

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur 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

Thème

**Etudes expérimentales de procédure de Séchage avec
des composants des stockage thermique.**

Devant le jury composé de :

Présenté par

Dr :BOUSBIA SALAH seif eddine

-CHNIBA ABBES Chaker

-HARIZ BELKACEM Youcef

-DOUCH Maher

-GUESSOUMA Mourad

2022-2023

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mon superviseur, le Dr Bousbia Seifeddine, pour son suivi attentif et ses précieux conseils. Je remercie les membres du jury pour leur présence et leur dévouement lors de l'évaluation de ce travail. Je souhaite également exprimer ma gratitude à tous les enseignants du département de génie mécanique pour leur soutien et leurs précieuses orientations. Je tiens également à remercier tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réussite de ce travail. Mon immense reconnaissance s'étend également à tous mes amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce voyage.

Sommaire

Remercîments.....	I
Sommaire.....	II
Liste des figures et tableaux.....	III
Nomenclature	VIII
Introduction	1

Chapitre I: Notions sur le séchage et les types des séchoirs solaires

I-1-Introduction.....	4
I-2-Séchage.....	4
I-2-1-Définition.....	4
I-2-2-Théories descriptives du phénomène de séchage.....	4
I-2-3-Principe de séchage :	6
I-2-4-Modes de séchage	7
I-2-5-Séchage mécanique	7
I-2-6-Séchage chimique	8
I-2-7-Séchage thermique	8
I-2-8-Séchage par ébullition	8
I-2-9-Séchage par entraînement	8
I-2-10-Différents types de séchoirs solaires	9
I-2-11-Séchoirs naturels	9
I-2-12-Séchoirs directs	10
I-2-13-Séchoirs indirects	12
Conclusion.....	15

Chapitre II : Systemes et matière de stockage thermique

II.1. Introduction :	17
II.2. Système de stockage de l'énergie thermique :	17
II.3. Classification des systemes de stockage d'énergie thermique :	17
II.3.1 Stockage par chaleur sensible (SCS):	19
II.3.2 Stockage par chaleur latente:.....	20
II.3.3 Stockage thermochimique:	20

II.3.4 Stockage par sorption :.....	20
II.4 Comparaison entre les types de stockage thermique:	21
II.5 Critères de choix et de la conception d'un système de stockage :	22
II.6.STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE ET LES MCP.	23
II.6.1.INTRODUCTION	23
II.6.2. Stockage de l'énergie thermique :	25
Chapitre III : Etudes expérimentale (réalisation de chambre de séchage et résultats)	
.....	27
III-1-Introuduction :	28
III-2-EtapedeRéalisation :	28
III-2-1-laboîtedeséchoir:.....	28
III-2-2-Mesuredelapertede masse :	29
III-2-3-Mesuresdestempératures	31
III-2-4-Mesuredelavitesseet del'humiditédel'air:	32
III-2-5-Produitséchés:	32
III-3-Résultats dans le premier jour	33
III-3-1-Variation de Radiation solaire en fonction de temps :.....	33
III-3-2-Variation de vitesse du vent en fonction du temps :.....	34
III-3-3-Variationde températureambiante enfonctiondutemps :.....	35
III-3-4-température de l'air et du stockage thermique du béton dans le temps :.....	36
III-3-5-Variationdetempératuredecapteursolaireenfonctiondutemps	36
III-3-6-Variationdetempératuredechambredeséchage et de la température de l'airenfonctiondu temps	37
III-3-7-la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du béton dans le temps :	38
III-3-8-L'énergie stockée dans le béton:	39
III-4-Résultats dans le deuxième jour :	39
III-4-1-Variationdetempératuredecapteursolaireenfonctiondutemps:	40
III-4-2-température de l'air et du stockage thermique du mélange dans le temps :	40
III-4-3-Variationdetempératuredechambredeséchage et de la température de l'air enfonctiondutemps	41
III-4-4-la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du béton dans le temps :	42
III-5-Résultats dans le troisième jour :	42

III-5-1-Variation de température de chambre de séchage et de la température de l'air en fonction du temps	43
III-5-2-la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du béton dans le temps :	44
III-5-3-Variation de masse d'échantillon en fonction du temps	44
III-5-4-L'énergie stockée dans le mélange:	45
Conclusion	46
Références bibliographiques.....	48
Resumé	51

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Figure I.1 : Présentation schématique d'un produit humide.	7
Figure I-2 : Principe de séchage à l'air libre	10
FigureI-3 : Leprincipe d'unéchoirsolairedirect.....	10
FigureI-4 : Principedu séchoirsolairefonctionnantenmodedirectàconvection naturelle.....	11
FigureI-5 : Exemplesdeséchoir solairedemodedirectà convectionforcée	12
FigureI-6:Leprincipe d'un échoirsolaireindirect.....	12
Figure I-7 : Exemples de séchoirs solaires directs et indirects en mode convection naturelle et en mode convection forcée.	13
Figure I-8 : Le principe d'un séchoir solaire mixte.	14
Figure I-9 : Séchoir solaire hybride	14
Figure II-1: Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique.	18
Figure II-2: Différents types de stockage de l'énergie thermique.....	19
Figure II-3: représente la classification des systèmes de stockage par sorption et par action chimique.	21
Figure III.1 : chambre de séchage.....	28
Figure III. 2:Vuelatéraledu séchoir	29
Figure III.3 : Balance numérique.....	29
Figure III.4: anemometer.....	29
Figure III.5: Échangeur de chaleur	30
Figure III.6: Mélange de métal et de pierre.....	30
Figure III.7: Un mélange de sable, de sel et de pellater.....	30
Figure III.8: béton.....	31
Figure III.9: mélange.....	31
Figure III.10: Solarimètreàaffichagenumérique.	31
Figure III.11: Thermomètre.....	31
Figure III.12: poids de l'échantillon.	32
Figure III.12:Vuelatéraledu séchoir	32
Figure III.13: pommedeterreaprèsséchage	33
Figure III.14: variation de Radiation solaire en fonction de temps	34
Figure III.15: variation de vitesse du vent en fonction du temps	34
Figure III.16: Évolution de la température ambient T_0 dans le temps	35

Figure III.17: Évolution de la température de l'air et du stockage thermique du béton dans le temps	36
Figure III.18: L'évolution de la température de l'air et de la température du capteur solaire dans le temps	36
Figure III.19: Évolution detempératuredechambredeséchage et de la température de l'air enfonctiondu temps	37
Figure III.20: Évolution de la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du béton dans le temps. Révisé le 23 mai 2023.	38
Figure III.21: Évolution L'énergie stockée dans le béton	39
Figure III.22: L'évolution de la température de l'air et de la température du capteur solaire dans le temps.	40
Figure III.23: Évolution de la température de l'air et du stockage thermique du mélange dans le temps.	40
Figure III.24: Évolution detempératuredechambredeséchage et de la température de l'air enfonctiondu temps	41
Figure III.25: Évolution de la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du mélange dans le tempsRévisé le 24 mai 2023	42
Figure III.26: Évolution detempératuredechambredeséchage et de la température de l'air enfonctiondu temps	43
Figure III.27: Évolution de la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du mélange dans le temps Révisé le 24 mai 2023	44
Figure III.28: Variation demassed'échantillonenfonctiondutemps	44
Figure III.29: Évolution L'énergie stockée dans le mélange	45

Liste de tableau :

Tableau I.1: Quelques exemples des méthodes de séchage	7
Tableau I-2 : Avantages et inconvénients du séchoir solaire direct	11
Tableau II-1: répertorie les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés, en utilisant six paramètres fondamentaux :	22
Tableau III-1: Matière de stockage thermique (Sable- Ciment – Cuvier-Aluminium-Gravier)	33
Tableau III-2: Matière de stockage thermique (Sable- plâtre- sel).....	39

Nomenclature

A	La surface de séchage (m^2)
L	Longitude
Λ	Altitude
Φ	l'altitude
Ω	l'azimuth
H	Hauteur du soleil
	La déclinaison
ω	Angle horaire
S_0	Constante solaire
λ_c :	conductivité thermique $W/(m.K)$
H	humidité absolue
H_r	L'humidité relative
Ψ	degré de saturation
X	Teneur en eau à base sèche $kg_{eau}/Kg_{(MS)}$
X_r	Teneur en eau du produit à base humide $kg_{eau}/Kg_{(Mh)}$
A_w	L'activité de l'eau dans le produit
P_{vp} :	Pression de vapeur d'eau à la surface du produit, (Pa)
V_s	Vitesse de séchage
M_v	La masse d'eau évaporée
M_s	La masse de produit sec
dX	L'humidité de produit au début et à la fin de l'opération. (kg)
Q	La quantité de chaleur transférée par unité de temps (W)
A	coefficient d'échange par convection ($W/m^2 \cdot K$).
T	Température (K, °C)
E	émissivité du produit à traiter et émissivité de l'émetteur
I_d	. Rayonnement direct [W/m^2]
I_f	Rayonnement diffusé [W/m^2]
IG	Rayonnement Global [W/m^2]
IR	Rayonnement réfléchi [W/m^2]
RS	rayon du soleil (km)
DST	distance terre-soleil (km)

INTRODUCTION

Introduction générale

De nombreux chercheurs se sont penchés sur l'étude du processus de séchage des produits agricoles en utilisant l'énergie solaire. Des études de simulation ont également été réalisées sur les séchoirs solaires directs et indirects, ainsi que sur le comportement de divers légumes et fruits en termes de séchage. Avec l'augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables et non-polluantes fournies par le soleil, de nombreuses tentatives ont été faites ces dernières années pour développer le processus de séchage solaire, principalement dans le but de préserver les produits agricoles et forestiers.

Le séchage est l'une des plus anciennes techniques utilisées pour la conservation des aliments. Il s'agit d'un processus qui implique le transfert de chaleur et de masse entre le produit et l'environnement. Cependant, les méthodes traditionnelles de séchage présentent plusieurs défauts, ce qui peut entraîner la détérioration du produit. Afin d'améliorer ces techniques traditionnelles, des dispositifs spéciaux appelés séchoirs solaires ont été développés.

L'objectif de cette mémoire est de faire un travail expérimental à travers des appareils de mesure disponibles dans des conditions météorologiques locales visant à :

- Fabrication d'une chambre de séchage à isolation thermique avec matière de panneaux sandwich 4 cm. Connecté avec collecteur solaire. (séchoir solaire indirect)
- Ajouter un facteur auxiliaire de stockage de la chaleur dans la chambre de séchage (échangeur de chaleur), qui nous a aidés à sécher après la chaleur du soleil est tombée en raison de son stockage de chaleur.
- Dans les expériences, nous visons à utiliser et tester les différents composants et matériaux manufacturés ou naturels disponibles sur le marché local avec des caractéristiques de stockage thermique.
- En plus d'effectuer des essais expérimentaux pour sécher un échantillon d'un produit agricole local avec une vitesse de séchage relativement lente.

Afin de présenter notre travail de manière organisée, nous l'avons divisé en trois chapitres distincts.

- ***Le premier chapitre*** traite de la théorie du séchage solaire, en expliquant les principes de base, les différents types de séchoirs solaires et les facteurs influençant le processus de séchage.

- *Le deuxième chapitre* décrit les classifications des systèmes de stockage d'énergie thermique et les types de stockage thermique.(composants solide)
- Enfin, *le troisième chapitre* expérimentale (réalisation de chambre de séchage échangeur de chaleur)et présente les résultats obtenus et discute des conclusions tirées de notre étude.

CHAPITRE I :

Notions sur le séchage et les types des séchoirs solaires

I-1-Introduction

L'utilisation de rayonnement solaire pour le séchage est l'une des applications les plus anciennes de l'énergie solaire. Il a été utilisé depuis l'aube de l'humanité principalement pour la conservation des aliments, mais aussi pour le séchage d'autres matériaux utiles comme les tissus, les matériaux de construction, etc.

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

Dans cette partie on va présenter les paramètres essentiels qui gouvernent le phénomène de séchage, les différentes théories et méthodes de séchage, les caractéristiques de l'air humide et d'un solide humide enfin une présentation des différents types du séchoir utilisé.

I-2-Séchage

I-2-1-Définition

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide [1].

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année) [2].

L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique.

I-2-2-Théories descriptives du phénomène de séchage

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénomène de séchage, qui permet d'étudier le transfert de masse et de chaleur dans un produit. Ces approches théoriques peuvent être classifiées comme suit :

- **Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929) [1],[3]**

Cette théorie suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouverné par la loi de Fick, qui traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau du milieu de forte concentration d'eau vers le milieu de faible concentration d'eau [4]. Autrement dit, du sein de

la matière à sécher vers sa surface. Puis à la surface on assiste à l'évaporation due à un apport énergétique extérieur.

Cette théorie donne satisfaction pour le séchage des aliments et des grains, ce qui n'est pas le cas pour les autres produits.

Elle est critiquée pour sa faible représentation des phénomènes physiques, en la simple différence de concentration et de négliger par exemple le gradient de température dans le solide, ou de mettre le coefficient de diffusion constant, ce qui n'est pas valable pour tous les produits.

La diffusité dépend de plusieurs facteurs, comme la nature du solide, et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température.

- **Théorie capillaire (1937) [1],[3]**

Cette théorie repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion, dont le mécanisme a notamment été étudié par Jurin. Lorsqu'on place un capillaire dans une cuve remplie d'eau, on observe une élévation du liquide dans le tube par rapport au niveau de la cuve. Cette théorie est appliquée à des produits poreux ou à des produits granulaires. Ceaglske et Hougen démontrent que pour le séchage d'un solide granulaire, l'écoulement de l'eau est entièrement dû aux forces capillaires, et totalement indépendantes de la concentration [5].

Krisher de sa part démontre que la première période du séchage est contrôlée par la capillarité, ce qui est confirmé expérimentalement par Gorling sur la pomme de terre.

- **Théorie Whitaker (1977) [6]**

Whitaker propose une nouvelle façon d'écrire les équations de transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux. Il applique un système d'équations de conservation de chaleur et de masse, pour les trois phases contenues dans le milieu (solides, liquide et gaz) et les lois de la thermodynamique. Ensuite il applique pour chacune de phases la prise de moyenne avec certaines simplifications, en prenant un volume élémentaire représentatif à l'échelle des pores ; ces paramètres permettent de considérer le milieu poreux comme un milieu continu équivalent. Il aboutit à un système d'équations permettant de calculer les différents paramètres décrivant le séchage. Cette étude peut être considérée comme le point de départ de nouvelles et modernes théories, puisqu'elle donne une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

- **Théorie de Luikov (1934) [5]**

Luikov découvre le phénomène de la diffusion thermique de l'humidité. Il propose que le gradient de température soit l'un des facteurs causant le transfert de l'humidité. Il s'est basé sur l'utilisation des équations fondamentales de la thermodynamique, et le processus de l'irréversibilité pour vérifier que le transfert de la vapeur et du liquide est divisé en deux parties : Un gradient de concentration et un gradient de température.

- **Théorie de Krischer-Berger et Pei (1938) [5]**

Krischer, suppose que pendant le séchage, l'humidité dans l'état liquide est due aux forces capillaires, et dans l'état vapeur au gradient de concentration de la vapeur.

Berger et Pei proposent que le transfert du liquide soit dû aux forces capillaires et au gradient de concentration, et la diffusion de vapeur est due au gradient de pression de la vapeur.

