



Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés

Domaine Science et Technologie

Filière Génie des Procédés

MIMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

Thème

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

Soutenu le: 07 /06 /2014

Par : BAHADJ Ahmed

DEVANT LE JURY

CHAOUICHA Samira

M.A.A

Président

MENNOUCHE Djemal

M.A.A

Examineur

LATI Moukhtar

M.A.B

Rapporteur

Année Universitaire : 2013/2014

Remerciement

*Je remercie Allah, mon créateur de m'avoir donnée les forces
pour accomplir ce mémoire*

*Tous mes remerciements à mon encadreur Monsieur " LATI
Moukhtar" de sa collaboration et de sa patience avec moi.*

*Je 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 pour toutes ma 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 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 و السرعة) 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
Résumé.....	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 méthodes du séchage.....	04
I.4) Caractéristiques de l'air de séchage.....	05
I.5) Caractéristiques des solides humides.....	05
I.6) Transferts de chaleur.....	06
I.7) Transfert de masse d'un produit humide.....	08
I.8) Vitesse de séchage.....	08
I.9) Cinétique du séchage.....	09

Chapitre II : les capteurs solaires

II.1) Types de capteurs solaires.....	11
II.1.1) Les capteurs solaires photovoltaïques.....	11
II.1.2) Capteurs solaires thermique.....	11
II.1.2.1) Capteurs plans.....	11
II.1.2.2) Capteurs par concentration.....	13
II.2) Les différents types de structure de séchoirs solaire.....	14
II.3) Classification des systèmes de séchage à énergie solaire.....	15
II.3.1) Systèmes de séchage à énergie solaire passifs.....	15
II.3.2) Systèmes de séchage à énergie solaire actifs «Les séchoirs hybrides ».....	17

Chapitre III : produite séchée (Pomme de terre)

III.1) Pomme de terre.....	19
III.2) Origine et présentation générale.....	19
III.3) La plante.....	20

III.4) Production.....	21
III.5) Récolte, conservation.....	21
III.6) Composition chimique de la pomme de terre.....	22

Chapitre IV : étude bibliographique

IV.1) Partie 1 : amélioration des capteurs solaire plan a air.....	23
IV.2) Partie 2 : séchage de pomme de terre	26

Chapitre V : Partie experimental

V.1) Partie I : Séchage solaire de pomme de terre.....	29
V.1.1) Description du système de séchage.....	29
V.1.1.1) Séchoir solaire indirect à convection forcée.....	29
V.1.2) Mode opératoire	30
V.1.3) Préparation du produit.....	30
V.1.4) Produit séché.....	30
V.1.5) Les résultats obtenus	31
V.2) Partie II : Réalisation et amélioration de capteur solaire à air.....	33
V.2.1) Réalisation du capteur.....	33
V.2.1.1) Description du dispositif expérimental.....	33
V.2.1.2) Les composants de capteur réalisé avec dimensionnement.....	33
V.2.2) Construction des composants.....	33
V.2.3) Méthode de mesure	34
V.2.3.1) Les résultats obtenues.....	34
V.2.4) Le capteur réalise avec une couche de sable.....	41
V.2.4.1) Préparation de sable.....	41
V.2.5) Les résultats obtenues	42
Conclusion générale.....	45
Référence.....	46
Annexe	48

Liste des figures

N° de figure	Désignation	Page
Figure(I.1)	Représentation schématique d'un solide humide	08
Figure(I.2)	Cinétique de séchage	10
Figure (II.1)	Panneaux photovoltaïque	11
Figure (II.2)	Représentation schématique d'un capteur plan	12
Figure (II.3)	Représentation schématique d'un capteur à concentration	13
Figure(II.4)	Séchoir solaire tente en polyéthylène	16
Figure(II.5)	Séchoir solaire indirect	17
Figure (III.1)	Composition chimique de la pomme de terre épluchée crue	22
Figure(IV.1)	Capteur muni d'obstacles TL	23
Figure(IV.2)	Schéma du dispositif expérimental	24
Figure(IV.3)	Schéma descriptif des chicanes	24
Figure(IV.4)	Schéma d'un élément du capteur	25
Figure (V.1)	Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à convection forcée	29
Figure (V.2)	Préparation du produit	30
Figure (V.3)	Produit séché	30
Figure (V.4)	Variation de teneur en eau en fonction de temps	31
Figure (V.5)	Variation de température d'entrée, sortie, avant et après de claie et température de produite en fonction de temps	31
Figure (V.6)	Capteur réalisée	34
Figure (V.7)	Schéma descriptif de capteur solaire réalisé	34
Figure (V.8)	Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire (double passe) de jour 12/05/2014	35
Figure (V.9)	Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire (double passe) de jour 13/05/2014	36
Figure (V.10)	Variation de déférence en températures d'entrée et la sortie de capteur (double passe) la jour 12/05/2014	37
Figure (V.11)	Variation de déférence en températures d'entrée et la sortie de capteur (double passe) la jour 13/05/2014	37
Figure (V.12)	Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire (passe ci-dessus de l'absorbeur)	38

Figure (V.13)	Variation de différence en températures d'entrée et la sortie de capteur (passe ci-dessus de l'absorbeur)	39
Figure (V.14)	Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire (passe au-dessous de l'absorbeur)	39
Figure (V.15)	Variation de différence en températures d'entrée et la sortie de capteur (passe au-dessous de l'absorbeur)	40
Figure (V.16)	Appareil du tamisage de sable	41
Figure (V.17)	Traitement de sable	42
Figure (V.18)	Fixation de couche de sable	42
Figure (V.19)	Graine de sable	42
Figure (V.20)	Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le Rayonnement solaire (passe ci-dessus de l'absorbeur avec une couche de sable)	43
Figure (V.21)	Variation de différence en température d'entrée et la sortie de capteur en fonction de temps	43
Figure (V.22)	Ecarte de température de capteur sans sable et avec sable	44

Liste des tableaux

N° de tableau	Désignation	Page
Tableau(II.1)	Structure de quelques séchoirs solaire	14
Tableau (III.1)	Principaux producteurs mondiaux de la pomme de terre en 2007	20
Tableau (III.2)	Principales wilayas productrices de pomme de terre en Algérie	20
Tableau(IV.1)	Quelque travail sur le séchage de pomme de terre	28

Liste des symboles

Symboles	Désignations	Unités
α	Coefficient de convection thermique	W/ m ² .K
λ_a	Conductivité thermique	W/m.K
φ_a	Flux absorbant	W
H_a	Humidité absolue	Kg eau / kg as
X_{eq}	Humidité d'équilibre	kg eau / kg 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
φ_p	Puissance perdue par convection et conduction	W
φ_s	Puissance stockée sous forme de chaleur	W
φ_t	Puissance thermique utile par m ² du capteur	W
φ_u	Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur	W
Q	Quantité de chaleur transférée par unité de temps	W
η	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 eau / kg Mh
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg eau / kg Ms
P_v	Tension de vapeur	Pascal
$-dx/dt$	Vitesse de séchage du produit	kg eau / kg 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/m² 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 cinq 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 quatrième chapitre est une étude bibliographique sur l'amélioration des capteurs solaires à air et le séchage de pomme de terre.

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 1 :
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) Domaines d'utilisations :

➤ Industrie agroalimentaire :

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage.

Le séchage peut être une étape nécessaire à la production du produit ou un rôle dans la conservation de l'aliment. Il existe moins de 200 types de séchoirs industriels dans le secteur alimentaire. On peut citer par exemple :

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

➤ **Industrie papetière :**

Le papier est obtenu par séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés.

➤ **Industrie du bois :**

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme du bois. [3]

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]

I.4) Caractéristiques de l'air de séchage :

I.4.1) humidité :

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

I.4.2) 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 :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} [\text{kg}_v \cdot \text{kg}_{\text{gas}}^{-1}] \quad (\text{I.1})$$

I.4.3) Humidité relative :

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température [6]

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} \cdot 100 \quad 0\% \leq H_r \leq 100\% \quad (\text{I.2})$$

I.4.4) Température sèche :

On nomme température sèche d'un gaz la température indiquée par une sonde de température placée dans le courant gazeux. Il s'agit de la température d'un gaz au sens Courant.

I.4.5) Température humide du gaz :

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

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:

$$M_h = M_e + M_s \quad (\text{I.3})$$

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.

$$X = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{I.4})$$

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.

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

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]

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} = \frac{M_e}{M_s} \quad (\text{I.6})$$

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 :

$$Q = \alpha S (T_a - T_s) \quad (I.7)$$

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.
- α ($W / m^2 \cdot K$) : 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 :

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

Avec :

- λ ($W / m \cdot K$) conductivité thermique de la pellicule de produit ou de gaz à travers laquelle s'effectue le transfert,
- $\frac{dT_s}{dl}$: 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.

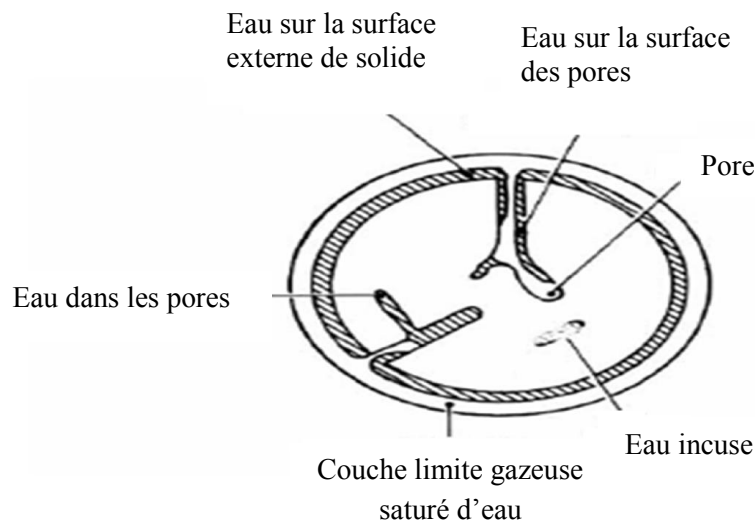
Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible.

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

I.7) 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]



Figure(I.1) : 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 évaporé de solide a séché par unité de temps et de masse de solide sec, ou toute simplement la limite du quotient de la différence de teneur Δm par l'intervalle de temps Δt , 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 $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ en fonction de X. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Sur la courbe schématique présentée à la Figure (I.2), on peut distinguer trois phases:

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

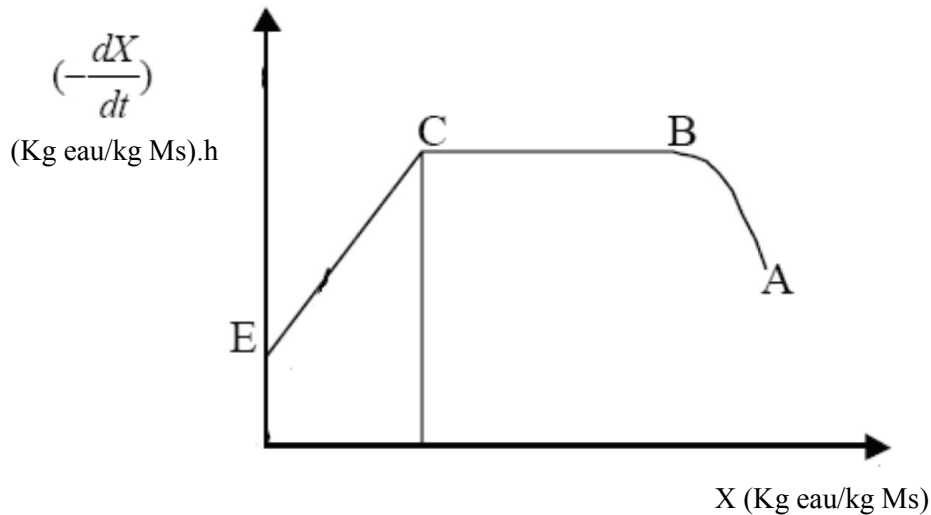
L'humidité du produit dans cette période varie mais pas sensiblement et la température du produit varie (croît ou décroît) jusqu'à la température humide correspondant à l'environnement séchant (zone A-B). Cette période est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grande taille,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

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.

