

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Ahmed Draïa Adrar**



**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département d'Hydrocarbures et Energies Renouvelables**

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en :**

**Filière : Génie des Procédés**

**Spécialité : Génie Chimique**

**Thème :**

**Etude Expérimentale et Simulation de la Cinétique de  
Séchage Solaire de Carotte**

**Préparé par :**

**M. BENALI Abdeledjalil**

**Mlle. FERHAT Hanane Wahiba Ikrame**

**Membres de jury d'évaluation :**

<b>Mr. HARROUZ Abdelkader</b>	<b>Président</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ. Adrar</b>
<b>Mr. MEDIANI Ahmed</b>	<b>Encadreur</b>	<b>MRB</b>	<b>URER/MS. Adrar</b>
<b>Mme. DJEDID khaira</b>	<b>Co-encadreur</b>	<b>MAA</b>	<b>Univ. Adrar</b>
<b>Mr. LOUMANI Akil</b>	<b>Examineur</b>	<b>MRA</b>	<b>Univ. Adrar</b>

**Année Universitaire : 2021/2022**



## شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة) : مدياني أحمد  
المشرف على مذكرة الماستر الموسومة بـ :

### Etude Expérimentale et Simulation de la Cinétique de Séchage Solaire de Carotte

من إنجاز الطالب(ة): بن علي عبد الجليل

و الطالب(ة): فرحات حنان وهيبة إكرام

كلية : العلوم و التكنولوجيا

القسم : محروقات و طاقات متجددة

التخصص: هندسة كيميائية

تاريخ تقييم / مناقشة: 2022/06/09

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

- امضاء المشرف:

A. Mediani

ادرار في: 2022/06/15



## REMERCIEMENT

Avant tout, nous remercions Allah le tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé. Nous tenons à exprimer notre remerciement et gratitude à notre rapporteur: Mr. A. MEDIANI qui nous a aidés pour rendre ce travail effectif. Nos profondes reconnaissances vont à Mr : TIGANI Cherif, DJEBER A. Elkrim, pour l'aide et le temps que nous ont offert. Nos remerciements vont aussi au département **des hydrocarbures et des énergies renouvelables** de l'université d'Adrar et à tous les enseignants qui nous ont enseignés durant les années du cursus. Notre remerciement aussi à l'unité de recherche URERMS, sans oublier: Dr : MOUNGAR Houcine et Dr: LOUMANI Akil. Enfin nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce travail

# Dédicace

Je dédie ce noble travail....

A mon père et à ma mère qui m'ont soutenu  
et encouragés dans les moments les plus  
difficiles.....

A mes frères et à mes sœurs pour leur  
patience et leur tendresse....

A mon binôme dans ce travail \*Hanane\*

A toute ma famille et à tous mes amis....

**BENALI Abdeldjalil**

## *Dédicace*

Je dédie ce noble travail....

A mon père et à ma mère qui m'ont soutenu  
et encouragés dans les moments les plus  
difficiles.....

A mes frères et à mes sœurs pour leur  
patience et leur tendresse....

A mon binôme dans ce travail \*abdeldjalil\*

A toute ma famille et à tous mes amis....

*Ferhat hanane*

## Table des matières

<b>Introduction Générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I :.....</b>	<b>3</b>
<b>L'énergie Et Les Energies Renouvelables .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction : .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2 Les Energies : .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3 Les Différentes Formes D'énergie :.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.1 L'énergie Mécanique .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.2 L'énergie Thermique.....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.3 L'énergie Chimique.....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.4 L'énergie Rayonnante :.....</b>	<b>7</b>
<b>I.3.5 L'énergie Nucléaire : .....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.6 L'énergie Electrique .....</b>	<b>8</b>
<b>I.4 Les Energies Renouvelables :.....</b>	<b>9</b>
<b>I.5 Les Formes D'énergies Renouvelables :.....</b>	<b>10</b>
<b>I.5.1 L'énergie Solaire :.....</b>	<b>10</b>
<b>I.5.2 L'Energie Solaire Passive : .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.3 L'Energie Solaire Active :.....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.4 Energie Thermique :.....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.5 Energie Photovoltaïque : .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.6 L'énergie Eolienne :.....</b>	<b>12</b>
<b>I.5.7 L'Energie Biomasse :.....</b>	<b>13</b>
<b>I.5.8 L'Energie Hydraulique :.....</b>	<b>15</b>
<b>I.5.9 L'Energie Géothermique: .....</b>	<b>15</b>
<b>I.6 Conclusion :.....</b>	<b>17</b>