- **Théorie de Philip et De Vries (1957) [3]**

Philip et De Vries, proposent que le mouvement de l'eau soit dû à la capillarité et à la diffusion de la vapeur. Cette théorie est basée sur le développement d'un système d'équations décrivant l'humidité et le transfert de chaleur dans les matériaux poreux.

I-2-3-Principe de séchage :

Le principe de séchage consiste à éliminer l'humidité d'un matériau solide ou liquide en utilisant de l'énergie pour évaporer l'eau. Le processus de séchage repose sur deux phénomènes physiques : l'évaporation et la diffusion.

L'évaporation est le processus qui transforme l'eau en vapeur en absorbant de l'énergie thermique. Cette énergie thermique peut être fournie par le soleil, par la chaleur produite par une source de chauffage, ou par un courant d'air chaud.

La diffusion est le processus qui permet à la vapeur d'eau de se déplacer de la zone de haute concentration d'humidité à la zone de faible concentration d'humidité, c'est-à-dire de l'intérieur du matériau à la surface où elle peut être évacuée.

Pour sécher un produit, il suffit de le ventiler par de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et l'humidité se produit entre cet air et le produit humide. L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette

différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage. Il existe donc deux facteurs importants pour contrôler les processus de séchage :

- Le transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire.
- Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide pour l'extraire des produits.

Un produit humide peut se représenter schématiquement comme sur la figure suivante. Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. [5]

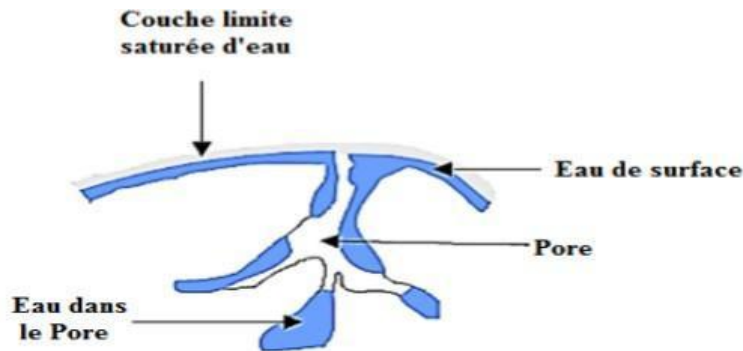


Figure I.1 : Présentation schématique d'un produit humide. [7]

I-2-4-Modes de séchage

Le mode de séchage se base sur deux types de transfert :

- Le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer.
- Le transfert de masse, de l'intérieur de solide vers sa surface, puis le passage en phase gazeuse. La vitesse de séchage est directement liée à la vitesse de ces deux phénomènes.

I-2-5-Séchage mécanique

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

Tableau I.1 : Quelques exemples des méthodes de séchage

Opération	Technique	Mécanisme	Applications
Concentration	Centrifugation	Sédimentation force	Jus de tomate
	Filtration	Tamassage	Boues résiduelles
	Ultrafiltration	Tamassage moléculaire	Lactosérum
Séchage	Egouttage	Gravité	Fromage
	Essorage	Tamassage	Cristaux de sucre

	Pressage	Expression	Fourrages
--	----------	------------	-----------

On pourrait ajouter à cette liste l'osmose inverse (concentration des jus de fruits) bien que cette technique constitue un cas limite plus assimilable à une opération de transfert de masse qu'à un processus de transfert de quantité de mouvement et que l'eau subisse déjà une sorte de changement d'état puisqu'elle passe à l'état de solution dans la membrane.

L'élimination d'eau par voie mécanique se caractérise essentiellement par trois points l'opposant nettement aux techniques faisant appel aux transferts de chaleur.

I-2-6-Séchage chimique

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium...) pour extraire l'eau [8].

I-2-7-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 déroulent en une phase interne et une phase externe :

- Transfert de chaleur externe, de la source de chaleur vers la surface de produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur de produit.
- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface de produit.
- Transfert de masse externe de la surface de produit vers le milieu extérieur [9].

Le séchage thermique se divise lui-même en deux types :

I-2-8-Séchage par ébullition

L'ébullition a lieu lorsque la température du produit est élevée (par conduction sur une surface chaude, par rayonnement, par de la vapeur d'eau surchauffée, par immersion dans de l'huile chaude) à une valeur telle que la pression de vapeur d'eau de ce produit est égale à la pression totale ambiante : $p = p_t$.

Il découle de cette définition que :

🚦 La température d'ébullition dépend de la pression totale (elle est plus basse sous vide qu'à pression atmosphérique) et de l'activité de l'eau du produit.

Le séchage par ébullition est mis en œuvre dans le cas du séchage par conduction, comme le sécheur cylindre.

I-2-9-Séchage par entraînement

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

- L'air apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation.

L'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau. La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et est ensuite entraînée par l'air. Le produit se met spontanément à une température telle que les transferts de chaleur permettent l'évaporation d'un débit d'eau égal à celui capable de traverser la couche limite (compte tenu de ce qu'une petite partie de la chaleur est utilisée à chauffer le produit).

I-2-10-Différents types de séchoirs solaires

On peut classer les séchoirs suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects [SECAAR]. Pour chacun de ces types de séchoir, l'écoulement de l'air asséchant peut se dérouler par convection forcée ou par convection naturelle. Dans le cas où l'écoulement d'air est par convection forcée, les séchoirs sont appelés séchoirs solaires actifs. Lorsque l'écoulement se fait par convection naturelle, ils sont appelés séchoirs solaires passifs [10]

I-2-11-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 disposé même au sol. (Le principe de séchage à l'air libre est simple, le rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchi vers l'environnement (Figure. I-2). [11].

Ces séchoirs sont très bon marché, mais nécessite 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).

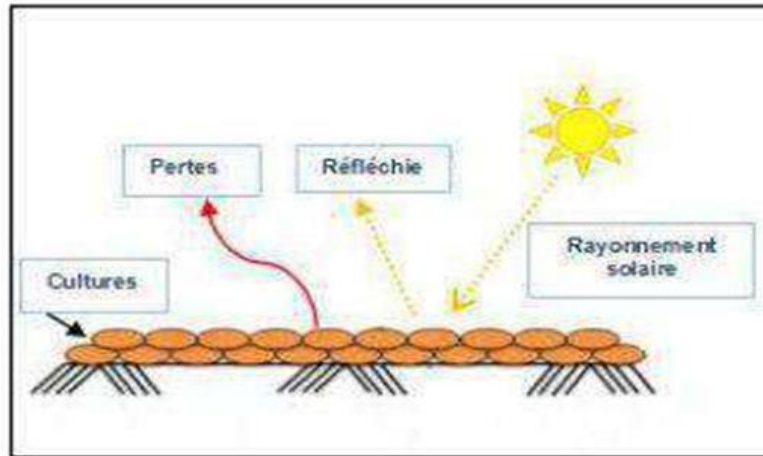
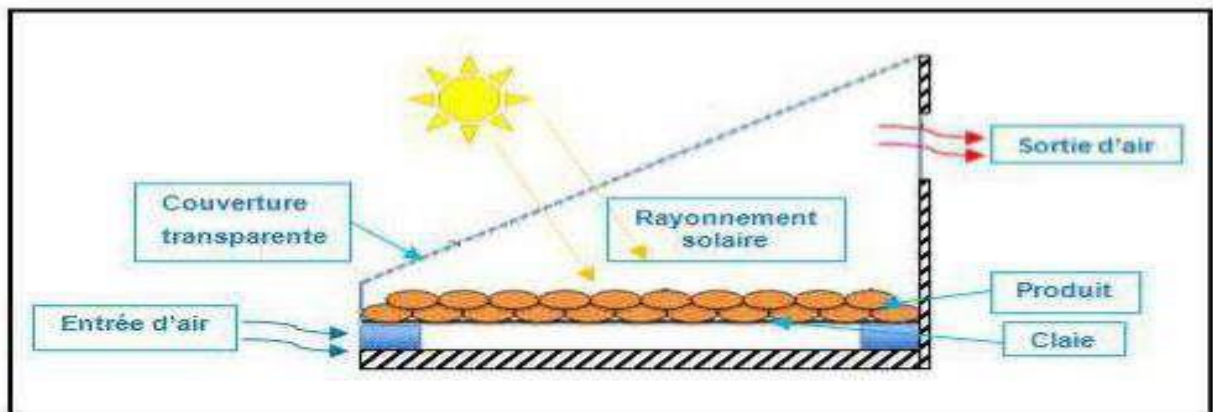


Figure I-2 : Principe de séchage à l'air libre [7]

I-2-12-Séchoirs directs

Dans ces séchoirs, les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Ces séchoirs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher. La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la position et orienté généralement au Sud (Figure. I-3). La chaleur est générée par absorption des rayonnements solaires incidents sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage. [11].



FigureI-3 : Leprincipe d'un séchoir solaire direct.[11]

Tableau I-2 : Avantages et inconvénients du séchoir solaire direct [8]

Avantages	Inconvénients
• Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel. • Pas besoin de main-d'œuvre qualifiée	• Température élevée en fin de séchage • Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil • Jaunissement des légumes verts • Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure

🌈 Séchoirs solaires passifs

Les séchoirs solaires passifs sont des dispositifs qui utilisent l'énergie solaire pour sécher les aliments, les herbes, les fruits, les légumes et d'autres produits. Contrairement aux séchoirs solaires actifs, qui utilisent des ventilateurs et des pompes pour faire circuler l'air, les séchoirs solaires passifs se basent sur des conceptions simples pour favoriser la circulation naturelle de l'air chaud à l'intérieur du séchoir.

Les séchoirs solaires passifs peuvent être fabriqués à partir de matériaux simples et peu coûteux, tels que le bois, le carton et le plastique. Les séchoirs solaires passifs peuvent être utilisés dans les régions où l'électricité est rare ou inexistante, ce qui les rend particulièrement utiles dans les pays en développement. [10].

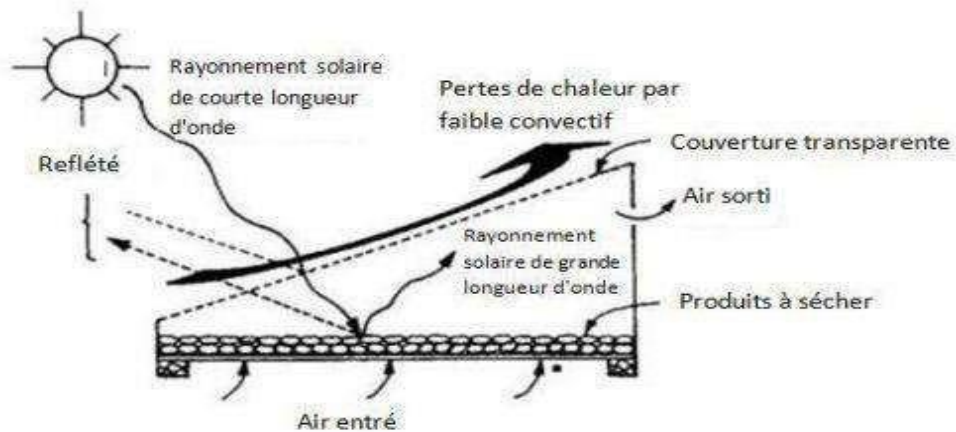


Figure I-4 : Principe du séchoir solaire fonctionnant en mode direct à convection naturelle [10].

🌈 Séchoirs solaires actifs

Les séchoirs solaires actifs sont des dispositifs qui utilisent l'énergie solaire pour sécher les aliments, les herbes, les fruits, les légumes et d'autres produits. Contrairement aux séchoirs solaires passifs, qui dépendent de la circulation naturelle de l'air, les séchoirs solaires actifs

utilisent des ventilateurs, des pompes et d'autres équipements pour augmenter la circulation d'air dans le séchoir.

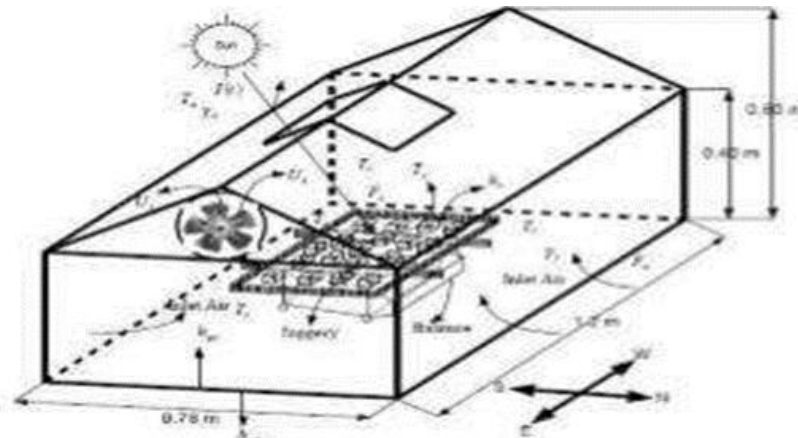


Figure I-5 : Exemple de séchoir solaire de mode direct à convection forcée [10]

I-2-13-Séchoirs indirects

Dans les séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont même mis à l'abri de la lumière entraînant une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment. Les séchoirs indirects se composent essentiellement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage (Figure. I-6). Le capteur solaire est généralement un module à part qui se fixe sur la chambre de séchage pendant l'exposition au soleil et dont l'inclinaison a pour but de maximiser le captage de l'énergie solaire. Il est constitué d'une surface vitrée située au-dessus et d'une surface absorbante, généralement peinte en noir. L'air est d'abord chauffé dans le capteur solaire, puis conduit dans la chambre de séchage où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours de l'air de séchage. [11].

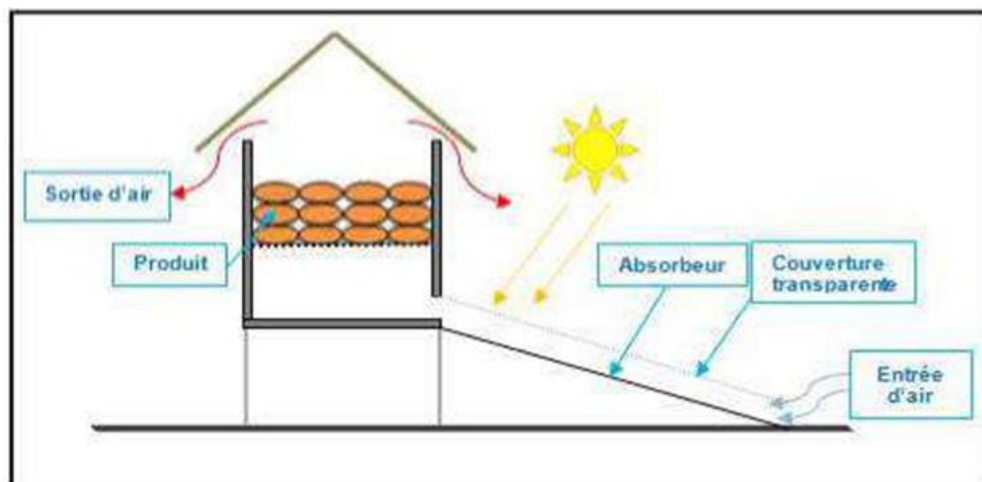


Figure I-6 : Le principe d'un séchoir solaire indirect. [11]

✚ Séchoirs solaires passifs

L'air asséchant est préchauffé dans l'insolateur puis s'écoule par convection naturelle dans l'armoire de séchage. Les transferts dans l'armoire de séchage et l'insolateur peuvent être intensifiés par l'effet cheminé d'un conduit surmontant l'armoire de séchage. Il est caractérisé par sa simplicité de construction et donc un faible coût [10].