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.2) : 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

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]

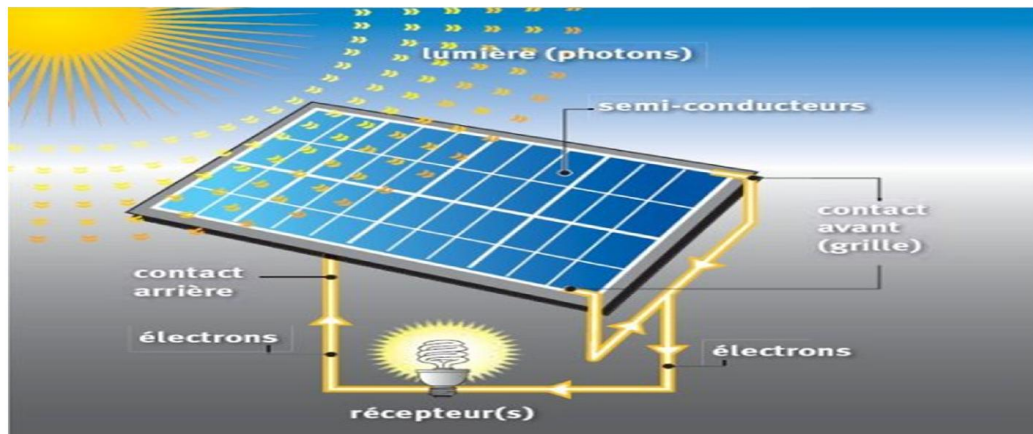


Figure (II.1) : Panneaux photovoltaïque

II.1.2) Capteurs solaires thermiques :

Les capteurs solaires thermique 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.

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 le plus utilisé 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.

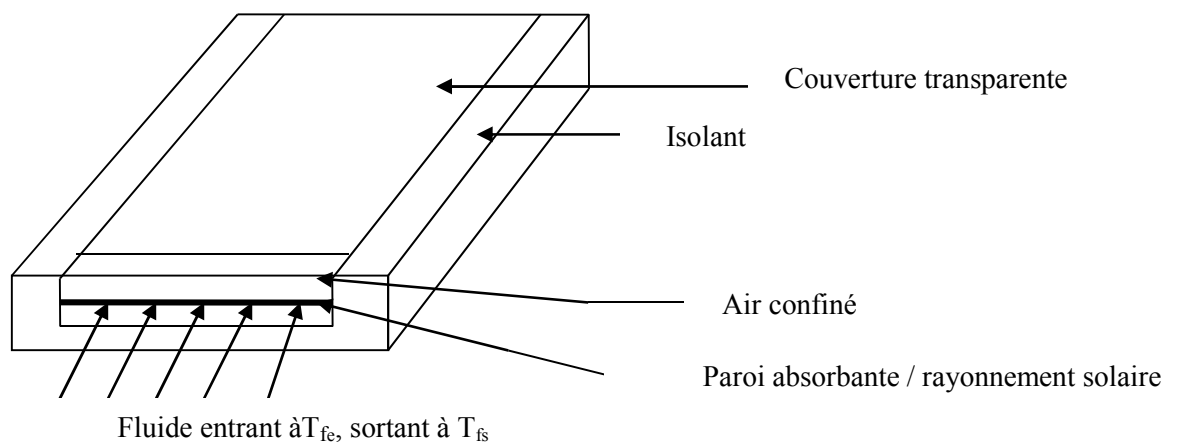


Figure (II.2) : Représentation schématique d'un capteur plan à air

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]

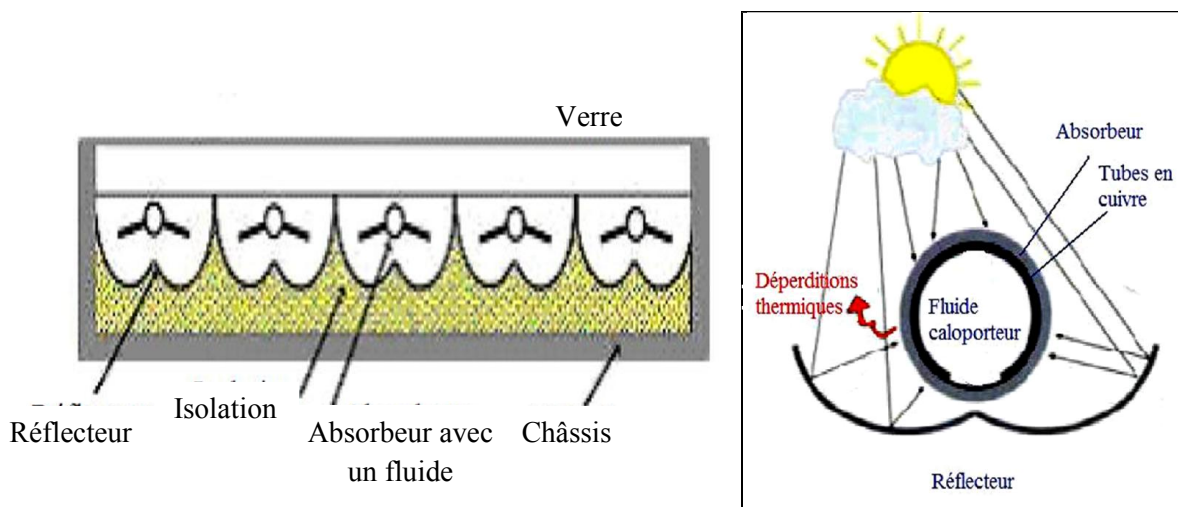


Figure (II.3) : Représentation schématique d'un capteur à concentration.

II.1.2.3) Bilan thermique du capteur :

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

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

Où φ_a : Le flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur,

φ_u : La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur,

$$\varphi_u = F_R \left((\tau_v \alpha_n) \phi_g - U_L (T_{fe} - T_\alpha) \right) \quad (\text{II.2})$$

$$F_R = \left(\frac{m c_p}{U_L} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{U_L F'}{m c_p} \right) \right] \quad (\text{II.3})$$

φ_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,

$$\varphi_p = U_L (T_1 - T_\alpha) = \varphi_{p_1} + \varphi_{p_2} \quad (\text{II.4})$$

Avec : φ_{p_1} : perte à l'avant

φ_{p_2} : perte à l'arrière

φ_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 :



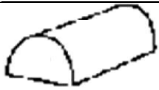



Le rendement instantané d'un capteur est défini par : [7]

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

$$\eta = \frac{\varphi_u}{\varphi_a} \quad (\text{II.5})$$

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 :

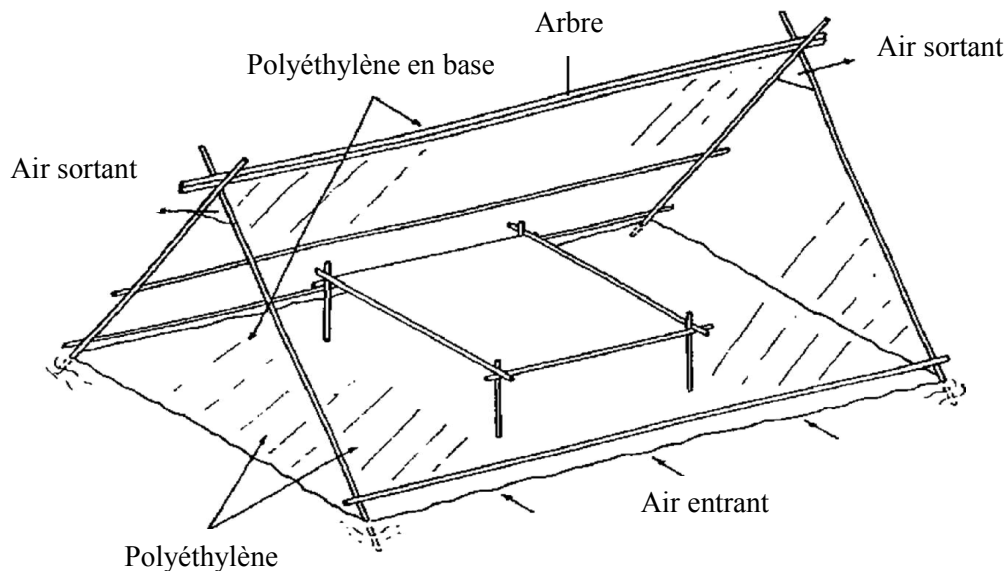
- La température qui augmente sous l'effet de serre.
- La circulation naturelle de l'air dans le séchoir.

Avantages

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

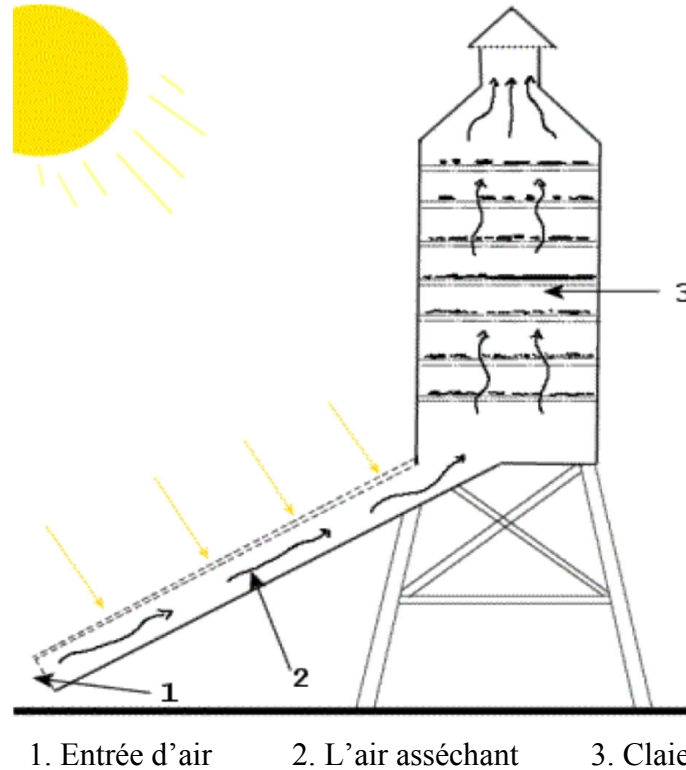
Dans les séchoirs solaires indirects, le collecteur convertit le rayonnement solaire en chaleur. L'air pénètre dans le collecteur, il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection jusqu'à la chambre de séchage, cet air est ensuite utilisé pour sécher les produits. La durée de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

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
séché (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^{ème} 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).

