Le fluide caloporteur** : Le fluide caloporteur est un moyen de transfert de la chaleur collectée par l'absorbeur à un fluide d'échange thermique appelé fluide de travail. 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.

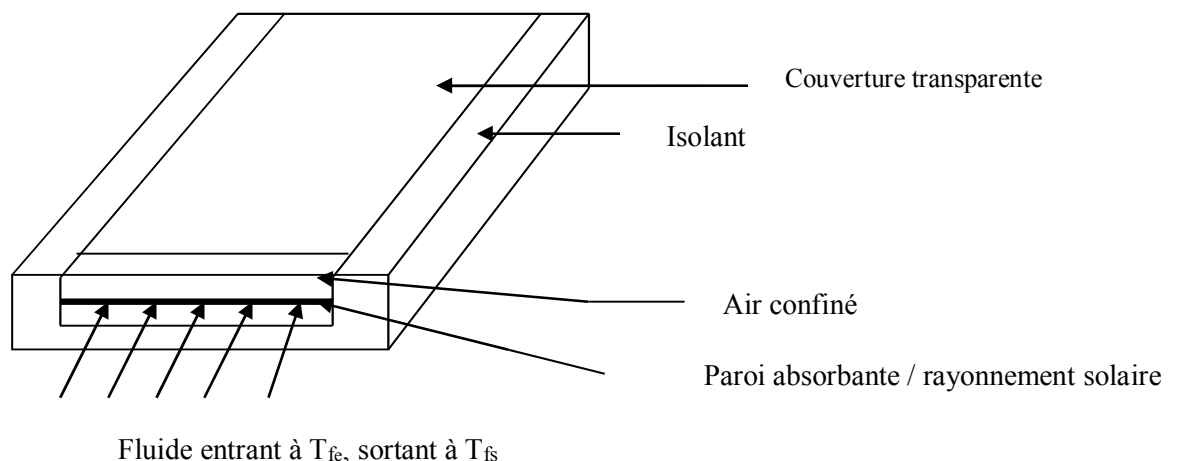
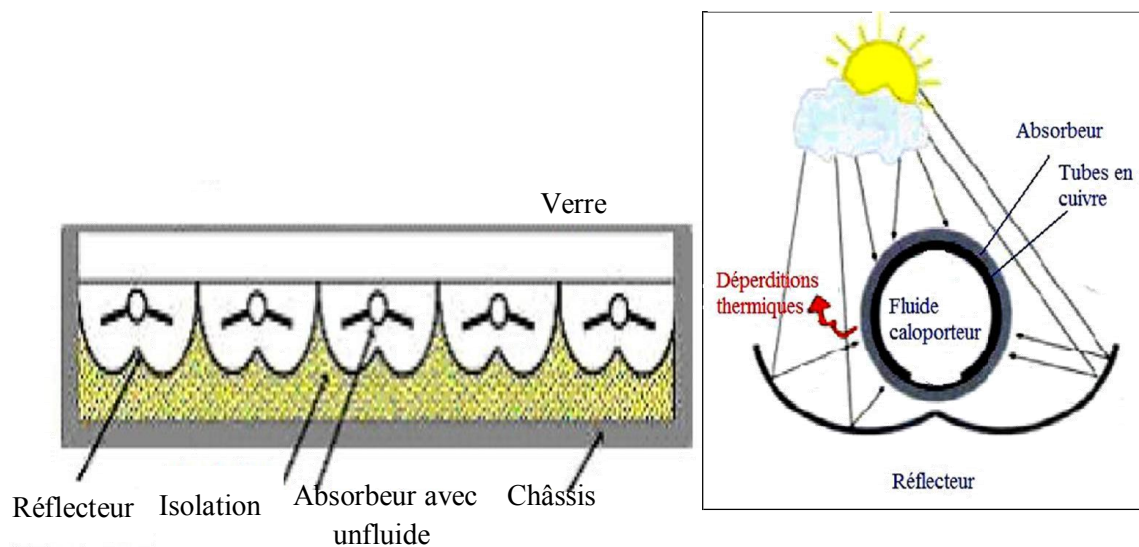


Figure (II.2) : Représentation schématique d'un capteur plan à air

### II.1.2.2) Capteurs par concentration:

Les capteurs plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très hautes températures. En revanche, il est possible d'utiliser des capteurs par concentration, mais ils sont plus complexes et plus onéreux.

Il s'agit de réflecteurs en demi-cercle qui renvoient et concentrent l'énergie solaire sur un tuyau où circule un fluide caloporteur. Cette concentration entraîne une augmentation de l'intensité, et les températures obtenues sur le récepteur (appelé cible) peuvent atteindre plusieurs centaines voire même plusieurs milliers de degrés Celsius. [2]



**Figure (II.3) : Représentation schématique d'un capteur à concentration.**

### II.1.2.3) Bilan thermique du capteur:

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur s'écrit :

$$\varphi_a = \varphi_u + \varphi_p + \varphi_s \quad (II.1)$$

Où  $\varphi_a$  : Le flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur,

$\varphi_u$  : La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur,

$$\varphi_u = F_R ((r_r \alpha_n) \Phi_g - U_L (T_{fe} - T_\alpha)) \quad (II.2)$$

$$F_R = (mcp/U_L) * [1 - \exp(-\frac{U_L F^F}{mcp})] \quad (II.3)$$

$\varphi_p$  : La puissance perdue par convection et conduction vers l'arrière du capteur et par convection, conduction et rayonnement vers la face avant du capteur,

$$\varphi_p = U_L (T_1 - T_\alpha) = \varphi_{p1} + \varphi_{p2} \quad (II.4)$$

## Chapitre II : Les capteurs solaires

Avec:  $\phi_{p1}$  : perte à l'avant

$\phi_{p2}$  : perte à l'arrière

$\phi_s$  : La puissance stockée sous forme de chaleur dans les différents éléments du capteur lorsque le régime thermique est variable.

### II.1.2.4) Rendement instantané d'un capteur:







Le rendement instantané d'un capteur est défini par : [7]

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par m}^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}}$$

$$\eta = Q_U / Q_a \quad (\text{II.5})$$

### II.2) Les différents types de structure de séchoirs solaire :

Pour améliorer l'efficacité de la dessiccation, il faut employer une sorte de structure qui capte la radiation solaire. Plusieurs types de séchoirs solaires ont été mis au point et sont illustrés ci-dessous.

Dessiccation solaire	description des types de séchoirs	
Armoire directe	la chambre de séchage est émaillée et on n'emploie pas de collecteur solaire séparé.	
Armoire indirecte	Le collecteur solaire est séparé de la chambre de séchage.	
Tunnel direct	En général une structure avec un cadre en cerceau recouvert d'une ou deux épaisseurs de film plastique.	
Tunnel bas	Séchoir direct semblable à ci-dessus mais construit près du sol, en général ne peut contenir qu'une seule couche de produit.	
Tente	Séchoir direct avec un cadre droit plutôt que courbé.	
Bac	Séchoir indirect avec courant d'air forcé.	

Tableau(II.1) : structure de quelques séchoirs solaire

### **II. 3) Classification des systèmes de séchage à énergie solaire:**

Les systèmes de séchage à énergie solaire sont classés principalement selon leurs modes de chauffage et la façon en la quels la chaleur solaire est utilisée. De façon générale, ils peuvent être classés dans deux groupes principaux, à savoir:

- Systèmes de séchage à énergie solaire actifs (dont la plupart des types se nomment souvent les dessiccateurs solaires hybrides).
- Systèmes de séchage à énergie solaire passifs.