✚ Séchoirs solaires actifs

Ils sont généralement composés d'un insolateur à air pour préchauffer l'air asséchant, d'une armoire de séchage et d'un ventilateur pour envoyer l'air chaud dans l'armoire de séchage [10]

Une étude comparative entre le séchage par convection naturelle et le séchage par convection forcée de bananes dans un séchoir solaire indirect a conduit à des résultats semblables à ceux de La figure I-7 [9] [12] [7]. présente un schéma de séchoirs solaires directs et indirects fonctionnant en convection naturelle et en convection forcée.

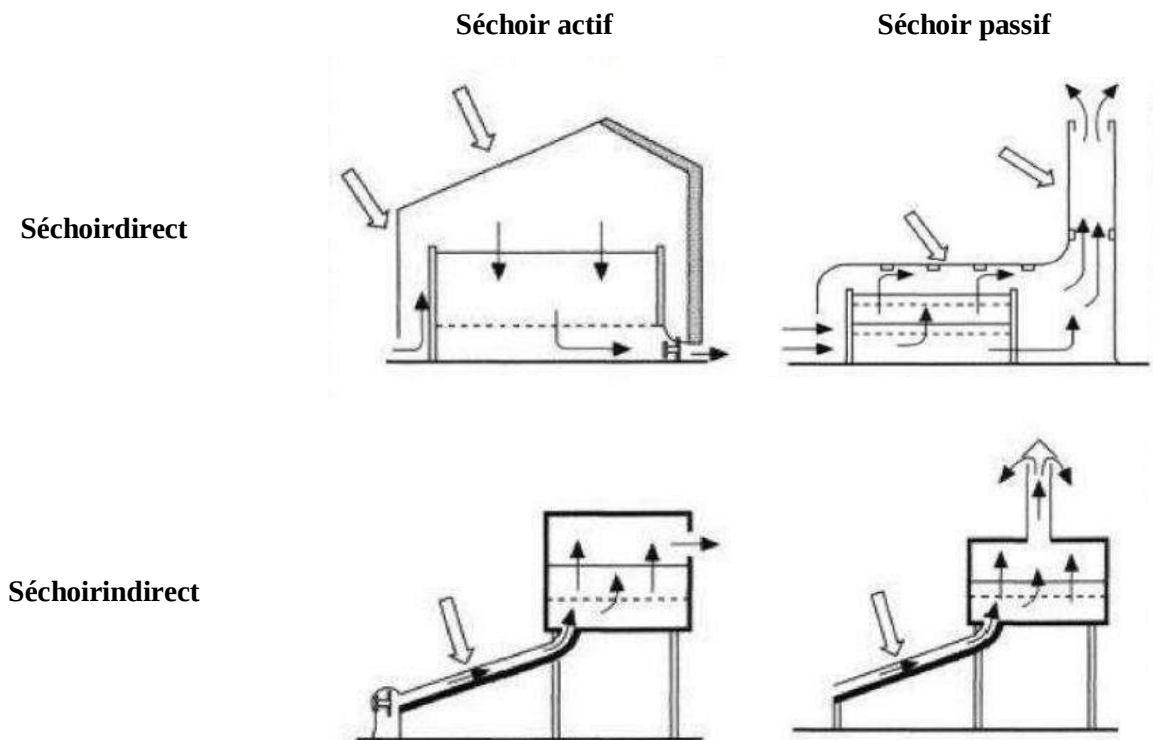


Figure I-7 : Exemples de séchoirs solaires directs et indirects en mode convection naturelle et en mode convection forcée [10].

Les séchoirs mixtes sont des dispositifs qui combinent les avantages des séchoirs solaires passifs et actifs. Ils utilisent l'énergie solaire pour sécher les produits, mais sont également équipés de dispositifs supplémentaires, tels que des ventilateurs, des capteurs, des

contrôleurs et des systèmes de stockage de chaleur, pour augmenter l'efficacité du séchage.).
[11].

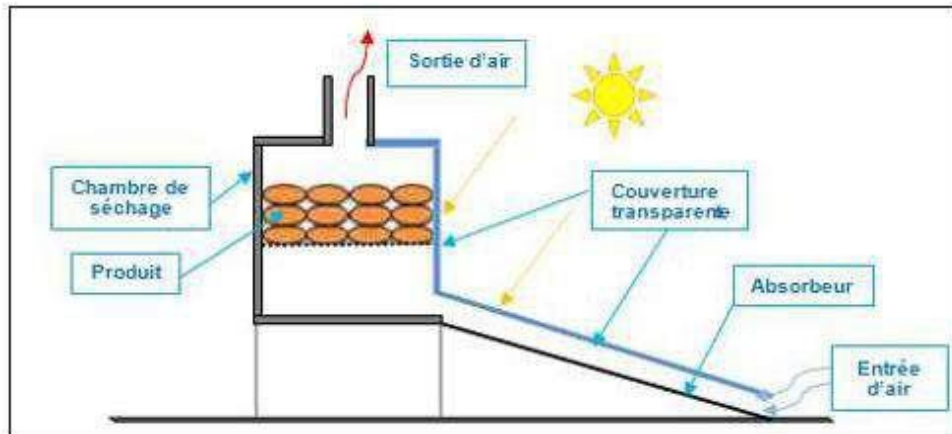


Figure I-8 : Le principe d'un séchoir solaire mixte [11].

✚ Séchoirs hybrides

Les séchoirs hybrides sont des dispositifs qui utilisent plusieurs sources d'énergie pour sécher les produits. En plus de l'énergie solaire, ils peuvent utiliser des sources d'énergie conventionnelles telles que l'électricité, le gaz naturel, le bois, la biomasse ou toute autre source d'énergie renouvelable.

Les séchoirs hybrides sont conçus pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire lorsque les conditions sont favorables, et utiliser d'autres sources d'énergie lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible ou lorsque les conditions météorologiques ne permettent pas son utilisation efficace. Les sources d'énergie supplémentaires sont souvent utilisées pour compléter l'énergie solaire pendant les périodes nuageuses, pluvieuses ou la nuit.

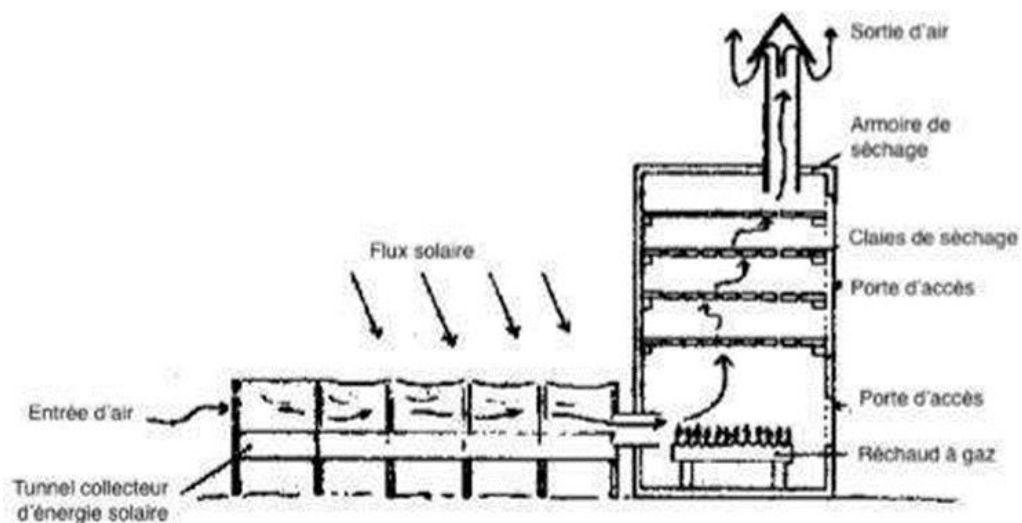


Figure I-9 : Séchoir solaire hybride [10]

Conclusion

En conclusion, ce chapitre nous a permis de découvrir les différents concepts de séchage, ainsi que les méthodes et les technologies utilisées pour éliminer l'eau ou l'humidité des matériaux. Nous avons vu que le séchage est un processus important dans de nombreuses industries, telles que l'alimentaire, la pharmaceutique, la chimique et la transformation des matériaux.

CHAPITRE II:

Systemes et matière de stockage thermique

II.1. Introduction :

Le domaine de l'énergie thermique stockée (ETS), notamment les matériaux à changement de phase, a été un sujet majeur de recherche au cours des deux dernières décennies.

L'intérêt mondial pour le stockage thermique de l'énergie découle de son potentiel à favoriser l'économie d'énergie, l'utilisation efficace et rationnelle des ressources disponibles, ainsi que l'exploitation optimale des énergies renouvelables.

Dans cette optique, nous présenterons une vue d'ensemble des différents types de stockage de l'énergie thermique, en les comparant les uns aux autres.

II.2. Système de stockage de l'énergie thermique :

Le stockage de l'énergie thermique peut englober principalement la chaleur solaire, ainsi que la chaleur générée par diverses sources industrielles telles que l'industrie métallurgique, les centrales à gaz, les installations d'incinération, et bien d'autres encore [13].

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées selon différents critères, comme illustré dans la figure (II-1). Si l'on considère la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en "stockage de chaleur" et "stockage de froid". En ce qui concerne la durée de stockage, deux catégories sont distinguées : "stockage à long terme" et "stockage à court terme". Par ailleurs, si l'on se base sur l'état du matériau de stockage, on identifie quatre principaux types : "stockage par chaleur sensible", "stockage par chaleur latente", "stockage par chaleur thermochimique" et "stockage par sorption". Les systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent également être classés en deux autres catégories : actifs ou passifs. Le terme "stockage actif" est utilisé lorsque le matériau de stockage circule dans le système. En revanche, dans un système de stockage d'énergie thermique passif (également appelé régénérateur), le matériau de stockage ne circule pas dans le processus. L'énergie thermique est transportée via un fluide caloporteur et transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur de chaleur. La structure de l'échangeur de chaleur est installée à l'intérieur du matériau de stockage [14].

II.3. Classification des systèmes de stockage d'énergie thermique :

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classées selon différents critères. Lorsqu'on se base sur la plage de température, on distingue le stockage de chaleur et le stockage de froid. En fonction de la durée de stockage, on peut les diviser en stockage à long terme et stockage à court terme. Selon l'état du matériau de stockage, il existe quatre types principaux : stockage par chaleur sensible, stockage par chaleur latente, stockage par chaleur thermochimique et stockage par sorption. Les systèmes de stockage thermique

peuvent également être classés en actifs ou passifs. Dans un système de stockage actif, le matériau de stockage circule dans le système, tandis que dans un système passif, le matériau de stockage reste immobile et l'énergie thermique est transférée via un fluide caloporteur à travers un échangeur de chaleur intégré au matériau de stockage [14].

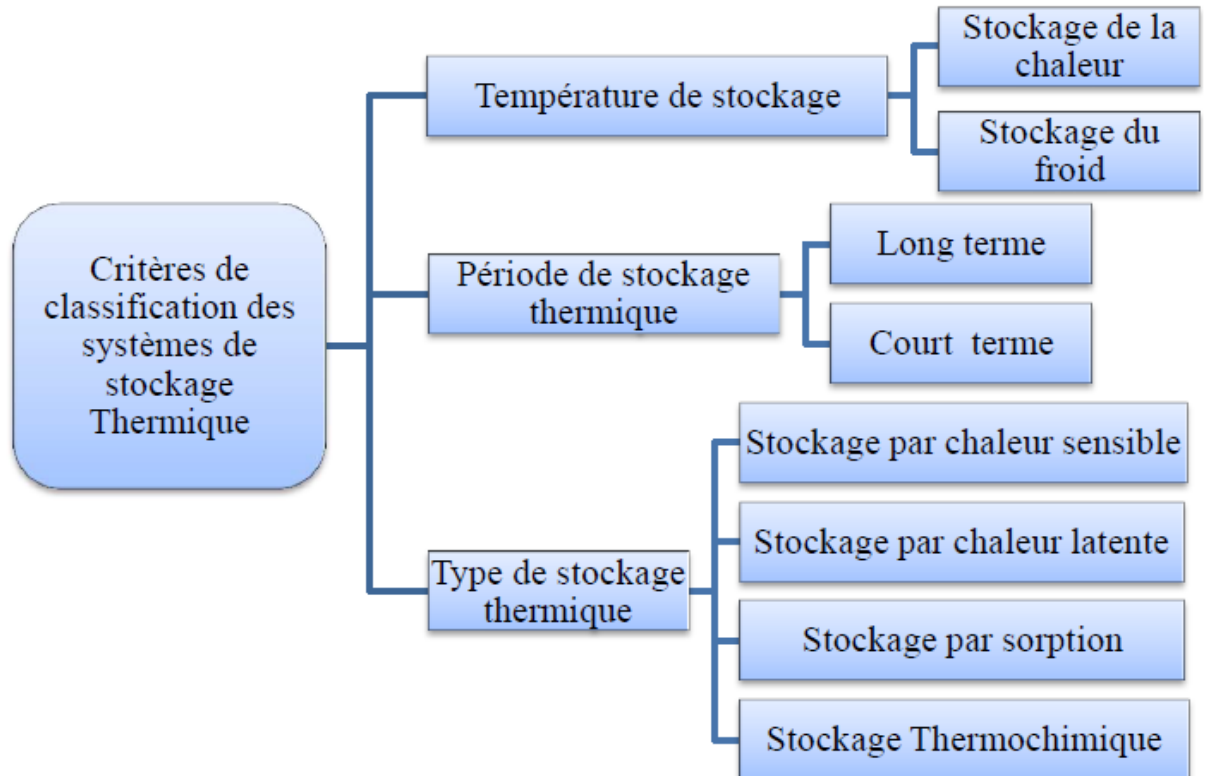


Figure II-1: Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique [14].