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-Oued	7392	1771626	246

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

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 féculs (amidon).

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 (fanés desséchés, 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 destinées 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]

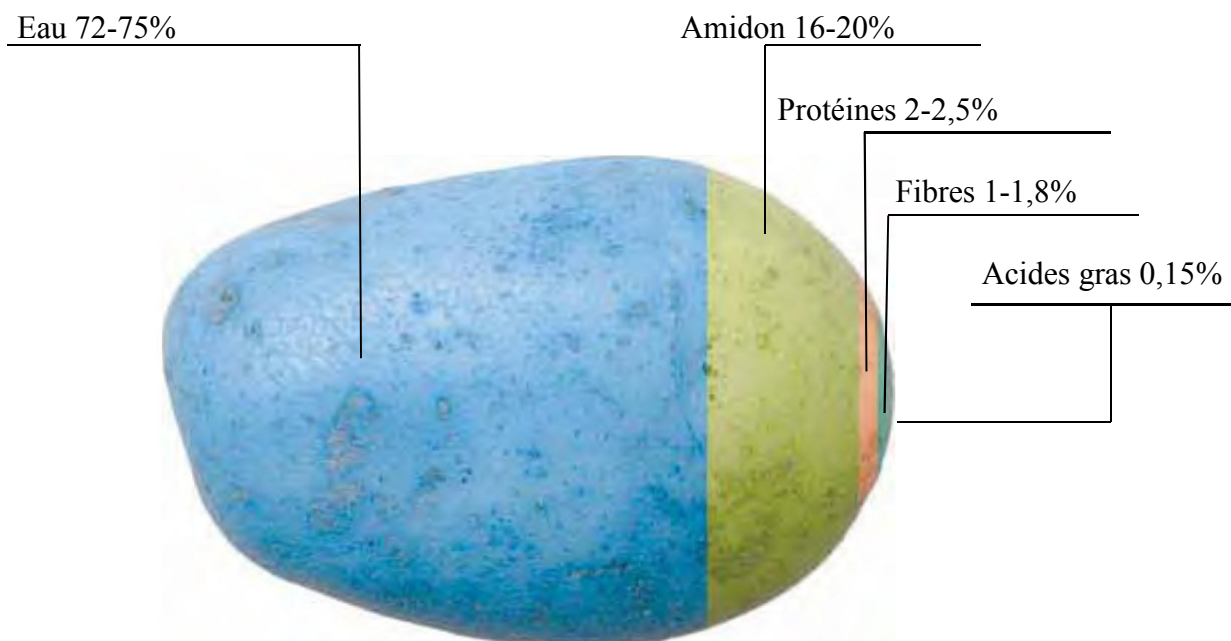


Figure (III.1): Composition chimique de la pomme de terre épluchée crue

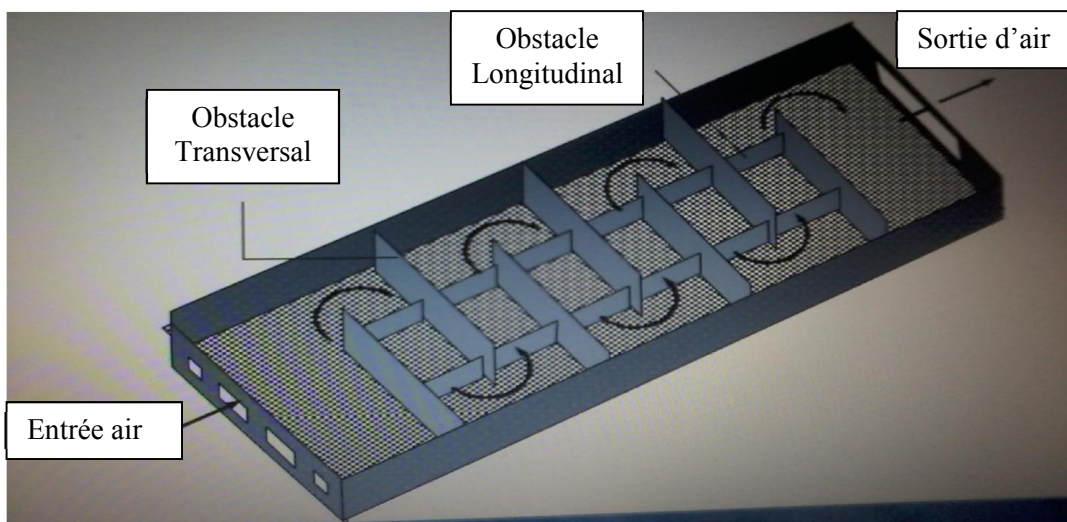
Chapitre IV :
Étude bibliographique

IV.1) Partie 1 : Amélioration des capteurs solaire plan a air

(Présentation de quelques travaux sur l'amélioration des capteurs solaires):

IV.1.1) A. Ahmed-Zaid et al :

Dans le cas des obstacles fixés sur l'isolant, le choix des formes géométriques d'obstacles utilisés doit satisfaire certains critères. En effet, la forme et la disposition des obstacles affectent l'écoulement d'air pendant sa trajectoire. Les obstacles assurent une bonne irrigation de l'absorbeur, créent la turbulence et réduisent les zones inactives dans le collecteur. [13]

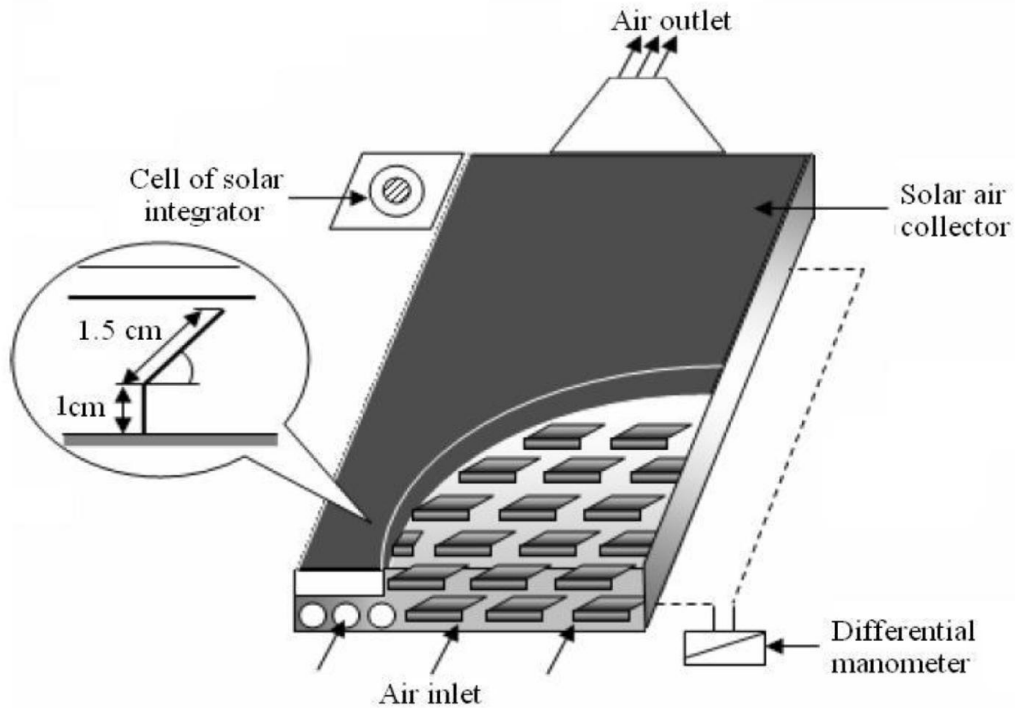


Figure(IV.1) : Capteur muni d'obstacles TL

IV.1.2) K. Aoues et al :

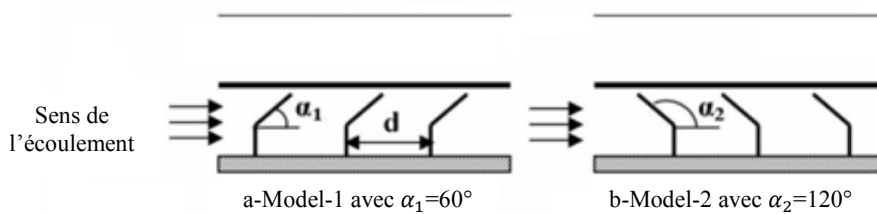
La veine d'air dynamique d'une hauteur de 25 mm est comprise entre la plaque absorbante (corps noir) et une plaque inférieure en acier galvanisé placée sur l'isolant.

L'isolation arrière est assurée grâce à une feuille de polystyrène de 40 mm d'épaisseur et puis elle est assurée également par le boîtier en bois de 5 mm d'épaisseur.



Figure(IV.2) : Schéma du dispositif expérimental

En outre, la veine d'air dynamique est équipée de rangées d'obstacles métalliques minces soudées perpendiculairement à l'écoulement sur la plaque inférieure placée au-dessus de l'isolant. Ces obstacles ont deux formes différentes (model-1 et model-2) où la différence entre les deux réside dans la partie inclinée d'angle α respectivement égale à 60° et 120° .

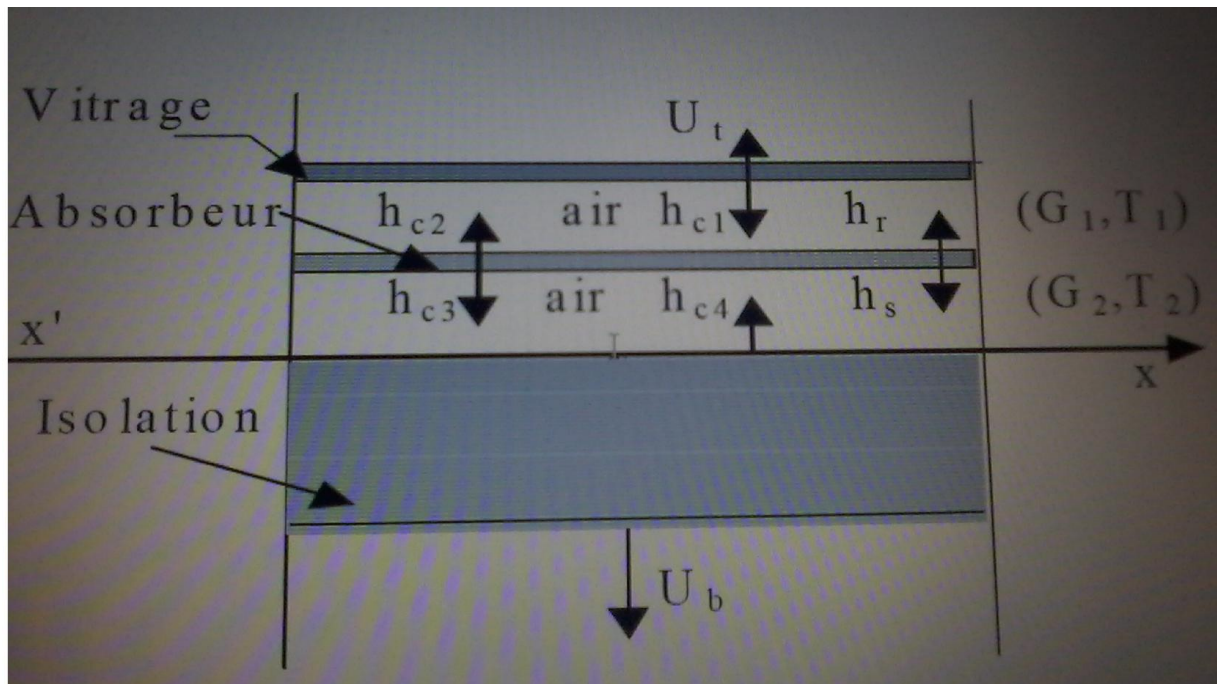


Figure(IV.3) : Schéma descriptif des chicanes

Ainsi, ces obstacles ont été mis en place et espacés d'une distance (d) suivant deux configurations, A et B, respectivement à $d = 10$ et $d = 5$ cm. Les deux configurations, A et B, se différencient donc par le nombre de rangées (de chicanes), respectivement égale à 152 et 256 chicanes.[14]