Trois classes secondaires distinctes des systèmes de séchage solaires actifs ou passifs peuvent être identifiées (qui changent principalement dans l'arrangement de conception des composants de système et le mode de l'utilisation de la chaleur solaire), à savoir :

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

#### **II.3.1) Systèmes de séchage à énergie solaire passifs :**

##### **II.3.1.1) Les séchoirs solaires directs:**

Les séchoirs directs sont des appareils simples et caractérisé par :

Simplicité de fonctionnement et de construction

- Produit protégé

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 font de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de la chaleur. Une feuille de plastique en polyéthylène transparent sert généralement de toit mais peut également utiliser d'autre matériaux, plus chers comme le verre ou les plastique spéciaux, donc le séchoir solaire direct combine deux effets :

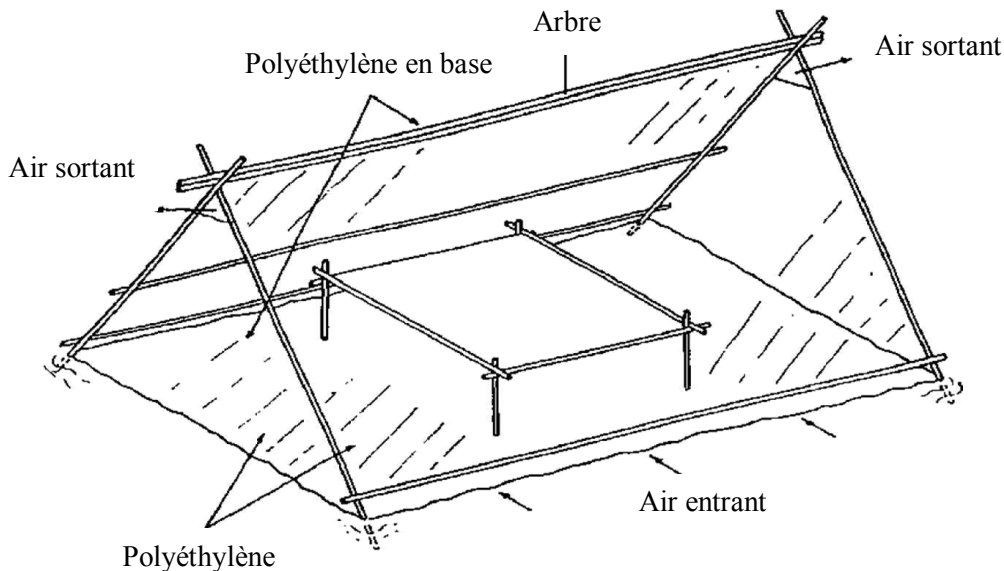
- La température qui augmente sous l'effet de serre.
- La circulation naturelle de l'air dans le séchoir.

##### **A avantages**

- Bien meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main d'œuvre qualifiée.
- Grandes possibilités de conception.[8]

### Inconvénients

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



Figure(II.4) : Le séchoir solaire tente en polyéthylène.

### II.3.1.2) Les séchoirs solaires indirects:

Les séchoirs solaires indirects comportent des isolateurs placés en amont d'une chambre de séchage et destinés à chauffer ou préchauffer l'air avant son envoi dans cette dernière.

#### Principe de fonctionnement

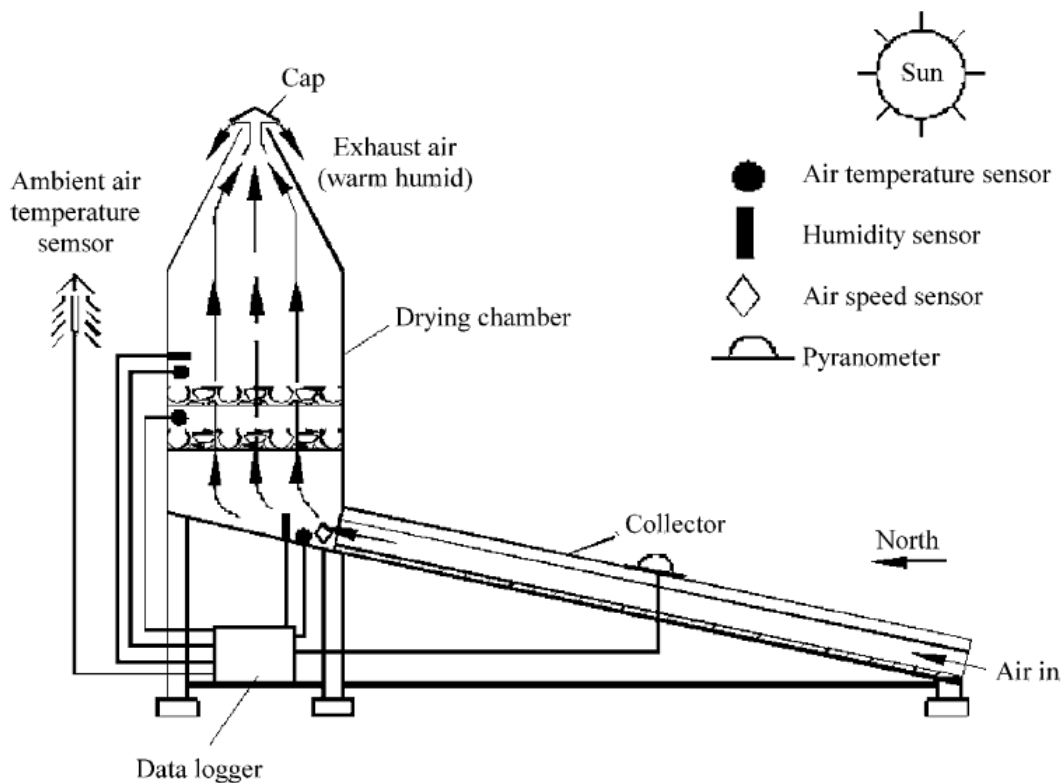
Dans les séchoirs solaires indirects, le collecteur convertit le rayonnement solaire en chaleur. L'air pénètre dans le collecteur, il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection jusqu'à la chambre de séchage, cet air est ensuite utilisé pour sécher les produits. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques. [7]

#### Avantages

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive.
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

### Inconvénients

- Coût important.
- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.



Figure(II.5) : Séchoir solaire indirect

### II.3.1.3) 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. [7]

### II.3.2) Systèmes de séchage à énergie solaire actifs «Les séchoirs hybrides »:

Les systèmes de séchage solaires actifs utilisent les systèmes de chauffage à énergie solaire et/ou électriques ou par combustible fossile basés et les ventilateurs et/ou les pompes motorisés pour la circulation d'air. L'apport d'énergie

## ***Chapitre II : Les capteurs solaires***

---

supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir:

- L'énergie d'appoint permet de maintenir une température constante à l'intérieur du séchoir quelles que soient les conditions climatiques. Dans ce cas, l'énergie solaire devient secondaire, elle permet de préchauffer l'air.
- Le ventilateur assure la circulation de l'air. Ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

### **A avantages**

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Forte augmentation de la productivité par rapport au séchoir solaire car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

### **Inconvénients**

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité ,gaz.
- Personnel qualifié pour la maintenance.[7]

## *Chapitre III : Produite séchée (Pomme de terre)*

---

### *Chapitre III : Produite séchée (Pomme de terre)*

#### **III.1) Pomme de terre:**

La pomme de terre 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.

#### **III.2) Origine et présentation générale :**

##### **III.2.1) Physionomie de la production:**

La pomme de terre est originaire de la cordillère des Andes : de la Colombie au Chili.

Elle est cultivée il y a 7000 ans, domestiquée au sud du Pérou et du nord de la Bolivie. Découverte au moment de la conquête du nouveau monde, vers 1570.

##### **III.2.2) Situation économique :**

La pomme de terre est la 4<sup>ème</sup> production alimentaire végétale au niveau mondiale après le blé, le riz et le maïs. Elle est considérée comme l'un des légumes les plus consommés par l'homme [9], cultivée sur environ 20 millions d'hectares avec une production de 300 millions de tonnes. Les surfaces cultivées sont en augmentation en Afrique, en Amérique latine et en Asie du sud.

En 2007, la production mondiale de pommes de terre est estimée à 333,5 millions de tonnes, pour une surface cultivée de 18,8 millions d'hectares, soit un rendement moyen de 17,23 tonnes par hectare (t/ha).