Le stockage de l'énergie thermique peut être simplifié et regroupé en plusieurs types, comme illustré dans la figure II-1 ci-dessous :

- Stockage thermochimique
- Stockage par chaleur sensible
- Stockage par chaleur latente
- Stockage par sorption

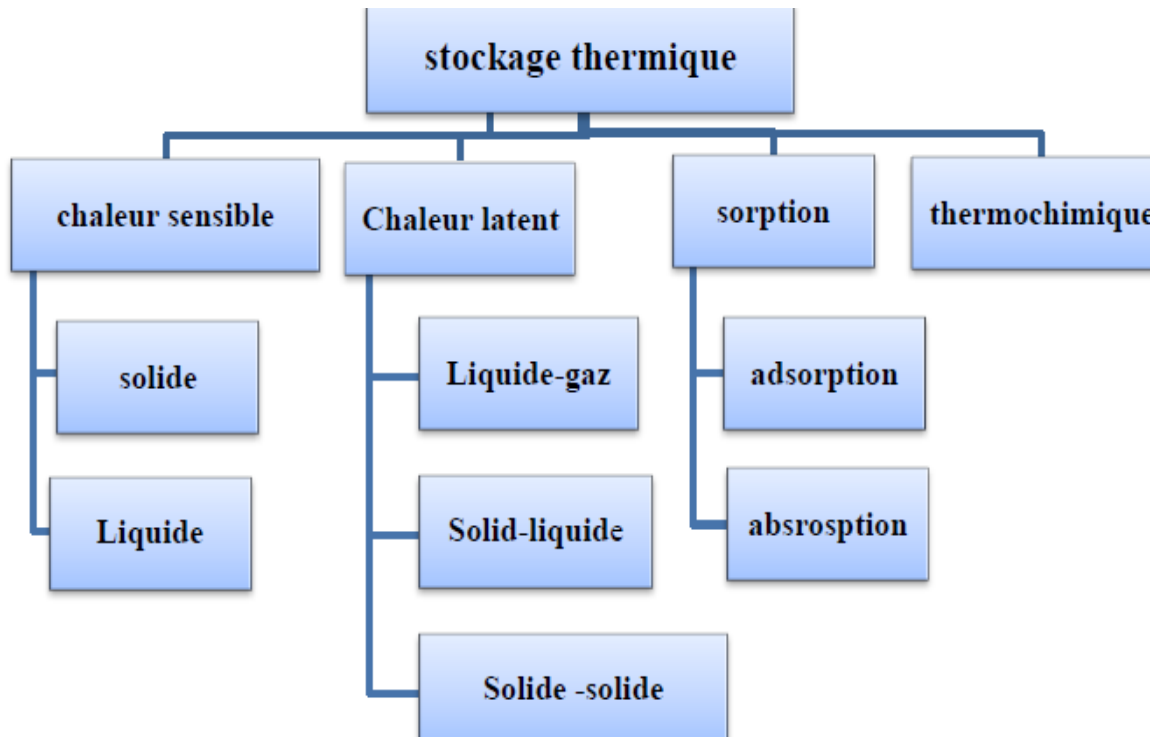


Figure II-2: Différents types de stockage de l'énergie thermique [15,16].

II.3.1 Stockage par chaleur sensible (SCS) [13]:

Le stockage d'énergie par chaleur sensible (SCS) implique le stockage de l'énergie thermique en augmentant la température d'un solide ou d'un liquide et en utilisant sa capacité calorifique. Le système SCS utilise la capacité thermique et le changement de température du matériau pendant les phases de chargement et de déchargement. La quantité de chaleur stockée dépend de la capacité calorifique du fluide, de la variation de température et de la quantité de matériau de stockage.

Dans le système (SCS), on distingue trois types de stockage [17]:

II.3.1.1 Stockage actif direct :

Dans le cas du stockage actif direct, le fluide caloporteur utilisé pour le transfert de chaleur est également utilisé pour le stockage d'énergie. Des exemples de fluides couramment utilisés incluent les sels fondus, l'eau, l'huile et les huiles synthétiques. Ce type de stockage actif direct peut être réalisé en utilisant un champ solaire pour générer de la vapeur d'eau, qui est ensuite utilisée pour le stockage actif direct. Ce système de stockage est souvent utilisé dans l'industrie pour équilibrer la demande et la génération de vapeur.

II.3.1.2 Stockage actif indirect :

Dans le cas du stockage actif indirect, l'énergie thermique est transférée du fluide caloporteur, tel qu'une huile synthétique, vers le matériau de stockage, comme les sels fondus, en utilisant un échangeur de chaleur.

Les systèmes de stockage par chaleur sensible, qui utilisent ce type de stockage actif indirect, sont couramment utilisés avec les centrales cylindro-paraboliques et les tours à concentration. À l'heure actuelle, ils sont les seuls systèmes de stockage de chaleur commercialisés. Cependant, l'un des inconvénients du stockage par chaleur sensible est qu'il nécessite de grandes quantités de matériau de stockage, ce qui peut entraîner des coûts élevés lorsque le système est mis à grande échelle.

II.3.1.3 Stockage passif :

Le stockage thermique passif utilise un matériau solide tel que le béton pour le stockage de chaleur. Des recherches ont été menées à la Plateforme Solari d'Almería (PSA) en 2003 par le DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) pour des températures de stockage d'environ 325°C. L'objectif de ce projet était de développer un matériau de stockage sensible efficace et peu coûteux. Les matériaux de stockage sont conditionnés sous forme de lit granulaire ou matriciel fixe, et l'échange de chaleur se fait par le biais d'un fluide caloporteur qui transfère sa chaleur via un échangeur de chaleur ou qui traverse directement le matériau de stockage poreux.

II.3.2 Stockage par chaleur latente [15]:

La technique de stockage d'énergie par chaleur latente (SCL) repose sur l'absorption ou la libération de chaleur lorsqu'un matériau de stockage subit un changement de phase de solide à liquide, de liquide à gaz, ou vice versa.

La capacité de stockage du système de stockage par chaleur latente (SCL) utilisant un matériau à changement de phase (PCM) peut être calculée à l'aide des équations suivantes :

II.3.3 Stockage thermochimique :

Dans le stockage thermochimique, la chaleur est stockée sous forme d'énergie chimique lorsqu'une réaction endothermique se produit. Cette réaction permet de stocker de la chaleur, et en raison de sa réversibilité, la chaleur peut être restituée lorsque la réaction inverse (exothermique) se produit [18].

Dans le cadre de cette réaction, A, B et C représentent trois composants chimiques distincts, et q représente une quantité d'énergie thermique. La réaction s'écrit comme suit :



II.3.4 Stockage par sorption :

Le stockage par sorption implique l'adsorption (à la surface) et l'absorption (dans le volume) de molécules qui consomment de l'énergie. La désorption inverse libère les molécules précédemment sorbées. Alors que la désorption est un processus endothermique (stockage d'énergie), la sorption est un processus exothermique (déstockage d'énergie) [18].

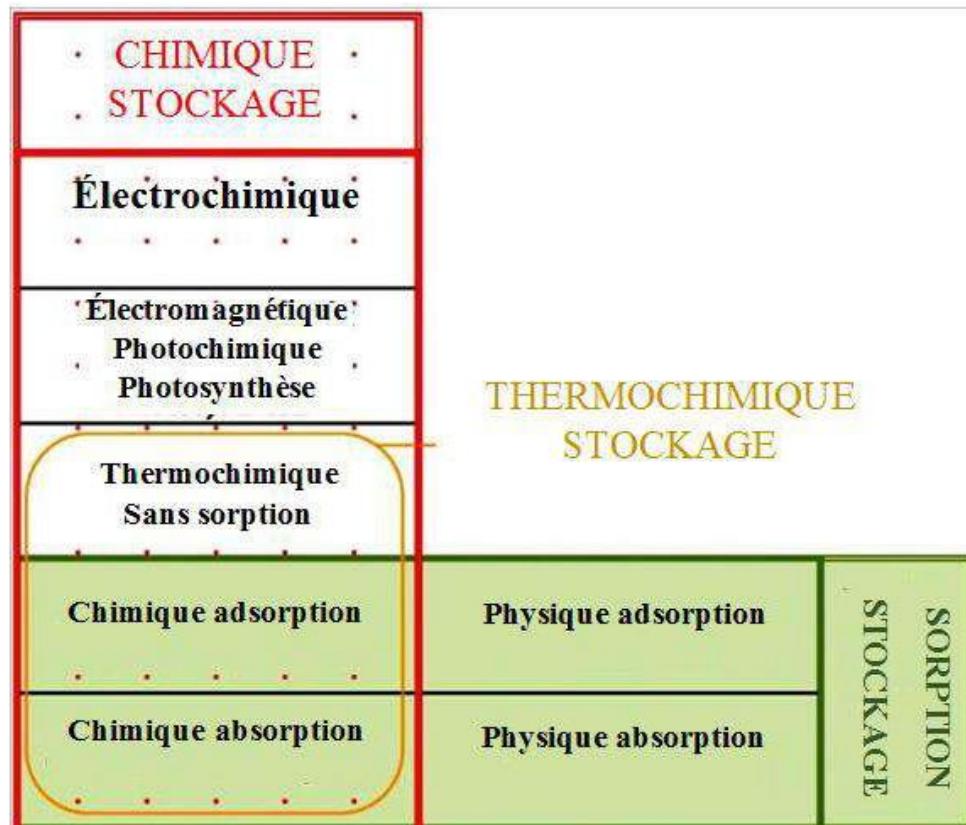


Figure II-3 :représente la classification des systèmes de stockage par sorption et par action chimique [19].

II.4 Comparaison entre les types de stockage thermique [18] :

En termes de densité énergétique, les systèmes thermochimiques ont une valeur approximativement cinq fois plus élevée que les systèmes à changement de phase, qui ont eux-mêmes une densité de stockage deux à trois fois plus élevée que les systèmes sensibles. Cela signifie que les systèmes thermochimiques offrent un potentiel plus élevé en termes de stockage d'énergie.

Les systèmes de stockage par voie thermochimique présentent plusieurs avantages, notamment un temps de stockage potentiellement infini, une facilité de transport et une densité de stockage supérieure par rapport aux autres technologies. Cependant, la principale difficulté réside dans la mise en œuvre d'un processus continu pour le stockage et la restitution de l'énergie thermique. Cela nécessite des avancées technologiques et des solutions innovantes pour rendre ces systèmes plus efficaces et économiquement viables.

Tableau II-1 : répertoire les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés, en utilisant six paramètres fondamentaux :

		Stockage par Chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par voie Thermochimique
Densité D'énergie	Volumétrique	Faible~ 15-60kWh.m-3	Moyenne ~ 50 -100 kWh.m-3	Elevée ~ 100-500kWh.m-3
	Massique	Faible ~ 0,02-0,03kWh.kg-1	Moyenne~ 0,05-0,1kWh.kg-1	Haute~ 0,5-1 kWh.kg-1
Température De stockage		Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de charge ou ambiante
Durée de Stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes Thermiques)	Théoriquement Illimitée
Transport de L'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance Théoriquement
Maturité		Echelle industrielle (20 MWe)	Echelle pilote (100 kWth)	Echelle laboratoire (1-5 kWth)
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

Ce tableau permet de comparer les caractéristiques clés des trois systèmes de stockage d'énergie thermique. Le stockage thermochimique présente une densité énergétique élevée, une large plage de températures de stockage, un potentiel de durée de stockage infinie, un transport simplifié de l'énergie, mais nécessite encore des développements en termes de maturité et de complexité de mise en œuvre. Le stockage par changement de phase a une densité énergétique moyenne à élevée, une plage de température de stockage dépendante du matériau à changement de phase (PCM), une durée de stockage à court à moyen terme, nécessite un fluide caloporteur pour le transport de l'énergie, et est une technologie bien établie. Le stockage par chaleur sensible présente une densité énergétique faible à moyenne, une température de stockage dépendante du fluide caloporteur, une durée de stockage à court à moyen terme, nécessite également un fluide caloporteur pour le transport de l'énergie, et est une technologie bien établie.

II.5 Critères de choix et de la conception d'un système de stockage :

Critères économiques :

Coût du matériau de stockage : Le coût du matériau utilisé pour le stockage thermique est un facteur essentiel dans la conception du système. Il doit être abordable pour assurer la viabilité économique.

Coût de l'échangeur de chaleur : L'échangeur de chaleur utilisé pour transférer la chaleur entre le fluide caloporteur et le matériau de stockage doit être pris en compte en termes de coûts d'investissement et d'exploitation.

Coûts d'investissement liés à l'encombrement du système de stockage : L'espace physique requis pour le système de stockage peut avoir un impact sur les coûts d'investissement liés à la construction et à l'installation.

Critères techniques :

Densité énergétique élevée : Il est souhaitable d'avoir une capacité de stockage énergétique élevée par unité de masse ou de volume pour maximiser l'efficacité du système.

Conductivité thermique élevée : Un matériau de stockage avec une conductivité thermique élevée permet des transferts de chaleur plus efficaces, ce qui favorise un chargement et un déchargement rapides.

Transferts de chaleur efficaces : Les transferts de chaleur entre le fluide caloporteur/de travail et le matériau de stockage doivent être efficaces pour assurer un stockage et une restitution optimaux de l'énergie thermique.

Stabilité mécanique et chimique : Le matériau de stockage doit être mécaniquement stable et chimiquement compatible avec le fluide caloporteur/de travail, l'échangeur de chaleur et les autres composants du système pour garantir une durabilité et une sécurité à long terme.

Réversibilité du matériau de stockage : Il est préférable d'avoir un matériau de stockage capable d'effectuer de nombreux cycles de charge et de décharge sans perte significative de performance, ce qui permet une utilisation prolongée et répétée du système.

Pertes thermiques minimales : Les pertes thermiques du système de stockage doivent être minimisées pour préserver l'efficacité globale du système.

Contrôle/commande du procédé maîtrisé : Un contrôle précis et une commande efficace du procédé de stockage et de déstockage sont essentiels pour assurer un fonctionnement sûr, fiable et optimal du système.

Tous ces critères doivent être pris en compte lors de la conception et du dimensionnement d'une unité de stockage d'énergie thermique. Il existe de nombreuses solutions technologiques qui répondent à ces critères, et le choix final dépendra des besoins spécifiques de l'application, des contraintes économiques et des performances requises.

II.6.Stockage de l'énergie thermique et les MCP.

II.6.1.introduction

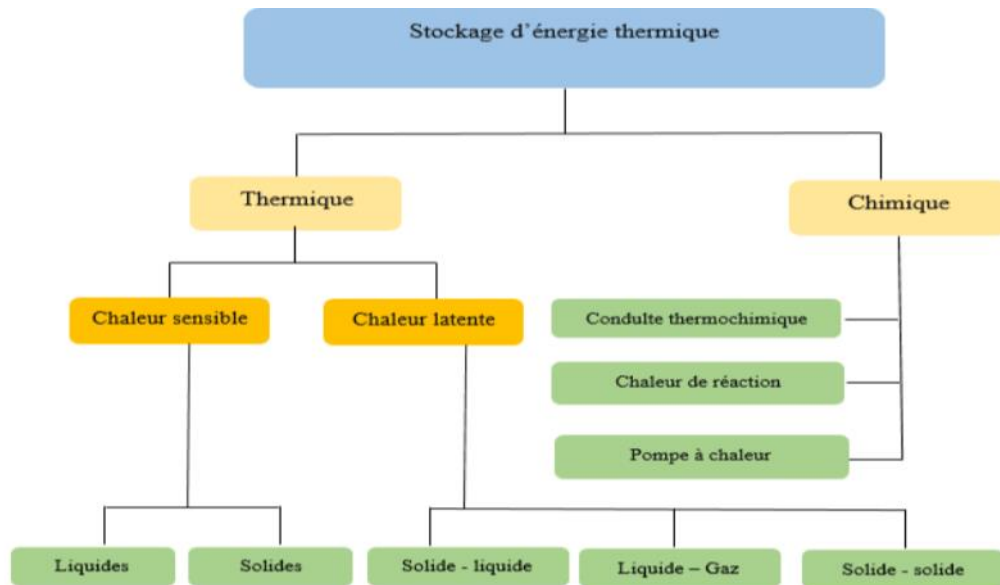
Avec la demande croissante en énergie et la diminution des ressources d'énergie fossile, le monde fait face à une crise énergétique imminente. Selon le World Energy Outlook de 2010, publié par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), environ 80 % des champs pétrolifères en activité seront épuisés d'ici 2035. Face à cette réalité, il est essentiel de se tourner vers des sources d'énergie durables et moins polluantes pour assurer un approvisionnement énergétique fiable et respectueux de l'environnement.