IV.1.3) A.Zerrouki et al :

Considérons un capteur solaire à air à deux passes (voir Figure IV.4). On suppose que ce capteur est dans un état tel que les conditions de Bliss sont respectées. [15]



Figure(IV.4) : Schéma d'un élément du capteur

IV.2) Partie 2 : Séchage de pomme de terre

(Quelques travaux sur séchage de pomme de terre):

IV.2.1) M.SOBRAL et al. (2001) : en étudiant l'effet du séchage sur le rétrécissement des cubes de pomme de terre rapportent que le volume des cubes diminuait linéairement avec la teneur en eau pour des pertes inférieures à 80 %.

L'effet de la température sur le taux de rétraction axiale est important sur les rondelles de petite épaisseur où il décroît proportionnellement à la température. Dans le cas de l'épaisseur moyenne, il est moins important puisque à 70 °C, le taux est le plus élevé suivi par celui de 60 °C et le plus bas est celui de 85 °C.

Quand aux rondelles les plus épaisses, l'effet de la température est plus important.

IV.2.2) BIMBENET et al. (2002) : rapportent que l'évolution de la structure physique du matériau est directement liée au mode d'évaporation et de transport interne d'eau. Lorsque le transport d'eau a lieu sous forme liquide vers la surface, le produit a tendance à rétrécir proportionnellement au volume d'eau évaporée, dans la mesure où la résistance mécanique du matériau sec le permet.

Cette résistance est remarquée chez les rondelles les plus épaisses de la pomme de terre séchée à 85 °C. [12]

IV.2.3) A. KAVAK (2006) : étudier du séchage en couche mince pour comprendre le comportement de la pomme de terre, pomme et disques de citrouille (potiron). Les expériences de séchage sont conduites à 60; 70 et 80°C avec une vitesse de l'air de 1; 1.5m/s. Le séchage est maintenu jusqu'à un contenu en humidité finale atteinte de 10 % (b.s); 13 % (b.s), 6 % (b.s) respectivement.

L'auteur rappelle que les phénomènes de séchage des produits biologiques se passent au cours de la phase de séchage à vitesse décroissante et sont contrôlés par les mécanismes de diffusion liquide et/ou de diffusion de vapeur. Ce comportement suggère qu'il est fortement influencé par le transfert interne de diffusion de l'humidité qui contrôle ce phénomène.

Le séchage ne présentant que des périodes de séchage à régime décroissant; les rondelles de 6,3 mm, séchant à deux vitesses (ou sous phases) de décroissance, avec une première sous phase rapide relative au départ de l'eau faiblement liée et une deuxième sous

phase ralentie, jusqu'à la fin du séchage relative au départ de l'eau plus fortement liée que la première.

L'effet de la température paraît plus intéressant sur les cinétiques et vitesses de séchage par rapport à la première sous phase qui est délimité par les différents points d'inflexion où la quantité d'eau évaporée correspondant à l'eau moins liée est assurée par la température la plus élevée et la plus fine des épaisseurs. Il est montré aussi que la deuxième sous phase de décroissance, qui correspond à l'eau de plus en plus liée plus difficile à évaporer, est plus lente dont les durées respectives ont montré que les proportions sont comprises entre 75 et 91% par rapport à la durée totale du séchage.

L'influence de l'épaisseur des rondelles de pomme de terre sur la cinétique de séchage est très importante.

La plus fine séchant plus rapidement que celle qui lui est supérieure, et enfin la plus épaisse séchant plus lentement que les deux autres.

IV.2.4) A. Boubeghal et al (2007) :

Les effets de différents paramètres (diamètre, la masse et la température) sur la cinétique de séchage de produit (pomme de terre). [16]

- **Effet du diamètre du produit**

Le diamètre du produit varie de 6 cm jusqu'à 10 cm, avec une masse de 8 kg et une température de l'air d'entrée de 60 °C. Elle montre que l'augmentation du diamètre du produit provoque l'augmentation de sa teneur en eau. Cela est dû à la diffusion de l'eau du produit. Au début du séchage, les surfaces sont saturées en eau, le passage de l'air chauffé provoque l'évaporation de cette eau de surface. Après cette période le phénomène de diffusion de l'eau du produit apparaît, il se dirige du centre du produit vers la surface, il a donc un trajet plus court à parcourir pour 6cm que pour 10 cm. C'est pourquoi la diminution du diamètre du produit conduit à un séchage plus rapide.

- **Effet de la masse du produit**

La masse du produit déposée sur chaque claie varie entre 4 kg et 12 kg. On voit que la température du produit de 4 kg est plus élevée qu'à 12 kg pour un temps fixé et une claie désigné. L'évolution de la température de l'air d'entrée dans l'enceinte de séchage permet à

ce dernier d'obtenir plus d'humidité, ce qui diminue sa température, et cela s'explique que la température du produit de la première claie est plus élevée que celle de la dixième claie.

- **Effet de la température de l'air chauffé à l'entrée de l'enceinte de séchage**

La température de l'air d'entrée varie de 50 à 70 °C avec un diamètre du produit de 6 cm et une masse de 8 kg. La teneur en eau pour une température de l'air d'entrée de 50 °C est inférieure à celle de l'air à 70 °C. Ceci explique que l'augmentation de la température de l'air d'entrée, qui permet de diminuer le temps de séchage.

Le tableau suivant présente de quelque travail sur le séchage thermique de pomme de terre.

Chercheur	Paramètre étudié	Type de séchoir	Temps de séchage
E. Kavak Akpınar (2005)	Température de l'air 60, 70 et 80 °C vitesse d'air 1 et 1,5 m/s	étuve Univ Turkey	600 à 720 min
L.Hassini et al (2007)	Température de l'air 40, 55, 70 et 85°C vitesse d'air 1 et 1,5 m/s Humidité relative 5, 15 et 25 %	Boucle de séchage Univ Tunisie	500 min
D. Fahloul et al (2009)	Température (55, 65, 75 °C), Pression (20, 40, 60 cm Hg) Découpe (rondelle (3,5 mm), cubique(1 cm) et bâtonnet(1 X 3 cm))	Étuve Sous vide Univ Batna	100 à 250 min
S Chouicha (2013)	vitesse d'air 0.51 m/s Humidité 5,22 et 5,25 Masse d'eau /Masse sèche	séchoir solaire indirect; Univ Ouargla	165 min
O. BADAOU (2013)	Température 65 °C, Epaisseur 0,3 cm	séchoir solaire indirect (UDES, Tipaza)	200 min

Tableau(IV.1) : quelque travail sur le séchage thermique de pomme de terre

Chapitre V :
Partie
expérimentale

Chapitre V : Partie expérimental

V.1) Partie I : Séchage solaire de pomme de terre :

V.1.1) Description du système de séchage :

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

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

Unité de production d'air chaud : Elle est constituée d'un capteur solaire à air à simple circulation et à simple vitrage, de surface inclinée, la latitude de la ville de Ouargla 31° par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud. L'absorbeur en tôle métallique est peint en noir. L'isolation thermique est en polystyrène et le vitrage est en verre.

Chambre de séchage : Elle est de hauteur 2,8 m, de longueur 1 m, et de largeur 0,63 m les parois extérieures sont en tôle galvanisée avec une isolation interne en polystyrène de 6 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 solaire (panneaux solaire photovoltaïque de 12V).

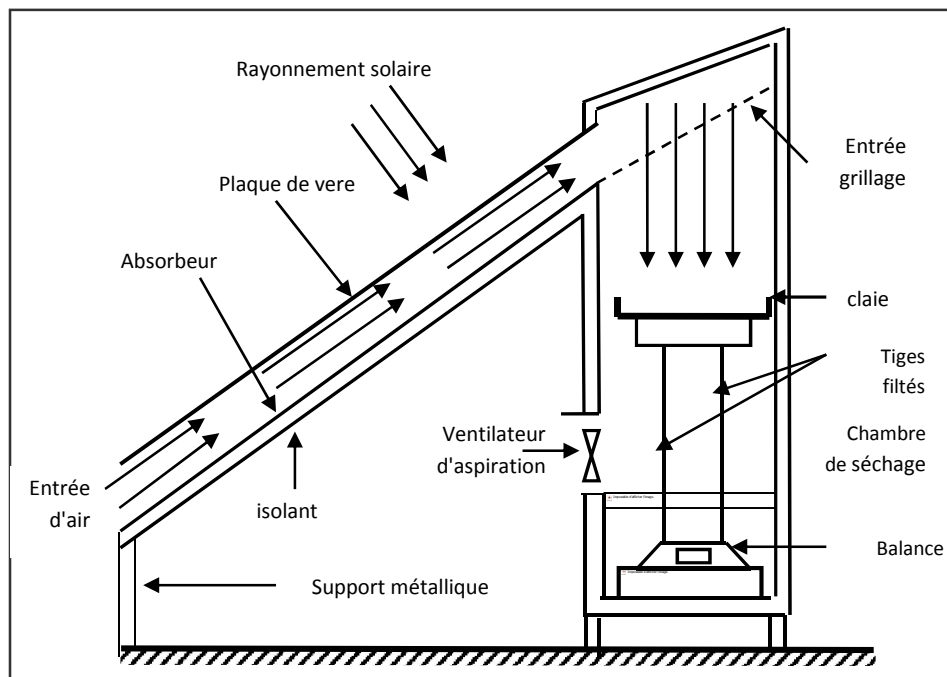


Figure (V.1) : Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à convection forcée

V.1.2) Mode opératoire :

Pour suivre la quantité d'eau évaporée de la pomme de terre au cours du, nous avons mesuré sa masse à l'aide d'une balance (figure (A.C.4)) à partir d'une masse initiale de 200g, chaque demi-heure à partir de 10 :00h jusqu'à 17 :00h. La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale. Les mesures de température et rayonnement sont effectuées chaque 30 minutes.