<b>Chapitre Ii:</b> .....	<b>18</b>
<b>Généralités Sur</b> .....	<b>18</b>
<b>Le Séchage Solaire</b> .....	<b>18</b>
<b>Ii.1 Introduction :</b> .....	<b>19</b>
<b>Ii.2 Définition :</b> .....	<b>19</b>
<b>Ii.3 Historique:</b> .....	<b>19</b>
<b>Ii.4 Principes De Séchage:</b> .....	<b>19</b>
<b>Ii.4 Le But:</b> .....	<b>20</b>
<b>Ii.5 Différents Méthodes Du Séchage:</b> .....	<b>20</b>
<b>Ii.5.1 Séchage Mécanique:</b> .....	<b>20</b>
<b>Ii.5.2 Séchage Chimique:</b> .....	<b>20</b>
<b>Ii.5.3 Séchage Thermique:</b> .....	<b>20</b>
<b>Ii.6 Les Processus De Séchage :</b> .....	<b>21</b>
<b>Ii.6.1 Par Conduction :</b> .....	<b>21</b>
<b>Ii.6.2 Par Convection :</b> .....	<b>21</b>
<b>Ii.6.3 Par Les Rayonnements :</b> .....	<b>21</b>
<b>Ii.6.4 Par Perte Diélectrique :</b> .....	<b>22</b>
<b>Ii.6.5 Par Lyophilisation :</b> .....	<b>22</b>
<b>Ii.7 Les Grandeurs Caractéristiques De L'air De Séchage :</b> .....	<b>22</b>
<b>Ii.7.1 Humidité Absolue</b> .....	<b>22</b>
<b>Ii.7.2 Humidité Relative:</b> .....	<b>22</b>
<b>Ii.7.3 Degré De Saturation</b> .....	<b>22</b>
<b>Ii.7.4 Température Caractéristique De L'air Humide.</b> .....	<b>23</b>
<b>Ii.7.4.1 Température Du Bulbe Sec Ts .</b> .....	<b>23</b>
<b>Ii.7.4.2 La Température Humide Th</b> .....	<b>23</b>
<b>Ii.7.4.3 La Température De Rosée Tr</b> .....	<b>23</b>

<b>Ii.7.4.4 Température De Saturation Adiabatique Tgs .....</b>	<b>23</b>
<b>Ii.7 Caracteristiques Des Solides Humides .....</b>	<b>23</b>
<b>Ii.7.1 Humidité Absolue .....</b>	<b>23</b>
<b>Ii.7.2 Humidité Relative .....</b>	<b>23</b>
<b>Ii.7.3 Hygroscopicité.....</b>	<b>23</b>
<b>Ii.8 Les Avantage Et Inconvénients De Séchage .....</b>	<b>24</b>
<b>Ii.8.1lesavantages .....</b>	<b>24</b>
<b>Ii.8.2inconvénients.....</b>	<b>24</b>
<b>Ii.9 Les Différents Types De Séchoirs Solaires :.....</b>	<b>24</b>
<b>Ii.9.1 Séchoir Solaire Direct: .....</b>	<b>25</b>
<b>Ii.9.2 Séchoir Solaire Indirect .....</b>	<b>25</b>
<b>Ii.9.3 Séchoirs Solaires Mixtes .....</b>	<b>26</b>
<b>Ii.9.4 Séchoirs Solaires Hybrides .....</b>	<b>26</b>
<b>Ii.10 Les Avantages Et Les Inconvénients Pour Les Différents Systèmes De Séchage Solaire : .....</b>	<b>28</b>
<b>Ii.10 La Vitesse De Séchage .....</b>	<b>29</b>
<b>Ii.11 La Cinétique De Séchage .....</b>	<b>30</b>
<b>Ii.12 Les Paramètres Influent Sur La Cinétique De Séchage .....</b>	<b>31</b>
<b>Ii.12.1 Influence De La Température De L'air De Séchage (Ta):.....</b>	<b>32</b>
<b>Ii.12.2 Influence De L'humidité De L'air De Séchage (Hr):.....</b>	<b>32</b>
<b>Ii.12.3 Influence De La Vitesse De L'air De Séchage (Va): .....</b>	<b>32</b>
<b>Ii.12.4 Influence De Taux De Recyclage De L'air De Séchage: .....</b>	<b>32</b>
<b>Ii.12.5 Le Calibre Du Produit A Sécher:.....</b>	<b>32</b>
<b>Ii.12.6 Influence De L'épaisseur Du Produit A Sécher (Ep): .....</b>	<b>32</b>
<b>Ii.13 Modélisation Mathématique De La Cinétique Du Séchage.....</b>	<b>33</b>
<b>Ii.14 Conclusion :.....</b>	<b>34</b>
<b>Chapitre Iii: .....</b>	<b>36</b>



<b>Partie Expérimentale .....</b>	<b>36</b>
<b>    Iii.1. Introduction.....</b>	<b>38</b>
<b>    Iii.2. Matériels Et Méthodes :.....</b>	<b>37</b>
<b>        Iii.2.1 Le Choix De La Plante Végétale : .....</b>	<b>37</b>
<b>        Iii.2.2. Le Lieu De Prélèvement Des Carotte .....</b>	<b>37</b>
<b>        Iii.2.3. Matériel Végétal .....</b>	<b>37</b>
<b>    Iii.3. Résultats Et Discussion .....</b>	<b>47</b>
<b>        Iii.3.1. Les Composants Physico-Chimies De Produits .....</b>	<b>47</b>
<b>        Iii.3.2 Cinétique De Séchage .....</b>	<b>48</b>
<b>    Iii.4 La Modélisation .....</b>	<b>52</b>
<b>        Iii.4.2 Résultats De La Modélisation .....</b>	<b>53</b>
<b>    Iii.5 Conclusion .....</b>	<b>57</b>
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>58</b>
<b>Références .....</b>	<b>60</b>

