

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

UNIVERSITE d'ADRAR

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en
Physique énergétique

Thème

SOUTENU LE : JUIN 2021

*L'étude De Séchage Solaire d'une
Plante Médicinale De La Région
D'Adrar*

Présenté par :

- ✓ Hamadi Ahlam
- ✓ Hamzaoui Zineb

Devant le jury composé de

Encadreur:	Mr. MEDIANI Ahmed	MRB .URERMS .Adrar
Examination :	Dr. SOUILEM Souad	MCA. université Ahmed Draia Adrar

Année universitaire : 2020/2021



شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): مدياني احمد

المشرف على مذكرة الماستر.

الموسومة ب: L' étude de réchape pdaire d'Une plante
médicinale de La région d'Adrar

من إنجاز الطالب(ة): حمادي أحلام

و الطالب(ة): حمزوي نزيدي

كلية: العلوم والتكنولوجيا

القسم: علوم المادة

التخصص: فيزياء طاقوية وطاقات متجددة

تاريخ تقييم / مناقشة:

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها. ويماكنهم إيداع النسخ الورقية (02) والالكترونية (PDF).

- امضاء المشرف

A. Medioui

ادرار في
مساعد رئيس القسم:-

د. سميلي بلال
رئيس قسم علوم المادة

dédicace:

je dédie les fruits de mes efforts à

- Mon père et ma mère que dieu prolonge leur vie et les
préserve.
- Mes chères sœurs, que dieu les bénisse.
- Mon mari, que dieu me le préserve comme soutien.
- Les conjoints de mes sœurs, ainsi que leur fils et filles.
- Ma grand-mère, mes oncles, ma tante et mes oncles.
- Aux parents de mon mari, à ses sœurs et à sa famille.
- A mes professeurs dans mon carrière académique.
 - A mes amis et collègues de l'école.
 - A tous ceux qui m'ont appris les lettres.
 - A tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.
- A celui qui m'a accompagné dans la réalisation de ce
travail.

H. Zineb

Dédicase

je dédie ce mémoire à:

-Vers lequel le ciel est sous ses pieds "ma mère bien-aimée".

-Acelui qui a travaillé dur pour m'élever "mon père bien -
aimé".

-A mon soutien dans la vie "mon cher fiancé abdo".

- A mes chères sœurs et à mes frère bien-aimés "fatima , tarek
et kholoude".

-A toute ma chère famille.

-A mes amis et bien- aimés à mon cœur "el cheima, safia et
zohra "

-A tous ceux qui m'ont appris une lettre dans ce monde mortel.

- A ma petite amie et compagnon dans cette recherche "zineb."

#.Ahlam

Remerciements

C'est un réel plaisir pour nous de garder ces lignes comme preuve de la profonde gratitude et de l'appréciation de tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation et à l'aboutissement de ce travail.

Tout d'abord, Nous remercions Dieu le tout-puissant de nous avoir aidé à accomplir cette humble œuvre.

Tous les éloges et la gratitude vont à Allah, car nous avons réussi et nous avons inspiré avec patience pour les difficultés auxquelles nous avons du faire face pour accomplir cet humble travail.

Merci à chaque enseignant qui nous a fait part de ses connaissances étapes de l'étude jusqu'à ce moment.

Nous remercions également le Dr. **Mediani Ahmed** qui nous a aidé à mener à bien nos recherches.

Nous remercions également, les responsables de l'URERMS pour avoir nous autorisé et nous accueilli au sein de leur établissement.

Les ingénieurs de labo de séchage **Tigani Cherif** et **Djaber Abdelkrim**

Nous remercions aussi le professeur : **Moungar Houssine** pour les conseils qu'il nous a donné

Aussi nos remerciements vont aux membres de jury, président et examinateur, pour avoir accepté présider et juger ce modeste travail.

En fin de compte, nous ne pouvons que prier dieu le tout-puissant de nous accorder le paiement, les conseils, la chasteté et la richesse, et de nous faire des dons guidés.

Résumé:

Le sujet de notre étude tourne autour du séchage solaire.

L'objectif principal de notre travail est une étude expérimentale du séchage des feuilles d'arbre sidr par séchage solaire direct et indirect. Le temps de séchage a pris moins 4 heures en raison de la nature des feuilles. La détermination de la cinétique de séchage est essentielle pour parvenir à une bonne compréhension des mécanismes qui se produisent dans le produit étudié, nous avons donc étudié la modélisation de la cinétique de séchage avec divers modules mathématiques.

Le séchoir utilisé dans cette expérience permet de déterminer l'effet des paramètres thermiques simultanément sur la température de séchage, le temps de séchage et la teneur en eau finale du produit ces paramètres décrivent le comportement la cinétique du produit pendant le processus de séchage .

Mots clés: séchage solaire, feuille de Sidr, cinétique de séchage, vitesse de séchage

ملخص:

موضوع دراستنا يتمحور حول التجفيف الشمسي.

الهدف الأساسي لعملانا هو دراسة تجريبية لتجفيف أوراق السدر عن طريق التجفيف الشمسي المباشر وغير المباشر، فلقد استغرق وقت التجفيف اقل من 4 ساعات نظرا لطبيعة الأوراق .

يعد تحديد حركية التجفيف أمر ضروري لتحقيق وفهم جيد لآليات التي تحدث في المنتج المدروس لذلك قمنا بدراسة نمذجة لحركية التجفيف بمختلف العلاقات الرياضية .

يتيح المجفف المستخدم في هذه التجربة تحديد تأثير المعلمات الحرارية الجوية في نفس الوقت درجة حرارة التجفيف، وقت التجفيف والمحتوى المائي النهائي للمنتج فهذه المعلمات هي التي تصف السلوك الحركي للمنتج أثناء عملية التجفيف .

الكلمات المفتاحية: التجفيف الشمسي، حركية التجفيف، درجة الحرارة، سرعة التجفيف، أوراق السدر

Abstract:

The subject of our study revolves around solar drying.

The main objective of our work is an experimental study of drying sidr leaves by direct and indirect .the drying time took less 4 hours due to the nature of the leaves.

Determining the drying kinetics is necessary to achieve a good understanding of the mechanisms that occur in the studied product, so we studied a modeling of drying kinetics with various mathematical relationships. The dryer used in this experiment allows the determination of the influence of atmospheric parameters at the same time drying temperature, drying time and final water content of the product. These parameters describe the dynamic behavior of the product during the product during the drying process

Key words: sun drying, sidr leaves, drying kinetic, drying speed

La liste de la figure

Figure I.1	Les panneaux photovoltaïques	Page 4
Figure I.2	principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique	Page 5
Figure I.3	Chauffe-eau solaire monobloc (ou compact)	Page 6
Figure I.4	Le chauffe-eau à thermosiphon	Page 6
Figure I.5	Chauffe-eau stockeur	Page 7
Figure I.6	Système photovoltaïque	Page 7
Figure I.7	L'effet photovoltaïque	Page 8
Figure I.8	La ferme éolienne de kaberténe	Page 9
Figure I.9	Technologie éolienne à axe vertical	Page 10
Figure I.10	Technologie éolienne à axe horizontal	Page 10
Figure I.11	Exemple de système éolien de type aérogénérateur	Page 11
Figure I.12	L'énergie biomasse	Page 12
Figure I.13	L'énergie hydrolique	Page 13
Figure I.14	Le principe de fonctionnement	Page 14
Figure I.15	La centrale géothermique de palin pino (philippines),le plus profond puits est de 3800 m	Page 15
Figure II.1	Présentation schématique d'un produit humide	Page 19
Figure II.2	Un séchoir solaire	Page 19
Figure II.3	Un séchoir solaire direct	Page 20
Figure II.4	Un séchoir solaire indirect	Page 21
Figure II.5	Un séchoir solaire mixte	Page 22
Figure II.6	Un séchoir solaire hybride	Page 23
Figure III.1	Les feuilles de Sidr	Page 35
Figure III.2	Séchoir solaire indirect à l'URERMS Adrar	Page 36
Figure III.3	Préparation du produit dans les claies	Page 37
Figure III.4	Appareille Pyranomètre	Page 37
Figure III.5	Les thermocouples dans la boit	Page 38
Figure III.6	Appareille de testo	Page 38
Figure III.7	Le produit dans le dessiccateur	Page 39
Figure III.8	L'étuve	Page 39
Figure III.9	Four à moufle	Page 39
Figure III.10	Plaque chauffée du produit	Page 41
Figure III.11	pH mètre	Page 41
Figure III.12	Titration de solution	Page 42
Figure III.13	Variation temporelles des rayonnements solaires	Page 43
Figure III.14	Evolution de la température de vitre en fonction de temps	Page 43
Figure III.15	Variation de la température de plaque absorbant en fonction de temps	Page 44
Figure III.16	Variation de la température entré et sortie du	Page 44

	capteur en fonction du temps	
Figure III.17	Evolution de la température de l'eau entrante et sortante en fonction du Temps	Page 45
Figure III.18	Evolution de la température de l'air entrant et sortant de la chambre de Séchage en fonction du temps	Page 45
Figure III.19	Evolution de la température de la plante dans la chambre en fonction du temps	Page 46
Figure III.20	Evolution de la température ambiante en fonction de temps	Page 46
Figure III.21	Evolution des températures des différentes parties de séchoir solaire en fonction de temps	Page 47
Figure III.22	Evolution de l'humidité relative de l'air à l'intérieur de la chambre et à l'extérieur du séchoir	Page 48
Figure III.23	Variation temporelle de l'humidité relative de l'entrée et de la sortie de la chambre de séchage en fonction du temps	Page 48
Figure III.24	la cinétique de séchage du produit dans le séchoir solaire	Page 49
Figure III.25	comparative entre le séchage à l'air et dans le séchoir solaire	Page 49
Figure III.26	Le lissage des courbes de cinétique de séchage à l'air libre par quatre modèles mathématiques	Page 50
Figure III.27	Le lissage des courbes de cinétique de séchage dans le séchoir hybride par quatre modèles mathématiques	Page 52

La liste des tableaux

Tableau I.1	Les types des cellules	Page 8
Tableau II.1	Quelques exemples des méthodes de séchage	Page 24
Tableau II.2	Les modèles mathématiques de la modélisation d'une cinétique de séchage	Page 31
Tableau III.1	Situation Botanique	Page 35
Tableau III.2	présenté d'activité d'eau de produit avant et après de séchage	Page 41
Tableau III.3	Teneurs en métabolites en pourcentage de matière sèche.	Page 42
Tableau III.4	Analyses biochimiques de Zizyphus Spina-Christi	Page 42
Tableau III.5	coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour la séchage direct	Page 49
Tableau III.6	coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour la séchage direct	Page 50

Notations

Symbole	Désignation	Unité
Eg	Energie	J
λ	Conductivité thermique de la pellicule de produit	W/m. K
$\frac{dT}{dt}$	Gradient de température entre la paroi chaude et le produit	
Q	La quantité de chaleur transférée par unité du temps	W
A	La surface d'échange	m^2
$T_a - T_s$	Entre la température de l'air de séchage et la température superficielle du produit à séché	K
Q	La quantité de chaleur transférée par unité du temps	W
A	La surface d'échange	m^2
α	Le coefficient d'échange par convection	W/ $m^2 \cdot K$
T_1	Température de la source émettrice	K
T_2	Température du produit	K
A_1	Surface du ceps recevant le rayonnement	m^2
A_2	Surface de l'émetteur infrarouge	m^2
φ	Facteur de complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit	
ε_1	Emissivité du produit	
ε_2	Emissivité de l'émetteur	
Hr	Humidité relative	%
Pv	pression partielle de vapeur	Pa
Ha	humidité absolue.	$\frac{Kg_v}{kg_a}$
Mv	masse de vapeur d'eau	Kgv
Ma	masse d'air sec	Kga
φ	Degré de saturation	%
λ	Conductivité thermique du milieu	W. $m^{-1} \cdot C^{-1}$
x	Variable d'espace dans la direction du flux	m
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur	m^2
ρ	Masse volumique de L'élément de surface	$Kg.m^{-3}$

V	Volume de l'élément de surface	m^3
C	Chaleur massique	$J.Kg$ $. C^{-1}$
T	Température	C
t	Temps	s
q	densité volumique d'énergie générée	$W.m^{-3}$

Table des matières

Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VI
Nomenclature	VI
Introduction générale	
Introduction générale	1
Chapitre I: Généralité sur les énergies renouvelables	
I.1 Introduction	3
I.2 Les énergies solaires	3
I.2.1 l'énergie solaire thermique	4
I.2.1.1 Central solaire thermodynamique	4
I.2.1.2 Chauffe-eau solaire	5
I.2.2 L'énergie solaire photo voltaïque	7
I.2.3 L'énergie éolienne	9
I.2.3.1 Types des turbines éoliennes	9
I.2.3.1.1 Eolienne à axe vertical	9
I.2.3.1.2 Eolienne à axe horizontal	10
I.2.3.2: constitution et fonctionnement d'une éolienne	11
I.2.4 L'énergie biomasse	12
I.2.5 L'énergie hydrolique	12
I.3 L'énergie hydrogène	13
I.4 L'énergie géothermique	14
I.5 Conclusion	15
Chapitre II: Le séchage solaire	
II.1 Introduction	17
II.2 Définition	17
II.3 Historique	17
II.4 Principe de séchage	18
II.5 Type de séchoirs solaire	19
II.5.1 Les séchoirs solaires à l'air	19
II.5.1.1 Les avantages	19
II.5.1.2 Les inconvénients	20
II.5.2 Les séchoirs solaires direct	20
II.5.2.1 Les avantages	20
II.5.2.2 Les inconvénients	21
II.5.3 Les séchoirs solaires indirect	21
II.5.3.1 Les avantages	22
II.5.3.2 Les inconvénients	22
II.5.4 Les séchoirs solaires mixtes	22