Diverses solutions ont été envisagées pour répondre à ce défi énergétique, telles que l'utilisation de l'énergie éolienne, des panneaux photovoltaïques, et d'autres sources d'énergie renouvelables. Cependant, ces sources d'énergie intermittentes posent des défis en termes de disponibilité et de gestion de l'énergie produite. C'est là que le stockage d'énergie thermique entre en jeu.

Le stockage d'énergie thermique offre une solution prometteuse pour pallier les fluctuations de la demande et de la production d'énergie. Il permet de stocker l'énergie thermique produite pendant les périodes de faible demande ou d'excès de production, afin de la restituer lorsque la demande est élevée ou la production est insuffisante. Cela contribue à équilibrer l'offre et la demande d'énergie, à optimiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelables et à réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

Dans cette optique, il est essentiel de concevoir et de choisir des systèmes de stockage d'énergie thermique efficaces et adaptés aux besoins spécifiques. Plusieurs critères doivent être pris en compte, tels que la capacité thermique, les coûts économiques, les propriétés techniques du matériau de stockage, la réversibilité du processus de stockage, les pertes thermiques, et la maîtrise du contrôle et de la commande du système.

Cette étude vise à explorer les différents types de stockage d'énergie thermique, tels que le stockage par changement de phase, le stockage thermochimique et le stockage par sorption, en examinant leurs caractéristiques, avantages et inconvénients. De plus, nous analyserons les critères de choix et de conception d'un système de stockage d'énergie thermique, en mettant l'accent sur les aspects économiques et techniques. Enfin, nous discuterons des solutions technologiques.



II.6.2. Stockage de l'énergie thermique :

Le stockage de l'énergie thermique est un moyen efficace et économique de stockage d'énergie, car il permet d'éviter les pertes de conversion lors de la conversion d'une forme d'énergie à une autre. Il existe différents systèmes de stockage d'énergie, tels que les systèmes mécaniques, électrochimiques, chimiques, électriques et thermiques.

L'énergie thermique peut être stockée sous différentes formes, notamment la chaleur sensible, la chaleur latente et la thermochimie, ou une combinaison de ces formes. Ces méthodes de stockage permettent de stocker l'énergie thermique en modifiant l'énergie interne d'un matériau.

La Figure II-3 fournit un aperçu des principales techniques de stockage de l'énergie thermique, permettant ainsi de mieux comprendre les différentes options disponibles.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot c_p \cdot dT$$

Avec :

Q : est la quantité d'énergie stockée (J).

m : est la masse du matériau de stockage (kg).

C_p : la chaleur spécifique du matériau de stockage (J.kg⁻¹.K⁻¹).

dT : est la variation infinitésimale de la température durant l'étape de charge (K). [18]

Effectivement, le stockage par chaleur sensible est l'un des modes de stockage thermique les plus anciens, les plus simples et les moins coûteux. Dans ce type de système, l'énergie thermique est stockée sous forme de chaleur sans que la structure moléculaire du matériau de stockage ne change.

Lorsque de la chaleur est ajoutée au matériau de stockage, sa température augmente, ce qui représente l'élévation de la température mentionnée. Cependant, il est important de noter que la structure moléculaire du matériau reste inchangée.

La densité de stockage de ce type de système est généralement considérée comme faible, ce qui signifie que la quantité d'énergie stockée par unité de volume ou de masse est limitée. Cela peut être un inconvénient majeur, en particulier lorsqu'une grande quantité d'énergie doit être stockée.

Il est également mentionné que l'état physique du matériau de stockage peut jouer un rôle dans le stockage par chaleur sensible. Différents matériaux peuvent avoir des capacités de stockage thermique différentes en fonction de leur état physique, qu'il s'agisse d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz.

Il convient de noter que malgré ses inconvénients en termes de densité de stockage, le stockage par chaleur sensible reste utilisé dans de nombreuses applications et peut être complémentaire à d'autres méthodes de stockage d'énergie thermique plus avancées.

CHAPITRE III :

***Etudes expérimentale (réalisation de
chambre de séchage et résultats)***

III-1-Introuduction :

Effectivement, le processus de séchage et l'efficacité du séchoir sont bel et bien liés aux facteurs climatiques. Ces facteurs ont un impact sur les paramètres de l'air et du produit impliqués dans le processus de séchage. Les résultats obtenus ont été obtenus par des expérimentations, et ils ont été évoqués et interprétés. Dans ce chapitre, nous présenterons un ensemble de figures représentant les courbes expérimentées expérimentalement lors du processus de séchage. Nous expliquerons ensuite ces courbes, qui décrivent et expliquent les principaux facteurs de séchage.

III-2-Etape de Réalisation :

III-2-1-la boîte de séchoir:

Découpage la planche de bois pour obtenir une planche aux dimensions (2,01 m, 1,01 m) pour servir de base à une boîte de séchage, et le reste des pièces est utilisé pour fabriquer.

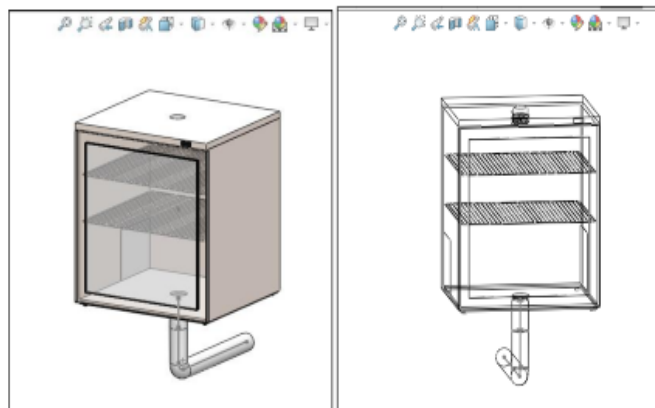


Figure III.1 : chambre de séchage



Figure III. 2 :Vue latérale du séchoir



Figure III.3 : Balance numérique.



Figure III.4 :anemometer

III-2-2-Mesure de la perte de masse :

La mesure de la perte de masse du produit en fonction du temps est effectuée sur l'ensemble produit – support, à l'aide d'une balance de précision à 0,1g ; pour la pesée systématique des produits séchés



Figure III.5 : schéma de chembre de shésage pour le stokage de chaleur.



Figure III.6 :Mélange de métal et de pierre

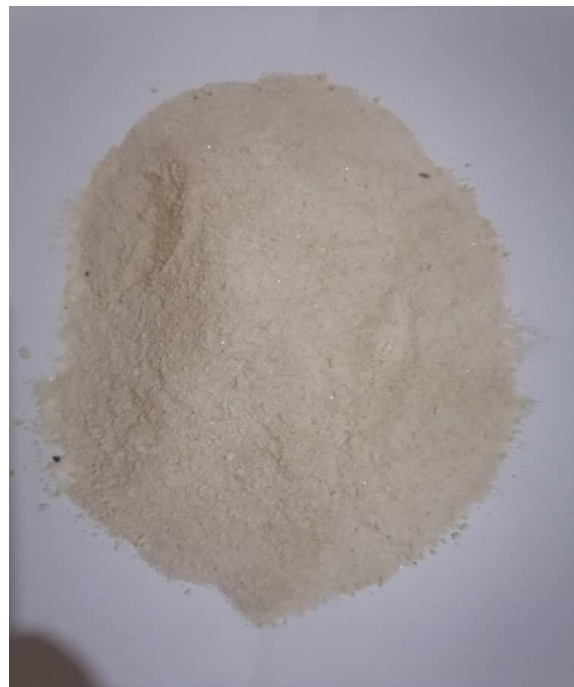


Figure III.7 : Un mélange de sable, de sel et de gypce



Figure III.8 :béton renforcée



Figure III.9: mélange



Figure III.10 :Solari mètre à affichage numérique.



Figure III.11 : Thermomètre

III-2-3-Mesures des températures

La mesure des températures s'effectue à l'aide des thermo couples de type K dans

plusieurs sens directs du capteur solaire:

- entrée et sortie du capteur solaire.
- entrée et sortie chambre de séchage.
- A un niveau du produit à sécher.

Les résultats de mesure des thermocouples sont affichés sur un thermomètre figure(III.11).



Figure III.12 : poids de l'échantillon.

III-2-4-Mesure de la vitesse et de l'humidité de l'air:

La vitesse de l'air asséchant est mesurée à l'entrée de la chambre de séchage. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un anémomètre

Figure III.12 : Vue la trémie du séchoir

III-2-5-Produits séchés:

Après un temps nécessaire, nous avons obtenu de la pomme de terre séchée



Figure III.13 : pommes de terre après séchage

III-3-Résultats dans le premier jour

-Le 23/05/2023, nous avons placé un lit renforcé à l'intérieur de la chambre, fabriqué à partir d'un béton composé de ciment, de cuivre, d'un radiateur en aluminium, de nickel, de gravier et de terre. Ensuite, nous avons mis en marche le ventilateur externe et avons observé.

Tableau III-1 : Matière de stockage thermique (Sable-Ciment –Aluminium-Gravier)

Matière de stockage thermique	$C_p [J/kg.K]$	$\rho [kg/m^3]$
Sable	920	2700
Ciment	1500	3150
Aluminium	966	2700
Gravier	1000	2260

les résultats suivants:

III-3-1-Variation de Radiation solaire en fonction de temps :

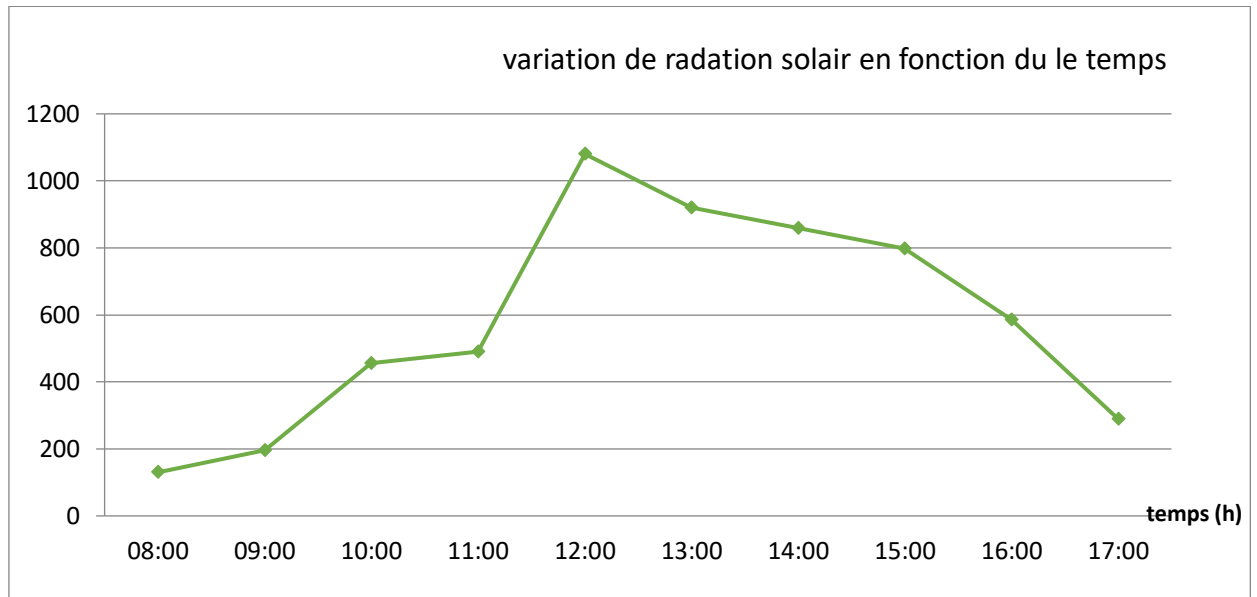


Figure III.14: variation de Radiation solaire en fonction de temps

Représente la variation de l'intensité du rayonnement solaire pour la journée 23/05/2023, Il a été observé une augmentation progressive de l'intensité du rayonnement solaire jusqu'à midi, atteignant une valeur maximale de 1080 W/m². Après 12h00, on observe une diminution des valeurs de rayonnement, atteignant un minimum de 290 W/m² à 17h00.

III-3-2-Variation de vitesse du vent en fonction du temps :

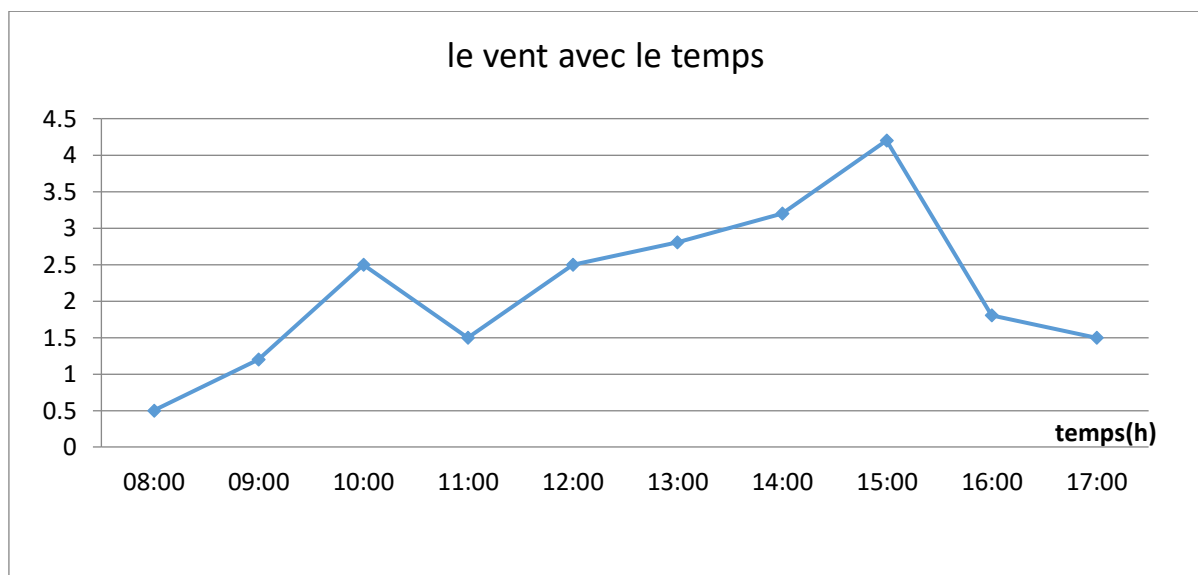


Figure III.15 : variation de vitesse du vent en fonction du temps

Montre l'évolution de la vitesse du vent en fonction du temps au cours de la journée 23/05/2023

Des fluctuations de la vitesse du vent dues aux nuages ont été observées et à 15h00, la vitesse de l'air a atteint un maximum de 4,2 mètres par seconde. Nous ne remarquons pas que la vitesse du vent diminuait généralement tout au long de la journée.