## liste des tableaux

---

### liste des tableaux

Tableau II.1	Avantages et inconvénients pour les différents types de séchoirs solaires	28
Tableau II.2	Modèles mathématiques de la cinétique du séchage	34
Tableau III.1	Les composants physico-chimies de produits	48
Tableau III.2	Modèles mathématiques donnés par différentes auteurs pour les courbes de séchage	53
Tableau III.3	Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme Fonction du temps pour le séchage indirect	55
Tableau III.4	Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour le séchage direct	57
Tableau III.5	Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour le séchage à l'aire	58

## liste des figures

---

Figure I.1	L'énergie mécanique	5
Figure I.2	l'énergie thermique	6
Figure I.3	l'énergie chimique	7
Figure I.4	l'énergie rayonnante	7
Figure I.5	l'énergie nucléaire	8
Figure I.6	l'énergie électrique	9
Figure I.7	Le soleil	10
Figure I.8	Eolienne à axe horizontale	12
Figure I.9	Eolienne à axe verticale	13
Figure I.10	Différents types de biomasse	13
Figure I.11	Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique.	15
Figure I.12	L'énergie géothermie	16
Figure II.1	Différents types de séchoirs solaires .	25
Figure II.2	Séchoir solaire indirect	26
Figure II.3	Séchoir solaire hybride solaire gaz	27
Figure II.4	Vitesse de séchage en fonction du temps	29
Figure II.5	Cinétique de séchage	30
Figure III.1	Morceaux des carottes.	37
Figure III.2	Les 4 échantillons des carottes avant et après le séchage	38
Figure III.3	Détermination de pH	39
Figure III.4	Détermination de l'acidité de titrage	39
Figure III.5	Détermination de l'activité d'eau	40
Figure III.6	Détermination de Teneur en eau	41
Figure III.7	Répartition des capsules dans le four	42
Figure III.8	Détermination du sucre réducteur par spectrophotomètre	43
Figure III.9	Détermination de la teneur en protéines	45
Figure III.10	Détermination de la teneur en lipides	46
Figure III.11	Evolution de l'humidité et la température à l'entrée et à la milieu de la chambre indirect.	48
Figure III.12	Comparaison entre la variation de la température et de l'humidité.	49

## liste des figures

---

Figure III.13	Variation de la température et l'humidité a l'entrée et au milieu de séchoir en fonction du temps	49
Figure III.14	La cinétique de séchage du produit dans le séchoir solaire	50
Figure III.15	Comparative entre le séchage à l'air et dans le séchoir solaire (indirect)	51
Figure III.16	Comparative entre le séchage dans le séchoir solaire (direct) et dans le séchoir solaire (indirect)	51
Figure III.17	Lissage des courbes de cinétique expérimentales dans le séchoir solaire par les 4 modèles mathématiques	54
Figure III.18	Lissage des courbes de cinétique expérimentales dans le séchoir solaire direct par les 4 modèles mathématiques	55
Figure III.19	Lissage des courbes de cinétique expérimentales à l'air par les 4 modèles mathématiques	56

## Liste des symboles

Symbole	Désignation	Unité
Pv	la pression de vapeur	Atm
Pt	la pression total ambiante	Atm
Ha	Humidité absolue	Kg d'eau /kg (as)
Me	Masse de l'eau	kg
Ma	Masse de l'air sèche	kg
P	la pression totale du mélange de gaz et de vapeur	Atm
Ps (T)	La pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.	Atm
$\psi$	Le degré de saturation	%
Has	Humidité absolue de saturation	Kg d'eau /kg (as)
Mh	Masse humide du produit	kg
Ms	Masse séché du produit	Kg
T	Température	C°
t	Temps	s
$R^2$	Le coefficient de détermination	sans
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg eau /kg ms
A	Acidité titrage	%
RMSE	Root Mean Square Error	Sans
Xr	Teneur en eau du produit à base humide	kg eau /kg mh
Xeq	Humidité d'équilibre	kg eau /kg (MS)

## Résumé

### Résumé:

Ce travail est une étude expérimentale et de modélisation dans le domaine du séchage solaire des produits alimentaires cas des carottes, dans un séchoir indirect et direct et à l'air libre. Dont la composition physicochimique de la carotte avant et après le séchage solaire a été déterminée pour l'appréciation du produit, Les courbes de la cinétique de séchage pour le produit objet d'étude, et différents modes ont été déterminées expérimentalement, le lissage de ces courbes par les différents modèles mathématiques existants et en se basant sur le paramètre de corrélation  $R^2$  et l'erreur standard « RMSE » permet de choisir le modèle approprié décrivant ce phénomène objet de l'étude : logarithmique

Par exemple dans le séchage indirect on a trouvé  $R^2 = 0.9953$  et  $RMSE = 0.0281$

Mots clés : séchage solaire, modélisation, cinétique de séchage, énergie solaire, carotte.