II.5.5 Les séchoirs solaires hybrides	23
II.5.5.1 Les avantages	23
II.5.5.2 Les inconvénients	23
II.6 Mode de séchage	24
II.6.1 Séchage mécanique	24
II.6.2 Séchage chimique	24
II.6.3 Séchage thermique	24
II.6.3.1 Séchage par ébullition	25
II.6.3.2 Séchage par entraînement	25
II.7 Différents modes de séchage	26
II.7.1 Séchage par conduction	26
II.7.2 séchage par convection	26
II.7.3 Séchage par rayonnement	26
II.7.4 Séchage par micro-onde	27
II.7.5 Séchage lyophilisation	27
II.8 Caractéristique de l'air de séchage	27
II.8.1 Humidité	28
II.8.1.1 Humidité relative	28
II.8.1.2 Humidité absolue	28
II.8.1.3 Degré de saturation	29
II.8.2 Température	29
II.8.2.1 Température humide	29
II.8.2.2 Température sèche	29
II.8.2.3 Température de la rose	30
II.8.3 Vitesse	30
II.9 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	30
I.9.1 Influence de la température de l'air	30
II.9.2 Influence de la vitesse de l'air	31
II.9.3 Influence de la l'humidité de l'air	31
II.10 Les modèles mathématiques de la modélisation d'une cinétique de séchage	31
II.11 Conclusion	32
Chapitre III: étude expérimentale de séchage du produit	
III.1 Introduction	34
III.2 Objectif	34
III.3 Définition de Sidr	34
III.4 Situation botanique	35
III.5 Les composantes chimiques de Zizyphus Spina-Christi	35
III.6 Description du séchoir solaire	35
III.6.1 le capteur solaire expérimental utilisé	36
III.6.2 Chambre de séchage	36
III.7 Préparation du produit	36
III.8 Appareils de mesures	37
III.8.1 Mesure du rayonnement solaire	37
III.8.2 Mesures des températures	37
III.8.3 Mesure de l'humidité et de la vitesse de l'air	38
III.9 Caractéristique physico-chimique de la Sidr	38
III.9.1 Activité d'eau	38

III.9.2 Détermination de teneur en eau	39
III.9.2 Détermination de cendre/matière organique	40
III.9.3 Détermination du pH	41
III.9.4 Détermination de l'acidité titrage	41
III.10 Résultats expérimentales	43
III.10.1 Variation de la température de vitre	43
III.10.2 Variation temporelles des températures de la vitre capteur thermique et panneaux PV	43
III.10.3 Variation de la température de plaque absorbant	44
III.10.4 Variation de la température de fluide entré et sortie de capteur thermique	44
III.10.4 Variation de la température de l'eau entré et sortie de capteur thermique	45
III.10.6 Variation de la température l'entré et sortie de la chambre de séchage	45
III.10.7 Variation de la température de la plante dans la chambre	46
III.10.8 Variation temporelle de la température ambiante	46
III.10.9 variation temporelle des températures des différentes parties de séchoir solaire	47
III.10.10 Variation temporelle de l'humidité relative entrée de la chambre et milieu extérieur	47
III.10.11 Variation temporelle de l'humidité relative de l'entré et la sortie de la chambre de séchage	48
III.10.12 Etude de la cinétique de séchage solaire	48
III.10.13 Comparative entre le séchage à l'air et séchoir solaire	49
III.11: Modélisation de la cinétique de séchage	49
III.12 Conclusion	53
Conclusion générale	
Conclusion générale	54
Référence	55
Annexes	59

Introduction Générale

Introduction générale:

L'énergie est une composante de base de l'univers, et c'est le principal nerf et moteur du développement de la civilisation et du progrès scientifique. La consommation de cette énergie a conduit à une aggravation de la situation énergétique dans le monde et à une diminution dans les pays de réserves d'énergies traditionnelles (charbon et pétrole) avec leurs prix élevés, qui ont conduit à la recherche d'énergies alternatives, y compris les énergies renouvelables, qui sont un type d'énergie inépuisable et la source est l'une des ressources naturelles comme le soleil, le vent et l'eau.

L'importance de l'énergie solaire est apparue comme une source d'énergie renouvelable alternative, car elle est la réponse décisive aux plus grandes menaces économiques environnementales dans le monde, ce qui fait de cette énergie l'énergie du futur, et appelle à une étude approfondie dans le domaine de son utilisation. Son rôle dans cette recherche est apparu dans le chauffage, la distillation et l'assèchement des produits agricoles, qui est l'objet de notre étude.

Le séchage solaire est considéré comme l'une des utilisations humaines les plus anciennes, du fait de la manipulation par le soleil des facteurs d'atmosphère et d'air, mais ces matériaux séchés sont soumis à des fluctuations atmosphériques, ce qui affecte leur structure et leur propriété physique. Aujourd'hui, la technologie qui utilise l'énergie solaire pour le séchage des produits agricoles, dont le processus s'est développé en fabriquant des séchoirs mécaniques qui chauffent l'air de l'intérieur et des ventilateurs pour le forcer à passer à une vitesse élevée, le séchage automatique est plus rapide que le séchage à l'air et le produit issu de ce processus est généralement un produit de haute qualité. Le rôle du séchage est de réduire la teneur en eau des produits traités et d'inhiber l'activité bactérienne, ce qui nous permet d'étudier plus facilement leurs propriétés chimiques. Le séchage nous permet également de conserver les produits qui existent à certaines saisons et les consommer tout au long de l'année.

Le traitement médical avec des herbes de toutes sortes s'est répandu sans recourir à des médicaments et des matériaux industriels à l'heure actuelle, et l'un des produits agricoles les plus importants qui jouent un rôle important dans le domaine de la médecine et de la cosmétologie est la plante Sidr car cette plante rentre dans des groupes d'importance thérapeutique.

Ce travail présente les résultats de l'étude de séchage des feuilles de Sidr, la cinétique de séchage de produit avec une comparaison du phénomène de séchage direct à l'air

(séchage directe) et dans le séchoir solaire (séchage indirecte), afin de déterminer l'efficacité du séchoir solaire.

Ce mémoire comporte trois chapitre, et structuré comme suit:

1^{er} chapitre: nous avons parlé en général des énergies renouvelables et des différentes transformations énergétiques.

2^{ème} chapitre: nous avons mené une étude générale du processus de séchage direct et indirect, et nous avons également mentionné les différents types de séchoirs solaires.

3^{ème} chapitre: nous avons mené une étude expérimentale sur le séchage des feuilles de Sidr au sein de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien d'Adrar, pour déterminer les courbes de cinétique de séchage direct et indirect, puis une modélisation mathématique et les facteurs qui l'affectent ont été déduits.

Enfin, nous avons terminé notre travail avec une conclusion qui inclut l'interprétation générale de l'étude.

**Chapitre I:
Généralités sur les énergies
renouvelables**

I.1 Introduction:

Aujourd'hui, alors que l'énergie fossiles s'épuisent et que la consommation augment, l'homme doit trouver des moyens de produire plus d'énergie tout en s'assurant que celle-ci pourra durer et doit être propre et en accord avec la nature, afin qu'elle n'en soit pas bouleversée.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables (soleil, vent, eau, biomasse) ont connu ces dernières années un développement assez rapide pour être considérées comme inépuisables à l'échelle de l'homme. Si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future, ce n'est pas le cas pour les combustibles fossile et nucléaires.

Les énergies renouvelables peuvent être utiles en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins.

Parmi les systèmes d'énergie les plus renouvelables figurent l'énergie solaire, en particulier le photovoltaïque et l'énergie éolienne. Cette dernière contribue de façon significative à la production de l'énergie électrique pour certains pays et ce grâce à sa maturité.

Dans ce chapitre, on va donner un aperçu général sur les énergies renouvelables.

I.2 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est produite par le soleil à la suite de réaction de fusion thermonucléaire. Elle est la source de la plupart d'énergies disponibles sur terre. Elle se propage dans l'espace sous forme de quanta d'énergie, elle est sans cesse très renouvelable. [7]

L'énergie solaire est le facteur de l'énergie électromagnétique provenant de soleil et parvenant à la surface de la terre après filtrage par atmosphère terrestre. Cette énergie est une énergie renouvelable apportée par le rayonnement solaire, et exploitée pour produire de l'électricité ou de la chaleur. [1]

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique.
- L'énergie solaire photovoltaïque.



Figure I.1 : Les panneaux photovoltaïques

I.2.1 L'énergie solaire thermique:

On désigne par énergie solaire thermique la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être utilisée soit directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. [2]

Le solaire thermique se décline de différentes façons:

- Central solaire thermodynamique.
- Chauffe- eau solaire.

I.2.1.1 Central solaire thermodynamique:

Le principe général des centrales solaires à concentration est le suivant: le rayonnement solaire est réfléchi sur des miroirs, concentré et collecté afin de chauffer un fluide caloporteur qui, par des cycles thermodynamiques, transmettra sa chaleur dans le but de produire de l'électricité. Suivant ce principe, les principaux éléments constituant les centrales sont représentés sur la Figure I.2:

- Le module collecteur/concentrateur, permettant de capter le rayonnement solaire direct et de le concentrer. Le niveau de concentration peut varier, on définit donc le facteur de concentration comme le rapport de la surface collectrice des miroirs sur la surface absorbante.
- Le module récepteur qui reçoit le flux radiatif solaire concentré et transmet l'énergie captée à un fluide caloporteur sous forme de chaleur. Le fluide caloporteur (huiles, sels fondus, air etc.) doit être chimiquement neutre vis-à-vis du récepteur et présenter un bon coefficient d'échange thermique.

- Le module bloc électrique qui regroupe le cycle thermodynamique et la génératrice électrique. L'énergie thermique du fluide caloporteur est transformée en énergie mécanique puis en électricité.

L'un des points forts de la technologie solaire thermodynamique est la possibilité de stocker l'énergie thermique, dans des fluides ou des matériaux, sans changement d'état, pour palier l'intermittence de la ressource solaire en restituant la chaleur stockée pour produire de l'électricité quel que soit le moment de la journée ou quelles que soient les conditions météorologiques.[43]

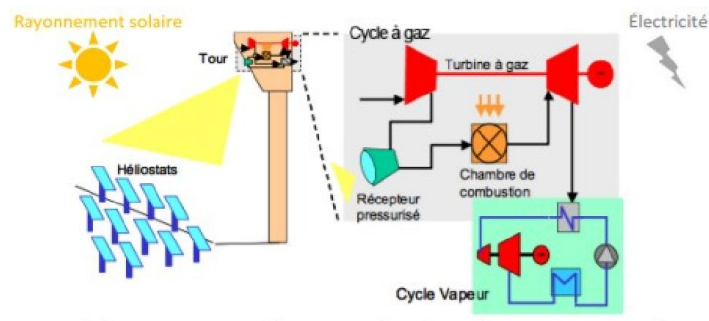


Figure I.2: Principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique (cas particulier d'une centrale à concentrateur à tour) [44]

I.2.1.1 Chauffe-eau solaire:

Un chauffe-eau solaire est un dispositif de captation de l'énergie solaire destiné à fournir partiellement ou totalement de l'eau chaude sanitaire (ECS).

On distingue plusieurs types de chauffe-eau solaire, selon le type de l'installation:

- **Le Chauffe-eau solaire monobloc:**

Les Capteurs et le ballon sont groupés sur un même châssis rigide et placés à l'extérieur. Ils peuvent être installés en toiture, sur terrasse ou au sol et fonctionnent sans électricité.

Le fluide, plus chaud dans les capteurs que dans le ballon, s'élève naturellement jusqu'à ce dernier, situé dans la partie supérieure du chauffe-eau. C'est l'effet thermosiphon.

Ce système est simple et peu coûteux. Mais le ballon se refroidit plus rapidement, même s'il est bien isolé. Il peut servir à préchauffer l'eau qui alimente un équipement classique existant.

Il se prête moins bien à la fixation sur un toit en pente [45]



Figure I.3: Chauffe-eau solaire monobloc (ou compact) [45]

• **Le chauffe-eau solaire à “thermosiphon”:**

Thermosiphon veut dire que la circulation de la chaleur passe des capteurs au ballon naturellement sans pompe ou autre dispositif, grâce aux différences de température. Pour ce faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs et les circuits hydrauliques doivent être installés dans les règles de l’art afin de faciliter la thermo circulation. Ce type de chauffe-eau solaire est très simple les risques de pannes sont faibles. Les coûts sont restreints et les performances, surtout dans les régions ensoleillées sont excellentes. La circulation naturelle par thermosiphon d’eau résulte de la différence entre la densité de l’eau contenue dans l’absorbeur et celle dans le ballon. [46]

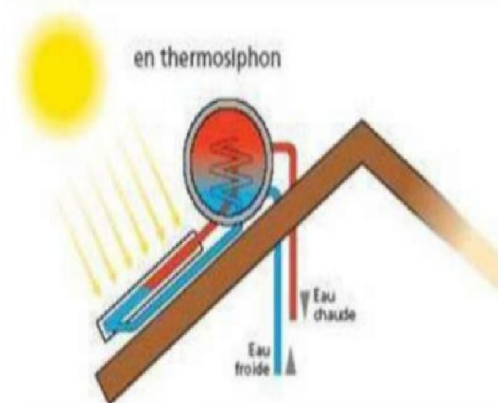


Figure I.4: Le chauffe-eau à thermosiphon [45]

• **Le Chauffe-eau stockeur:**

Le principe du chauffe-eau stockeur (ou auto-stockeur) est très ancien. Il est constitué d’un réservoir disposé dans un coffre isolant et protégé par une couverture transparente.

Pendant la période d’ensoleillement, la température du ballon, recouvert d’un revêtement absorbant noir, s’élève. Pour éviter que celle-ci ne diminue pendant la nuit, le revêtement est généralement du type « sélectif ». Avant que ces revêtements n’existent, il était

courant de rencontrer des chauffe-eau munis d'un double vitrage ou d'un volet isolant qui était disposé sur le capteur, hors période d'ensoleillement. Ce type de chauffe-eau est bien adapté aux régions où le risque de gel n'existe pas et où la température ambiante nocturne est très élevée.

C'est, en particulier, le cas des régions tropicales. [46]



Figure I.5: Chauffe-eau stockeur [45]

I.2.2 L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photon, comprise dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques, composés des cellules ou de photopiles, fabriqués avec des matériaux sensibles à la longueur d'ondes du visible, ces derniers sont les responsables de la production d'énergie.

L'association de plusieurs cellules PV en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau de rayonnement et de température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. [3]

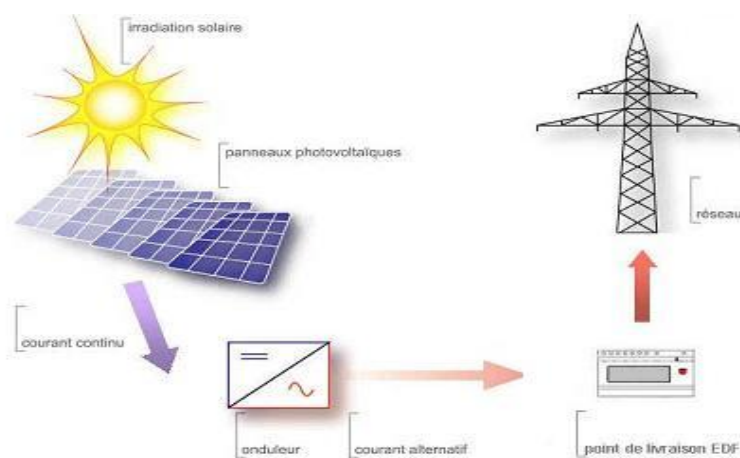


Figure I.6: Système photovoltaïque [48]

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec

les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie. Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap (E_g) de ce semi conducteur. L'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui. D'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction.

Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g . Ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

Si les photons ont une énergie inférieure E_g ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. [3]

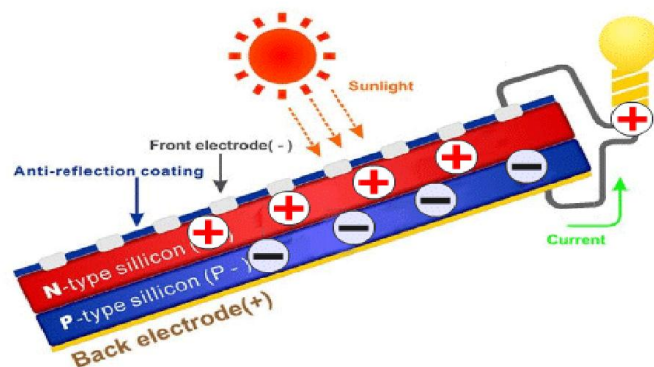





Figure I.7: L'effet photovoltaïque [47]

Il existe trois types principaux de cellule :

- **Cellule monocristalline.**
- **Cellule poly cristalline.**
- **Cellule amorphe.**

Tableau I.1: Les types des cellules

Cellule monocristalline	Cellule poly cristalline	Cellule amorphe
		

I.2.3: l'énergie éolienne:

L'éolienne permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes:

La conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, cette conversion se fait au niveau de l'éolienne.

La conversion de cette énergie mécanique en énergie électrique, selon la technologie de l'éolienne utilisée, la transmission de l'énergie électrique au réseau soit directement, soit par l'intermédiaire total ou partiel d'une interface de l'électronique de puissance. [4]



Figure I.8: La ferme éolienne de kaberténe

I.2.3.1 Types des turbines éoliennes:

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se diffèrent essentiellement dans leur organe de capture d'énergie, à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol, on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal. [40]

I.2.3.1.1 Eolienne à axe vertical:

Les pales des éoliennes verticales, aussi appelées VAWT (éoliennes à axe vertical), tournent autour d'une tige placée verticalement, comme son nom l'indique, cette solution est moins répandue que les éoliennes horizontales mais tend progressivement à la remplacer.

L'avantage de cette espèce est sa capacité à attraper des vents légers. Nous n'avons pas besoin des vents forts pour les faire tourner, car ils n'ont pas besoin de s'orienter vers ceux-ci. De plus, elles occupent moins de place que les éoliennes horizontales. [42]

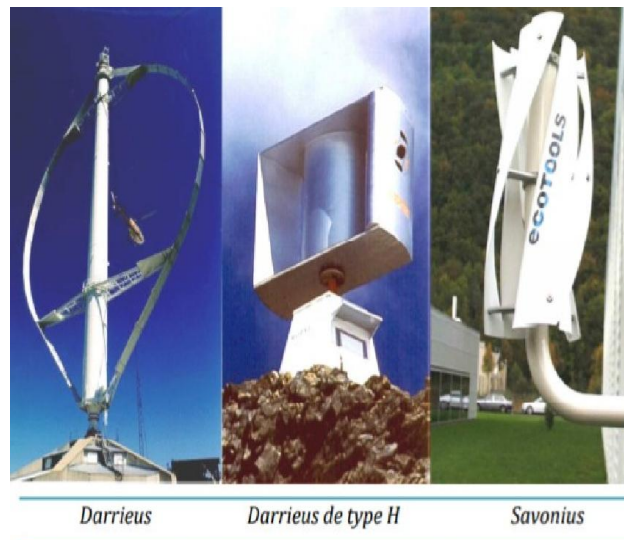


Figure I.9: Technologie éolienne à axe vertical [42]

I.2.3.1.2 Eolienne à axe horizontal:

L'éolienne horizontal est le type le plus répandu, également appelée HAWT (Horizontal axis Wind turbine) fonctionne globalement selon le même principe que les éoliennes de grandes capacités que l'on peut voir dans les parcs éoliens:

Le plus souvent, l'éolienne pour particulier à axe horizontal capte le vent (de face ou de dos selon le modèle) grâce à des pales assemblées en hélice.

Celles-ci tournent autour d'un mat placé horizontalement par rapport au sol.

Le générateur, actionné par la rotation de l'hélice, et situé en haut de l'éolienne.

L'hélice est constituée de deux ou trois pales. La deuxième solution étant la plus privilégiée, car elle offre de meilleures performances. [42]



Figure I.10: Technologie éolienne à axe horizontal [42]

I.2.3.2: constitution et fonctionnement d'une éolienne:

Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments qui sont présentés sur la **figure I. 11** Un mât, un rotor, la nacelle, les pales.

- le mât : il permet de déplacer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre Son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal), le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande multiplicateur, générateur, etc..).
- le rotor : composé de trois pales en général et du nez de l'éolienne, il est entraîné par l'énergie du vent et peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes à pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Il est lié à la nacelle par le moyeu.
- La nacelle : elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine (dans le cas des éoliennes produisant des électricités, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite par ce mât électromagnétique).
- Les pales : elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il y a plusieurs points à prendre en contact pour la construction des pales qui sont l'aérodynamisme et la structure).

[41]

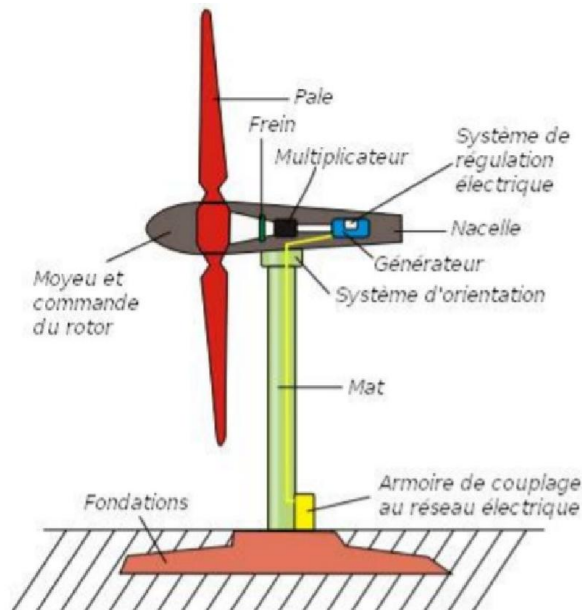


Figure I.11: Exemple de système éolien de type aérogénérateur [41]

I.2.4 L'énergie Biomasse:

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières:

- Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie.
- La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité dans de centrales thermique.

L'intérêt est que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou le méthane est compensé par celui absorbé par la repousse des plantes qui entre outre sont la source principale de biomasse. De cette manière, le bilan carbone peut être proche de zéros. [5]

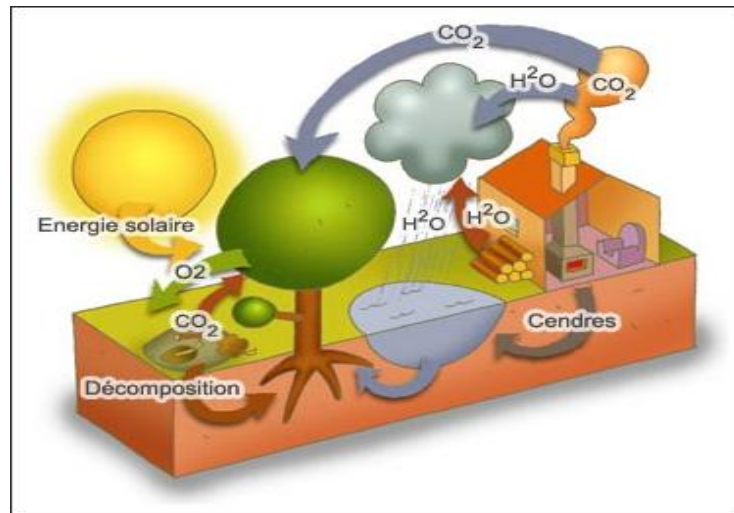


Figure I.12: L'énergie biomasse

I.2.5: L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est l'énergie que l'on obtient à partir du mouvement de l'eau. Que ce soit par les marées, le cours d'eau ou les chutes d'eau.

Des turbines sont tournées par l'eau issue des cours d'eau ou des chutes d'eau. Ensuite, cette énergie est transformée en énergie électrique au sein d'une centrale électrique.

- **La retenue de l'eau :**

Le barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue.

- **La conduite forcée de l'eau:**

Une fois l'eau stockée, des vannes sont ouvertes pour que l'eau s'engouffre dans de longs tuyaux métalliques appelés conduites forcées. Ces tuyaux conduisent l'eau vers la centrale hydraulique, située en contrebas. Chaque centrale se met en marche selon un programme prédéfini en fonction des besoins d'électricité.

- **La production d'électricité:**

À la sortie de la conduite, dans la centrale, la force de l'eau fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. La puissance de la centrale dépend de la hauteur de la chute et du débit de l'eau. Plus ils seront importants, plus cette puissance sera élevée.

- **L'adaptation de la tension:**

Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très haute tension. L'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint la rivière par un canal spécial appelé canal de fuite.[1]

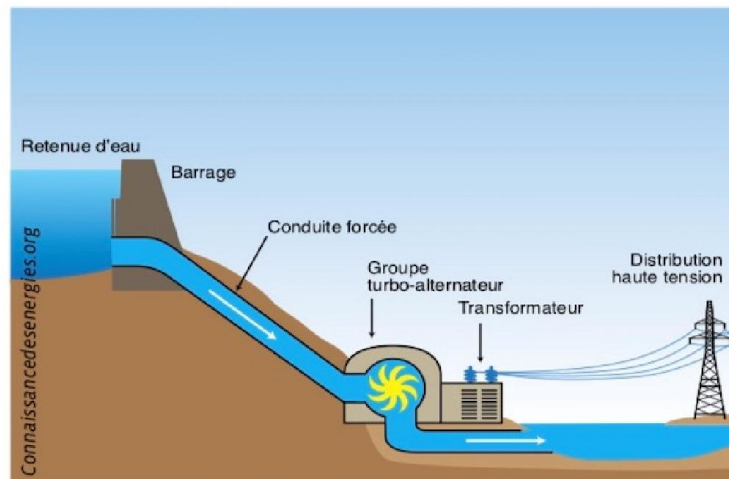
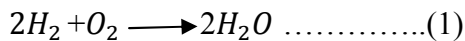


Figure I.13: L'énergie hydraulique

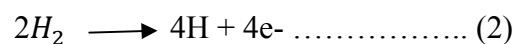
I.3: l'énergie hydrogène:

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En effet, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale:

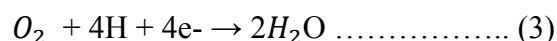


Dans les piles dites (acide), l'hydrogène est oxydé à l'anode, c.-à-d. décomposé en protons et électrons. Les protons traversent ensuite l'électrolyte et se retrouvent à la cathode. Le déséquilibre en électrons crée un pôle positif et un pôle négatif entre lesquels circulent les électrons produisant ainsi de l'électricité. Simultanément à la cathode, les protons réagissent avec les électrons et l'oxygène et donnent de l'eau, seule sous-produit de cette réaction chimique. [6]

- Oxidation (anode):



- Réduction (cathode):



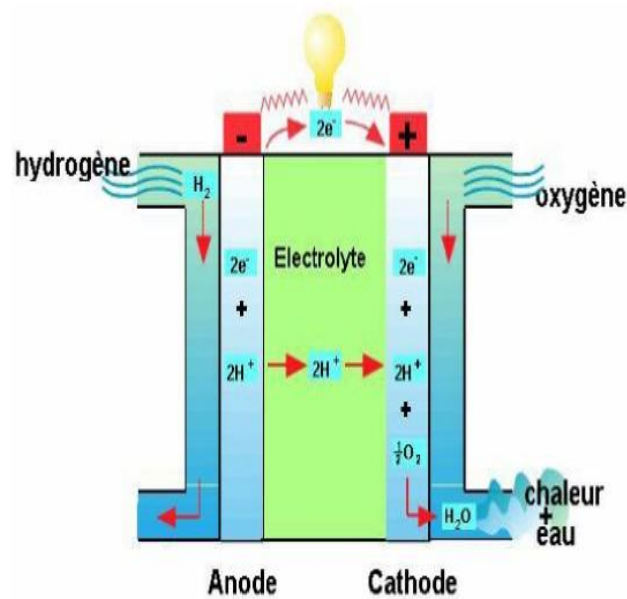


Figure I.14: Le principe de fonctionnement [6]

I.4 L'énergie géothermique:

Le terme de géothermie est formé à partir des mots grecs Géo (la terre) et therme (chaud). Il recouvre l'ensemble des techniques qui permettent de récupérer la chaleur naturellement présente dans le sous-sol terrestre, en particulier dans les aquifères (réservoirs rocheux renfermant des eaux souterraines). Cette énergie calorifique provient en part à peu près égale à la chaleur résiduelle produite par les phénomènes de formation de la planète (il y a 4,5 milliards d'années) et de la radioactivité naturelle.

La température des eaux géothermales augmente avec la profondeur, (hausse moyenne de la température en fonction de la profondeur). Le gradient a une valeur mondiale moyenne de 3°C pour 100 m de profondeur. Il s'échelonne ensuite entre 1°C pour 100 mètres et 10°C pour 100 mètres, selon les conditions physiques et géologiques de la région.

L'énergie géothermique provient de la chaleur accumulée dans le sous-sol. Elle est perpétuellement réapprovisionnée par la radioactivité des roches et la proximité du magma en dessous de la croûte terrestre.

L'exploitation par l'homme de cette énergie renouvelable porte le nom de géothermie.

Le manteau terrestre étant chaud, la croûte terrestre laisse filtrer un peu de cette chaleur, cependant la plus grande partie de la puissance géothermique obtenue en surface (87%) est produite par la radioactivité des roches qui constituent la croûte terrestre (désintégration naturelle de l'uranium, du thorium et du potassium).

Il existe dans la croûte terrestre, épaisse en moyenne de 30Km, un gradient de température appelé gradient géothermique, plus on creuse et plus la température augmente; en moyenne de 3°K par 100 mètres de profondeur.