III-3-3-Variation de température ambiante en fonction du temps :

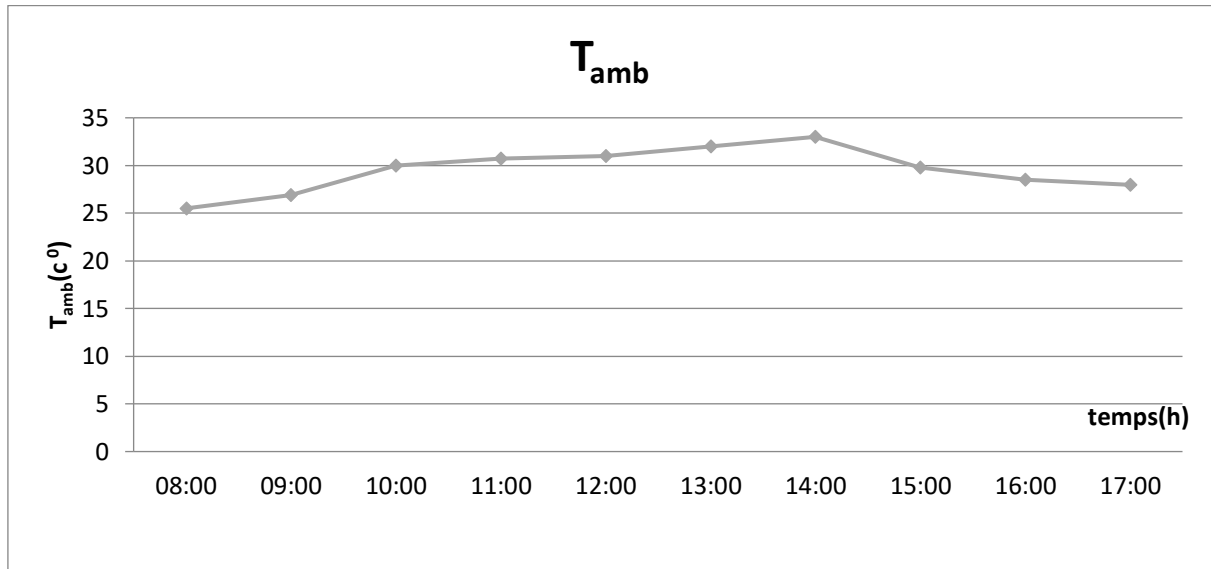


Figure III.16 :Évolution de la température ambiante T_0 dans le temps

Montre l'évolution de la température de l'air en fonction du temps sur Révisé le 23/05/2023. Une augmentation progressive de la température de l'air a été observée jusqu'à midi, lorsqu'elle a atteint une valeur maximale de 33°C. Après 12h00, en notant une diminution des valeurs de température, on a atteint un minimum de 28°C à 17h00.

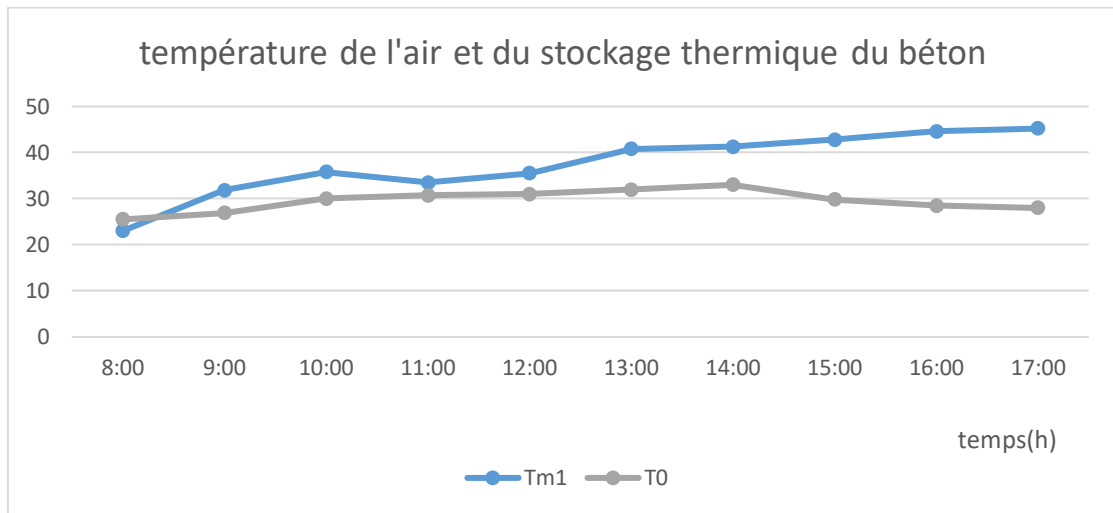
III-3-4-température de l'air et du stockage thermique du béton dans le temps :

Figure III.17:Évolution de la température de l'air et du stockage thermique du béton dans le temps

permet de suivre l'évolution de la température de l'air et du stockage thermique du béton en fonction du temps Révisé le 23 mai 2023

-Il y a eu une augmentation progressive de la température de stockage du béton jusqu'au coucher du soleil, où elle a atteint un maximum de 45,2°C.

-Une augmentation progressive de la température de l'air a été observée jusqu'à midi, lorsqu'elle a atteint une valeur maximale de 33°C

Après 12h00, en notant une diminution des valeurs de température Atteindre un minimum de 28°C à 17h00

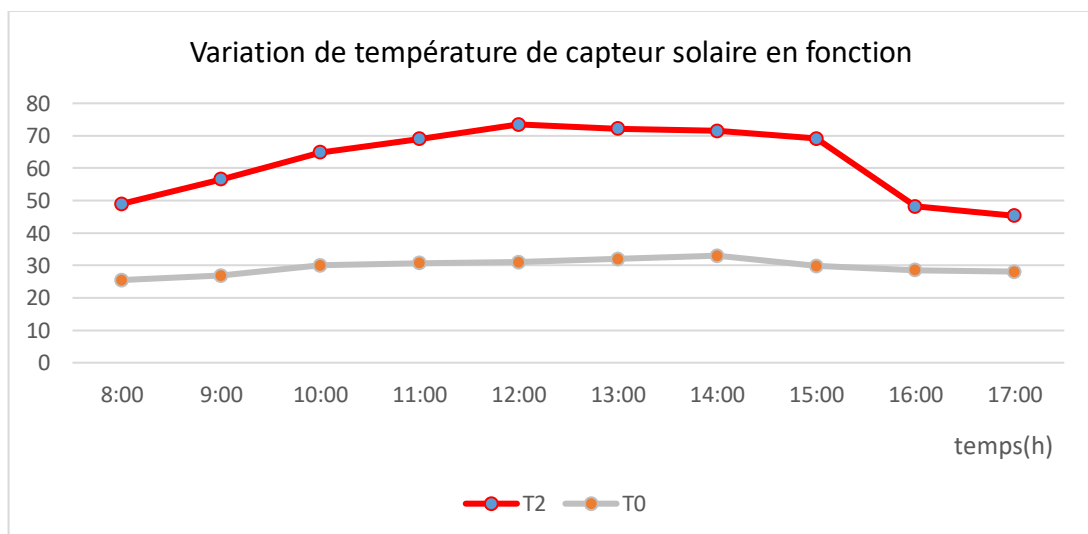
III-3-5-Variation de température de capteur solaire en fonction du temps

Figure III.18:L'évolution de la température de l'air et de la température du capteur solaire dans le temps

Permet de suivre l'évolution de la température de l'air et de la température des capteurs solaires en fonction du temps. Révisé le 23 mai 2023

Une augmentation progressive de l'intensité de la chaleur a été observée chambre, où elle a atteint une valeur maximale de 73,5. A 12h00, notant une diminution de l'intensité de la chaleur, pour atteindre un minimum de 45,3 à 17h00.

Une augmentation progressive de la température de l'air a été observée jusqu'à midi, lorsqu'elle a atteint une valeur maximale de 33°C.

III-3-6-Variation de température de chambre de séchage et de la température de l'air en fonction du temps

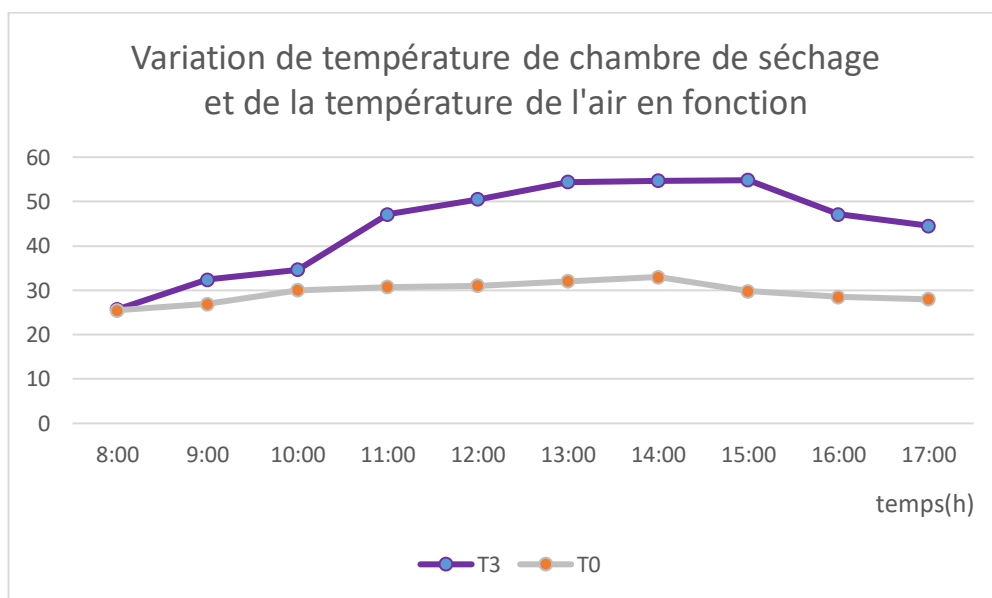


Figure III.19:Évolution de température de chambre de séchage et de la température de l'air en fonction du temps

De température de chambre de séchage et de la température de l'air en fonction du temps. Révisé le 23 mai 2023

Une augmentation progressive de l'intensité thermique de la pièce a été observée, atteignant une valeur maximale de 54,8. A 15h00 précises, on constate une légère diminution de l'intensité de la température de la pièce, atteignant un minimum de 44,5 à 17h00 le soir.

Une augmentation progressive de la température de l'air a été observée jusqu'à midi, lorsqu'elle a atteint une valeur maximale de 33°C.

III-3-7-la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du béton dans le temps :

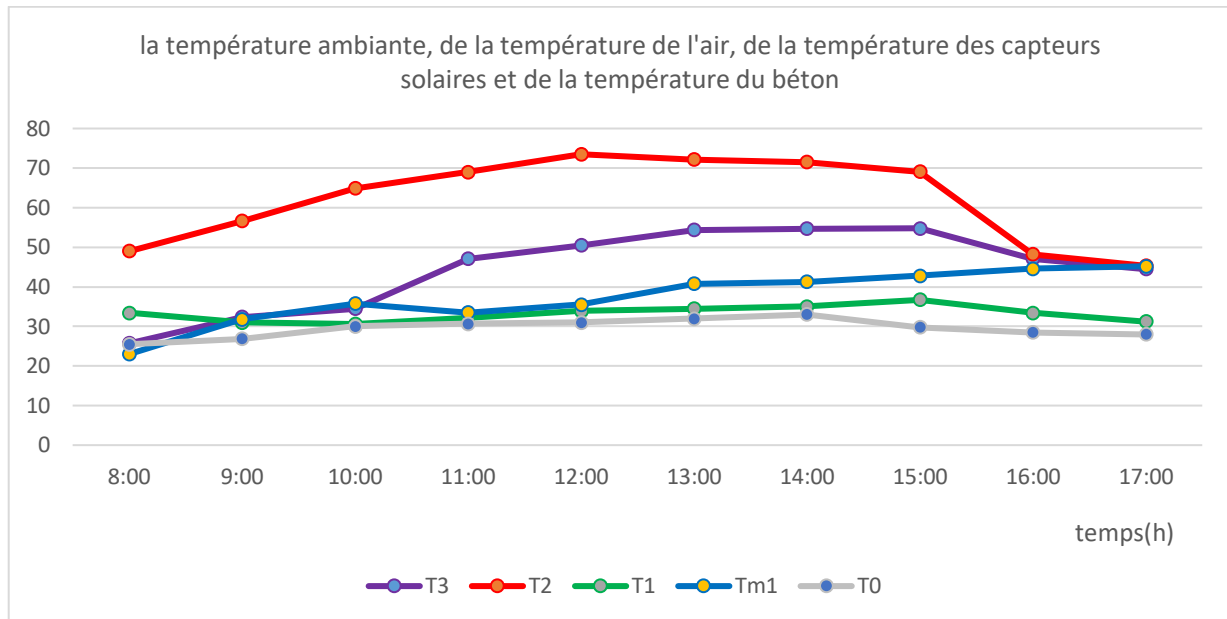


Figure III.20: Évolution de la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du béton dans le temps. Révisé le 23 mai 2023.

Nous remarquons que la température ambiante, la température de l'air et la température des capteurs solaires augmentent progressivement du matin jusqu'à midi, atteignant leur maximum. Ensuite, elles commencent à diminuer progressivement jusqu'au coucher du soleil, où elles chutent directement. En revanche, la température du béton continue d'augmenter constamment jusqu'au coucher du soleil.

III-3-8-L'énergie stockée dans le béton:

$$W_{\text{stocké}} = (m \cdot C_p)_{\text{béton}} \cdot (T(t) - T_{\text{ini}}) \quad (\text{IV. 6})$$

$m=7[\text{Kg}]$, $C_p=1104.85[\text{J/kg. K}]$; $T(t)=\text{Température instantanée du béton}$, $T(i)$
béton =23

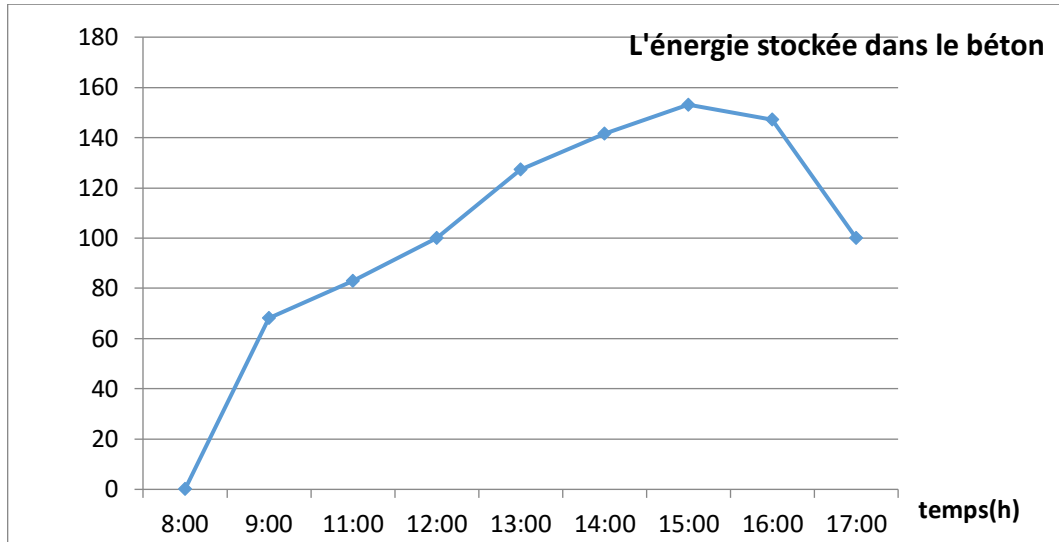


Figure III.21: Évolution L'énergie stockée dans le béton

III-4-Résultats dans le deuxième jour :

- Le 24/05/2023, nous avons placé des boîtes en fer remplies d'un mélange de sel, de sable et de plâtre à l'intérieur de la chambre. Ensuite, nous avons mis en marche les ventilateurs intérieur et extérieur et avons observé.