V.1.3) Préparation du produit :

Les tubercules de pomme de terre ont été pelés et lavés à l'eau du robinet, puis coupés en rondelles d'une épaisseur de 0.003m, elles ont été réparties sur la claie de séchage.



Figure (V.2) : Préparation du produit

V.1.4) Produit séché :

Après un temps nécessaire, nous avons obtenu de pomme de terre séchée avec une teneur en eau à base sèche de 4 kg eau /kg m.s.



Figure (V.3) : Produit séché

V.1.5) Les résultats obtenus résumé dans les courbes suivantes :

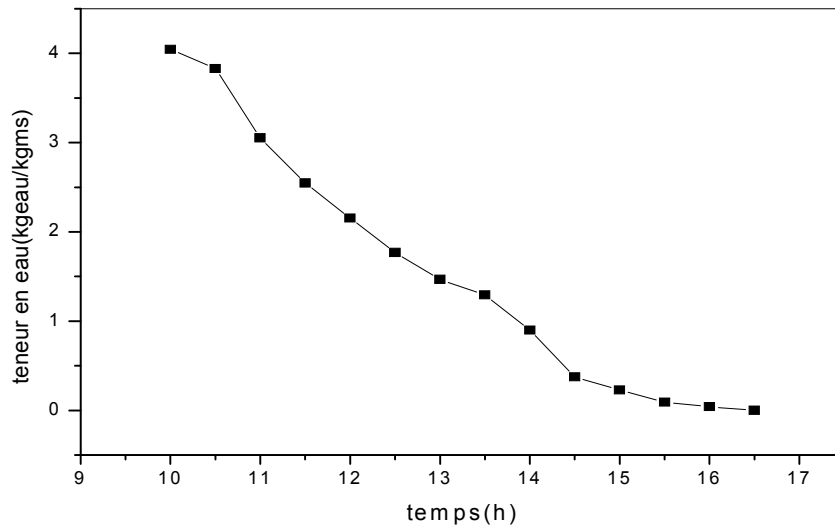


Figure (V.4) : Variation de teneur en eau en fonction de temps

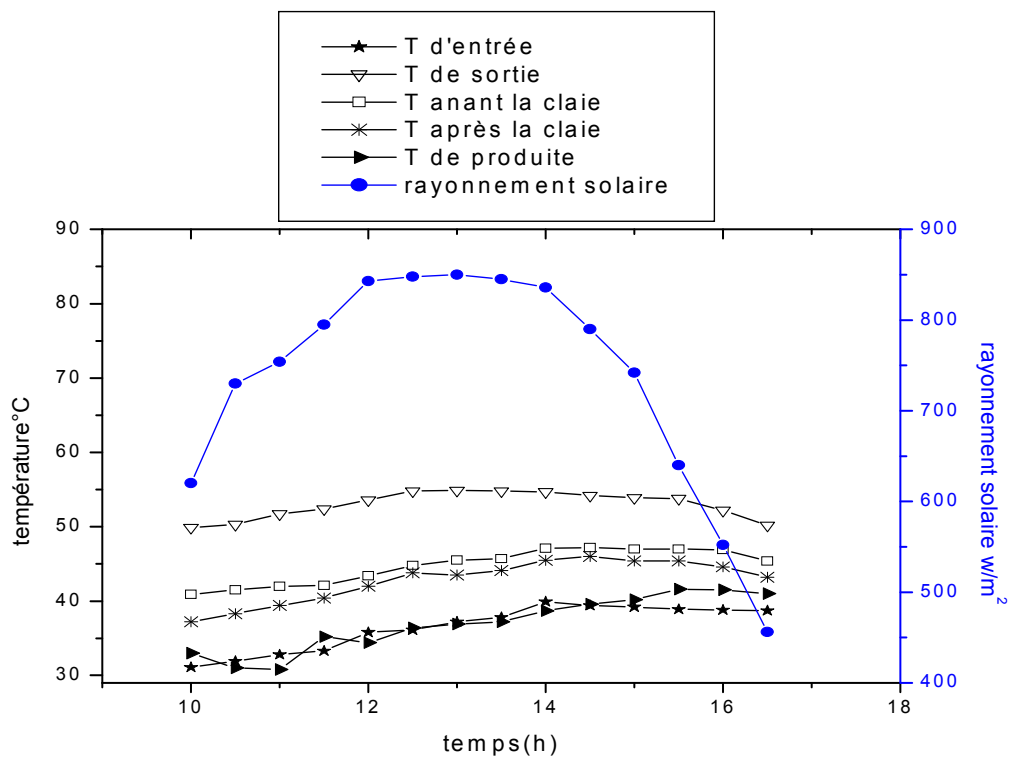


Figure (V.5) : Variation de température d'entrée, sortie, avant et après de claie, température de produite et rayonnement solaire en fonction de temps

La figure (V.5) 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 31.1 à 39.9°C et de 49.9 à 54.9°C, on constate un écart important entre l'entrée du capteur et la sortie. Ce-ci est dû à l'effet de l'absorbeur sur l'air circulant dans le capteur solaire.

De figure on remarque que la température entre l'avant et après de claie est de 2°C.

De figure (V.4) on démontrée que la durée de séchage de pomme de terre (épaisseur 0.003m et un teneur en eau initial de 4 kg d'eau/kg ms.), est de 6h 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].

V.2) Partie II : Réalisation et amélioration de capteur solaire à air

V.2.1) Réalisation du capteur:

V.2.1.1) 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.

V.2.1.2) Les composants de capteur réalisé avec dimensionnement :

Les dimensionnements de prototype (capteur solaire à air) réalisé est : $2.5m^2$ de surface (1mx2.5m). (Les figures dans l'annexe A et B)

- **Le coffre :** Plaque mince en acier galvanisé avec d'une épaisseur de 0.001 m. figure (A.A.1).
- **La vitre :** verre d'épaisseur 0.004 m. figure (A.A.3)
- **L'absorbeur :** Une plaque mince en Aluminium peint en noir mate avec une épaisseur 0.003 m. figure (A.B.6)
- La vienne d'air dynamique d'une hauteur de 0.06 m est comprise entre la plaque. figure (A.B.5)
- Une plaque inferieur en acier galvanisé de 0.001 m couvre l'isolant arriere du capteur. figure (A.B.3)
- La hauteur entre l'absorbeur et la vitre est de 0.06 m.
- L'isolation arriere et laterale du capteur est assurée par : laine de verre de 0.06 mm d'épaisseur. les figures ((A.A.2) (A.B.4)).
- **Support de capteur:** On utilise un supporter de l'angle fixé (31°). figure (A.A.4)

Le cisaillement et le cintrage des plaques sont faits à l'aide des appareils qui sont disponibles dans La parloir technologie comme le montre dans la figure (A.B.2).

V.2.2) Construction des composent :

Après la préparation on montage les composants.

Fixer l'isolant de 0.06 m épaisseurs sur le couvre et les cotés, puis poser la plaque en acier de (0.88 x 2.5) m et installé avec les vis de longueur 0.014 m(on remarque un vide de 0.06 m) a même manière on pose l'absorbeur (la plaque d'aluminium), d'après on pose le vitre (verre) sur le coté de couvre et coller avec célecone.



Figure (V.6) : le capteur réalisée

V.2.3) Méthode de mesure :

On mesure le rayonnement solaire et la température d'entrée et la sortie de capteur chaque 30 minutes, avec : un double passage de l'air (dessus et au-dessous de l'absorbeur de capteur), simple passage sans sable et avec sable.

Tout les expériences sur le capteur réalisé c'est effectuée a une vitesse fixe a l'aide d'un ventilateur a courant continu placé au niveaux d'entrée de capteur. figure (A.B.9) .

V.2.3.1) Les résultats obtenues résumé dans les courbes suivante:

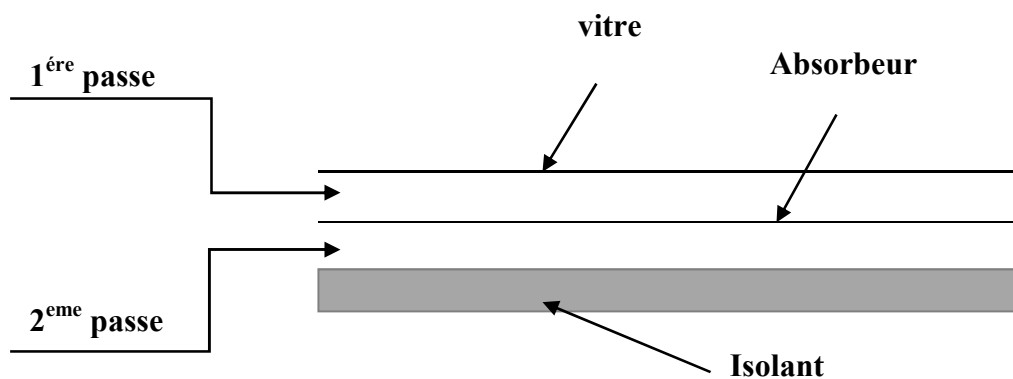


Figure (V.7) : Schéma descriptif de capteur solaire réalisé

Description de figure :

La vitre utilisée dans notre capteur est un verre transparent de 0.004m d'épaisseur et l'absorbeur réalisée par une plaque d'aluminium d'épaisseur 0.003 m, laine de verre de 0.06m comme l'isolation arrière et latérale.

Le premier passage indiqué la passe ci-dessus de l'absorbeur et le deuxième passage indiqué la passe au-dessous de l'absorbeur.

- Pour des jours 12,13/05/2014 : double passage de l'air (dessus et au-dessous de l'absorbeur de capteur)

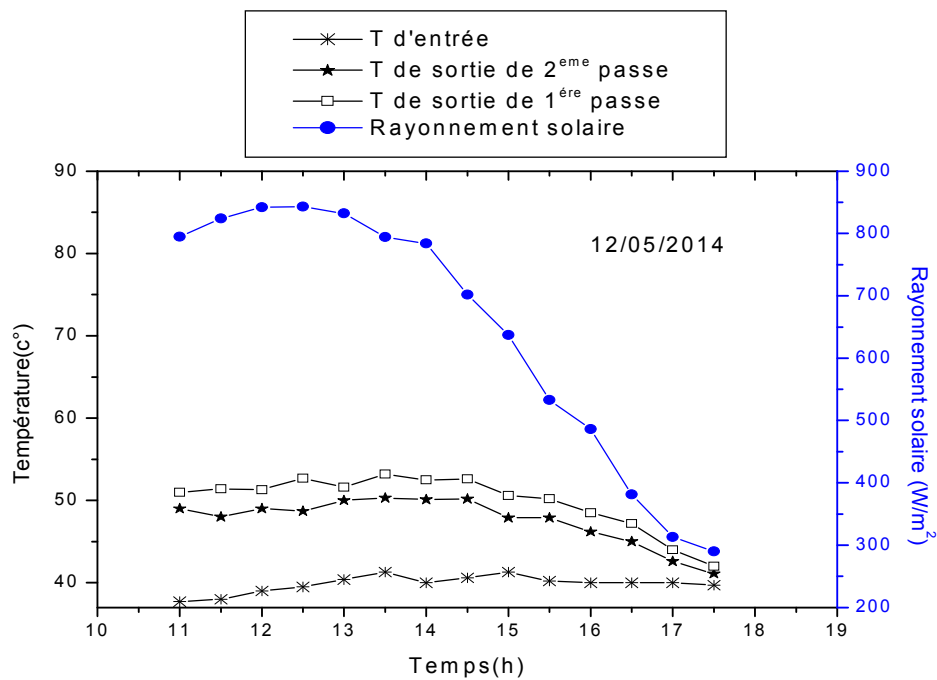


Figure (V.8): Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire (double passe) de jour 12/05/2014