La géothermie vise à étudier et exploiter ce phénomène d'augmentation de la température en fonction de la profondeur (même si le flux de puissance obtenu diminue avec la profondeur, puisque l'essentiel de ce flux provient de la radioactivité des roches de la croûte terrestre).[34]



Figure I.15: La centrale géothermique de pinon pinon (philippines), le plus profond puits est de 3800 m [34]

I.5: conclusion:

Les énergies renouvelables représentent une grande partie de notre avenir énergétique. Elles permettent le développement futur et sont une solution de nos problèmes énergétiques et environnementaux. Il y a plusieurs énergies renouvelables qui existent mais sont peu utilisées par l'homme car elles ont un coût élevé.

Nous avons évoqué dans ce chapitre de manière générale les énergies renouvelables.

Il fournit également des informations générales en expliquant comment convertir les énergies en énergie électrique.

Chapitre II: Le séchage solaire

II.1 Introduction:

Le séchage solaire est l'une des plus anciennes utilisations humaines connues de l'homme, ils utilisaient autrefois le séchage à l'air solaire pour sécher les produits agricoles, car ils sont récoltés à certaines périodes de l'année alors qu'ils sont consommés tout au long de l'année, qu'ils doivent stocker jusqu'à consommation.

Cependant, ce type de séchage n'est pas garanti pour produire des résultats et laisse des risques pour la santé dus à la contamination des aliments, à la détérioration, aux insectes et aux bactéries pathogènes.

Les scientifiques ont eu recours à la fabrication d'un système de séchage qui dépend directement du solaire avec des ingrédients simples et disponibles localement, appelé séchoir solaire. C'est la solution la plus appropriés pour sécher les produits agricoles et industriels et les conserver plus longtemps.

Le séchoir solaire est utilisé pour chauffer l'air à l'intérieur du séchoir afin de déshydrater l'aliment.

II.2 Définition:

La déshydratation (ou le séchage) est définie comme l'application de la chaleur dans des conditions commandées pour enlever la majorité de l'eau dans un aliment par évaporation.

Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, au dessous d'un seuil, dont les réactions enzymatique et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des microorganismes. [13]

Le but d'une telle opération est, soit de rendre à une substance traitée ses qualités mécanique ou physico-chimique initiales, soit de faciliter son stockage et sa conservation. [8]

II.3 Historique :

Le séchage par l'exposition au soleil est l'une des plus anciennes méthodes utilisant l'énergie solaire, pour la conservation des aliments, comme les légumes, les fruits, le poisson, la viande, etc. Depuis les temps préhistoriques, l'humanité a utilisé le rayonnement solaire comme la seule source d'énergie thermique disponible pour sécher et conserver toutes les denrées alimentaires nécessaires pour l'hiver, pour sécher les briques du sol pour leurs maison et peaux d'animaux pour le dressage. [18]

La première installation de séchage connue été trouvée dans le sud de la France et datée d'environ 8000 avant JC. C'était une surface pavée en pierre et utilisée pour le séchage des récoltes; les vents naturels ou des vitesses modérées ont été combinés avec le rayonnement solaire pour accélérer le séchage [19].

Diverses installations dans le monde ont été trouvées entre les années 7000 et 3000 avant JC. Il y avait plusieurs installations combinés, le rayonnement solaire et la circulation naturelle de l'air, principalement pour les séchages des denrées alimentaires. En Mésopotamie ont été trouvés des sites, de soleil et de séchage à l'air de matières textiles colorées et pour le séchage solaire à l'air des plaques d'argile écrite. La première installation de séchage à l'air exclusivement pour les cultures a été trouvée dans « Hindu river valley » et est datée d'environ 2600 avant JC. [19]

Le philosophe grec et le médecin, Aristote (384-322 BC) (bien connu), qui décrit en détail les phénomène de séchage, ont donné, pour la première fois, des explications théoriques de séchage. Plus tard, la biomasse et le bios ont été utilisés pour bruler des fours primitifs pour sécher le matériel de construction, etc. comme des briques, mais les aliments n'ont été exposés qu'au rayonnement solaire direct. L'industrie du séchage conventionnel a commencé vers le 18ème siècle et à la même époque a commencé peut l'industrie pour certains types d'aliments pour la conservation aussi bien. Malgré tout ce séchage par exposition au soleil a continué à être utilisé pour de petites quantités de produits agricoles. [20]

II.4 Principe de séchage:

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 adhérant à sa surface externe par des forces superficielles. [11]

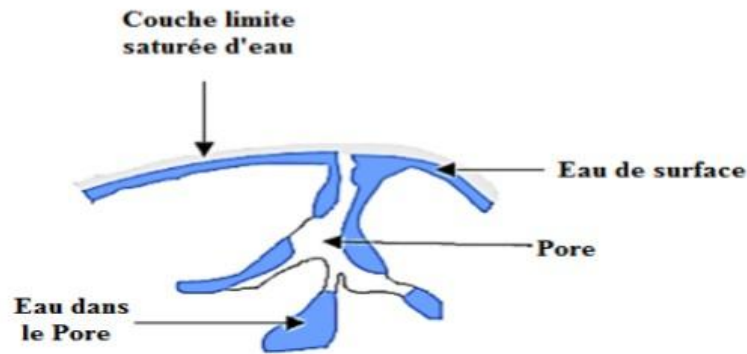


Figure II.1 : Présentation schématique d'un produit humide. [11]

II.5 Les type des séchoirs solaires:

Il y a plusieurs types des séchoirs solaires développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité. On peut classer les séchoirs suivant la façon, dont ils utilisent le rayonnement solaire, en séchoirs naturels, séchoirs directs, séchoirs indirects, séchoirs mixtes et séchoirs hybrides.

II.5.1 Les séchoirs solaires à l'air :

C'est une méthode qui a été utilisée depuis l'antiquité et qui existe encore aujourd'hui, et qui est le produit le plus clair à l'air libre, bien que le séchage à l'air soit une technique facile et peu coûteuse, mais elle entraîne de grandes pertes.



Figure II.2: Le séchage solaire sous air [31]

II.5.1.1 Les avantages : [15]

- Procédé simple et non coûteux.
- N'exige ni matériel ni d'œuvre qualifiée.

- Source d'énergie solaire gratuite et non polluante.
- Pas de dépense d'énergie.
- Séchage doux grâce à l'alternance jour et nuit.
- Peu de changement de couleur (brunissement).

II.5.1.2 Les inconvénients : [15]

- Une longue durée de séchage (possibilité de moisissure).
- Altération de la qualité du produit par le rayonnement solaire.
- L'efficacité du processus est faible compte tenu des nombreux aléas (météorologie, constituants du produit sensibles aux rayonnements ultra violets, insectes, rongeurs, perte de vitamine...etc.).

II.5.2 Les séchoirs solaires directs:

Le séchage direct au soleil dépend de l'absorption du rayonnement solaire directement du soleil. Il se présente sous la forme d'une seule pièce dans laquelle les aliments sont séchés, il est généralement en bois dont la partie inférieure est peinte en noir pour augmenter l'absorption de chaleur. Il est placé à un angle d'inclinaison prononcé vers le côté sud et contient deux trous, un en bas qui permet à l'air froid d'entrer et l'autre en haut pour que l'air chaud s'échappe.

Les séchoirs les plus couramment utilisés sont ceux dont la surface est transparente, il peut s'agir de plastique ou de verre pour augmenter le réchauffement.

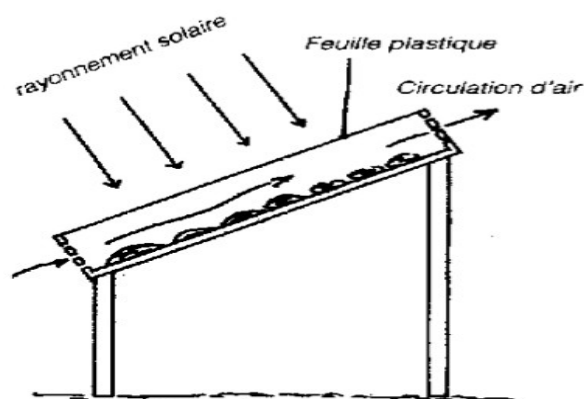


Figure II.3: Un séchoir solaire direct [32]

II.5.2.1 Les avantages:[14]

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.
- Grandes possibilités de conception.

II.5.2.2 Les inconvénients:[14]

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

II.5.3 Les séchoirs solaires indirects:

Le séchoir solaire indirect se compose de:

- Un collecteur qui convertir le rayonnement solaire en chaleur.
- Une chambre de séchage qui contient le produit.
- Une cheminée.

Le principe de fonctionnement de ce séchoir solaire indirect est de chauffer l'air grâce à un capteur solaire. Cet air chaud circule entre les aliments à sécher.

Le capteur solaire est une caisse plate constitué d'une vitre, d'une plaque de métal et d'une planche en bois isolé. La plaque noir permet de capter le maximum d'irradiation et la vitre d'augmenter l'effet de serre du capteur. L'air entre dans le séchoir par le bas, il est chauffé grâce à son contact à la plaque de métal noire. Cet air chaud monte et passe par les différents étages de produits en se chargeant de leur humidité et sort par le haut du séchoir (cheminée). [12]

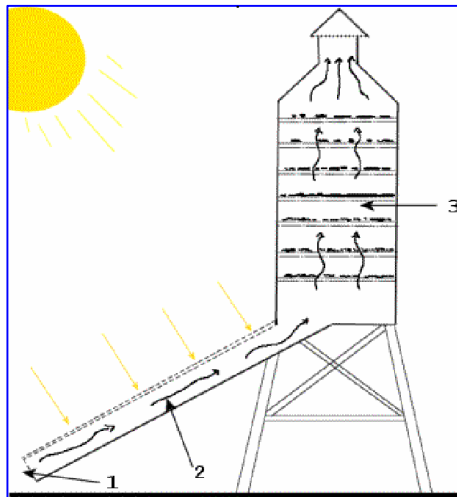


Figure II.4: Un séchoir solaire indirect [14]

1. Entrée d'air.
2. Partie exposée aux rayons du soleil, sous une vitre.
3. claie.
4. Cheminée.

II.5.3.1 Les avantages:[15]

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil.
- Le produit conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- Température limitée (55°C).

II.5.3.2 Les inconvénients:[16]

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

II.5.4 Les séchoirs solaires mixtes:

Le système de séchage se compose essentiellement d'un réchauffeur d'air solaire (capteur solaire) intégré à la chambre de séchage à la base et d'un réchauffeur rotatif au sommet de la cheminée du séchoir. La sortie d'air chaud du réchauffeur d'air est reliée à la base de la chambre de séchage. Le séchage additionnel est également obtenu à partir du rayonnement solaire direct tombant sur le produit par le côté transparents, avant et les

panneaux supérieurs. Le ventilateur à vent rotatif a été construit à partir du rotor à ailettes ondulé. [17]



Figure II.5 : Le séchoir solaire mixte à l'URERMS Adrar

II.5.5 Les séchoirs solaires hybrides: [23,24]

Les systèmes de séchage actifs (hybrides) utilisent des systèmes de chauffage solaires, électriques ou à combustibles fossiles pour les ventilateurs ou les pompes avec moteurs pour faire circuler l'air, les entrées d'alimentation supplémentaires peuvent être:

- La puissance supplémentaire aide à maintenir une température constante à l'intérieur de la sécheuse, quelles que soient les conditions météorologiques l'énergie solaire devient secondaire, car elle permet à l'air d'être chauffé.
- Le ventilateur assure la circulation de l'air à l'intérieur du sèche-linge. L'énergie solaire reste cependant la seule source de chaleur le sécheur à une plus grande capacité d'évaporation grâce à l'important grâce à une ventilation améliorée.



Figure II.6 Un séchoir solaire hybride à l'URERMS Adrar [33]

II.5.5.1 Les avantages:[21]

- Meilleur contrôle du séchage.
- Cela peut être utilisé même en l'absence d'énergie solaire, ce qui réduit les risques d'endommagement du produit.

II.5.5.2 Les inconvénients:[22]

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

II.6:Mode de séchage :

II.6.1 Séchage mécanique:

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécanique (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 II.1: Quelques exemples des méthodes de séchage

opération	Technique	Mécanisme	application
concentration	Centrifugation	Sédimentation	Jus de tomate
	Filtration	Tamisage	Boues résiduaires
	Ultrafiltration	Tamisage moléculaire	Lactosérum
séchage	Egouttage	Gravité	Fromage
	Essorage	Tamisage	Cristaux de sucre
	Pressage	Expression	Fourrages

II.6.2 Séchage chimique:

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produit déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium,...) pour extraire l'eau. [30]

II.6.3 Séchage thermique:[30]

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.

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

II.6.3.1 séchage par ébullition:

L'ébullition d'un liquide se produit lorsque sa température est telle que la pression de vapeur P de l'eau de ce liquide est égale à la pression totale ambiante $P_t = P + P_t$ l'ébullition proprement dite (formation de bulles de vapeur d'eau) est plus difficile à observer dans les solides ou les corps pâteux que dans les liquides. L'allure à laquelle s'évapore l'eau est déterminée par l'allure d'apport de la chaleur latente d'évaporation. Cet apport est effectué:

- Par conduction, à partir d'une surface chauffée au contact du produit.
- Par génération interne de chaleur due à l'exposition à un rayonnement infrarouge ou de micro-ondes ou par un chauffage diélectrique.
- Par convection, à partir de vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide chauffant. [28]

II.6.3.2 Séchage par entraînement:

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que:

- Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- Un transfert d'eau s'effectue n sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

Les séchoirs à "entraînement" peuvent être divisés en deux catégories. [30]

❖ Les séchoirs actifs:

Qui comportent des isolateurs (capteurs) placés en amont d'une chambre de séchage et destinés à chauffer l'air avant son envoi dans cette dernière. Ils sont nombreux (1/3 fonctionne en convection naturelle, 2/3 fonctionnent en convection forcée). Ils peuvent être dotés d'un chauffage d'appoint ou d'un recyclage afin d'améliorer ses performances, comme c'est le cas dans les pays industrialisés.

D'une manière générale, ces séchoirs sont dits indirects et ce genre de séchoir est isenthalpique. [29]

❖ Les séchoirs passifs:

(Ou séchoirs serres) qui sont constitués d'une enceinte dont le toit et (ou) les côtés en matériau transparent laissent pénétrer le soleil. Le rayonnement frappe donc directement les produits à sécher qui jouent alors le rôle d'absorbeur. Ces séchoirs sont dits séchoirs serres directs. Si le rayonnement détériore le produit, on interpose alors entre la couverture transparente et le produit une surface opaque servant d'absorbeur. Ce genre de séchoir est dit séchoir serre indirect.