## Chapitre III : Produite séchée (Pomme de terre)

Les principaux producteurs pour l'année 2007 sont indiqués dans le tableau. [10]

	Quantité(t)
Chine	72 040 000
Russie	36 784 200
Inde	26 280 000
U.S.I	20 373 267
Ukraine	19 102 300
Pologne	11 643 769
Allemagne	11 604 500
Belarus	8 743 976
Pays-Bas	7 200 000

**Tableau (III.1) : Principaux producteurs mondiaux de la pomme de terre en 2009**

En Algérie, la production en 2012/2013 toute catégorie de pommes de terre confondues se situe autour de 4,5 millions de tonnes dont 0,45 millions de tonnes de semences pour une superficie de l'ordre de 125.000 hectares.[11]

Les principales wilayas productrices de pomme de terre en Algérie

wilayas	Superficies (ha)	Productions (qtx)	Rendements (qtx/ha)
Ain Defla	15230	3200000	210.1
Mascara	9550	2087150	218.5
Tlemcen	7505	1979550	263.8
EL Oude	7392	1771626	246

**Tableau (III.2) : Les principales wilayas productrices de pomme de terre en Algérie**

La wilaya de Ain-Defla est le premier producteur de la pomme de terre en Algérie, avec une production de 3200000 qtx sur une superficie de 15230 ha , suivie de la wilaya de Mascara .La wilaya d'El-Oued, classée quatrième du point du vue production, se retrouve néanmoins seconde en matière de rendements (246 qtx/ha) après la wilaya de Tlemcen( 263qtx/ha) .

### III.3)La plante:

#### III.3.1)Caractères botaniques:

La famille des solanacées comprend plusieurs espèces à tubercule, dont fait partie la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) .

Le tubercule de pomme de terre est l'extrémité tubérisée d'une tige souterraine. Il porte des bourgeons dormants situés au fond d'une dépression, ou oeil, disposés de façon alternée sur une spirale. Les yeux rassemblés autour du bourgeon terminal forment la

couronne. Après un temps de repos végétatif plus ou moins long, les bourgeons entrent en croissance et le tubercule germe.

### III.3.2) Cycle biologique:

La durée du cycle végétatif de la pomme de terre dure entre 90 à 150 jours, le cycle de développement comprend trois phases principales. À partir de la récolte du tubercule : le repos végétatif du tubercule, la croissance des germes, la croissance et la tubérisation de la plante. Ces phases se réalisent même en l'absence de toute plantation.

Le grossissement des tubercules s'effectue d'abord par multiplication cellulaire puis les cellules augmentent de volume par accumulation d'eau et de grains d'amidon . Il dépend du climat (température, photopériode ou durée du jour), du tubercule mère et du feuillage.

La pomme de terre a une réaction de « jour court » pour la tubérisation, les variétés ne diffèrent entre elles que par la photopériode critique au dessus de laquelle la tubérisation est inhibée. [12]

### III.4) Production:

Facteurs pouvant influencer la qualité

Les tubercules peuvent être caractérisés par la couleur de leur peau et de leur chair, leur forme et le degré de l'enfoncement de leurs yeux. La forme est le plus souvent oblongue, plus ou moins allongée mais parfois arrondie.

Sur le plan commercial, les critères de choix sont :

Les caractéristiques morphologiques, comme la coloration de la chair, et la présentation du tubercule (forme régulière, aptitude à l'épluchage mécanique).

La qualité de la chair, caractérisée par la finesse de celle-ci (dimension des cellules), sa tenue à la cuisson, sa teneur en féculés(amidon).

Les pommes de terre sont cultivées dans plus de 150 pays, principalement dans l'hémisphère nord. La distribution de cette culture s'étire en [latitude](#) de 45 ° S à 65 ° N et marque deux pics, le plus important dans les zones tempérées situées entre 45 et 57 ° N, qui incluent l'Allemagne, la Pologne l'Ukraine et la Russie, et le deuxième dans les zones subtropicales situées entre 23 et 34 ° N, qui comprennent en particulier le [bassin indo-gangétique](#)<sup>146</sup>.

## Chapitre III : Produite séchée (Pomme de terre)



En [2014](#), la production mondiale de pommes de terre est estimée à 385 millions de [tonnes](#), pour une surface cultivée de 18,8 millions d'hectares, soit un rendement moyen de 20.51 tonnes par hectare (t/ha). Ce chiffre n'inclut pas les plants ([semences](#)) qui représentent 30,8 millions de tonnes (Mt), soit environ 10 % du total. Cette culture s'inscrit à la cinquième place (en tonnage) des productions agricoles au niveau mondial, après la canne à sucre, le maïs, le riz et le blé et devant la betterave à sucre. C'est la plus importante [dicotylédone](#) alimentaire.

Une comparaison par continent montre que l'[Asie](#) 49% et l'[Europe](#) 31.8% concentrent 81 % de la production totale contre 11.1 % pour les [Amériques](#), 7.6 % pour l'[Afrique](#) et 0,5 % pour l'[Océanie](#).

Le [rendement moyen](#) le plus élevé est obtenu en Océanie avec 41.13 t/ha contre 26.64 t/ha dans les Amériques, 21.84 t/ha en Europe, 18.93 t/ha en Asie et 14.87 t/ha en Afrique.

La liste des vingt premiers pays producteurs en 2014 est donnée dans le tableau ci-après avec les surfaces cultivées et les rendements moyens (source FAOSTAT).

**Tableau (III.3): Principaux pays producteurs de pommes de terre**

Année 2014 <sup>148</sup>		Surface cultivée (milliers d'hectares)	Rendement (tonnes par hectare)	Production (millions de tonnes)
1	 <a href="#">Chine</a>	5 645	17.02	96.088
2	 <a href="#">Inde</a>	2 024	22.92	46.395
3	 <a href="#">Russie</a>	2 101	14.99	31.501
4	 <a href="#">Ukraine</a>	1 343	17.64	23.693
5	 <a href="#">États-Unis</a>	425	47.15	20.057
6	 <a href="#">Allemagne</a>	245	47.42	11.607

### *Chapitre III : Produite séchée (Pomme de terre)*

7	 <a href="#">Bangladesh</a>	496	19.03	9.435
8	 <a href="#">France</a>	168	47.94	8.055
9	 <a href="#">Pologne</a>	277	27.77	7.689
10	 <a href="#">Pays-Bas</a>	155	45.66	7.100
11	 <a href="#">Biélorussie</a>	308	20.39	6.280
12	 <a href="#">Égypte</a>	178	26.97	4.805
13	 <a href="#">Iran</a>	160	29.56	4.742
14	 <a href="#">Pérou</a>	317	14.79	4.693
15	 <a href="#">Algérie</a>	156	29.92	4.674
16	 <a href="#">Malawi</a>	270	17.31	4.669
17	 <a href="#">Canada</a>	139	33.03	4.589
18	 <a href="#">Belgique</a>	81	54.00	4.381
19	 <a href="#">Royaume-Uni</a>	140	30.09	4.213
20	 <a href="#">Turquie</a>	130	32.12	4.166
	<b>Total monde</b>	<b>18 775</b>	<b>20.51</b>	<b>385.074</b>

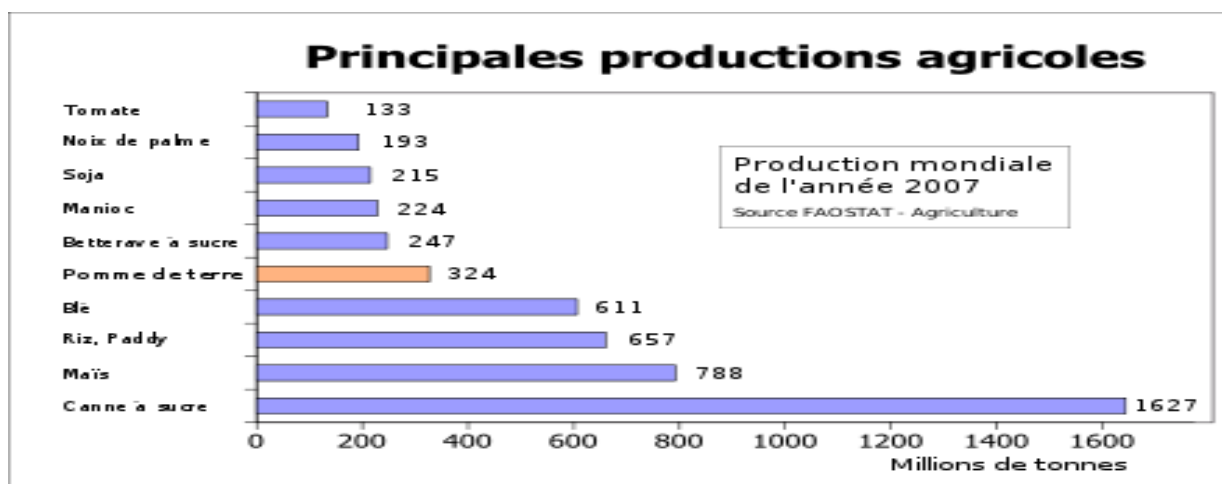


Figure (III.1): La pomme de terre, cinquième produit agricole au niveau mondial.