### ملخص:

هذا العمل هو دراسة تجريبية ونمذجة في مجال التجفيف الشمسي للمنتجات الغذائية كعينة الجزر، في مجفف غير مباشر ومباشر وفي الهواء. بما في ذلك التركيب الفيزيوكيميائي للجزر قبل وبعد التجفيف الشمسي لتقييم المنتج، تم تحديد منحنيات حركة التجفيف المختلفة تجريبياً، وتمليس هذه المنحنيات من خلال النماذج الرياضية المختلفة القائمة، وبناءً على معامل الارتباط والخطأ المعياري، أمكننا اختيار النموذج المناسب و هو اللوغاريتمي الذي يصف هذه الظاهرة موضوع الدراسة، على سبيل المثال في التجفيف غير المباشر نجد  $R^2 = 0.9953$  و  $RMSE = 0.0281$  الكلمات الأساسية: التجفيف الشمسي ، النمذجة ، حركة التجفيف ، الطاقة الشمسية ، الجزر.

### Summary :

This work is an experimental and modeling study in the field of solar drying of food products, in the case of carrots, in an indirect and direct dryer and in the open air. Of which the chemical composition of the carrot before and after the solar drying was determined for the appreciation of the product, The curves of the kinetics of drying for the product object of study, and different modes were determined experimentally, the smoothing of these curves by the various existing mathematical models and based on the correlation parameter  $R^2$  and the standard error "RMSE" makes it possible to choose the appropriate model describing this phenomenon object of the study: logarithmic .

For example in indirect drying we find  $R^2 = 0.9953$  and  $RMSE = 0.0281$

Keywords: solar drying, modeling, drying kinetics, solar energy, carrot.

# **Introduction générale:**

## **Introduction générale**

---

### **Introduction générale :**

L'augmentation des prix de l'énergie et la réduction continue des ressources en combustibles conventionnels de la Terre ainsi que l'augmentation du réchauffement climatique mondial ont été la motivation de l'intérêt croissant récent pour les sources d'énergie alternatives, telles que l'énergie solaire. Le soleil est l'une des sources d'énergie les plus riches dans ce contexte et est presque inépuisable. L'efficacité énergétique et la technologie solaire sont des éléments importants de toute conception. De plus, ils sont importants pour la nation et pour la Terre. Le Soleil est un immense réservoir d'énergie propre et la puissance provenant des rayons du soleil qui atteignent la terre est appelée énergie solaire. L'énergie solaire est la source d'énergie la plus facilement disponible. L'énergie solaire reçue sous forme de rayonnement peut être convertie directement ou indirectement en d'autres formes d'énergie telles que la chaleur et l'électricité qui peuvent être utilisées par l'homme. Étant donné que le soleil devrait rayonner essentiellement à un taux constant pendant un milliard d'années, il peut être considéré comme une source inépuisable d'énergie utile. L'énergie solaire est utilisée depuis la préhistoire, mais de la manière la plus primitive. Avant 1970, des travaux de recherche et développement étaient menés dans quelques pays pour exploiter plus efficacement l'énergie solaire, mais la plupart de ces travaux restaient principalement académiques. Après la hausse spectaculaire des prix du pétrole dans les années 1970, plusieurs pays ont commencé à formuler de vastes programmes de recherche et développement pour exploiter l'énergie solaire. Tout à fait raison le séchage est une opération énergivore, il s'agit d'un processus d'élimination de l'humidité hygroscopiques des matériaux. Elle implique l'application de chaleur pour vaporiser l'eau liquide des produits alimentaires et agricoles. Le processus de séchage varie du simple séchage au soleil ouvert au séchage industriel très complexe. En plus le séchage des produits alimentaires et agricoles est indispensable pour la conservation et le stockage, la manipulation facile et la réduction des coûts de transport. Diverses sources d'énergie sont utilisées pour fournir l'énergie nécessaire au processus de séchage. L'énergie solaire est la source d'énergie la plus utilisée dans le processus de séchage. Il est utilisé directement ou indirectement pour sécher les aliments et les produits agricoles. Le séchage au soleil ouvert est l'application directe de l'énergie solaire. Dans l'application indirecte, l'énergie solaire est utilisée pour produire de l'air chaud qui est utilisé pour l'application de séchage. Différents types de collecteurs peuvent être incorporés pour produire de l'air chaud pour le séchage. Ainsi, le séchage solaire trouve ses applications à des fins industrielles et domestiques pour sécher différents types de produits.



## Introduction générale

---

Ce travail présente les résultats de l'étude de séchage de carotte, la cinétique de séchage de produit avec une comparaison du phénomène de séchage direct à l'air (séchage direct) et dans le séchoir solaire (séchage indirect), afin de déterminer l'efficacité du séchoir solaire.

Ce mémoire comporte trois chapitres, est structuré comme suit:

Le 1<sup>er</sup> chapitre: nous avons parlé en général des énergies et des énergies renouvelables et les différents types de chacune.

Le 2<sup>ème</sup> 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.

Le 3<sup>ème</sup> chapitre: nous avons mené une étude expérimentale sur le séchage de carotte en utilisant un séchoir indirect au sein de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien d'adrar, pour déterminer les courbes de la cinétique de séchage direct, indirect et à l'air libre, puis une modélisation mathématique et les facteurs qui l'affectent ont été déduits.

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

# **Partie théorique**

**Chapitre I :**  
**L'énergie et les énergies**  
**renouvelables**

### I.1 INTRODUCTION :

Le terme « énergie » recouvre des réalités nombreuses et diverses. Si l'on met à part ses utilisations imagées comme « un homme plein d'énergie », l'énergie désigne une capacité à agir quels qu'en soient les modes : mettre en mouvement, chauffer, comprimer, éclairer, sonoriser, transmettre une information, etc.