Quant aux séchoirs mixtes qui sont peu présentés, ceux sont des séchoirs dont une seule partie du produit reçoit et absorbe le rayonnement. Naturellement les séchoirs passifs ne sont pas isenthalpique.

II.7 Différents modes de séchage:

II.7.1 Séchage par conduction

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. [9] Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation: [9]

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \dots\dots\dots(4)$$

Avec

λ : Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/m. K).

$\frac{dT}{dt}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

II.7.2: séchage par convection:

On envoie sur le produit à sécher un flux d'air chaud. Il s'établit spontanément entre ce produit et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que:

- Un transfert de chaleur de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- Un transfert d'eau en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air. [10]

Ce mode de séchage utilise l'équation suivante:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_a - T_s) \dots\dots\dots (5)$$

Avec:

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

A: la surface d'échange (m^2).

α : Le coefficient d'échange par convection ($W/m^2 \cdot K$).

II.7.3: Séchage par rayonnement.

Ce mode est destiné aux produits en plaque (carton, viande), ou en fibre (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faibles épaisseurs (cigarettes). L'énergie est apportée aux produits à sécher par des ondes électromagnétiques (rayonnement), soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. [9] La quantité de chaleur transmise au produit par unité du temps par ce mode de transfert est donnée par :

$$Q = A_1 \cdot C \left[\left[\frac{T_1}{100} \right] - \left[\frac{T_2}{100} \right] \right] \cdot \varphi \dots\dots\dots (6)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}{A_2}} \dots\dots\dots (7)$$

Avec:

T_1 : Température de la source émettrice (K)

T_2 : Température du produit (K)

A_1 : Surface du ceps recevant le rayonnement

A_2 : Surface de l'émetteur infrarouge

φ : Facteur de complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit

ε_1 : Emissivité du produit

ε_2 : Emissivité de l'émetteur

II.7.4 Séchage par micro-ondes:

Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert avec des micro-ondes, on peut sécher à des épaisseurs plus importantes qu'avec l'infrarouge. [11]

II.7.5 La lyophilisation:

La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace c'est-à-dire un passage direct de l'état solide (glace) à l'état vapeur. Cette dernière est ensuite enlevée de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur. [11]

II.8 Caractéristique à l'air de séchage:

De nombreux facteurs affectent le processus de séchage, notamment:

II.8.1 Humidité:

Cette variable représente le rapport entre la pression partielle (P_v) et la pression de vapeur saturante. La relativité à l'air est de 100% lorsque l'air est complètement saturé, et en regardant la masse d'air humide qui occupe volume V à température T et sous pression P

- ✓ M_h représente la masse d'air humide et une somme de la masse d'air sec est égale à M_a et M_v la masse de vapeur d'eau

$$M_h = M_v + M_a \dots\dots\dots (8)$$

- ✓ P représente la pression d'air humide et est égale à la somme des pressions partielles d'air sec et de la pression de vapeur d'eau

$$P = P_v + P_a \dots\dots\dots (9)$$

L'air a de nombreuses propriétés principales, et ce sont:

II.8.1.1 L'humidité relative:

L'humidité relative, ou comme on l'appelle aussi, le degré d'humidité est le rapport entre la pression moléculaire de la vapeur d'eau ce qui est présent dans l'air à la pression atmosphérique à l'état de saturation. [25] Il est donné par la relation:

$$Hr = \frac{P_v}{P_s(T)} \cdot 100 \dots\dots\dots (10) \qquad 0\% \leq Hr \leq 100$$

Ou

Hr: humidité relative (%).

Pv: pression partielle de vapeur (Pa).

Ps: pression de saturation de vapeur (Pa).

II.8.1.2 l'humidité absolue :

L'humidité absolue est le rapport entre une masse de vapeur d'eau et son contenu dans un volume d'air humide sur sa masse l'air sec est inclus dans cet argument, et l'humidité absolue est souvent appelée le rapport de mélange.

Il est désigné par le symbole (Ha) et est donné par la relation suivante [25]:

$$Ha = \frac{M_v}{M_a} \left[\frac{Kg_v}{kg_a} \right] \dots\dots\dots (11)$$

Ha: humidité absolue. $\left[\frac{Kg_v}{kg_a} \right]$

Mv: masse de vapeur d'eau (Kgv).

Ma: masse d'air sec (Kga).

L'humidité absolue peut être écrite en termes de pression comme suit: [26]

$$Ha = 0.622 \cdot \frac{P_v}{p - P_v} \dots\dots\dots(12)$$

II.8.1.3 Degré de saturation:

Il représente le rapport entre l'humidité de l'air spécifique et l'humidité de l'air saturé à la même température. Le degré de saturation avec la relation suivante [25]:

$$\varphi = \frac{H_a}{H_{as}} [\%] \dots\dots\dots(13)$$

φ : Degré de saturation (%).

Ha: L'humidité absolue.

II.8.2: Température:

La température st l'un des facteurs les plus importants affectant les séchoirs solaires, et c'est un troisième facteur. Les facteurs de base qui sont:

II.8.2.1: Température humide:

Il représente le degré d'équilibre de la masse d'eau qui s'évapore dans l'air, auquel cas la chaleur est prélevée pour l'évaporation de l'air d'une manière pratique il indique également la température dans le thermomètre, qui est intégré dans filament placé dans un courant de gaz avec mouillage permanent avec de l'eau pure, et il faut tenir compte du fait que le degré de chaleur est appliqué la chaleur humide est la température prise par un solide humide dans une période de vitesse constante de le processus de séchage, et cette échelle est placée dans l'air dont le débit est relativement rapide.

II.8.2.2: Température sèche:

La température sèche du gaz est la température indiquée dans le thermomètre, comme il se doit mettez un thermomètre extérieur pour obtenir cette température.

II.8.2.3 Température de la rose (rosée):

Si l'air est refroidi à une pression constante, son humidité relative augmentera à la valeur de 100%, ce qui conduit à l'équilibre de la vapeur liquide et l'apparition des premières gouttes d'eau condensé, ou la température de la rosée est indiquée par un symbole par T_r , la température de rosée est considérée comme la température nécessaire pour refroidir l'air humide afin de l'atteindre saturation.

II.8.3 la vitesse:

La vitesse de l'air est caractérisée par le déplacement de la masse d'air produit par les forces du gradient de pression, pour toutes les valeurs il faut une température constante ou une humidité relative.

Plus l'air à la surface du produit est rapide, plus le processus de séchage sera rapide. L'air a une faible évaporation, ce qui n'entraîne aucun mouvement autour du produit à sécher [27].

La vitesse de séchage est donnée par la relation:[39]

$$V_s = \frac{-dM_v}{S_s \cdot dt} = \frac{M_s \cdot dt}{S_s \cdot dt} \dots \dots \dots (14)$$

$$M_v = M_s \cdot dX \dots \dots \dots (15)$$

$$dX = X_e - X_s \dots \dots \dots (16)$$

M_v : La masse d'eau évaporée.

M_s : La masse de produit sec.

dX : La variation de la teneur en eau de produit à sécher.

S_s : La surface de séchage.

X_e : Teneur en eau de produit à l'entrée.

X_s : Teneur en eau de produit à la sortie.

II.9 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage:

II.9.1 Influence de la température de l'air:

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

II.9.2 Influence de la vitesse de l'air:

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible.

II.9.3 Influence de l'humidité de l'air:

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits, il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente. [35]

II.10 Les modèles mathématiques :

Le tableau regroupe quelques équations caractéristiques de séchage trouvées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage solaire en couche mince d'un produit.

Tableau II.2: Les modèles mathématique de la modélisation d'une cinétique de séchage

Modèle	Expression du modèle	Référence
Newton	$X^* = \exp(-kt)$	W.K.Lewis , 1921
Page	$X^* = \exp(-kt^n)$	C. Page , 1949
Page modifié I	$X^* = \exp(-(kt)^n)$	D. D. Overhults & al. , 1973
Page modifié II	$X^* = \exp((-kt)^n)$	G. M. White & al. , 1981
Henderson et Pabis	$X^* = a \exp(-kt)$	M. S. Chinnan. , 1984
Logarithmique	$X^* = a \exp(-kt) + c$	A.Yagcioglu, & al. , 1999
Two-term	$X^* = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	S. M. Henderson , 1974
Two-term exponential	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Y. I Sharaf-Elden, & al. , 1980
Wang et singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	C. Y. Wang, & al. , 1978
Approximation de la diffusion	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	A. S. Kassem , 1998
Henderson et Pabis modifié	$X^* = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	V. T. Karathanos , 1999
Verma et al	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	L. R. Verma, & al. , 1985
Midilli- Kucuk	$X^* = a \exp(-kt^n) + bt$	A. Midilli, et al. , 2002

Les modèles mathématiques qui représentent la cinétique de séchage sont sélectionnés selon que le coefficient de corrélation R^2 est le plus élevé et s'approche de 1, le paramètre statistique χ^2 et l'erreur rot men RMSE est le plus bas et s'approche de 0.

Ou χ^2 , R^2 et RMSE sont tous deux calculés avec les relations suivantes:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{R_{exp,i}} - X_{R_{pre,i}})^2}{N} \dots\dots\dots (17)$$

$$REMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{R_{exp,i}} - X_{R_{pre,i}})^2}{N}} \dots\dots\dots (18)$$

N: est le nombre d'observation.

i: est le nombre des constantes du modèle.

Ou $X_{R_{exp,i}}$ taux d'humidité expérimental calculé à l'aide de l'équation :

$$X_d = \frac{X_t - X_e}{X_i - X_e} \dots\dots\dots (19)$$

$$\left\{ X_i = \frac{(W_0 - W_d)}{W_d} \dots\dots\dots (20) \right.$$

$$\left. X_t = \left[\frac{(X_{i+1}) W_t}{W_0} - 1 \right] \dots\dots\dots (21) \right.$$

I.11 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques concepts de séchage solaire, des types de séchoirs solaires directs, indirects, mixtes et hybrides avec certains de leurs avantages et inconvénients, puis nous avons abordé les différentes méthodes de séchage.

Nous avons expliqué les modèles mathématiques décrivant le phénomène de la cinétique de séchage solaire et l'influence des paramètres de l'air asséchant sur le séchage solaire.

**Chapitre III:
Étude expérimentale de
séchage des feuilles de
Sidr**

III.1 Introduction:

De nombreuses plantes médicinales contribuent au traitement de nombreuses maladies, car elles contiennent de nombreux composés pharmaceutiques, la plante Sidr est l'une de ces plantes et elle a été mentionnée dans le Coran 4 fois, nous avons donc choisi l'étude de cette plante, en déterminant les propriétés physicochimiques des feuilles de Sidr, suivant la cinétique de séchage et définissant les constantes de séchage afin de faciliter leur utilisation dans le domaine médical et cosmétique.

L'étude a été menée dans l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien URERMS au niveau de l'équipe de séchage solaire.

III.2 Objectifs:

- La détermination de la composition physicochimique du produit.
- La détermination expérimentale des courbes de cinétique de séchage.
- La détermination du modèle mathématique approprié de séchage du produit (modèle, paramètres et constantes).

III.3: Définition de la plante Sidr (*Zizyphus Spina-Christi*):

Sidr est une plante arborescente. Il appartient à la famille, qui comprend environ 58 genres, dont le plus important est le *Zizyphus Spina-Christi*. Il comprend environ 600 espèces d'arbres, d'arbustes et de tiges, rarement des herbes, réparties dans toutes les différentes régions du monde.

L'arbre Sidr est un arbre vivace à croissance rapide, de taille moyenne à grande, épineux, ramifié et de forme cylindrique, d'une hauteur comprise entre 3 et 5 mètres, contenant des épines petites et pointues.

Les feuilles sont simples, de forme ovale, leur longueur varie selon les variétés, y compris les courtes et moyennes. Les feuilles se distinguent par le fait que leur venage part de la base, ou il y a 3 à 5 nervures à la connexion au cou, la couleur du cou est rouge verdâtre dans certaines variétés [36].

Il est utilisé dans de nombreuses utilisations thérapeutiques, y compris le traitement des maux de tête et de la fièvre, laxatif pour l'abdomen, purifie et renforce l'intestin et la peau, et ses feuilles sont utilisées dans le traitement des articulations enflées et douloureuses et sont utilisées dans les traitements des pellicules et le traitement des tumeurs malignes, du paludisme

et des maladies d'immunodéficience, ainsi que son utilisation dans le traitement des douleurs à l'estomac. [36]



Figure III.1: L'arbre et les feuilles de Sidr

III.4 Situation botanique: [2]

Jacamon (1992), Sidr est classé comme suit :

Tableau III.1 : Situation Botanique

Embranchement	Spermaphytes
Sous- embranchement	Angiospermes
Classe	Dicotylédones
Sous-classe	Rosidae
Ordre	Rhamnales
Famille	Rhamnacées
Genres	Zizyphus
Espèce	Zizyphus lotus

III.5 Les composantes chimiques de *Zizyphus Spina-Christi*

Les principaux composés photochimiques de l'usine sidr est : valphonides, saponines, tanins et alcaloïdes.

III.6 Description du séchoir solaire:

Le séchoir solaire étudié (figure III. 2) est un séchoir solaire indirect à convection naturelle.



Figure III.2 : Séchoir solaire indirect à l'URERMS Adrar

III.6.1 Le capteur solaire PVT expérimental utilisé:

Est un capteur à air plan, constitué de deux panneaux : panneau thermique d'une longueur de 1.30 m, d'une largeur de 0.40m et d'une épaisseur de 0.1 m, et un panneau photovoltaïque thermique de mêmes dimensionnement que le précédent.

Les deux parties sont recouvertes en verre, les cotés latéraux et la partie inférieure sont isolés thermiquement.

III.6.2 La Chambre de séchage:

La chambre de séchage est une boîte en bois de forme cubique, de dimensions : $1*0.3*0.4$ m³, les parties latérales sont isolées thermiquement par du bois et du polystyrène. A l'intérieur de la boîte se répartissent (7) claies en bois de forme rectangulaire, sur lequel est fixé un grillage pour permettre le passage de l'air.

Il dispose également d'un ventilateur de 0.012m de diamètre qui expulse l'air frais.

III.7 Préparation du produit:

Les feuilles de *Zizyphus Spina-Christi* sont soigneusement préparées, on prépare cinq claies, on met 50g de masse du produit dans chaque claie et on met quatre claies dans le séchoir solaire et une pour séchage à l'air libre.