### Répartition par continents des cultures de pommes de terre

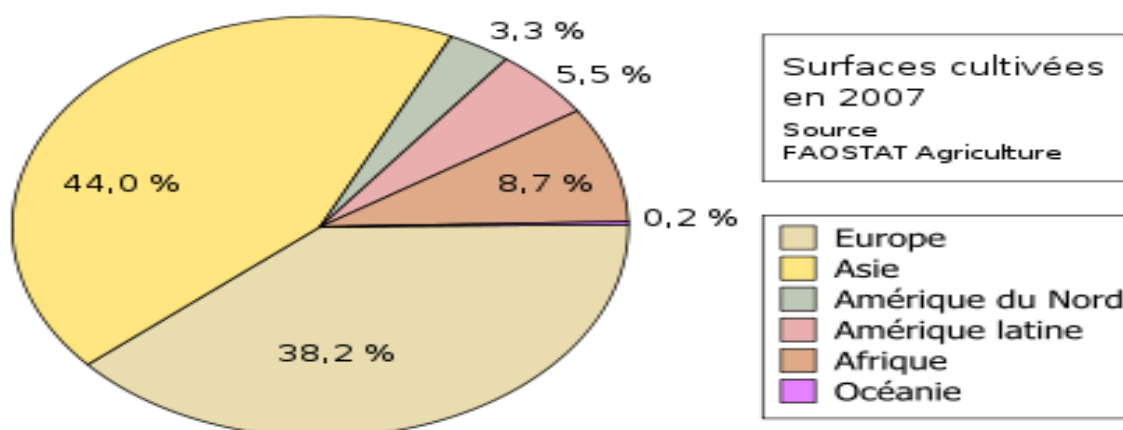


Figure (III.2): Répartition des surfaces cultivées par continent

#### III.5) Récolte, conservation:

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.

#### Récolte :

Les tubercules de grande consommation ne doivent être arrachés qu'à maturité complète (fanes desséchées, peau surdifiée), 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.[12]

### Conservation :

Le stockage de la récolte devra se faire, si possible, au dessous de 6°C. Par ailleurs le tubercule gèle à -1 et -2°C. En cave ou en silo à l'abri de la lumière du jour, au sec et au frais.

L'augmentation de la production de la pomme de terre dans la région de 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.

### III.6)Composition chimique de la pomme de terre:

Les composants majeurs de la pomme de terre sont rassemblés dans le Figure suivant.

[10]



Figure (III.3): Composition chimique de la pomme de terre épluchée crue



## Chapitre IV : Partie expérimental

### IV.1) Partie I : Séchage solaire de pomme de terre :

#### IV.1.1) Description du système de séchage :

Dans cette expérience nous avons utilisé un séchoir solaire indirect à convection forcée figure (IV.1).

##### IV.1.1.1) Séchoir solaire indirect à convection forcée : (figure (IV.1))

**Unité de production d'air chaud :** Elle est constituée d'un capteur solaire à air à simple circulation et à double vitrage, de surface inclinée, la latitude de la ville d' El-oued  $23^\circ$  par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. L'absorbeur en tôle métallique est peint en noir avec un tube en cuivre de diamètre 22 mm . L'isolation thermique est en polystyrène et les vitrages est en verre.

**Chambre de séchage :** Elle est de hauteur 1,05 m, de longueur 0.6 m, et de largeur 0,6 m les parois extérieures sont en bois (multi -couche) de 1.5 cm , avec une isolation interne en polystyrène de 2 cm d'épaisseur. L'air chauffé pénètre à travers la claie pour sortir par un ventilateur d'aspiration dans un écoulement par convection forcée.

**Ventilateur d'aspiration:** C'est un élément qui permet de créer un écoulement forcé alimentée par une source d'énergie électrique (chargeur de 24V).

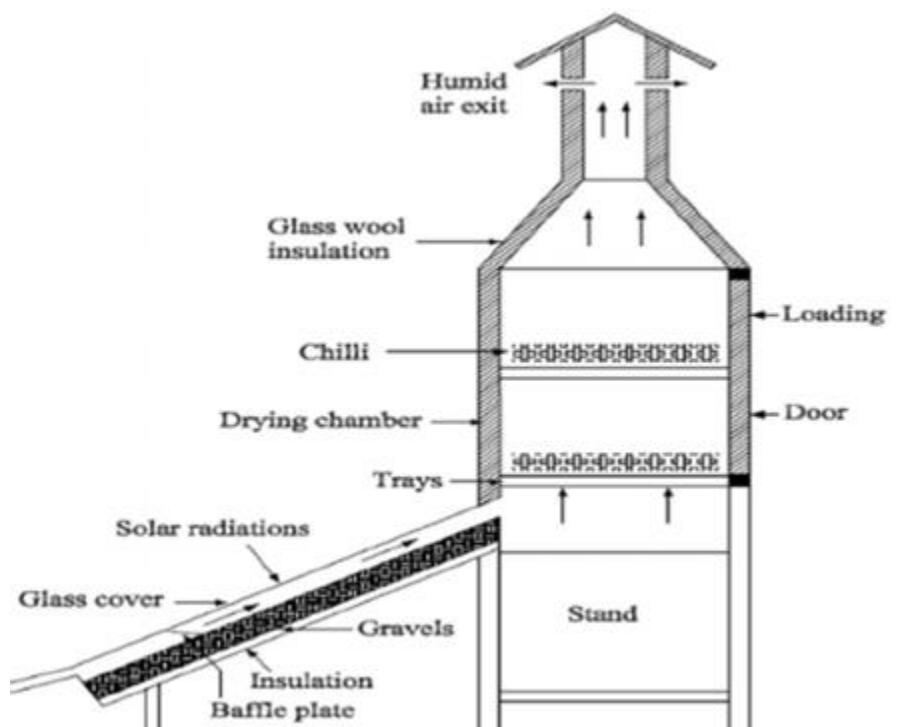


Figure (IV.1) : Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à convection forcée

### IV.1.2) Mode opératoire:

Pour suivre la quantité d'eau évaporée de la pomme de terre au cours , nous avons mesuré sa masse à l'aide d'une balance (figure (A.C.3)) a partirez d'une masse initiale de 200g, chaque une heure a partirez de 08:00h jusqu'à 19 :00h . La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale. Les mesures des températures et sont effectuées chaque 60 minutes .

### IV.1.3) Réalisation du capteur:

#### IV.1.3.1)Description du dispositif expérimental:

Dans notre partie de travail nous avons réalisé de prototype de capteur solaire plan à air de même dimensionnement d'un capteur existe au niveau de université.