L'histoire de l'homme a été substantiellement marquée par l'évolution des sources d'énergie libre qu'il a su ou pu utiliser. Jusqu'à il y a environ 500 000 ans, la seule énergie libre à la disposition de l'homme était sa propre énergie. En maîtrisant le feu pour chauffer, cuire, éclairer ou travailler les métaux, il a franchi la première marche de son apprentissage énergétique. Sont venues ensuite l'utilisation de l'énergie animale domestiquée, éolienne, hydraulique, thermique à cycles, chimique, électrique, nucléaire, solaire, etc. Chacune de ces étapes a été l'occasion d'une évolution le plus souvent majeure des structures des sociétés humaines.

Aujourd'hui l'énergie utilisable par l'homme se présente en de multiples formes. et on peut les classer en deux catégories ; des énergies classiques (non renouvelables) et des énergies renouvelables.

### I.2 Les énergies :

Le mot « énergie » vient du Grec Ancien « *énergéia* », qui signifie « La force en action ». Ce concept scientifique est apparu avec Aristote et a fortement évolué au cours du temps. Aujourd'hui, **l'énergie désigne « la capacité à effectuer des transformations »**. Par exemple, l'énergie c'est ce qui permet de fournir du travail, de produire un mouvement, de modifier la température ou de changer l'état de la matière. **Toute action humaine requiert de l'énergie : le fait de se déplacer, de se chauffer, de fabriquer des objets et même de vivre.**

L'énergie est partout présente autour de nous : dans la rivière qui fait tourner la roue du moulin, dans le moteur d'une voiture, dans l'eau de la casserole que l'on chauffe, dans la force du vent qui fait tourner les éoliennes... et même dans notre corps humain. [1]

**I.3 Les différentes formes d'énergie :**

Stockée dans les objets, les molécules, les atomes, l'énergie se manifeste de multiples façons. Mais qu'elle soit mécanique, cinétique, énergie thermique des mers, chimique, rayonnante ou encore nucléaire, elle peut toujours se convertir d'une forme à une autre.

**I.3.1 L'énergie mécanique**

L'énergie mécanique, associée aux objets, est la somme de deux autres énergies : l'énergie cinétique et l'énergie potentielle :

- L'énergie cinétique est l'énergie des objets en mouvement ; plus la vitesse d'un objet est grande, plus son énergie cinétique est importante. L'énergie des cours d'eau (énergie hydraulique) et celle du vent (énergie éolienne) sont des énergies cinétiques. Elles peuvent être transformées en énergie mécanique (moulin à eau, moulin à vent, pompe reliée à une éolienne) ou en électricité, si elles entraînent un générateur.
- L'énergie potentielle est l'énergie stockée dans les objets immobiles. Elle dépend de la position de ces derniers. Comme son nom l'indique, elle existe potentiellement, c'est-à-dire qu'elle ne se manifeste que lorsqu'elle est convertie en énergie cinétique. Par exemple, une balle acquiert, quand on la soulève, une énergie potentielle dite de pesanteur, qui ne devient apparente que lorsqu'on la laisse tomber. [2]



,

Figure I.1 : L'énergie mécanique

### I.3.2 L'énergie thermique

Il s'agit tout simplement de la **chaleur** . Celle-ci est causée par l'agitation, au sein de la matière, des molécules et des atomes . L'énergie thermique représente donc l'énergie cinétique d'un ensemble au repos.

Dans une machine à vapeur, elle est transformée en énergie mécanique ; dans une centrale thermique, elle est convertie en électricité. Le sous-sol renferme de l'énergie thermique (géothermie), qui est utilisée soit pour produire du chauffage, soit pour générer de l'électricité.[2]