Figure III.3 : Préparation du produit dans les claies

III.8 Appareillages de mesure:

III.8.1 Mesure du rayonnement solaire:

Le Pyranomètre est placé dans la partie supérieure du capteur solaire face au soleil, là où les valeurs d'irradiation solaire sont enregistrées lors de l'acquisition.



Figure III.4 : Le Pyranomètre

III.8.2 Mesure des températures :

La mesure des températures s'effectue à l'aide des thermocouples :

- **Les thermocouples de type K**, qui sont placés sur :
 - ❖ panneaux et vitre panneaux photovoltaïque
 - ❖ la plaque du capteur thermique
 - ❖ l'entrée et la sortie d'eau
 - ❖ l'entrée de l'air à la chambre
 - ❖ claie portant le produit à sécher

- ❖ Milieu de séchoir
- ❖ température ambiante
- **Les thermocouples de type J** sont placés sur :
 - ❖ La vitre et l'entrée d'air au capteur thermique
 - ❖ sortie d'air de la chambre

L'ensemble des thermocouples est relié à un module placé dans L'acquisition de données, les résultats sont transformés au P.C pour traitement.

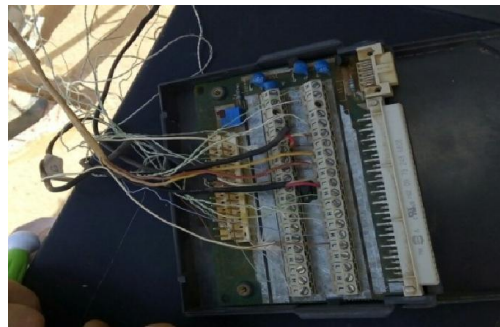


Figure III.4 : Les thermocouples placés dans le module

III.8.3 Mesure de l'humidité et de la vitesse d'air:

L'humidité et la vitesse de l'air à l'entrée et à la sortie de la chambre de séchage sont mesurées respectivement à l'aide d'une sonde à affichage numérique et d'un manomètre connecté à un appareil de marque testo. Les résultats obtenus sont affichés par ordinateur.



Figure III.5: Appareil thermo et hygromètre Testo H176

III.9 Caractéristique physico-chimique de Sidr:

III.9.1 Activité d'eau:

L'activité de l'eau est un facteur critique qui détermine directement la conservation des aliments. La température, le pH et quelques autres facteurs ont une certaine influence sur la possibilité et le taux de croissance d'un organisme dans des denrées alimentaires. L'activité de l'eau représente le plus important de ces facteurs.

Pour mesurer l'activité d'eau des feuilles de Sidr, on utilise appareil Hygrolab



Figure III.6 : Appareil Hygrolab (l'activité d'eau)

Tableau III.2: l'activité d'eau du produit avant et après le séchage

	Avant de séchage(AW)	Séchage direct(AW)	Séchage indirect(AW)
Activité d'eau	0.938	0.125	0.095

III.9.2 Détermination de la teneur en eau

- Sécher les trois capsules vides à l'étuve durant 15 minutes à 105°C.
- Mettre les capsules après refroidissement dans un dessiccateur.
- Peser dans chaque capsule 2g de feuille de sidr et les placer dans l'étuve réglée à 105 C°.
- Retirer les capsules de l'étuve, les placer dans le dessiccateur et après refroidissement les peser.

L'opération est répétée jusqu'à l'obtention d'un poids constant (en réduisant la durée de séchage à 30 minutes).



Figure III.7 : Le produit dans le dessiccateur

Figure III.8 : L'étuve

Le pourcentage de l'humidité est donné par la formule suivante :

$$\text{Humidité (H\%)} = \frac{M1 - M2}{M1} * 100$$

Avec

M1 : la masse de la matière fraîche avant séchage (g).

M2 : la masse de la matière fraîche après séchage (g).

$$\text{Matière sèche (\%)} = 100 - H(\%)$$

III.9.3 Détermination de cendre / matière organique:

Les feuilles de sidr (2g) sont introduites dans une étuve pendant 24 heures à 105 C° puis dans un four à moufle pendant 3 heures à 550 C°.



Figure III.9: four à moufle

❖ Le pourcentage de la matière organique est donné par la formule suivante :

$$\text{Matière Organique(\%)} = \frac{M1 - M2}{M1} * 100$$

M1 : masse de prise d'essai (g) ;

M2 : masse de cendre (g) ;

La teneur en cendre est calculée comme suit :

$$\text{Cendre (\%)} = 100 - MO(\%)$$

❖ Le pourcentage de l'humidité, matière sèche, organique et cendre

Tableau III. 3 : teneurs en métabolites en pourcentage de matière sèche.

	Humidité	Matière sèche	Matière organique	Cendre
Avant séchage%	41.69	58.31	90.47	9.53
Séchage indirect %	1.84	98.16	85.33	14.67
Séchage direct %	6.24	93.76	84.94	15.06

III.9.4 Détermination du pH:

- couper en petits morceaux une partie de l'échantillon.
- placer le produit dans un bécher et y ajouter au moins deux ou trois fois son volume d'eau distillée.
- chauffer au bain-marie pendant 30 mn en remuant de temps en temps avec une baguette de verre.
- broyer ensuite le mélange obtenu dans un mortier et procéder à la détermination en prenant soins que l'électrode soit complètement immergée dans la solution.



Figure III.10: Plaque chauffante utilisée



Figure III.11: pH mètre

III.9.4 Détermination de l'acidité titrage:

Peser à 0,01g près au moins 2g de l'échantillon à analyser.

- Placer l'échantillon dans une fiole conique avec 15 ml d'eau distillée chaude récemment bouillie et refroidie puis mélanger jusqu'à l'obtention d'un liquide homogène.
- Adapter un réfrigérant à la fiole conique puis chauffer le contenu au bain-marie pendant 30 minutes.

- Refroidir, transvaser quantitativement le contenu de la fiole conique dans une fiole jaugée de 20 ml et compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée récemment bouillie et refroidie, bien mélanger puis filtrer.
- prélever à la pipette 10 ml du filtrat et les verser dans un bécher.
- Ajouter trois gouttes de phénolphtaléine et tout en agitant, titrer avec de la solution d'hydroxyde de sodium 0,1 N jusqu'à l'obtention d'une couleur rose persistante pendant 30 secondes.



Figure III.12: titrage de solution

L'acidité titrage est exprimée en grammes d'acide pour 100g de produit :

$$A\% = \frac{(20 \cdot V1 \cdot 100)}{(V0 \cdot M \cdot 10)} \cdot 0.07$$

Soit :

M : la masse, en grammes de produit prélevé.

V0 : le volume en millilitres de la prise d'essai.

V1 : le volume en millilitres de la solution d'hydroxyde de sodium utilisée (0,1 N).

0.07 : facteur de conversion de l'acidité titrage en équivalent d'acide citrique.

Tableau III. 4 : Analyses biochimiques de *Zizyphus Spina-Christi*

	La masse (g)	pH	L'acidité (%)
Avant séchage	2.011	6.45	0.56
Séchage indirect	2.009	6.56	0.28
Séchage direct	2.007	6.59	0.49

Le tableau permet de remarquer la diminution grave de l'acidité dans le cas de séchage indirect, au moitié presque, dans le cas de séchage direct la diminution est moins importante que

l'indirect, ce qui donne lieu à un produit défavorisant la croissance des microorganismes d'altération (pathogène)

III.10 Résultats expérimentaux:

III.10.1 Variation temporelles des rayonnements solaires:

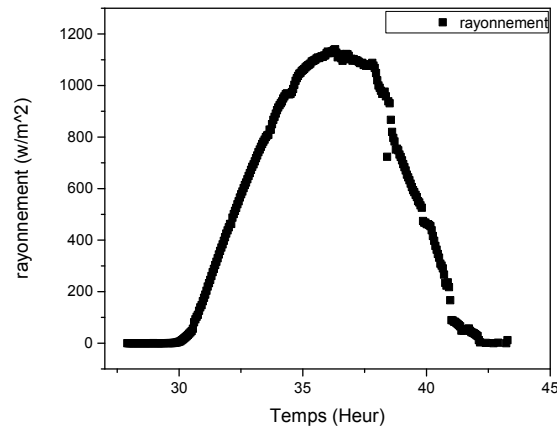


Figure III.13: Evolution du rayonnement solaire en fonction du temps

On remarque sur la figure que l'intensité de rayonnement solaire mesurée augmentait avec l'augmentation des heures de lumière du jour et atteignait son maximum entre midi et 15h et atteignit une valeur de 1100 W/m^2 , puis diminuait par la suite.

III.10.2 Variation temporelles des températures de la vitre de capteur thermique et panneaux PV:

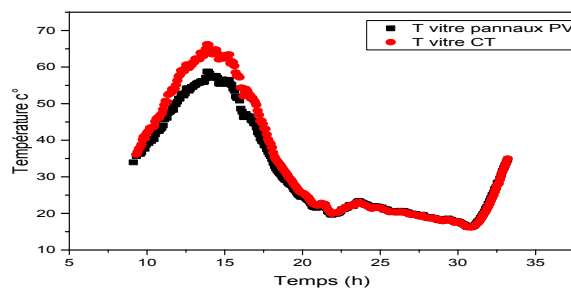


Figure III.14: Evolution de la température de vitre en fonction de temps

Cette figure représente l'évolution de la température de vitre capteur thermique et panneaux PV en fonction du temps, nous remarquons que température de vitre du capteur est supérieure à celle du vitre du panneau solaire pendant la journée et cela est du au fait que la température de

l'air qui circule à l'intérieure du capteur est fonction du rayonnement solaire, après cela la température diminue, avec la diminution du rayonnement, et devient minimale avec l'absence du rayonnement solaire.

III.10.3 Variation de la température de la plaque absorbante:

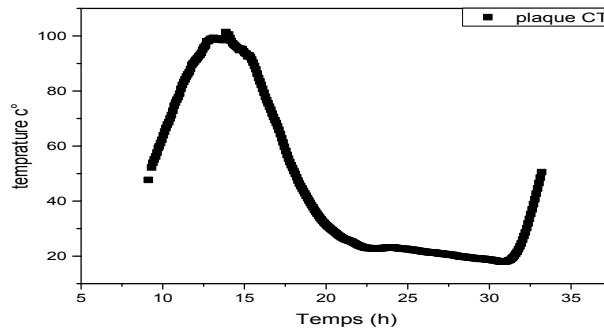


Figure III.15: Variation de la température de la plaque absorbante en fonction du temps

Cette figure représente la variation de la température de la plaque absorbante en fonction du temps, on remarque qu'une augmentation de la température avec l'augmentation des heures de journée est enregistrée, en période 13h à 15h on enregistre une valeur maximale, ce qui est traduit par l'absorption du rayonnement solaire est plus grande et importante dans cette période, puis la température diminue avec la diminution du rayonnement solaire.

III.10.4 Variation de la température du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur PV:

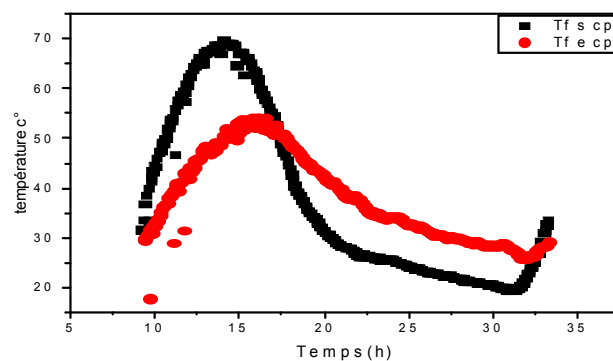


Figure III.16: Variation de la température de fluide de l'entrée et de sortie du capteur en fonction du temps

Cette figure Représente la Variation de la température d'entrée et de sortie du capteur en fonction du temps, On remarque une augmentation de température jusqu'à l'obtention de 70°C pour le fluide caloporteur à la sortie du capteur, dans l'intervalle du temps allant de midi à 15h

III.10.5 Variation de la température de l'eau entrante et sortante du capteur thermique:

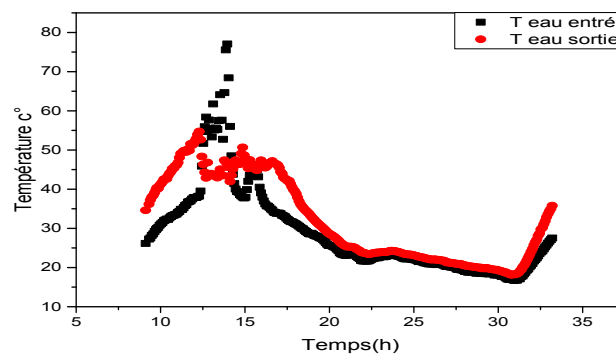


Figure III.17: Evolution de la température de l'eau entrante et sortante en fonction du temps

Cette figure représente l'évolution de la température de l'eau entrante et sortante en fonction du temps car nous remarquons une légère augmentation de la température de l'eau d'entrée et de sortie jusqu'à 12h, après cela, la température de l'eau entrante diminue, la température de l'eau extérieure augmente fortement jusqu'à une valeur maximale de 68.42°C vers 14h puis elle diminue progressivement avec la diminution du rayonnement.

III.10.6 Variation de la température de l'air à l'entrée et sortie de la chambre de séchage:

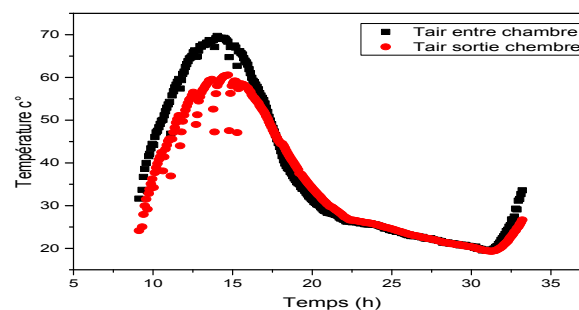


Figure III.18: Evolution de la température de l'air entrant et sortant de la chambre de séchage en fonction du temps

La tendance de cette courbe représente l'évolution de la température de l'air entrant et sortant de la chambre de séchage en fonction du temps, on remarque une augmentation de la température de l'air entrant et sortant de la chambre jusqu'à atteindre un pic maximum, avec un écart de la valeur maximal à midi ou la température de l'air extérieur est plus faible par rapport à la température de l'air entrant, cela est du à l'augmentation de la vitesse de l'air dans le ventilateur, ce qui indique le travail du ventilateur qui assure le dégagement de l'air humide et moins chauffé de l'intérieur de la chambre à l'extérieur, tandis que l'absorption du rayonnement solaire s'annule pendant la nuit, ce qui conduit à la même température pour l'air entrant et sortant de la chambre.