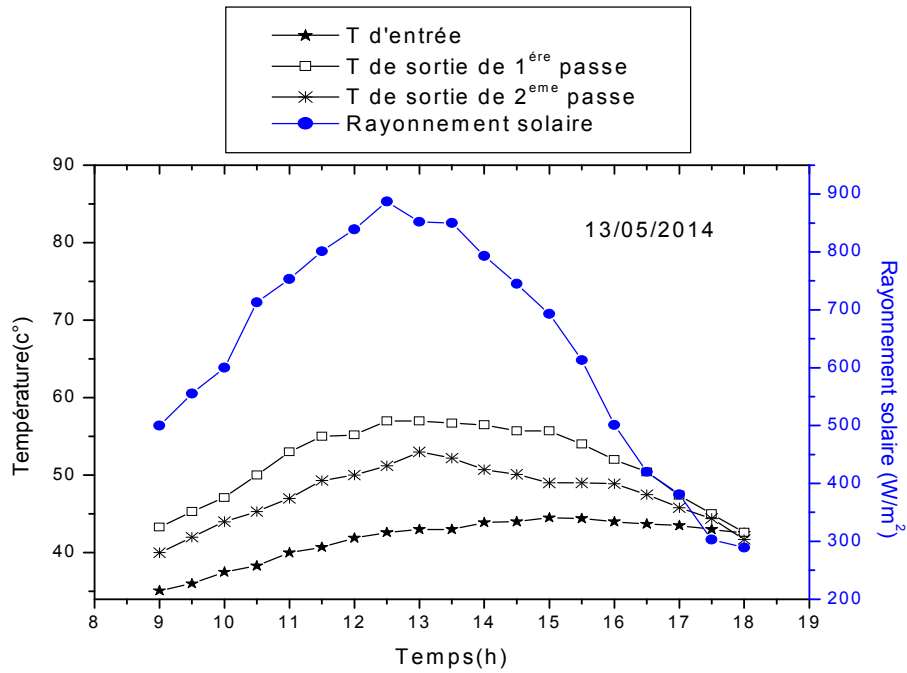


Figure (V.9): Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire (double passe) de jour 13/05/2014

Les figures ((V.8)(V.9)) présente la Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire où la température d'entrée et la sortie de capteur augmenté jus 'qua 12h après on remarque une diminution de température jus 'qua 17h de cette période on remarque la même variation de rayonnement solaire où la valeur maximale enverront de 850w/m^2 a partie de 12 :30h et après on remarque une diminution jus 'qua 17h d'une valeur de 360 w/m^2

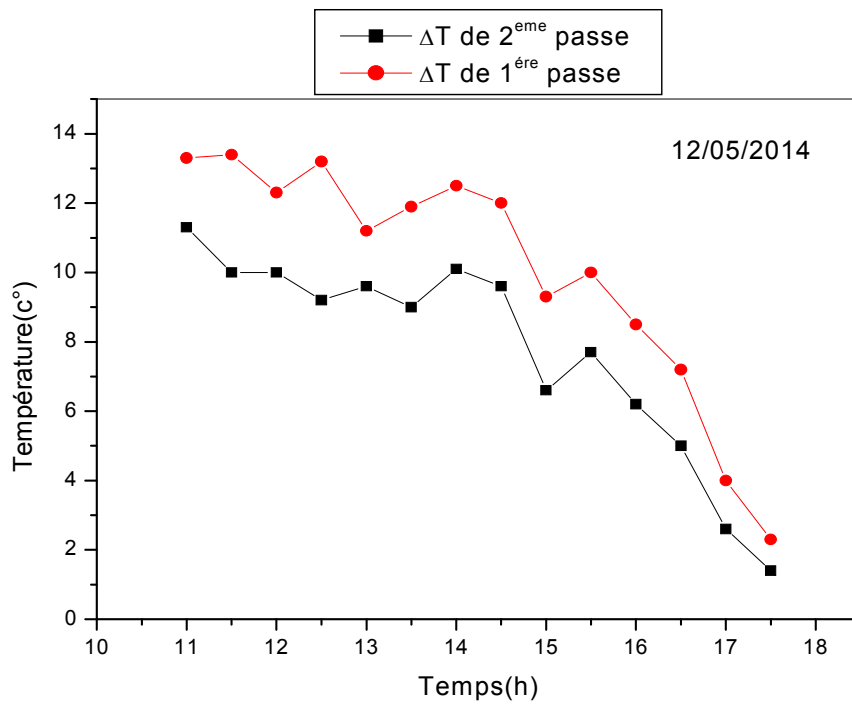


Figure (V.10): la variation de de gradient de températures de capteur (double passe) la jour 12/05/2014

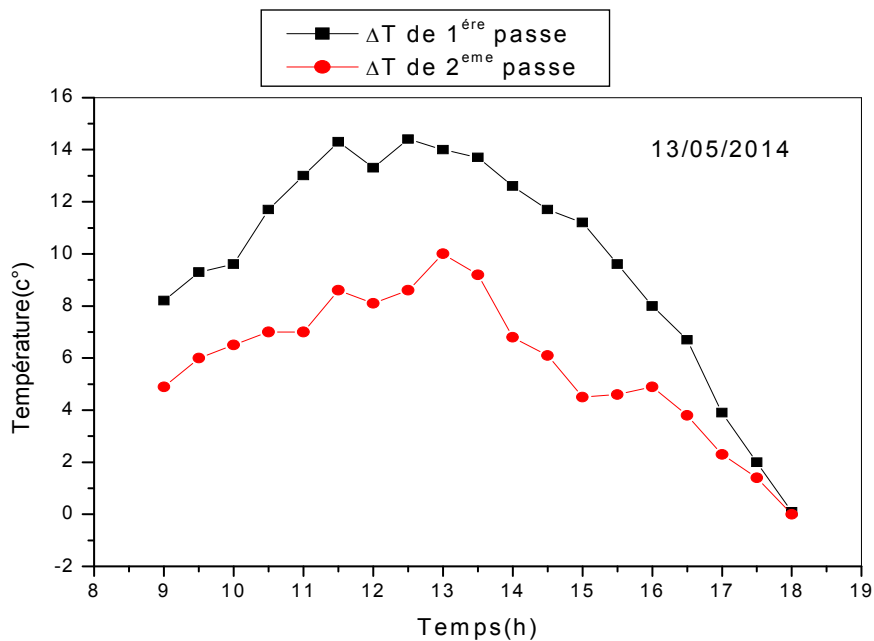


Figure (V.11): la variation de gradient de températures de capteur (double passe) la jour 13/05/2014

Dans les figures ((V.8) (V.9)) on remarque que :

La mesure de rayonnement solaire des deux jours est proche, la valeur maximale est de 887 w/m^2 (le 13/05/2014) et 843 w/m^2 pour le jour 12/05/2014.

Avec ou même température d'entrée on remarque que la température maximale de sortie de 1^{ère} passage est de 56.7°C et au même temps la valeur maximale de 2^{ème} passage est de 52.2°C donc on détermine que la température de 1^{ère} passage (passe ci-dessus de l'absorbeur) élevée par rapport l'autre.

Et dans la figure ((V.10) (V.11)) on remarque que la différence en températures de 1^{ère} passage mieux par rapporte la 2^{ème}, donc on gain une température non acceptable entre 02°C et 06°C

- Pour du jour 20/05/2014 : simple passage (ci-dessus de l'absorbeur)

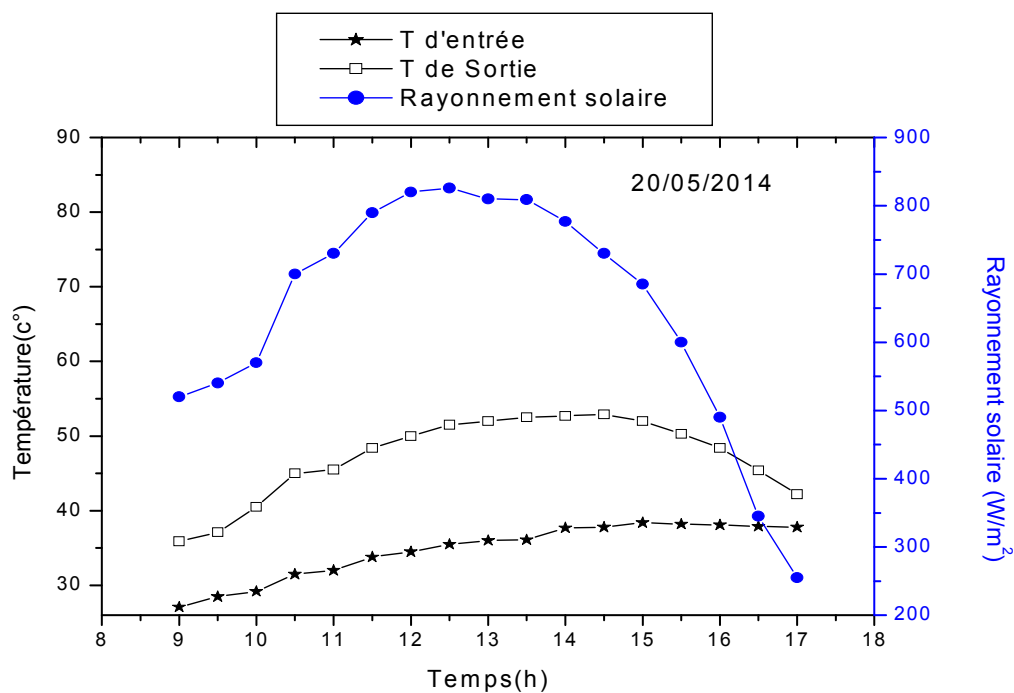


Figure (V.12): Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire (passe ci-dessus de l'absorbeur)