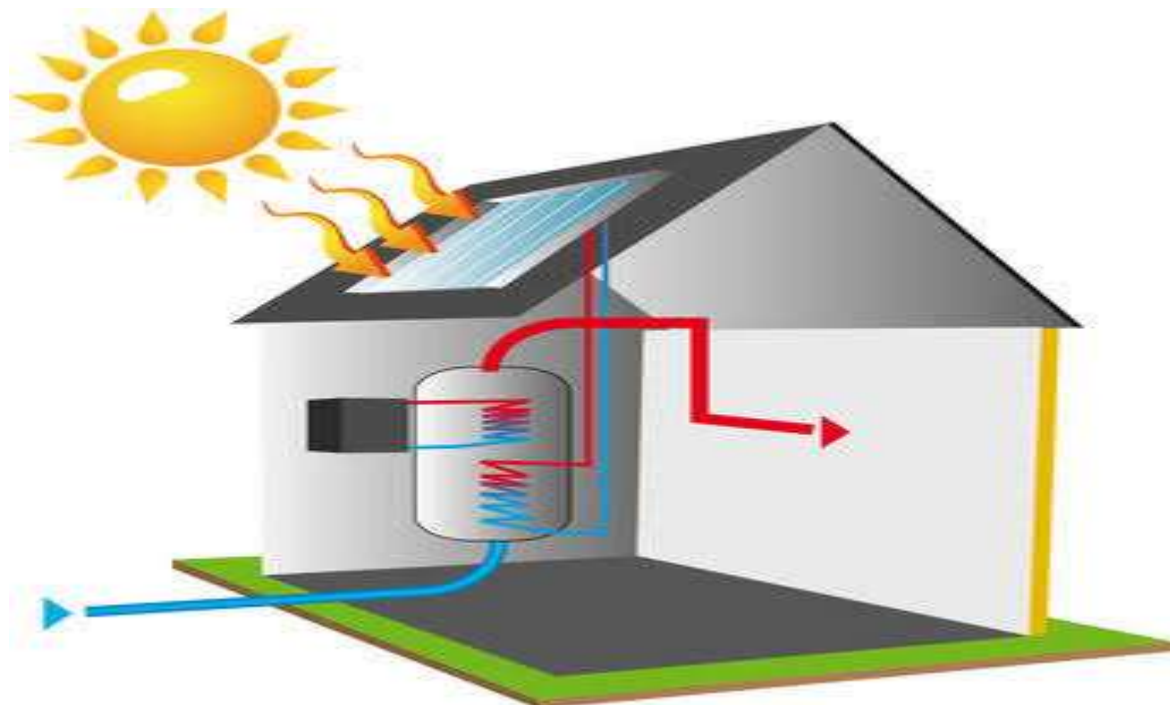


Figure I.2 : l'énergie thermique

### I.3.3 L'énergie chimique

L'énergie chimique est l'énergie associée aux liaisons entre les atomes constituant les molécules. Certaines réactions chimiques sont capables de briser ces liaisons, ce qui libère leur énergie (de telles réactions sont dites exothermiques).

Lors de la combustion, qui est l'une de ces réactions, le **pétrole** , le gaz, le charbon ou encore la **biomasse** convertissent leur énergie chimique en chaleur – et souvent en lumière. Dans les piles, les réactions électrochimiques qui ont lieu produisent de l'électricité. [2]

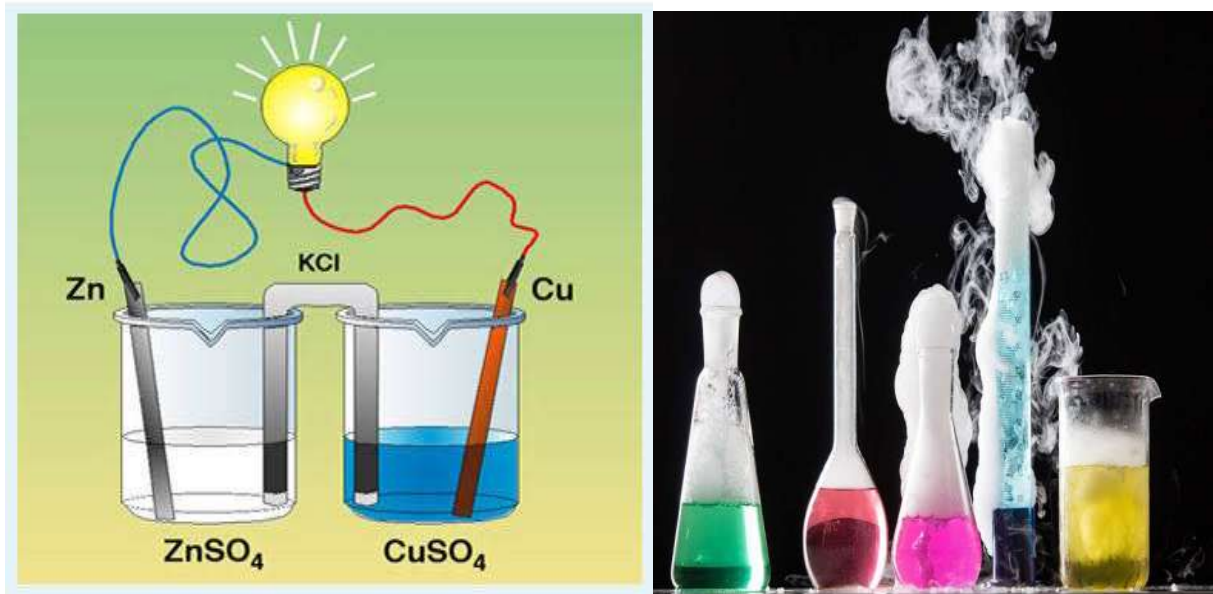


Figure I.3 : l'énergie chimique

### I.3.4 L'énergie rayonnante :

C'est l'énergie transportée par les rayonnements. L'énergie lumineuse en est une, ainsi que le rayonnement infrarouge . Les deux sont émis, par exemple, par le Soleil ou les filaments des ampoules électriques.