III.10.7 Variation de la température de la plante dans la chambre:

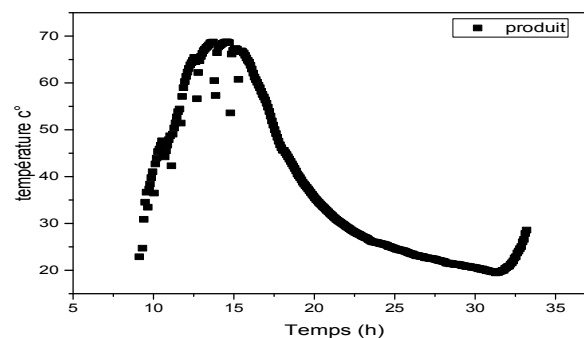


Figure III.19: Evolution de la température de la plante dans la chambre en fonction du temps

Elle représente l'évolution de la température de la plante dans la chambre en fonction du temps, on remarque une augmentation de la température du produit jusqu'à l'obtention d'une valeur maximale dans les heures allant de 13 :00 à 15 :00 heures.

III.10.8 Variation temporelles de la température ambiante:

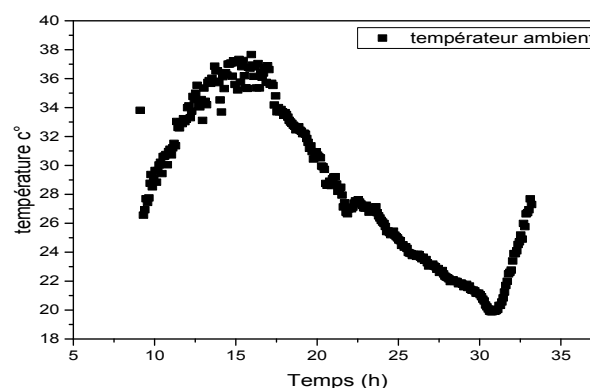


Figure III.20: Evolution de la température ambiante en fonction de temps

Cette figure représente l'évolution de la température ambiante en fonction du temps, nous remarquons une augmentation de la température pendant les heures de clarté, mais nous remarquons une fluctuation de valeur maximale, due à l'effet de l'air sur celui-ci, après cela, elle commence à diminuer.

III.10.9 Variation temporelles des températures des différentes parties de séchoir solaire:

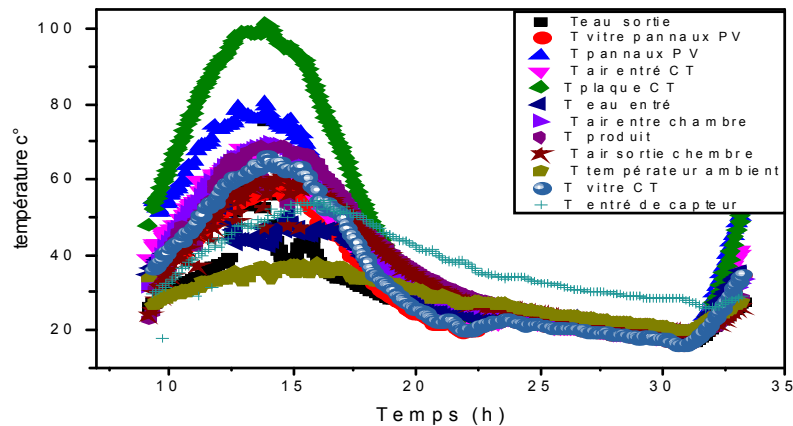


Figure III.21: Evolution des températures des différentes parties de séchoir solaire en fonction du temps

Cette Figure représente l'évolution des températures des différentes parties de séchoir solaire en fonction du temps, on remarque que les courbes ont presque les mêmes allures, mais la différence est à midi lorsque l'absorption des rayonnements solaire est la plus grande, cette différence est due à l'effet de l'absorbeur sur l'air circulant dans le capteur solaire et la consommation d'une quantité de chaleur par évaporation d'eau du produit en plus de l'humidité de l'air.

III.10.10 : Variation temporelle de l’humidité relative entrée de la chambre et milieu extérieur

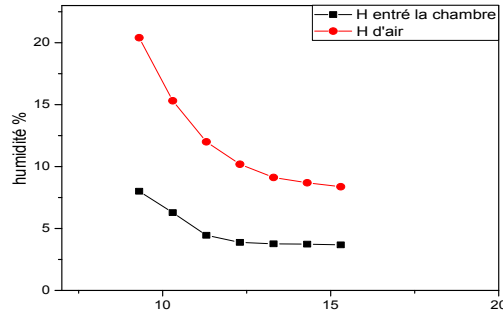


Figure III.22: Evolution de l’humidité relative de l’air à l’intérieur de la chambre et à l’extérieur du séchoir

La courbe représente l’évolution de l’humidité relative de l’air à l’intérieur et à l’extérieur du séchoir. Nous remarquons une différence d’humidité de l’air à l’intérieur et à l’extérieur du séchoir à chaque instant, aussi une diminution de l’humidité relative avec l’augmentation des heures du jour où la température est élevée.

III.10.11 Variation temporelle de l’humidité relative de l’entrée et de la sortie de la chambre de séchage :

On utilise un Appareil thermo et hygromètre: Testo H176 pour enregistrer l’évolution les données de l’humidité et de la température.

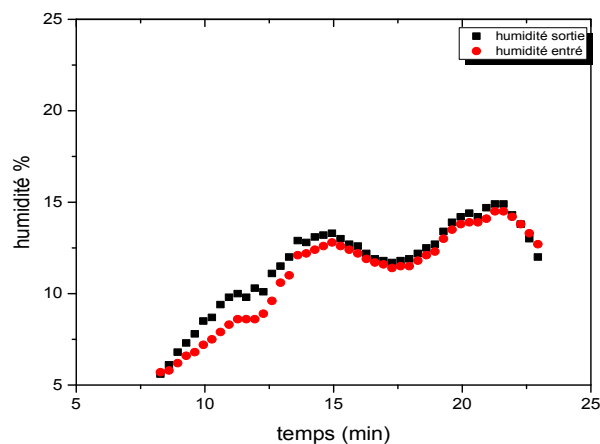


Figure III.23 : Variation temporelle de l’humidité relative de l’entrée et de la sortie de la chambre de séchage en fonction du temps

On remarque une augmentation de l'humidité au moment où le produit est placé à l'intérieur du séchoir solaire puis elle diminue avec l'augmentation de la température

III.10.12 Etude de la cinétique de séchage solaire:

Afin d'étudier la cinétique de séchage, nous avons préparé des feuilles de sidr et mis 50 g dans chaque claie, nous avons mis quatre claies à l'intérieur de la chambre du séchoir solaire et une à l'extérieur du séchoir pour être séchée à l'air libre. Ensuite, on pèse la masse après chaque heure de séchage, jusqu'à l'obtention d'une valeur constante.

Cette opération de séchage a pris 4h pour atteindre des valeurs fixes.

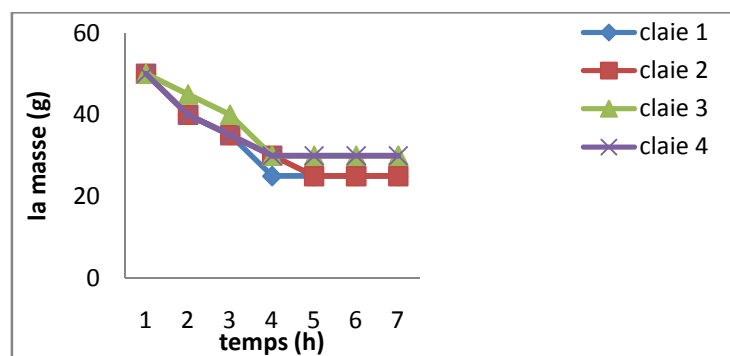


Figure III.24: la cinétique de séchage du produit dans le séchoir solaire

La figure III.24, Présente la cinétique de séchage du produit pour 4 heures de séchage, on remarque sur cette figure que la masse du produit diminue progressivement, et dès la quatrième heure elle commence à se stabiliser.

III.10.13 Comparative entre le séchage à l'air et séchoir solaire:

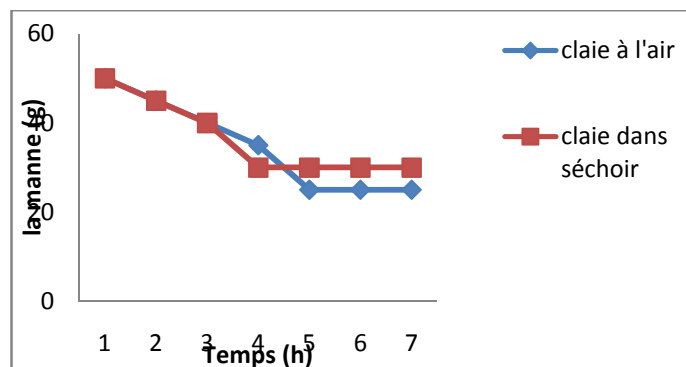


Figure III.25 : comparative entre le séchage à l'air et dans le séchoir solaire

Notons également que le séchage direct dans l'air a pris plus de temps que le séchage dans le séchoir solaire, ce que indique que le séchage au séchoir solaire plus rapide que le séchage

dans l'air, ce que nous pouvons expliquer par la différence en valeur de température et d'humidité.

III.11: Modélisation de la cinétique de séchage:

La régression non linéaire est utilisée pour déterminer les constantes du modèle utilisé. L'efficacité d'un modèle est déterminée à partir des paramètres statistique tels que le coefficient de corrélation (R^2) élevé (tendant vers 1) et Chi-carrée $r(x^2)$ minimale (tendant vers 0).

L'analyse de régression a été effectuée en utilisant le programme informatique (Curve Expert Professional 2.2.0) et les coefficients de chaque modèle de séchage ont été déterminés.

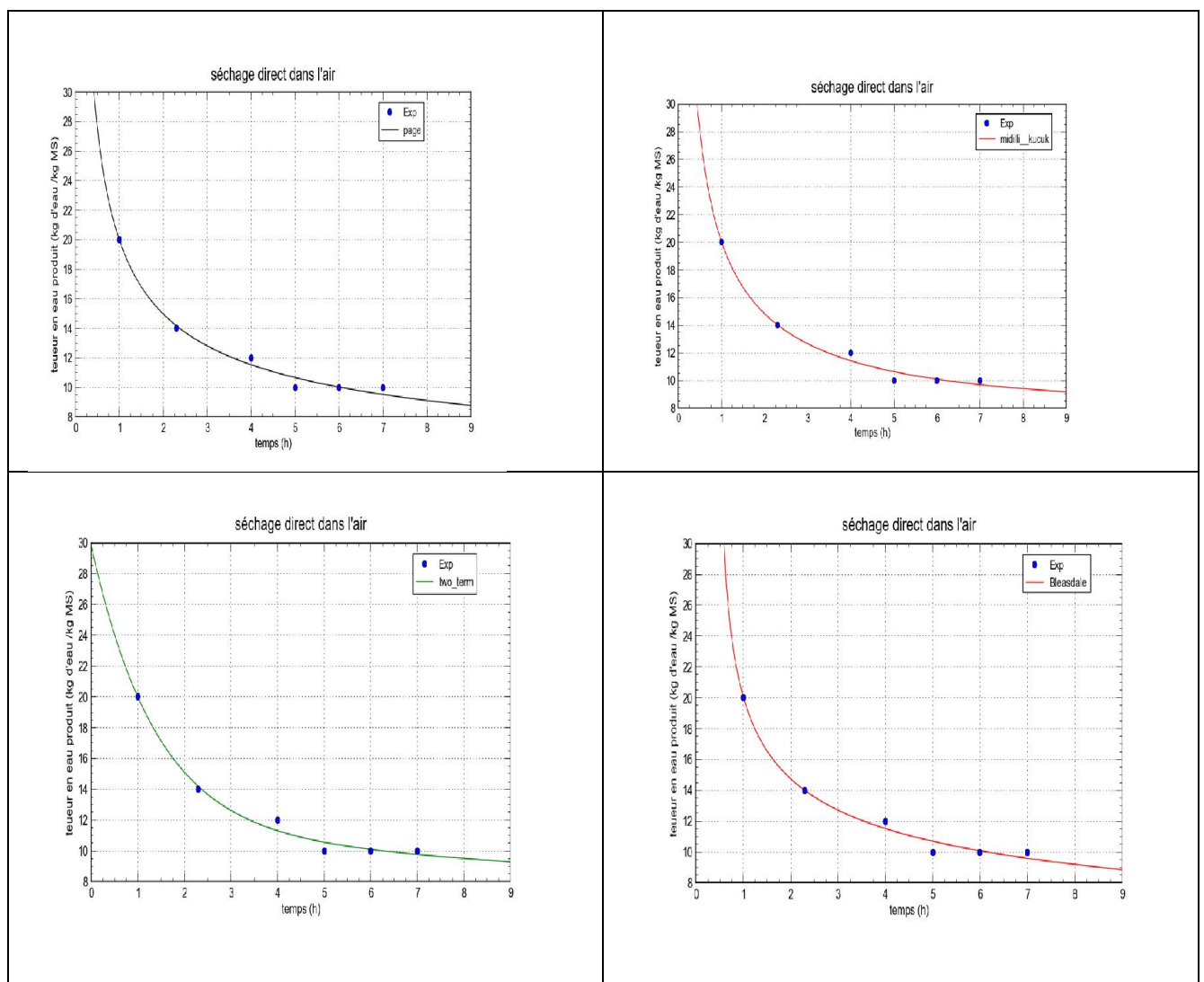


Figure III.26: le lissage des courbes de cinétique de séchage à l'air libre par quatre modèles mathématiques

Tableau III.5: Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour la séchage direct

Modèle	équation	a	b	k	K0	K1	x^2	R^2	RMSE
Page	e^{-kx^n}	---	---	- 2.9928	---	---	0.4783	0.9941	0.6915
Midilik_kucuk	$ae^{-kx^n} + bx$	0.18296	0.14167	- 4.6874	---	---	0.6447	0.9946	0.8029
two_term	$ae^{-k_0x} + be^{-k_1x}$	18.5389	11.1186	---	0.2141	0.0070	0.6667	0.9942	0.8160
Bleasdale	$(a + bx)^{-\frac{1}{c}}$	-3.356 E-05	7.6 E- 05	---	----	---	0. 5434	0. 9942	0.7371

Tous les modèle utilisés peuvent décrire l'évolution de la teneur en eau réduite des produits avec R^2 variant de 0.9941 à 0.9946 et x^2 variant de 0.4783 à 0.6667. Le modèle "Midilik_kucuk" peut être proposés comme étant le modèle le plus faible pour décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.