#### IV.1.3.2) Les composants de capteur réalisé avec dimensionnement:

Les dimensionnements de prototype (capteur solaire à air) réalisé est : 1.2 m<sup>2</sup> de surface (0.6 m x 0.6 m). (Les figures dans l'annexe A et B)

- **Le coffre :** Plaque en bois (multiple) avec une épaisseur de 0.015 m. figure (A.A.1).
- **Le vitrage :** doubles verres d'épaisseur de 0.005 m. figure(A.A.3)
- **L'absorbeur :** Une plaque mince en acier galvanisé peint en noir mate avec une épaisseur 0.003 m. figure(A.B.6)
- Le tube en cuivre La vienne d'air dynamique d'une épaisseur de 0.001 m et diamètre de 0.022m au-dessus et en contacte de l'absorbeur peint en noir mate . figure(A.B.5)
- Une plaque inferieur en acier galvanisé de 0.001 m couvre l'isolant arrière du capteur. figure(A.B.3)
- La hauteur entre l'absorbeur et la vitre est de 0.05m.
- L'isolation arrière et latérale du capteur est assurée par : poléstiiaire et papier en aluminium . les figures ((A.A.2)(A.B.4)).
- **Support de capteur:** On utilise un petit supporter en aluminium de l'angle fixé (23°). figure(A.A.4)

**IV.2.1) Construction des composant :**

**IV.2.1.1) montage du panneaux solaire:**

Après la préparation on montage les composants.

Montage d'un coffre de capteur et assemblage avec de cloues et colle , Fixer l'isolant de 0.02 m épaisseurs sur le couvre et les cotés, puis poser la plaque en acier de (0.6 x 0.6) m et montage le tube en cuivre.

Après la préparation de tube en cuivre cintrage et coudée la forme (M) sellant le largeurs du panneaux, et fixé ce tube sur et au contacte de l'absorbeur avec des vises parqueur indiqué dans les figure ((IV.5) (IV.6)).

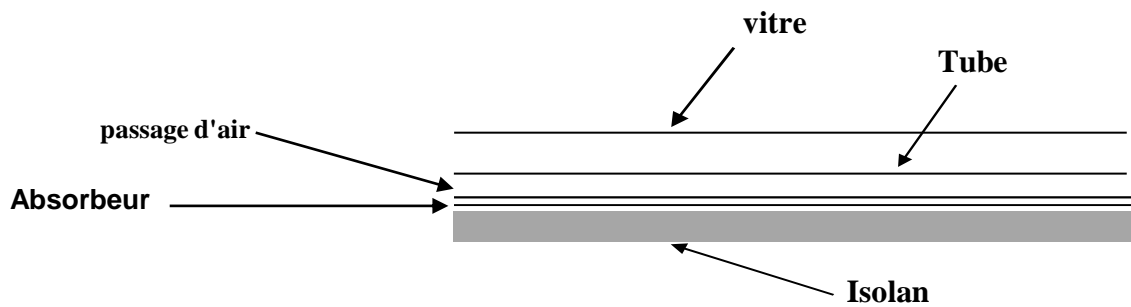
Troué l'orifice d'entre et sortie du l'air chaude dans la face avant du capteur et peinte les tous en noire mat .

Pose la premier vitre puis la deuxième et coller avec le silicone.

**IV.2.1.2) montage de chambre de séchage:**

Montage d'un coffre de chambre de séchage de cinq coté et laissent le sixième comme port du chambre ,et fixer l'isolant de 0.02 m épaisseurs sur les toutes cotés du chambre.

Troué les deux coté du chambre pour fixe des quatre tige-fileté comme support des claies de séchage .



**Figure (IV.2) : Schéma descriptif de capteur solaire réalisé**



**Figure (IV.3) : chambre de séchage**



**Figure (IV.4) : le capteur réalisée**

#### **IV.2.2) Préparation du produit:**

Les tubercules de pomme de terre ont été pelés et lavés à l'eau du robinet, puis coupées en rondelles d'une épaisseur de 0.0025m, elles ont été répartir sur la claie de séchage.



**Figure (IV.5) : Préparation du produit**

#### **IV.2.3)Produit séché:**

Après un temps nécessaire, nous avons obtenu de pomme de terre séchée avec une teneur en eau à base sèche de 1 kg eau /kg m.s.



**Figure (IV.6) : Produit séché**

IV.2) Partie II : Les résultats obtenus résumé dans les courbes suivante:

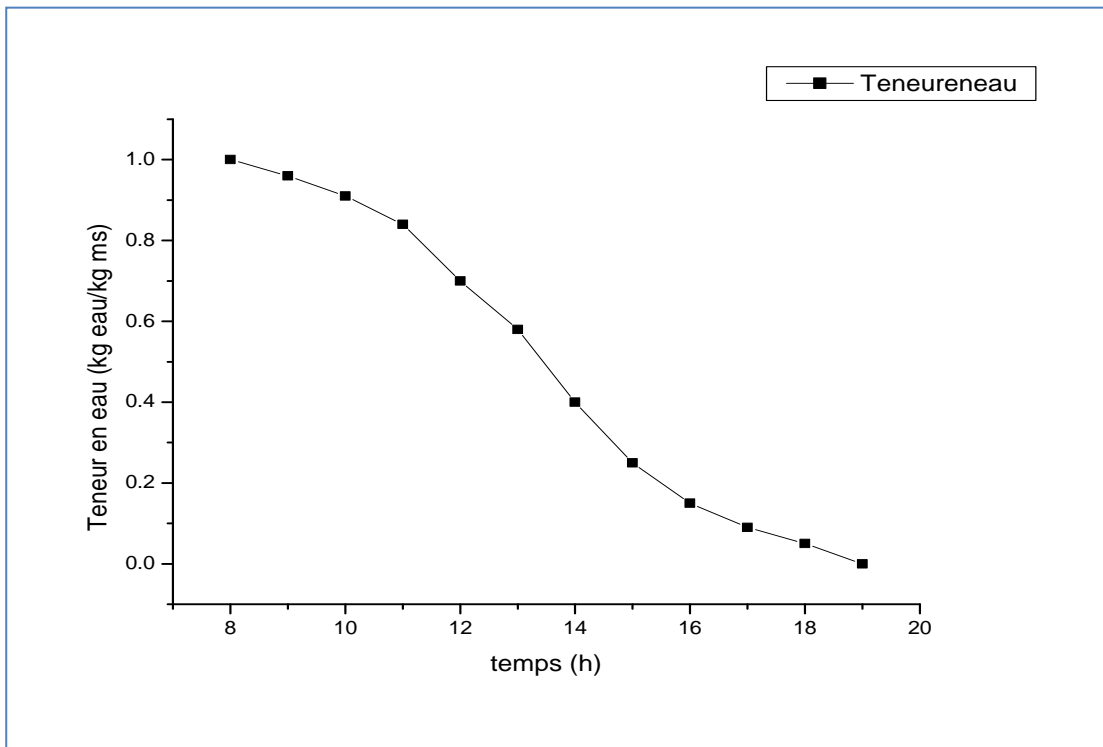


Figure (IV.7) : Variation de teneur en eau en fonction de temps

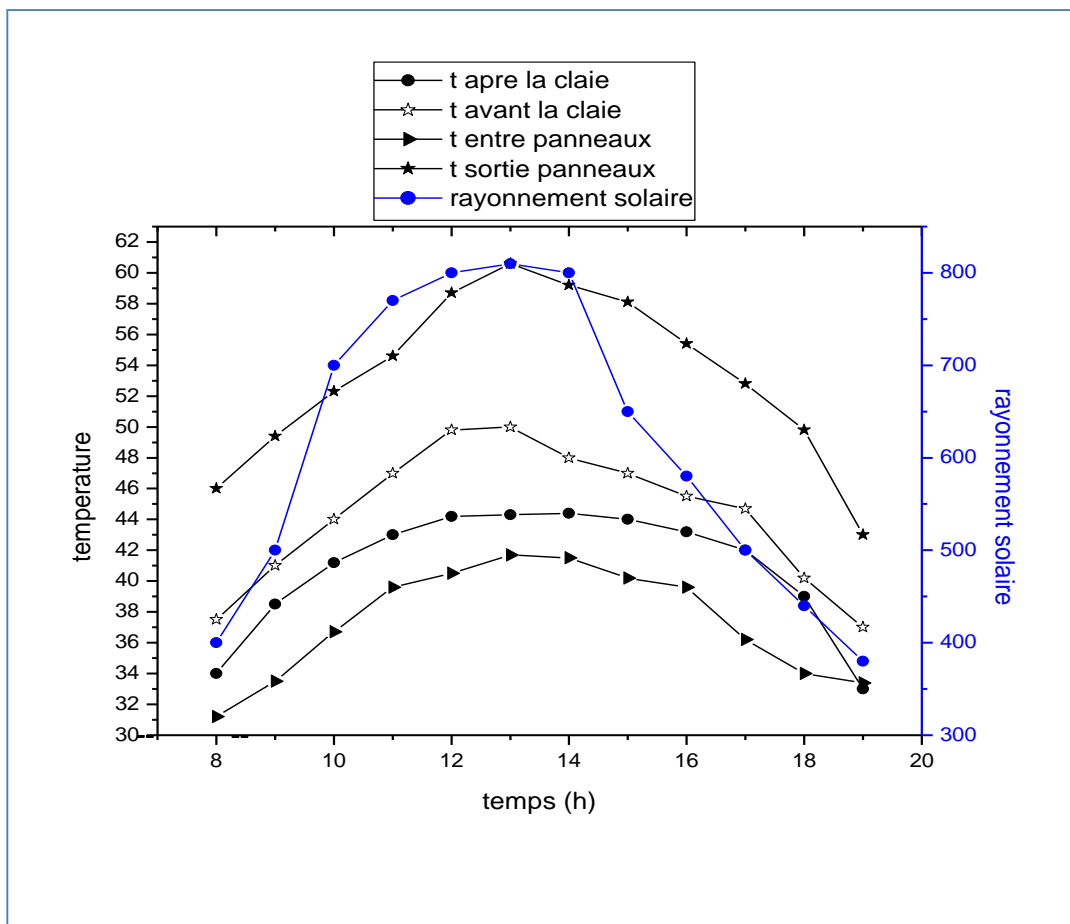


Figure (IV.8) : Variation de température d'entrée, sortie, avant et après de claie, température de produite et rayonnement solaire en fonction de temps

La figure (IV.8) présente la distribution de la température dans le séchoir solaire pour où la température de l'air asséchant est mesurée dans cinq positions, l'entrée et la sortie du capteur solaire, avant et après la claie et la température de produit.

Cette figure montre que la température d'entrée et la sortie du capteur varie respectivement de 31.2 à 43 °C et de 41.7 à 60.6 °C, on constate un écart important entre l'entrée du capteur et la sortie .Ce-ci est du à l'effet de l'absorbeur sur l'air circulant dans le tube en cuivre du capteur solaire.

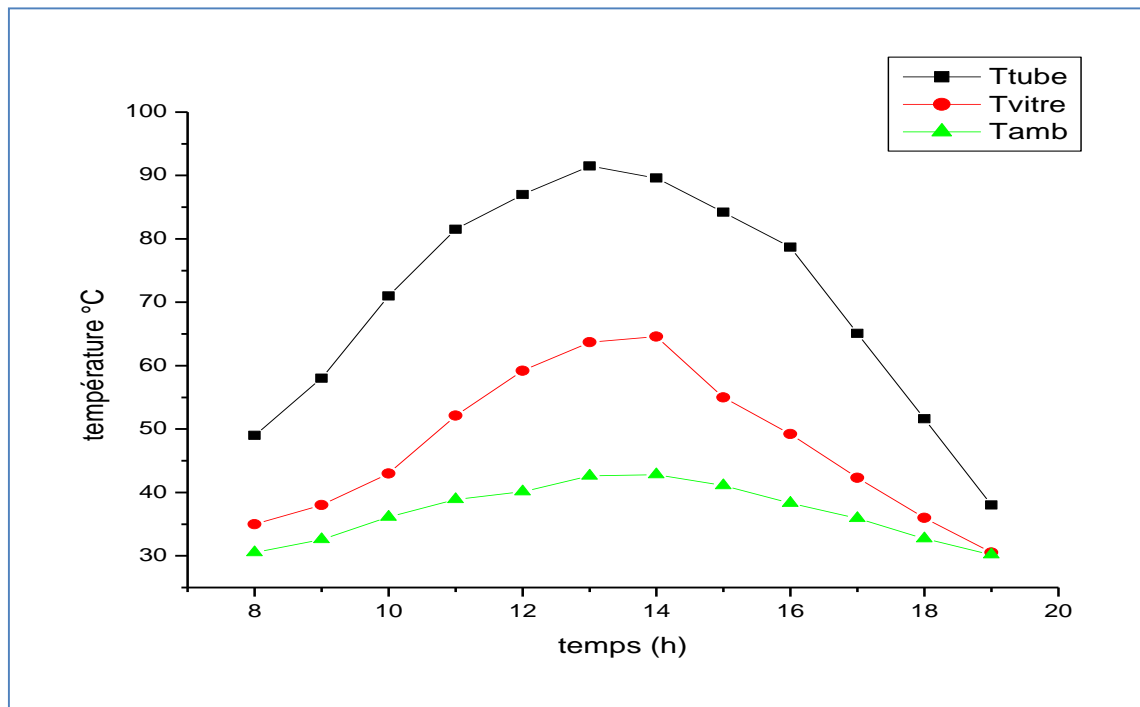
De figure on remarque que la température entre l'avant et après de claie est de 4°C.

De figure (IV.7) on démontrée que la durée de séchage de pomme de terre (épaisseur 0.0025m et un teneur en eau initial de 1 kg d'eau/kg ms.), est de 10h pour un séchoir solaire indirect à convection forcée .

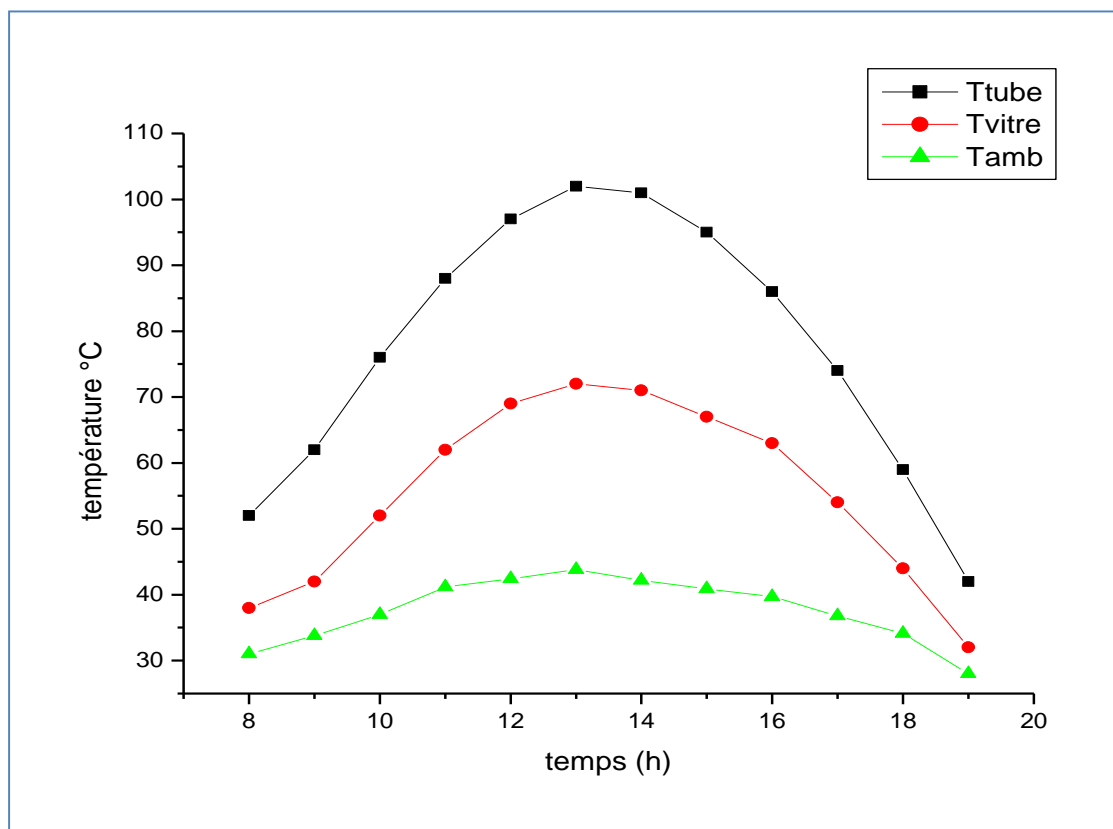
Résultats des Chercheurs sur le séchage de pomme de terre

L.Hassini et al(2007) Univ Tunisie, prendre un résultat de séchage de pomme de terre avec un temps de 500 min de température variée entre 40°C vers 85°C.