Tableau III-2 : Matière de stockage thermique (Sable- plâtre- sel)

Matière de stockage thermique	$C_p[\text{J/kg.K}]$	ρ [kg/m ³]
Sable	920	2700
gypse	1000	1500
sel	864.13	2163

III-4-1-Variation de température de capteur solaire en fonction du temps:

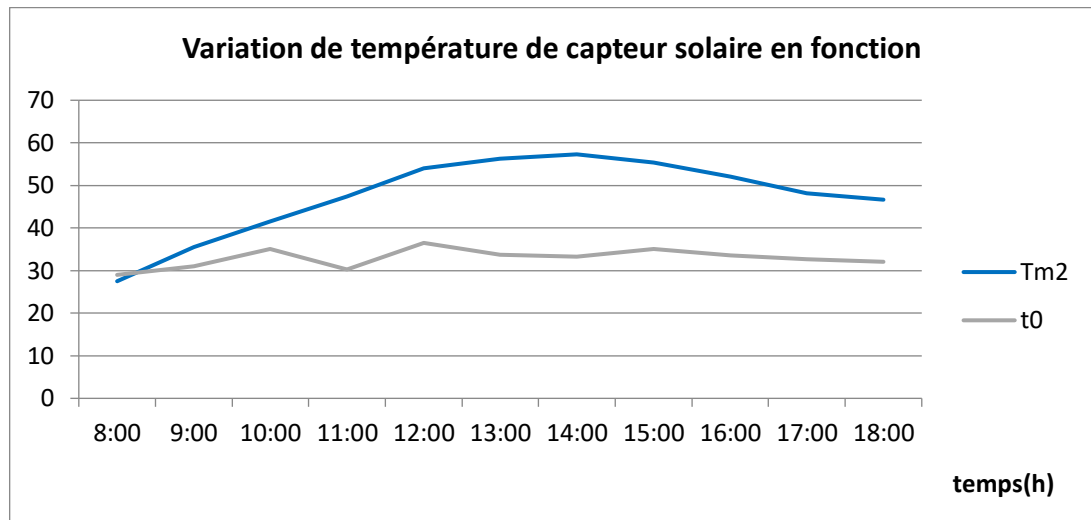


Figure III.22 :L'évolution de la température de l'air et de la température du capteur solaire dans le temps.

permet de suivre l'évolution de la température de l'air et de la température des capteurs solaires en fonction du temps. Révisé le 24 mai 2023

Nous avons observé une augmentation progressive de l'intensité de la chaleur jusqu'à midi, atteignant une valeur maximale de 69 degrés. Ensuite, la chaleur a commencé à diminuer, atteignant un minimum de 35,4 degrés à 17h00. La température de l'air a fluctué en raison des nuages et du vent, atteignant son maximum à 36,5 degrés à midi.

III-4-2-température de l'air et du stockage thermique du mélange dans le temps :

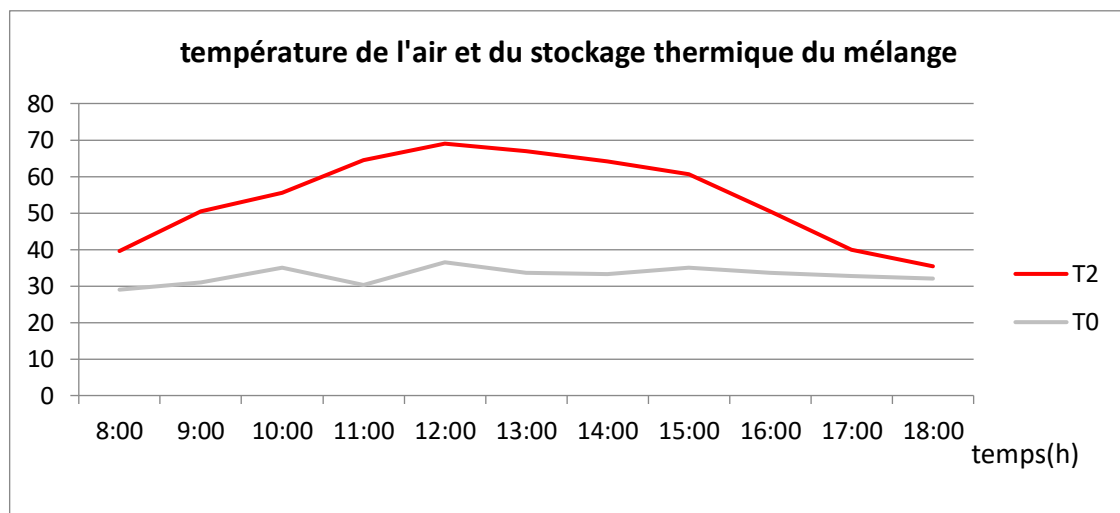


Figure III.23:Évolution de la température de l'air et du stockage thermique du mélange dans le temps.

permet de suivre l'évolution de la température de l'air et du stockage thermique du mélange en fonction du temps Révisé le 24 mai 2023

Il y a eu une augmentation progressive de la température de stockage du mélange jusqu'au coucher du soleil, où elle a atteint 57,3 degrés Celsius, avec un maximum de 36,5 à 14h00.

- Une augmentation progressive de la température de l'air a été observée jusqu'à midi, lorsqu'elle a atteint sa valeur maximale de 36,5 degrés Celsius à midi, notant que les valeurs de température ont diminué jusqu'à Atteindre une température d'au moins 32,1°C à 18h00

III-4-3-Variation de température de chambre de séchage et de la température de l'air en fonction du temps

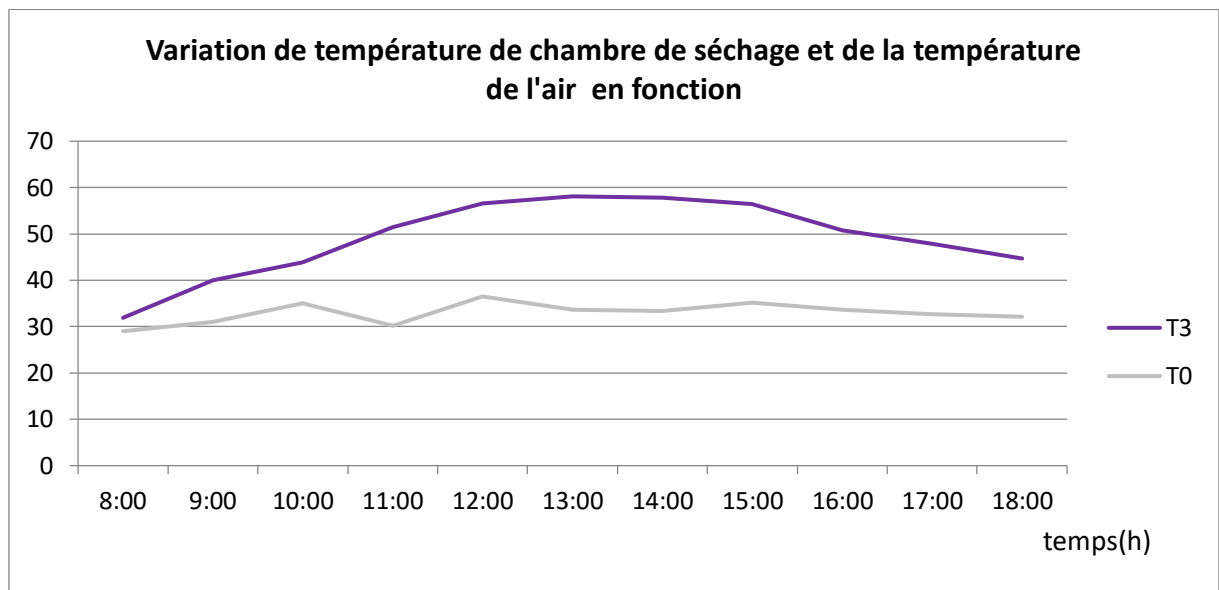


Figure III.24:Évolution de température de chambre de séchage et de la température de l'air en fonction du temps

De température de chambre de séchage et de la température de l'air en fonction du temps. Révisé le 24 mai 2023

Une augmentation progressive de l'intensité thermique de la pièce a été observée, atteignant une valeur maximale de 58,1. À 13h00 précises, une légère diminution de l'intensité de la température de la pièce a été constatée, atteignant un minimum de 44,7 à 18h00. Une augmentation progressive de la température de l'air a été observée, atteignant une valeur maximale de 36,5 degrés Celsius à 12h00.

III-4-4-la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du béton dans le temps :

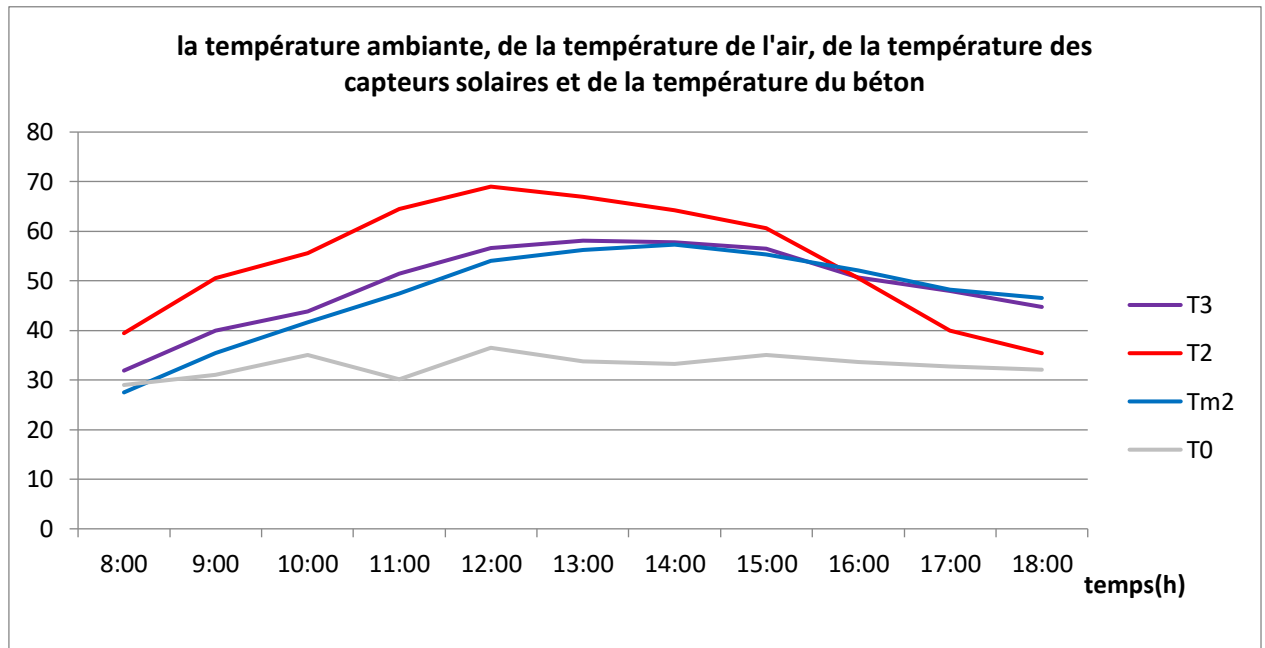


Figure III.25:Évolution de la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du mélange dans le tempsRévisé le 24 mai 2023

Nous remarquons que la température ambiante, la température de l'air et la température des capteurs solaires augmentent progressivement du matin jusqu'à midi, atteignant leur maximum. Ensuite, elles commencent à diminuer progressivement jusqu'au coucher du soleil, où elles chutent directement. En revanche, la température du mélange continue d'augmenter constamment jusqu'au coucher du soleil.

III-5-Résultats dans le troisième jour :

Le 25 mai 2023, nous avons placé des boîtes en fer remplies d'un mélange de sel, de sable et de plâtre à l'intérieur de la chambre. Ensuite, nous avons allumé les ventilateurs internes et externes et ajouté 50 grammes de tranches de pommes de terre. Les résultats suivants ont été observés :

III-5-1-Variation de température de chambre de séchage et de la température de l'air en fonction du temps

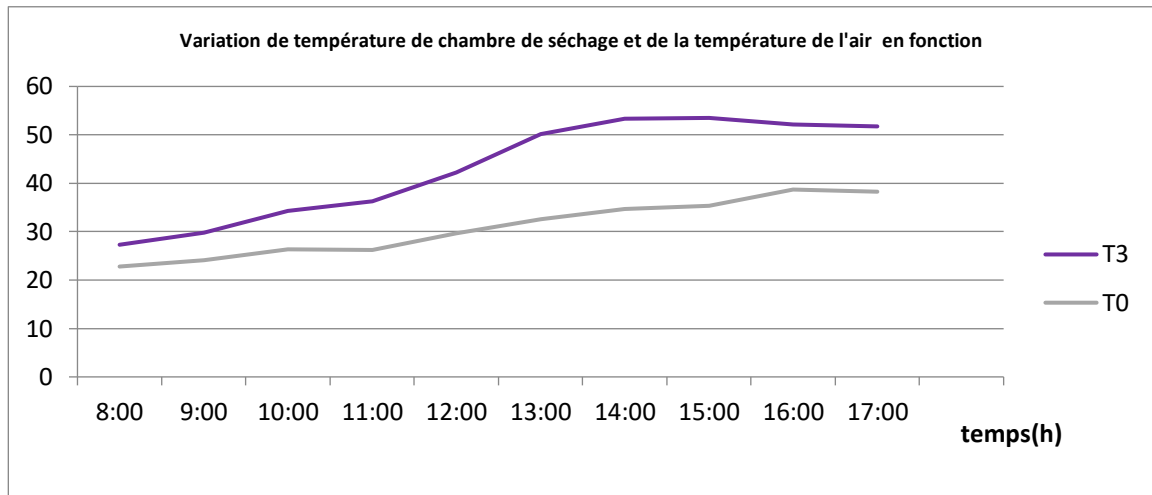


Figure III.26:Évolution de température de chambre de séchage et de la température de l'air en fonctiondu temps

De température de chambre de séchage et de la température de l'air en fonction du temps. Révisé le 25 mai 2023

Une augmentation progressive de l'intensité thermique de la pièce a été observée, atteignant une valeur maximale de 53,5. À 15h00 précises, une légère diminution de l'intensité de la température de la pièce a été constatée, atteignant un minimum de 51,8 à 17h00. Une augmentation progressive de la température de l'air a été observée, atteignant une valeur maximale de 38,7 degrés Celsius à 16h00.