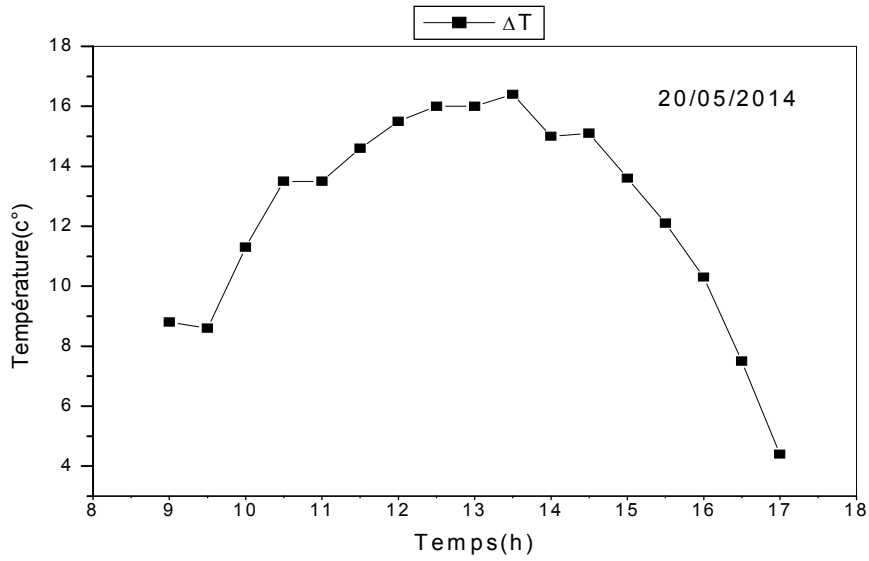


Figure (V.13): la variation de de gradient de températures de capteur (passe ci-dessus de l'absorbeur)

- **Pour du jour 21/05/2014 :** simple passage sans sable (au-dessous de l'absorbeur)

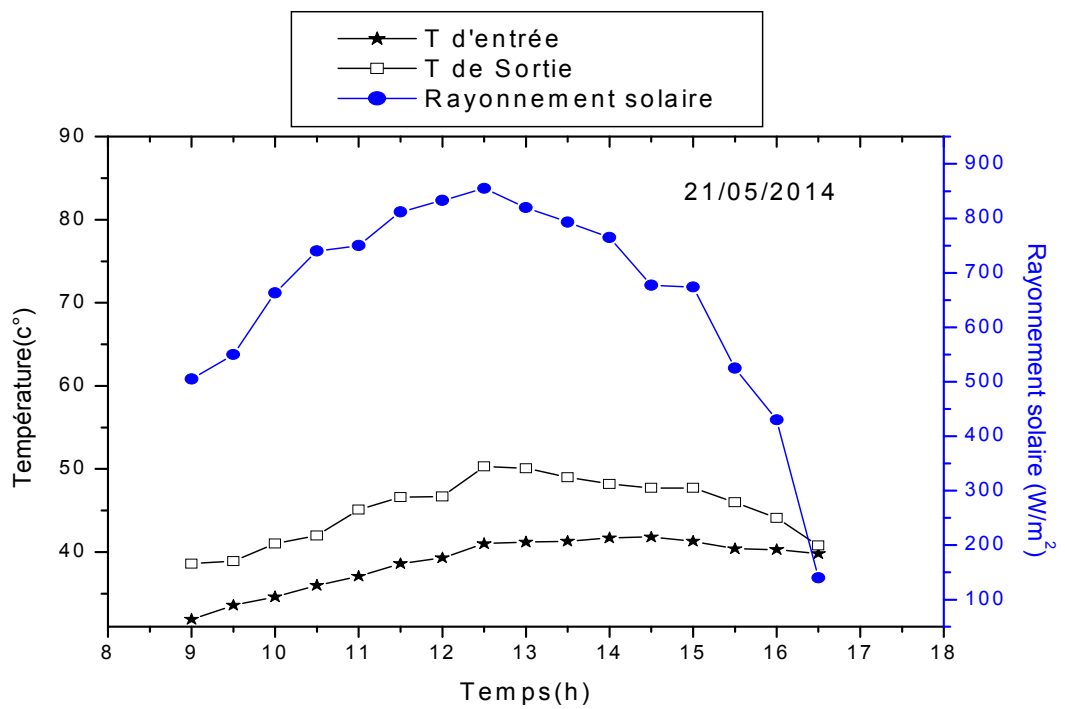


Figure (V.14): Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire (passe au-dessous de l'absorbeur)

Des figures ((V.12)(V.14)) on remarque que la variation de température en parallèle avec la variation de rayonnement solaire où on observe un augmentation de deux paramètres de 9h jus ‘qua 12 :30h et après on remarque une diminution jus ‘qua 17h

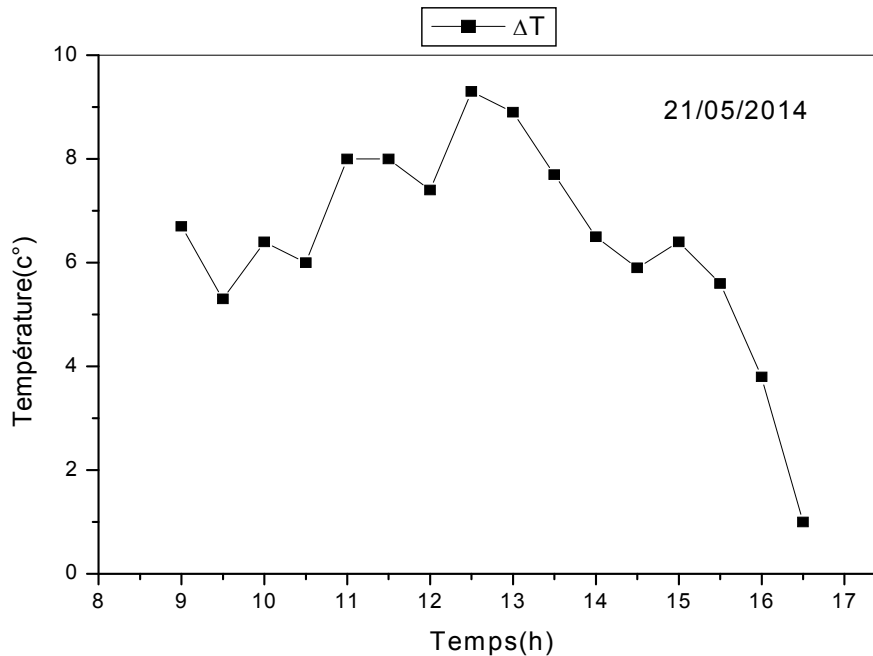


Figure (V.15): la variation de gradient de températures de capteur (passe au-dessous de l'absorbeur)

Les figures ((V.7) (V.9)) donnant les résultats de températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire des deux essais exécuté dans les jours 20 et 21/05/2014, la premier c'est un simple passage d'air ci-dessus de l'absorbeur et la deuxième au-dessous, ou la température de sortie de passe ci-dessus de l'absorbeur élève par rapporte a 2^{ème} passe et la déférence entre les températures d'entrée et de la sortie de deux cas donnant la même résultats comment indiqué dans les figures ((V.8) (V.10)) ou la valeur maximale de ΔT de passe ci-dessus de l'absorbeur est 16.4C° et 9.3C° de 2^{ème} passe.

V.2.4) Le capteur réalise avec une couche de sable :

On utilise une couche de sable (2.472 kg) d'épaisseur de $125\mu\text{m}$ fixée sur le capteur par la peinture, le rôle de ce sable est de l'augmentation de stockage de l'énergie solaire (augmenté la chaleur). Les figures ((V.18) (V.19))

V.2.4.1) Préparation de sable : il y a deux parties

V.2.4.1.1) Le tamisage de sable:

Le sable qu'on a utilisé c'est le sable des dunes de la région de **El-Oued**, le tamisage de ce sable a été effectué au niveau du laboratoire de génie de procédé pour obtenir un sable de diamètres de $125\mu\text{m}$ pour stocker l'énergie solaire (la chaleur).

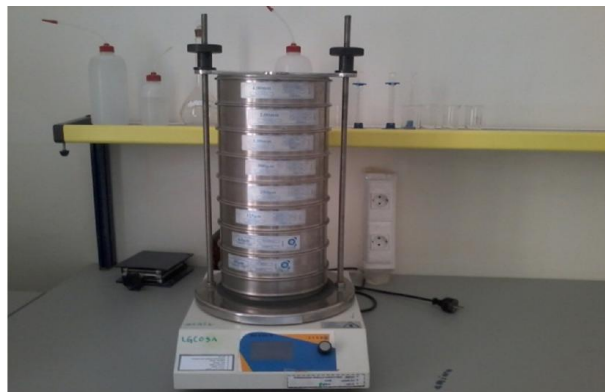


Figure (V.16): l'appareil du tamisage de sable

V.2.4.1.2) Le traitement du sable :

Le traitement consiste à laver le sable avec de l'eau distillée et après avec l'acide chlorhydrique HCl (0.1 mol/l) et finalement avec l'eau distillée. Le but de traitement c'est d'éliminer les autres matériaux qui sont collés au sable. Le lavage du sable est fait à l'aide des béchers. Après le traitement le sable est séché dans un séchoir solaire direct.



Figure (V.17): Traitement de sable

V.2.4.1.3) Etapes de fixation de couche de sable :

Après préparation de sable sur le niveau de laboratoire et le séchage on fixe ce sable sur l'absorbant avec une peinture noire mate comme indiqué dans les figures ((V.18) (V.19)).



Figure (V.18): fixation de couche de sable



Figure (V.19): graine de sable

V.2.5) Les résultats obtenus résumés dans les courbes suivantes:

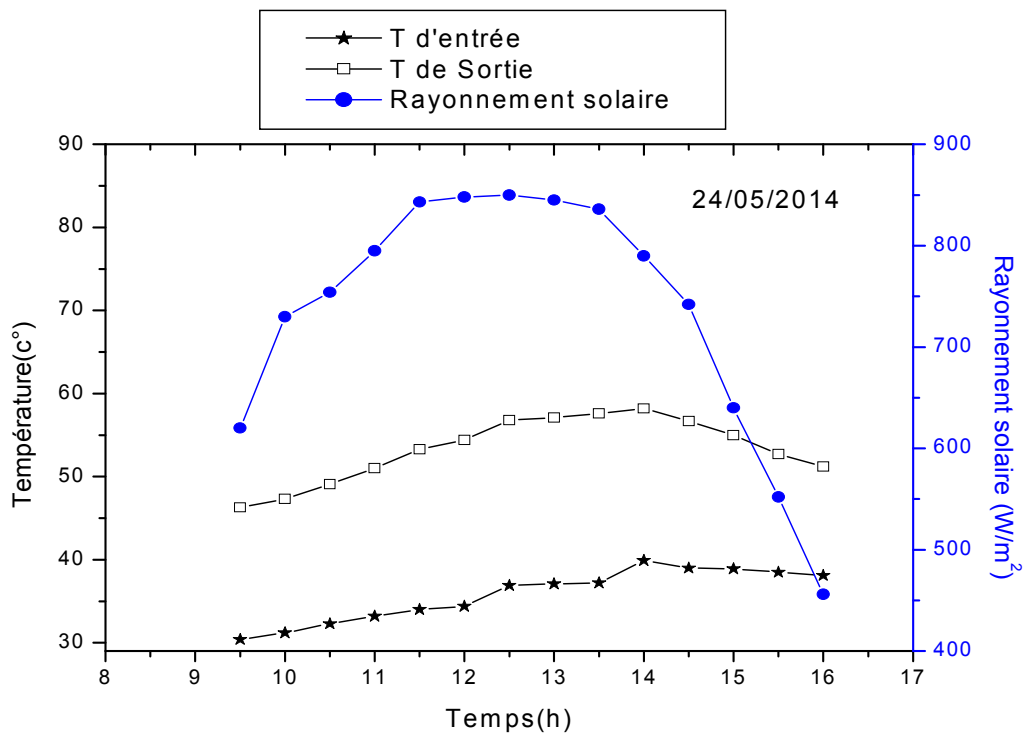


Figure (V.20): Variation des températures d'entrée et la sortie de capteur et le rayonnement solaire (passe ci-dessus de l'absorbeur avec une couche de sable)