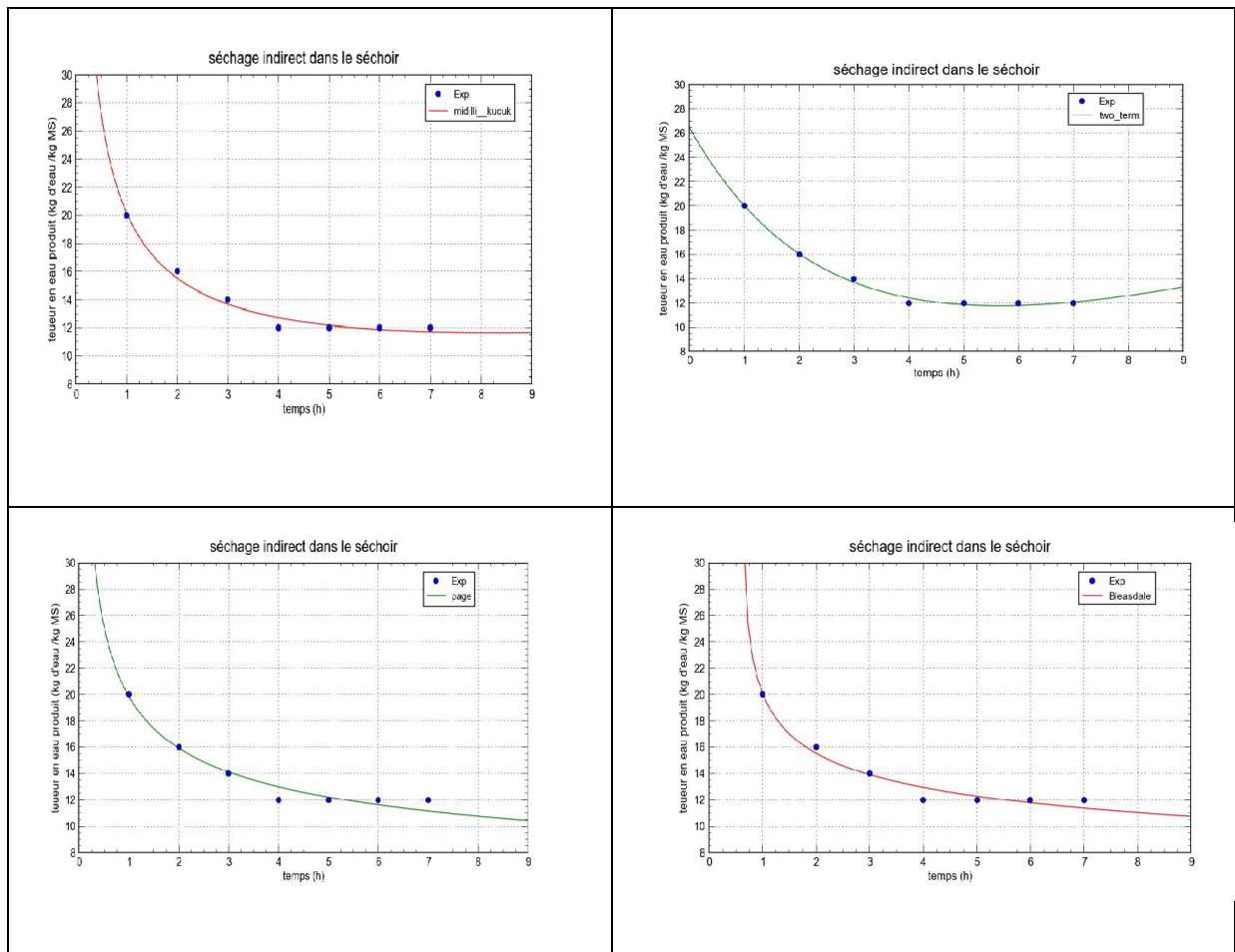


Figure III.27: le lissage des courbes de cinétique de séchage dans le séchoir hybride par quatre modèles mathématiques

Tableau III.6: Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour la séchage indirect

modèle	équation	a	b	k	K0	K1	x^2	R^2	RMSE
page	e^{-kx^n}	---	---	- 2.9869	---	---	0.6242	0.9825	0.7901
Midilik_kucuk	$ae^{-kx^n} + bx$	7.2 E-02	0.3749	- 5.6047	---	---	0.5750	0.9911	0.7583
two_term	$ae^{-k_0x} + be^{-k_1x}$	6.5314	19.8826	---	-7.5 E-02	0.4279	0.3338	0.9970	0.5777
Bleasdale	$(a + bx)^{-\frac{1}{c}}$	-6.5 E-07	1.1 E-06	---	---	---	0.6426	0.9851	0.8016

Tous les modèles utilisés peuvent décrire l'évolution de la teneur en eau réduite des produits avec R^2 variant de 0.9825 à 0.9970 et x^2 variant de 0.3338 à 0.6426. Le modèle "two_term" peut être proposés comme étant le modèle le plus faible pour décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.

III.12 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons étudié le séchage des feuilles d'arbre *Zizyphus Spina-Christi* ou temps de séchage a pris moins 4 heures en raison de la nature des feuilles, ou nous avons remarqué une diminution de la valeur de l'humidité et de l'acidité, ce qui permet d'inhiber le travail de bactéries nocives. L'étude de la cinétique de séchage permet de déterminer la courbe de cinétique, puis le lissage par des modèles mathématique permet d'apprécier le modèle et les paramètres appropriés au mode et au produit.

Les meilleurs modèles sont Midilik_kucuk pour séchage à l'air et two_term pour le séchage dans le séchoir solaire indirect.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans ce mémoire, nous avons mené nos recherches sur le séchage des feuilles d'arbre *Zizyphus Spina-Christi* en raison de sa grande importance dans le domaine de la médecine et des cosmétiques. Nous sommes appuyés sur le séchage solaire direct et indirect pour l'étude de la caractérisation physicochimique des feuilles de *Zizyphus Spina-Christi* pour inhiber le travail de bactéries nocives tout en préservant les propriétés nutritionnelles (couleur, gout et odeur).

La qualité physicochimique avant et après le séchage a été définie, comparée et présentée.

Les différentes courbes de cinétique de séchage, dans le séchoir indirect hybride ou sous air, ont été élaborées expérimentalement. Le but de cette étude était de trouver les coefficients optimaux qui permettent de réduire significativement l'humidité du produit séché en un temps relativement court, en établissant une modélisation de la cinétique du séchage, en choisissant des relations mathématiques adaptées et en donnant des résultats proches et empiriques.

Quatre modèles mathématiques ont été utilisés pour décrire le phénomène de la cinétique de séchage, les meilleurs modèles remarquables, en se basant sur les paramètres statistiques, sont **Midilik_kucuk** pour séchage à l'air et **two_term** pour séchage dans séchoir solaire hybride indirect. Le séchoir utilisé dans cette expérience détermine l'effet de plusieurs paramètres thermodynamique à la fois, la température de séchage, le temps de séchage et le comportement hydro cinétique des feuilles de Sidr. Un des facteurs affectant le temps de séchage est la masse du produit et le pourcentage d'eau qu'il contient, la vitesse et la température de l'air de séchage.

Références Bibliographiques

Référence:

- [1] Ahmed Ghadni. sous le thème: Energies renouvelables. mémoire de licence Publisher on Jun 6,2018.
- [2] Généralité sue l'énergie renouvelable.
- [3] **C.DARRAS**, modélisation de système hybrides photovoltaïque /hydrogène : application site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE, thèse de doctorant, université de corse-pascal Paoli, May 2011.
- [4] **NAWA HACENNA**: intégration des énergies éoliennes dans le réseau électrique, "thèse de master académique, Université 8 mai 1945-Guelma, juillet, 2019.
- [5] **H.KANCHEV**: Gestion des flux énergétique dans un système hybride de source énergie renouvelable : optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain "thèse de doctorat, PRES Université Lille Nord- de – France 2014.
- [6] **K. KORDESCH et G. SIMADER**, Fuel Cells and Their Applications, ed VCH, Fuel Cell Handbook (5ième édition) EG&G services, Parson, Inc. Science Applications, International Corporation (CD ROM). 1996
- [7] **Nadia Chalal**, étude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect, mémoire magister en génie climatique, université mentouri-Constantine, déc. 2007
- [7] **Fellow P.2000**. Food processing technology principals and practice.CRC press, now York, 571p.
- [8] **Boulemtafes Amel**, le séchage solaire des produits agricoles, recherche et développement
- [9] **Charreau A, Cavaille R(1991)** séchage théorie et pratique, technique de l'ingénieur, génie des procédés, 2480-1; 2480-23
- [10] **Mujumdar, A.S.** Guide pratique du séchage industriel application, principes, équipements et nouveau développement. Sakamon devahastin, Montréal exegex corporation, Québec, 2000.
- [11] **Souheyla khaldi**; Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie; Thèse de doctorat université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2018.
- [12] **Kaddouri Laid**, contribution à l'amélioration des performances d'une capteur solaire destiné au séchage solaire, Thèse de master, mai 2018
- [13] **A. Gauthier** industriel alimentaires et agricoles, juin 1990; citée par L.Bennamoun.

- [14] **Djamel Mennouche**, valorisation produits agro-alimentaire et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire, Magister, Jun, 2016
- [15] **S. Bouchali**, étude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques. Thèse de doctorat: université Hadj lakhder. Batna.2010.
- [16] **W. Belachi**, Application du séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaires. Mémoire de magister: université kasdi Merbah, 2009.
- [17] **Ekechukwe OV**, Norton B. review of solar energy drying systems: an overview of solar drying technology. Energy conversion and management, 1999,40.
- [18] **Arrianus**, flavius (known as A rain, 96-180 A.D. Greek historian), history of a lexander and indicia, vol. II, (book VIII, indicia). In the Loeb classical library, Harvard University press, Cambridge M ass, M C M L X V I, 1966.
- [19] **K rolls**, K., Kast, W., 1989. Trocknen und trockner in der production, 3rd volume, 574, geschichtliche entwicklung der trocknungstechnik. Springer Verlag, Berlin.
- [20] **V. Belessiotis**, E. delyannis, solar drying solar energy 85 (2011) 1665-1691.
- [21] **A. Benseddik**, amélioration de la qualité et de la performance du séchage solaire des produits agro-alimentaires par insertion d'un traitement de détente instantanée contrôlée (DIC); analyse expérimentale, modélisation empirique et phénoménologique. Thèse se doctorat, université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, juillet, 2018.
- [22] **S. Chouicha**. étude et réalisation d'un nouveau procédé de séchage couplé à un système de chauffe-eau solaire. Thèse de magister, université Kasdi Merbah, Ouargla, 2010.
- [23] **P. Dudez**. Le séchage solaire à petit échelle des fruits et légumes: expériences et procédé, édition du Greth. France .1999.
- [24] **O.V. Ekechukwe, B, Norton**, review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology, energy conversion, mangement.40, 1999,615-655
- [25] **M.Duminil**, air humide, techniques de l'ingénieur. B 2230,1993.
- [26] **A.Mukhtar**, contribution à l'amélioration du séchoir solaire pour les cultures agricoles, mémoire de magister, université Qasidi Merbah et Ouargla, P28-38.
- [27] **N.Bekkioui**, séchage solaire du bois: Modélisation simplifiée du séchage d'une pile de bois dans un séchoir solaire à parois vitrées, thèse de doctorat, Déc. 2009.
- [28] technique de l'ingénieur-génie des procédés séchage par André Charreau et Roland Cavaille, j 2480-2; 2480-22.

- [29] **D. Michel**, les séchoirs solaires: théorie et pratique. 1985.
- [30] **M. Touati Tliba, B. Drihem**, étude expérimentale du séchage solaire des plantes feuillues, thèse master, Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued, 2018.
- [31] **a. Essalih**, modélisation des isothermes de désorption du produit agroalimentaire, thèse master, université Ahmed Draia Adrar, Jun, 2018.
- [32] Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes, GRET, 1996
- [33] Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes, GRET, deuxième partie, 1996
- [34] **A. Bachiri, M. Meloudj** étude d'une installation de chauffage géothermique, thèse de Master, Université de M'sila 2017/2017
- [35] **B.Touati**, "Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe", Thèse de Magistère, Centre Universitaire, Bechar, Algérie (2001).
- [36] **حميدة فتيحة ، لوصيف منى ريان** -دراسة فيتو كيميائية لنبات السدر *Zizyphus lotus* لمنطقتي عين السمارة وتمالوس مذكرة التخرج للحصول على شهادة الماستر-جامعة الإخوة منتوري قسنطينة 15 جويلية 2019.
- [37] **سلوى حمزة, حسين بثينة الحسن ناصر سندس وفي غني**، دراسة تأثير المستخلص المائي و الكحولي لأوراق نبات السدر *Zizyphus Spina-Christi* على نمو بعض الأنواع البكتيرية -جامعة الكوفة
- [38] **M. SAADOUDI**, caractérisation biochimique conservation et essais d'élaboration du produit alimentaire à base du fruit de *Zizyphus loutus* L. Thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat en sciences, université BATNA1-HADJ LAKHDAR ,2018-2019, pp 9.
- [39] **A. Khenblouche**. Etude et réalisation d'un nouveau procédé de séchage couplé à un système de chauffe-eau solaire. Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah. Ouargla.2014
- [40] **S. Metatla**, optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA, mémoire de magister d'école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.
- [41] projet l'énergie éolienne d'aujourd'hui. PDF
- [42] **M. Rechoum**, L'énergie éolienne, Thèse de mémoire master université des sciences et technologie Houari Boumediene (USTHB).
- [43] A. Ferrière, Centrale solaire thermodynamique, technologie l'ingénieur. 2008 BE 903.
- [44] site internet du laboratoire PROMES, <http://www.promes.cnrs.fr/>.

- [45] **www. Carbone lorraine. com.**
- [46] A.Errahmani, N. Ben Athmane, Amélioration de l'efficacité des panneaux photovoltaïque par l'installation d'un système de refroidissement par l'eau des modules PV, thèse mémoire master, Jun, 1009.
- [47] [http://m. ar. Dsnsolar. Com.](http://m.ar.Dsnsolar.Com)
- [48] **www. Lys-Artaud. AC- Aix- Marseille. Fr.**

Annexes



Balance de précision



peser des feuilles de sidr



Le produit dans le séchoir



Les feuilles de sidr après le séchage



Les appareils (OPUS) pour mesurer l' humidité