III-5-2-la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du béton dans le temps :

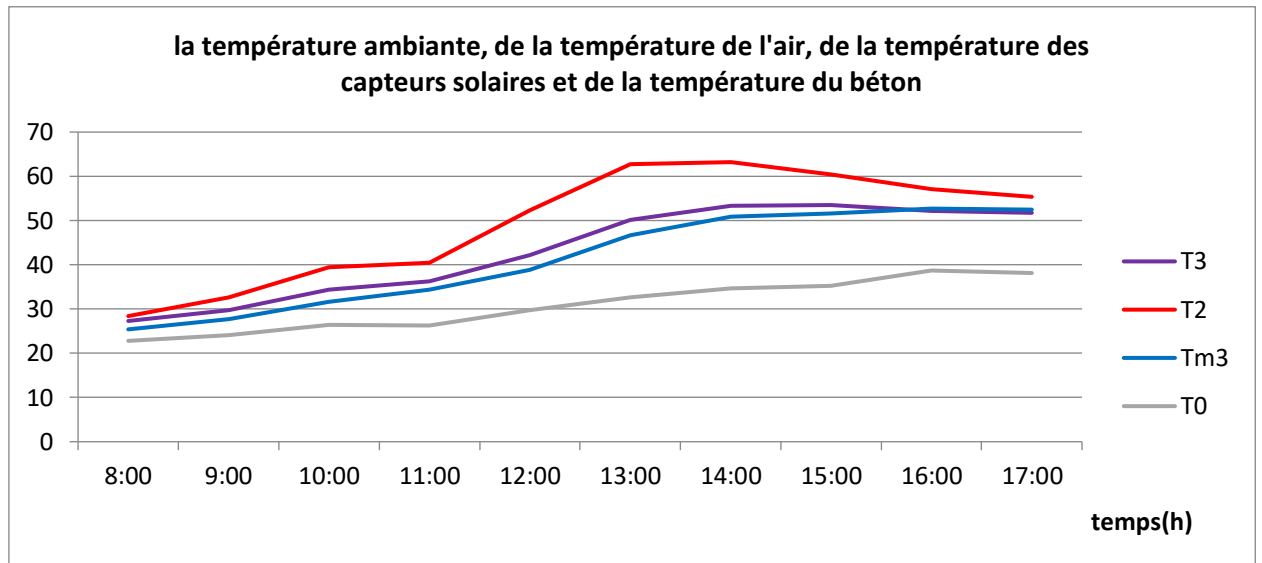


Figure III.27 :Évolution de la température ambiante, de la température de l'air, de la température des capteurs solaires et de la température du mélange dans le temps

Révisé le 24 mai 2023

Nous remarquons que la température ambiante, la température de l'air et la température des capteurs solaires augmentent progressivement du matin jusqu'à midi, atteignant leur maximum. Ensuite, elles commencent à diminuer progressivement jusqu'au coucher du soleil, où elles chutent directement. En revanche, la température du mélange continue d'augmenter constamment jusqu'au coucher du soleil.

III-5-3-Variation de masse échantillon en fonction du temps

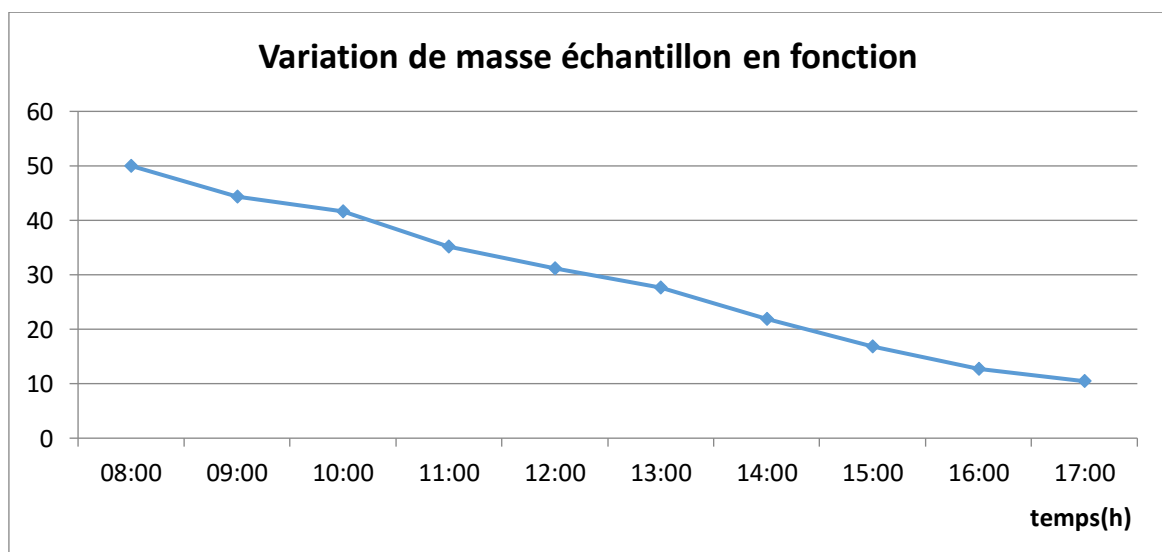


Figure III.28:Variation de masse d'échantillon en fonction du temps

Montre les changements de température de chambre de séchage en fonction du temps dans la journée 25/05/2023

Nous avons remarqué une diminution progressive de la masse de l'échantillon, atteignant son maximum à 17h00, pour atteindre 10,46 g.

III-5-4-L'énergie stockée dans le mélange:

$$W_{\text{stocké}} = (m \cdot C_p)_{\text{mélange}} \cdot (T(t) - T_{\text{ini}}) \quad (\text{IV. 6})$$

$m=12[\text{Kg}]$, $C_p=928.04[\text{J/kg. K}]$; $T(t)=\text{Température instantanée du mélange}$,
 $T(i)_{\text{sable}}=27.5$

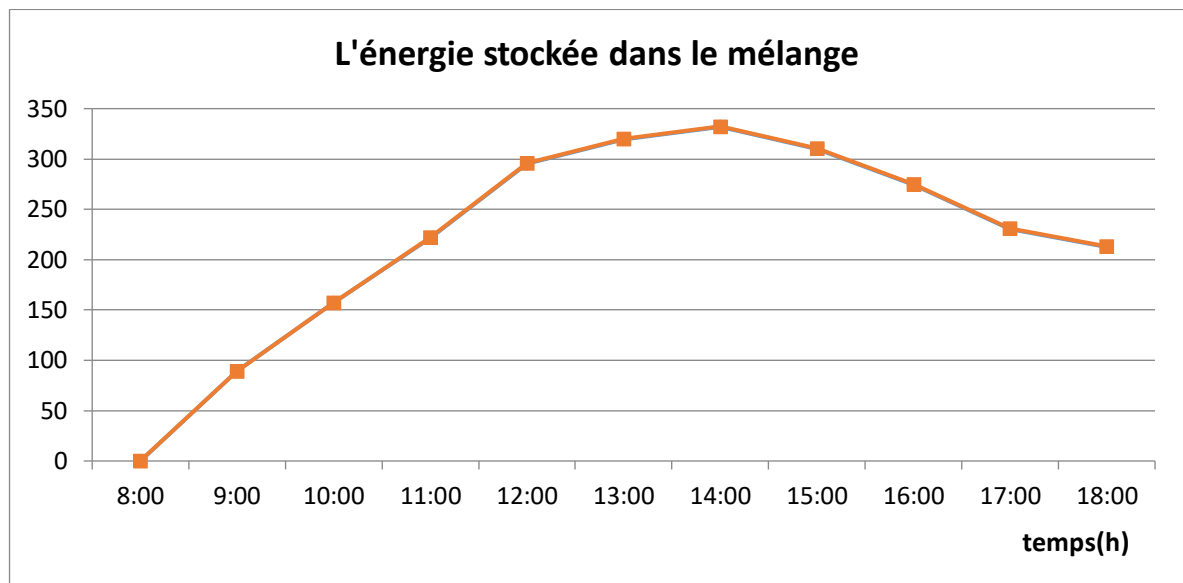


Figure III.29 : Évolution L'énergie stockée dans le mélange

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le séchage solaire dans une pièce isolée consiste à utiliser l'énergie solaire pour sécher des matériaux à l'intérieur d'un espace clos isolé de l'environnement extérieur. Ce type de séchage au soleil est utilisé pour obtenir un processus de séchage plus efficace et contrôlé.

Dans ce mémoire, des travaux expérimentaux ont été réalisés à travers les appareils de mesure disponibles et dans les conditions météorologiques du désert, la plupart des objectifs couverts ont été atteints :

- Nous avons réalisé une chambre de séchage à isolation thermique avec matière de panneaux sandwich 4 cm. reliée avec collecteur solaire. (séchoir solaire indirect). Où la perte de chaleur limitée, et la différence de température entre la sortie du capteur solaire et la température dans la chambre de séchage a été entre 6 à 8 degrés Celsius de perte.
- Nous avons également remarqué que le double fonctionnement des ventilateurs v_1 et $v_2 = 2.4\text{m/s}$ contribuait grandement à un bon flux d'air chaud traversant la chambre de séchage.
- Malgré les fluctuations météorologiques et l'effet des nuages sur la valeur du rayonnement solaire, nous avons obtenu des résultats très satisfaisants dans le séchage de l'échantillon de pomme de terre. Nous avons surmonté cela à l'aide d'un système de stockage thermique.
- L'utilisation du système de stockage thermique nous a également donné une préférence thermique dans la chambre de séchage pour plus longtemps que d'habitude, en particulier lorsque la valeur du rayonnement solaire diminue. Ceci en valeurs variables
 - La première matière M_1 (béton renforcé) a donné une chaleur à 48°C Jusqu'à 17h dans la chambre de séchage
 - Et de 52°C Jusqu'à 18 h à l'intérieur de la chambre de séchage pour la matière M_2 (sable, sel, gypse). Nous pouvons gagner des heures supplémentaires de chaleur appropriée pour le séchage en l'absence du soleil.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Bimbenet J.J. Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris 2ème édition pp34 Cité par H. Madjoudj ,(1984).
- [2] DaouedMihoubi, Déshydratations d'argile par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation. Thèse de doctorat, université de Pan et des pays de l'Adour, école doctorale des sciences exactes et de leur application, (2004).
- [3] A. Bondil, J. Hrabovsky, Isolation thermique, tome , editionEyrolles Cité par N. Chalal.
- [4] LyesBennamoun , Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local Magister, Université de Mentouri Constantine, Faculté des Sciences, Département de physique (2001).
- [5] S. Whitaker, Heat and mass transfert in granular parous media Advances in drying I, Hemisphere publication, pp 23-61,(1980).
- [6] Techniques de l'ingénieur – génie des procédés Séchage Théorie et calculs. Par André charreau et Roland cavaillé, j 2480-2 ; 2480-22.
- [7] BenseddikAbdellouahab , Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée mémoire de magistère énergétique , Universite Abou-Bekrbelkaid-Tlemcen , 06 Juillet 2011. (V1)
- [8] GUESSOUM Abdenmour HOUTI Mohamed Etude ,Mémoire de Master Académique et amélioration du fonctionnement d'unséchoir solaire direct à convection naturelle , UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA ,2016
- [9] Bennamoun L. etBelhamri A., Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. Journal of Food Engineering, 59 259-266, 2003
- [10] AumpornOrawan. contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase. universite de perpignan via domitia. 7 décembre 2017 (e) (K1)
- [11] SouheylaKhaldi. Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2018. (H1)
- [12] Hassanain A.A., Simmple Solar Drying System for Banana Fruit. World Journal of Agricultural Sciences ,5 (4) 446-455,2009.

[13]AbhayB. Lingayatetal. Reviewon phasechangematerial as thermal energystorage medium:materials,Applications.international journalofengineering researchandapplications (IJERA).Vol 3,Issue 4,Jul-Aug2013, pp.916-921.

[14]MahfoudiNadjiba.Stockage de lachaleurdansunmilieugranuleuxsolide .doctoraten sciences:Génie mécanique option:Energétique.université mohamed khider–biskra faculté des sciences et dela technologie département: Génie Mécanique .28/02/2016. p147.

[15]AtulSharmaetal.Reviewonthermalenergy storagewithphasechangematerialsand applications. Renewableand sustainable energyreview. vol13, February2009, pp.318-345.

[16]KokouviEdemN'Tsoukpoe.Etudedustockageàlong termedel'énergiesolairethermique parprocédé d'absorptionLiBr-H₂O pourle chauffage de l'habitat.Thèsede docteur de l'universitédespécialité:Énergétiqueetgéniedesprocédés.soutenuepubliquementle19mars 2012.pp248.

[17]Laurie EmmanuelleAndré,Stockage thermochimique de l'énergie solaire concentrée à partir de matériauxinnovantspar réactionssolide-gazréversibles, préparée auseinde l'école doctorale énergieet environnement et del'unitéderecherche, Soutenuele 29 novembre2017. p232

[18]MatthieuMartinelli,Stockaged'énergie thermiqueparchangementdephaseapplicationaux réseauxde chaleur, Thèsededoctorat, Universitégrenoblealpes, 05 décembre2016, p134.

[19]M.Pierre Pardo,DéveloppementD'unprocédédestockaged'énergie thermiquehaute températureparvoithermochimique,Doctoratdel'universitédetoulouse,lundi9décembre 2013.p139.

[20] BoutaouiMeriem, Simulationnumérique dustockage thermique par chaleur latente dansune capsule Elliptique,Mémoire de Master,Université M'HamedBougaraBoumerdes,année2016, pp95.

Resumé

Dans le cadre de la sécurité alimentaire et pour préserver la grande production de pommes de terre dans El-oued ces dernières années, notre étude a porté sur l'importance d'exploiter le séchage solaire dans wilaya d'El-oued, où nous avons implanté une chambre de séchage reliée à un capteur solaire, sur lequel nous avons effectué plusieurs expériences et mesures telles que la température, la vitesse du vent et la valeur du rayonnement solaire où les résultats ont montré l'étendue de son effet sur le processus de séchage des pommes de terre, et en ajoutant un système de stockage thermique au séchoir solaire avec local matériaux qui ont des propriétés de stockage thermique tels que: sable - sel - gravier - ciment et aluminium, nous pouvons augmenter le rendement du séchoir solaire

Mots clés : séchoir solaire - stockage thermique - procédé de séchage - béton - mélange.

ملخص

في إطار الامن الغذائي وللمحافظة على المنتج الكبير للبطاطس في الوادي في السنوات الماضية، ركزت دراستنا على أهمية استغلال التجفيف الشمسي في ولاية الوادي، حيث قمنا بإنشاء غرفة تجفيف موصولة مع مجمع شمسي، أجرينا عليه عدة تجارب و قياسات مثل درجة الحرارة وسرعة تدفق الهواء وقيمة الاشعاع الشمسي، حيث أظهرت النتائج مدى تأثيرها على عملية تجفيف البطاطس، وبإضافة نظام تخزين حراري للمجفف الشمسي ب مواد محلية ذات خصائص التخزين الحراري مثل: الرمل -الملح -الحصى -والأسمنت والالمنيوم، يمكننا من زيادة مردود المجفف الشمسي

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي-التخزين الحراري-عملية التجفيف-خرسانة-خليط.

Abstract

In the context of food security and to preserve the large production of potatoes in El-oued in recent years, our study focused on the importance of exploiting solar drying in the wilaya of El-oued, where we have implanted a drying chamber connected to a solar collector, on which we carried out several experiments and measurements such as temperature, wind speed and the value of solar radiation where the results showed the extent of its effect on the process of drying potatoes, and adding a thermal storage system to the solar dryer with local materials that have thermal storage properties such as: sand - salt - gravel - cement and aluminum, we can increase the yield of the solar dryer

Keywords: solar dryer - thermal storage - drying process - concrete - mixture.