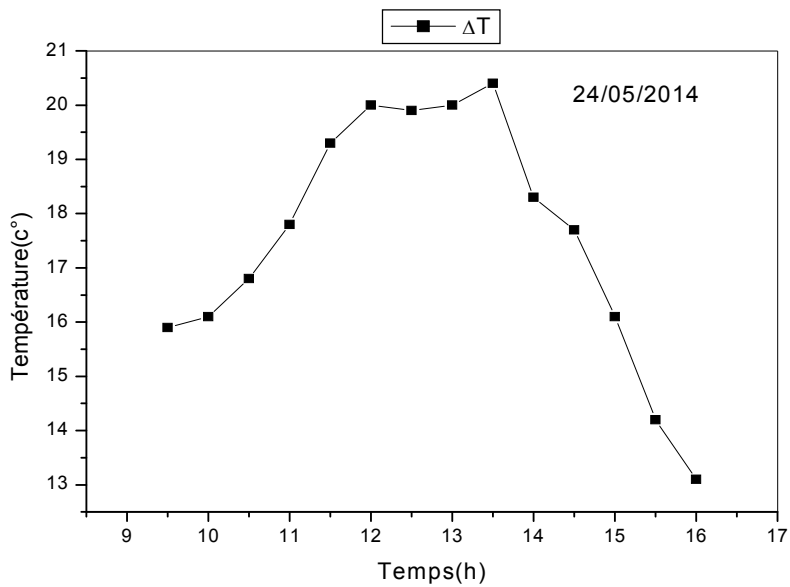


Figure (V.21): Variation de de gradient de température de capteur en fonction de temps

Après des figures ((V.20) (V.21)) on déterminé que l'augmentation de l'écart de température très mieux par rapport les résultats obtenu par les expériences passé (sans sable) où ΔT maximale donnent est 20.4°C mais on prendre un ΔT maximale de 16.4°C ; 9.7°C par des expériences ci-dessus et au-dessous de l'absorbeur sans sable en suite.

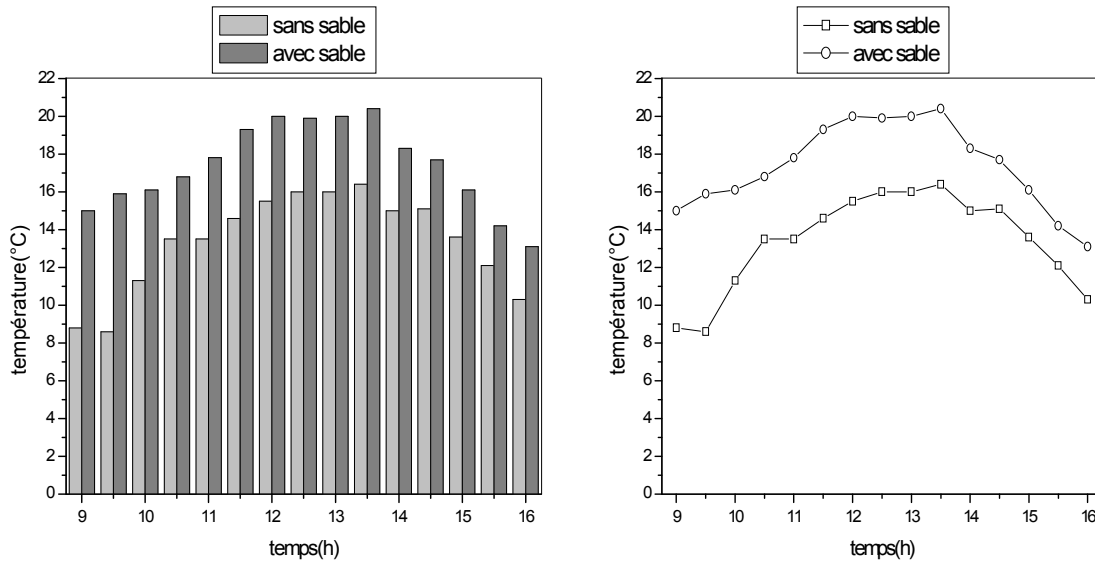


Figure (V.22) :l'écart de température de capteur sans sable et avec sable

De figure (V.22) on remarque que l'écart de température de capteur sans sable faible par rapport a l'état avec sable puisque en prendre une augmentation de température de 6°C

| *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 0.003m et un teneur en eau initial de 4 kg d'eau/kg ms), est de 6h 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 passage de l'air dynamique est la premier passe (ci-dessus de l'absorbeur) pour un double passage de l'air.
- l'efficacité augmentée dans le capteur solaire réalisé avec couche de sable

Recommandation :

- ✓ Pour améliorer l'efficacité du capteur solaire réalisé on propose de ajouter des chicanes 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^{èmes} 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)

- [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. Moummi, M. Zellouf, A. Moummi, 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



Annexes

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

Annexe A: Les compositions de capteur :



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



Figure (A.A.2) : Laine de verre

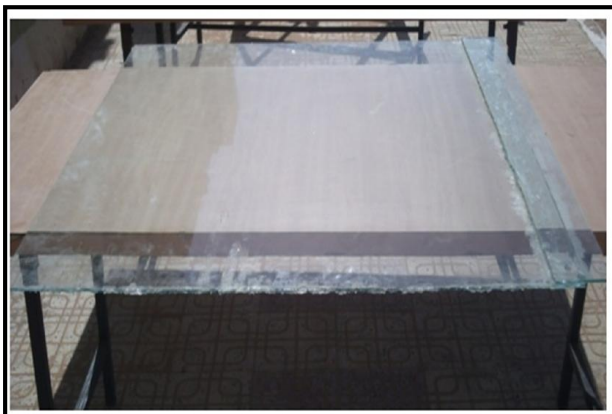


Figure (A.A.3) : La vitre transparente



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

Annexe B : Les étapes des constructions :

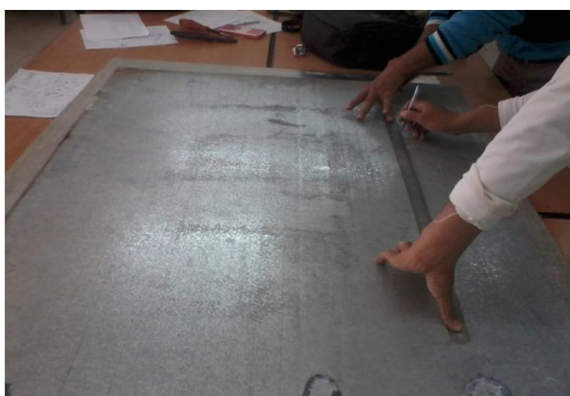


Figure (A.B.1):Traçage des plaques



Figure (A.B.2):Cisaillement et cintrage des plaques



Figure (A.B.3):Trouer et collage des plaques



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

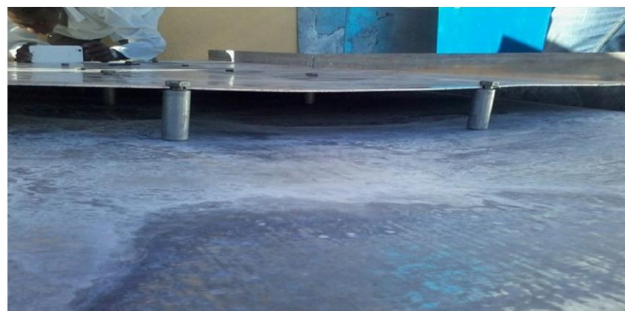


Figure (A.B.5):Espace entre les deux capteurs



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

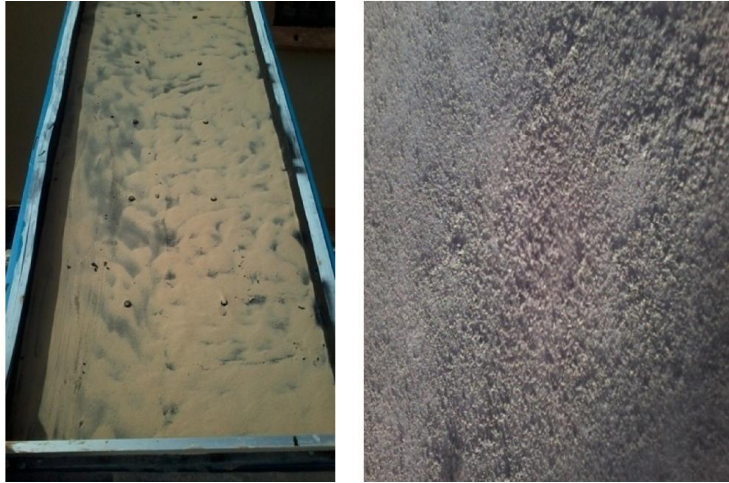


Figure (A.B.7):l'absorbeur avec une couche de sable



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

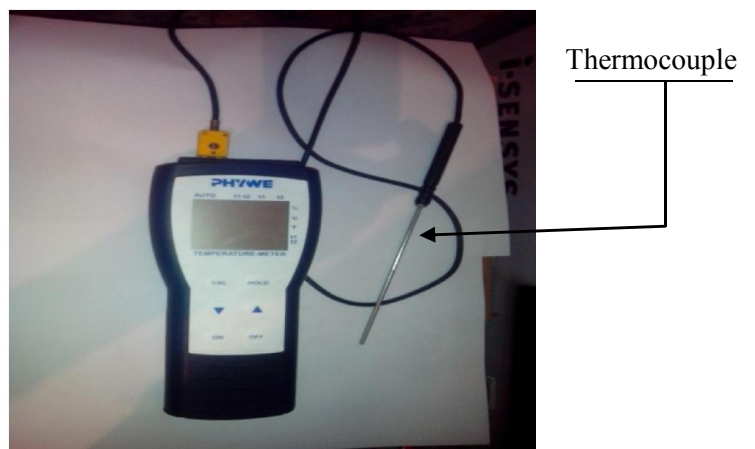


Figure (A.C.2):Température mètre (PHYWE)



Figure (A.C.3):Hygromètre testo



Figure (A.C.4):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	ρ	μ	ν	C_p	λ	a	Pr
C°	K°	kg.m ⁻³	kg.m ⁻¹ .s ⁻¹	m ² s ⁻¹	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	m ² s ⁻¹	-
-23	250	1,413	1,60×10 ⁻⁵	0,949×10 ⁻⁵	1005	0,0223	1.32×10 ⁻⁵	0,722
27	300	1,177	1,85×10 ⁻⁵	1,57×10 ⁻⁵	1006	0,0262	2,22×10 ⁻⁵	0,708
77	350	0,998	2,08×10 ⁻⁵	2,08×10 ⁻⁵	1009	0,0300	2,98×10 ⁻⁵	0,697
127	400	0,883	2,29×10 ⁻⁵	2,59×10 ⁻⁵	1014	0,0337	3,76×10 ⁻⁵	0,689