L'énergie des rayonnements solaires peut être récupérée et convertie en électricité (énergie photovoltaïque ) ou en chaleur solaire récupérée (solaire thermique).[2]

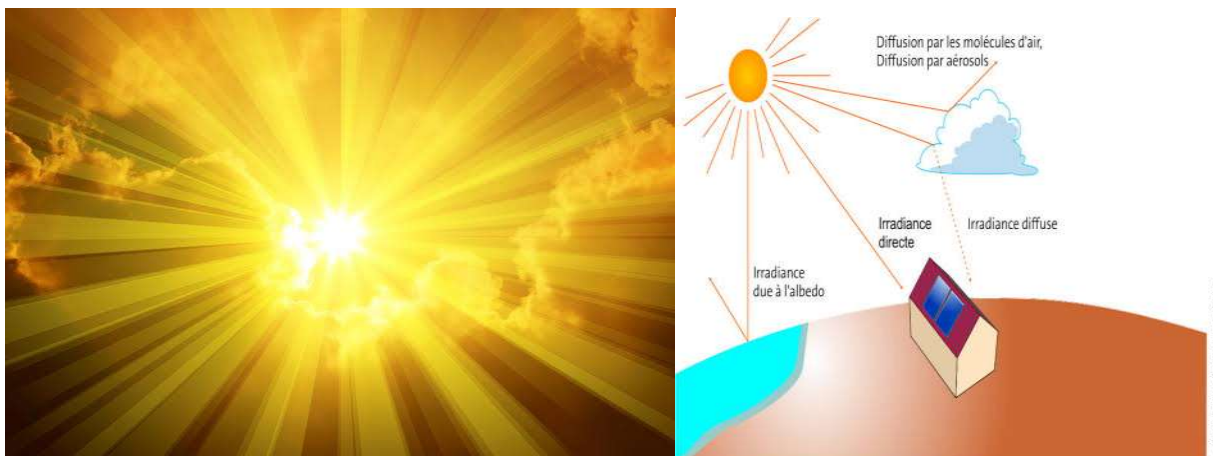


Figure I.4 : l'énergie rayonnante

### I.3.5 L'énergie nucléaire :

L'énergie nucléaire est l'énergie stockée au cœur des atomes, plus précisément dans les liaisons entre les particules (protons et neutrons) qui constituent leur noyau. En transformant les noyaux atomiques, les réactions nucléaires s'accompagnent d'un dégagement de chaleur.

Dans les centrales nucléaires, on réalise des réactions de fission des noyaux d'uranium, et une partie de la chaleur dégagée est transformée en électricité.

Dans les étoiles comme le Soleil, l'énergie des atomes est libérée par des réactions de fusion des noyaux d'hydrogène. [2]



Figure I.5 : l'énergie nucléaire

### I.3.6 L'énergie électrique

L'énergie électrique représente de l'énergie transférée d'un système à un autre (ou stockée dans le cas de l'énergie électrostatique) grâce à l'électricité, c'est-à-dire par un mouvement de charges électriques. Elle n'est donc pas une énergie en soi, mais un vecteur d'énergie. Le terme est toutefois communément utilisé par commodité de langage. Les systèmes pouvant fournir ces transferts électriques sont par exemple les alternateurs ou les piles. Les systèmes receveurs de ces transferts sont par exemple les résistances, les lampes ou les moteurs électriques. [2]