M.Lati (2011) Univ Kasdi Merbah Ouargla prendre un résultat de séchage de pomme de terre avec un temps de 4h et 25min dans un séchoir indirecte forcé à une température fixe 60°C [18].

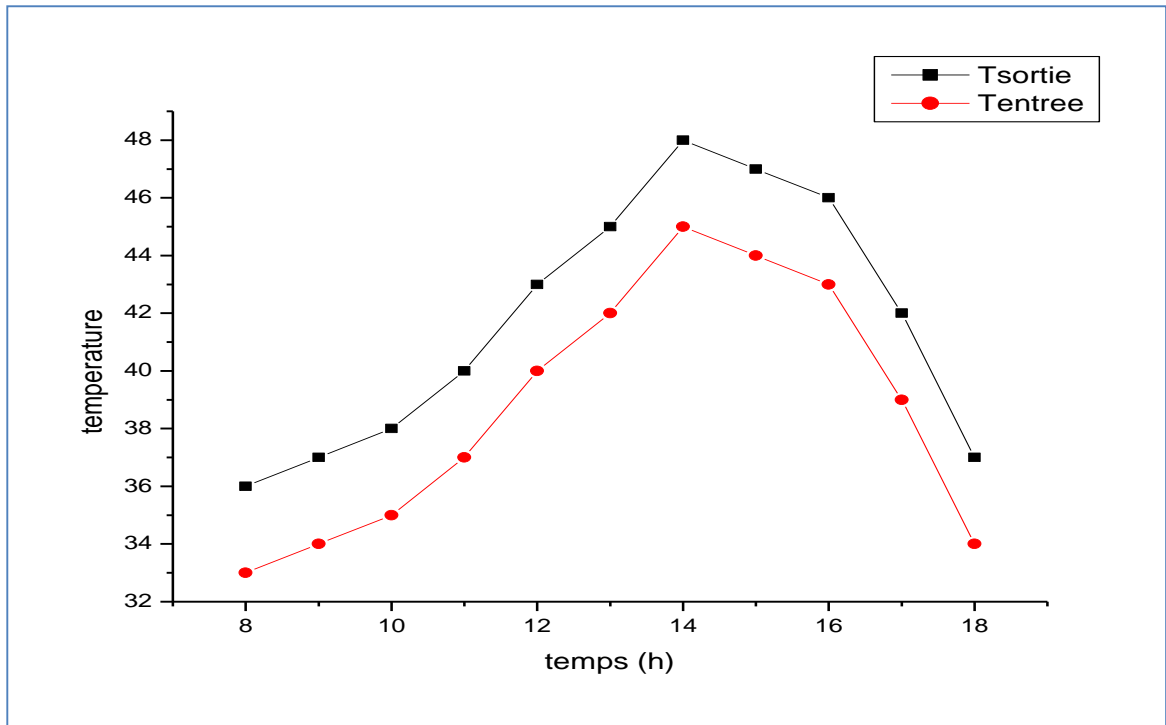


**Figure (IV.9):** Variation de température dans le tube en cuivre de capteur en fonction du temps avec simple verre

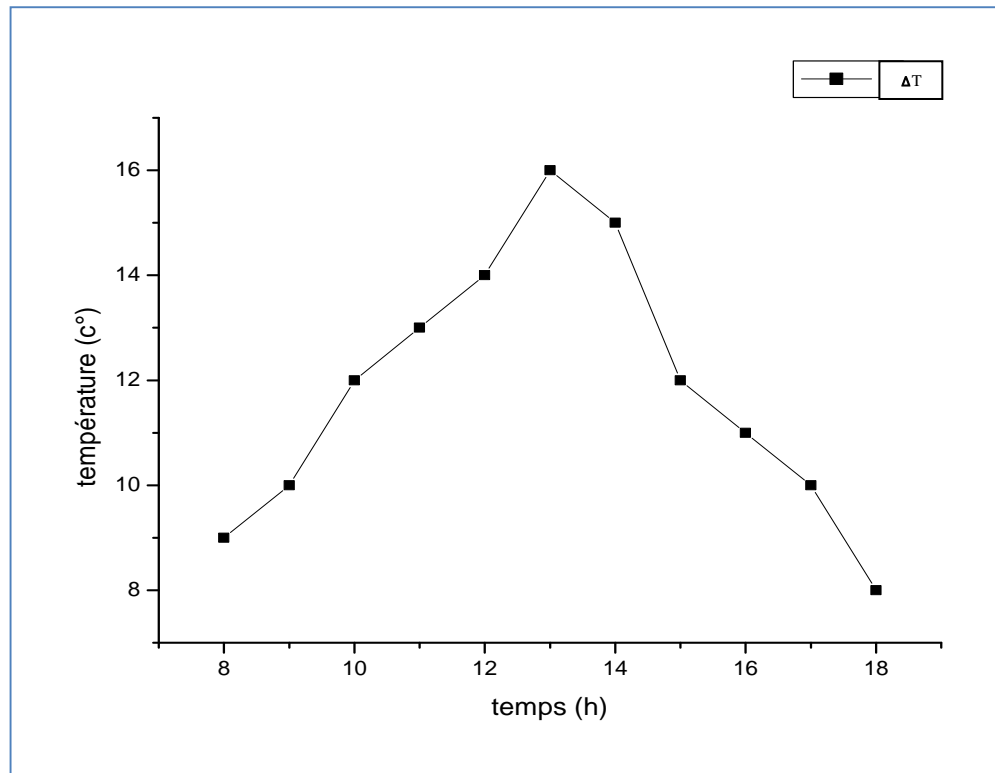


**Figure (IV.10):** Variation de température dans le tube en cuivre de capteur en fonction du temps avec double verre

Dans la figure ((IV.09)et(IV.10)) en remarque que le double vitrage du panneaux solaire et très importante pour augmenté le chaleur dans l'absorbeur (tube)



**Figure (IV.11): Variation de températures d'entrée et la sortie du capteur**



**Figure (IV.12): Variation de gradient de température de capteur en fonction de temps**

Après les figures (IV.12) on remarque que la gradient de température varie respectivement au heure de jour 08/05/2017 .

L'écarte obtenu de température très important entre 16.4°C ; 7.9 °C , avec un  $\Delta T$  maximale de 16 .4 de l'absorbeur.

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Ce travail contribue à l'amélioration des connaissances dans le domaine du séchage solaire de pomme de terre et le domaine des capteurs solaires.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que :

### 1) pour le séchage de pomme de terre:

L'étude de la cinétique de séchage montre que la durée de séchage de pomme de terre (épaisseur 0.0025 m et un teneur en eau initial de 1 kg d'eau/kg ms), est de 10h pour un séchoir solaire indirect à convection forcée. la conservation est alors possible dans des conditions ambiantes.

### 2) pour la réalisation et amélioration de capteur solaire:

- Le meilleur résultat de température de l'air dynamique d'un absorbeur avec un tube .
- l'efficacité augmentée dans le capteur solaire réalisé avec double verre , ne pas le même que le capteur solaire simple verre.

### Recommandation :

- ✓ Pour améliorer l'efficacité du capteur solaire réalisé on propose d'ajouter des chicane pour augmenter la surface de contact et le transfert de chaleur dans le capteur.
- ✓ Ainsi on propose une modification sur le niveau de support de capteur (orientation de l'angle de capteur).
- ✓ Pour le séchage de pomme de terre on propose une analyse (biologique) avant et après le séchage pour déterminer la qualité de produit.

## Références

---

### Références

- [1] **Guide de l'utilisateur de Toit Solaire Photovoltaïque.** Programme européen PV-SALSA (2002).
- [2] N.Chalal, **Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect.** Mémoire de magister. Université Mentouri-Constantine(2007).
- [3] A.Bensedik, **Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée.** Mémoire de magister. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen. (2011).
- [4] S.Chouicha, **Etude expérimentale du séchage solaire Des dattes humides et impact Sur la qualité.** Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah-Ouargla(2010).
- [5] H. Ben cheikch, M. Ould Sidimed et Y.Draoui, **Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif.** Mémoire de l'ingénieur d'état. Université Kasdi Merbah –Ouargla. (juin 2011).
- [6] W. Belachi, **Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires.** Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah- Ouargla(2009).
- [7] N.Nadir, **Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire.** Mémoire de magister, université Kasdi Merbah Ouargla(2009).
- [8] D. Mennouche, **Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire.** Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah-Ouargla(2006).
- [9] O. Badaoui, M. Lati, N. Metidji, A. Djebli, K. Debiani et R. Sellami, **Contribution du séchage solaire dans la production de la farine de pomme de terre.** 9<sup>èmes</sup> Journée Scientifiques et Techniques. Oran(2013).
- [10] <http://www.fao.org/potato-2008/fr/pommedeterre/> consulté le 28 avril 2014.
- [11] **La culture de pomme de terre : Production et possibilité pour la transformation** Journée de la Pomme de Terre.Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielles. Mostaganem, (2013).
- [12] H.Medjoudj, **Etude du comportement au séchage de six légumes : Carotte, Courgette, Cardon, Pomme de terre, Ail et Oignon.** Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine.
- [13] A. Ahmed-Zaïd, A. Moulla, M. S. Hantala et J.Y. Desmons, **Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans à Air: Application au Séchage de l'Oignon Jaune et du Hareng.** Rev. Energ. Ren. Vol.4 p. 69-78. (2001)

## Références

---

- [14] A. Zerrouki, B. Tedjiza et N. Said, **Modélisation des Pertes Thermiques dans un Capteur Solaire à Air à deux Passes**. Rev. Energ. Ren. Vol. 5p.49-58. (2002).
- [15] K. Aoues, N. Moumami, M. Zellouf, A. Moumami, A. Labed, E. Achouri et A. Benchabane, **Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air: Etude expérimentale dans la région de Biskra**. Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 p. 237 – 248. (2009).
- [16] A. Boubeghal, M. Benhammou, B. Omari, S. Amara, L. Amer, H. Mounzar et S. Ouejdi, **Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection naturelle** Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen p. 315 – 320. (2007).
- [17] M.H. Berrebeuh, **Etude de validité des cinétiques de séchage en convection forcée pour les applications de séchage solaire de certains produits alimentaires**. Mémoire de magister. université Kasdi Merbah- Ouargla (2009).
- [18] M.Lati, **contributions à l'amélioration d'un séchoir solaire de produit agro- alimentaire**. Mémoire de magister. université Kasdi Merbah- Ouargla (2011).
- [19] H.Houhou, **Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires**. Mémoire de magister. université Mohamed Khider – Biskra

# Annexe

---

**Annexe :** compositions de capteur, étapes des constructions, appareilles de mesure et Propriétés thermo-physiques de l'air

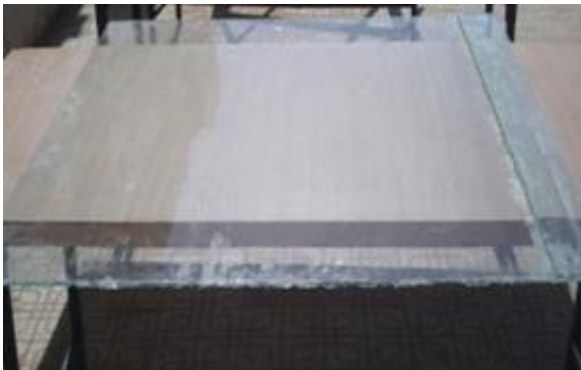
## Annexe A: Les compositions de capteur :



**Figure (A.A.1):** Les composants du coffre



**Figure (A.A.2) :** Poléstiare isolante

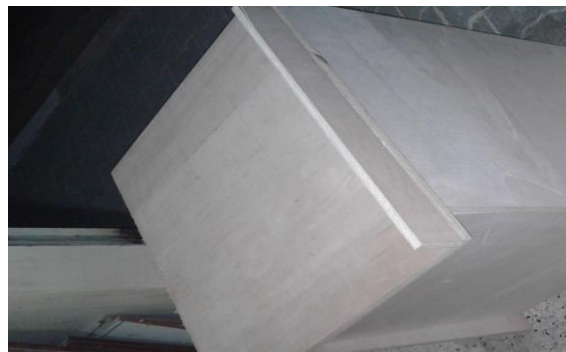


**Figure (A.A.3) :** La vitre transparente



**Figure (A.A.4) :** Le Supports de capteur

## Annexe B : Les étapes des constructions :



**Figure (A.B.1):** assemblage du panneaux

## Annexe



**Figure (A.B.3): assemblage et collage des plaques (par clou et colle)**



**Figure (A.B.4) : Coller l'isolant sur le couvre et fixation des plaques**



**Figure (A.B.5): Tube en cuivre**

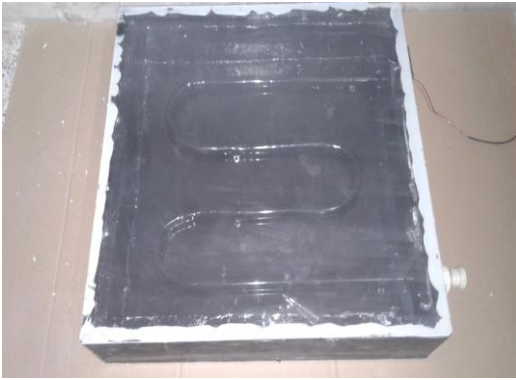


**Figure(A.B.6): fixation du tube**



**Figure(A.B.7): codage et ceintrage du tube en cuivre**

## Annexe



Figure(A.B.6):Peinture de L'absorbeur (noir mate)



Figure (A.B.7):l'absorbeur avec tube cuivre



Figure (A.B.8):Montage de verre



Figure (A.B.9):Ventilateur à l'entrée de capteur

### Annexe C : Les appareils de mesure :



Figure(A.C.1):Solarimètre



Figure (A.C.2):Température mètre(PHYWE)

## Annexe



Figure (A.C.3):balance utilisé(KERN)

### Annexe D : Propriétés thermo-physiques de l'air :

D'après les tables publiées par Frank M. White, "Heat and Mass transfer", Addison-Wesley, 1988 :

Air à pression atmosphérique								
T	T	$\rho$	$\mu$	$\nu$	$C_p$	$\lambda$	a	Pr
C°	K°	kg.m <sup>-3</sup>	kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	-
-23	250	1,413	1,60×10 <sup>-5</sup>	0,949×10 <sup>-5</sup>	1005	0,0223	1.32×10 <sup>-5</sup>	0,722
27	300	1,177	1,85×10 <sup>-5</sup>	1,57×10 <sup>-5</sup>	1006	0,0262	2,22×10 <sup>-5</sup>	0,708
77	350	0,998	2,08×10 <sup>-5</sup>	2,08×10 <sup>-5</sup>	1009	0,0300	2,98×10 <sup>-5</sup>	0,697
127	400	0,883	2,29×10 <sup>-5</sup>	2,59×10 <sup>-5</sup>	1014	0,0337	3,76×10 <sup>-5</sup>	0,689