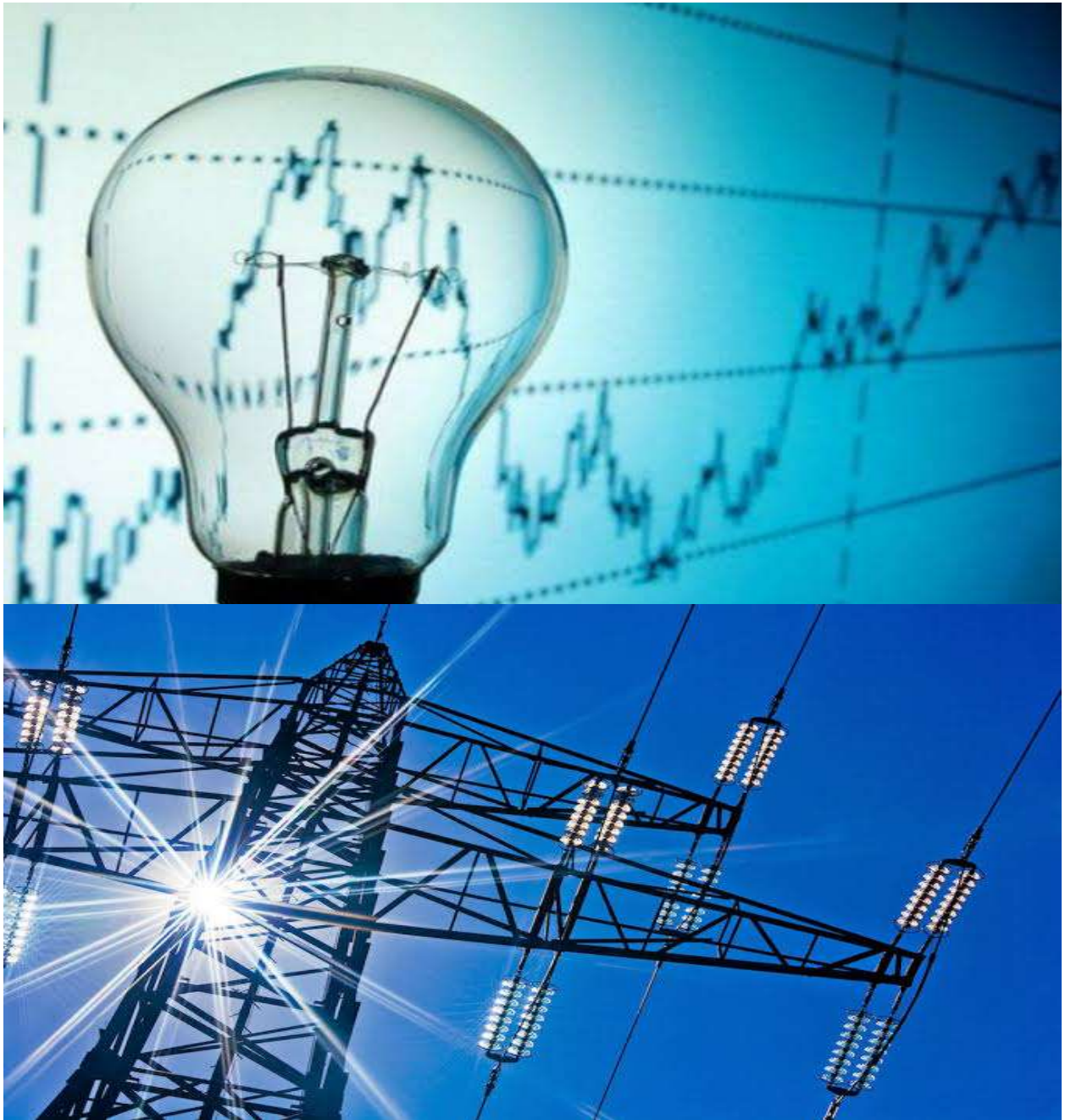


Figure I.6 : l'énergie électrique

#### **I.4 Les énergies renouvelables :**

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain.

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Nous soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la

vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition. Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émissions de CO<sub>2</sub>, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles. [3]

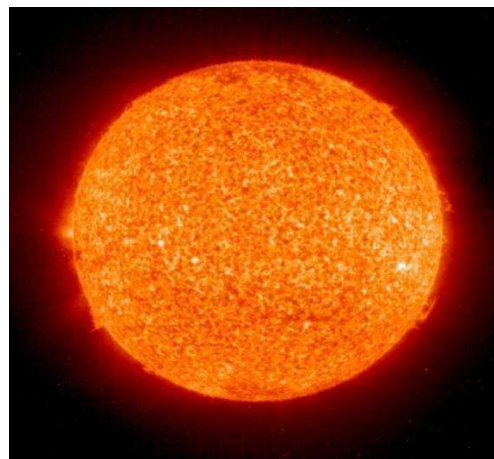
Les principales énergies renouvelables sont :

- √ L'énergie solaire
- √ L'énergie éolienne
- √ L'énergie biomasse
- √ L'énergie hydraulique
- ✓ L'énergie géothermique

### **I.5 Les formes d'énergies renouvelables :**

#### **I.5.1 L'énergie solaire :**

Le soleil est une source abondante et écologique d'énergie renouvelable. Aujourd'hui, nous captions l'énergie solaire pour chauffer les maisons et l'eau et pour produire de l'électricité au moyen de deux différentes méthodes et technologies : l'énergie solaire passive, l'énergie solaire active. [4]



**Figure I.7 :** Le soleil

**I.5.2 L'énergie solaire passive :**

L'énergie solaire passive désigne l'ensemble des techniques où la chaleur solaire peut être utilisée sur place, sans être transférée au moyen d'un caloporteur (air ou eau). Elle est directement liée aux techniques de construction qui permettent des économies d'énergie pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage.

Elle concerne la conception de bâtiments et la mise en place de composants de construction permettant d'utiliser le rayonnement solaire, à la fois pour l'éclairage naturel et le chauffage des espaces habitables. En plus de limiter la consommation d'énergie, l'énergie solaire passive peut contribuer au confort ressenti par les résidents.

Les maisons solaires passives, sont d'abord des bâtiments très bien isolés, pour lesquels les pertes de chaleur sont réduites au plus bas niveau possible. Dans les cas les plus poussés, elles n'ont pas besoin d'un système de chauffage. Ces maisons exploitent d'abord les apports solaires mais font aussi appel à des principes comme ceux de l'inertie thermique du bâtiment, l'éclairage naturel, l'ombrage en été, etc. [5]

**I.5.3 L'énergie solaire active :**

L'énergie solaire active implique le recours à des capteurs et des équipements mécanisés pour collecter et distribuer l'énergie. Elle désigne l'ensemble des moyens qui permettent de capter et de transformer le rayonnement solaire pour des applications énergétiques comme le chauffage de l'eau ou de l'air et la production d'électricité par des panneaux photovoltaïques. [5]

**I.5.4 Energie thermique :**

Le composant principal des capteurs solaires thermiques est un absorbeur noir qui convertit l'énergie solaire en chaleur. Celle-ci est acheminée vers un autre endroit, où elle sera utilisée immédiatement ou stockée en vue d'un usage ultérieur. Le transfert de la chaleur s'effectue au moyen d'un fluide caloporteur, de l'eau, de l'antigel ou de l'air. [5]

**I.5.5 Energie photovoltaïque :**

Le rayonnement solaire peut être converti en électricité par des capteurs photovoltaïques (PV). Ces capteurs sont généralement constitués de composants électroniques au silicium. Le silicium est abondant dans la nature et peu coûteux (c'est essentiellement du sable). Moyennant certaines modifications, le silicium possède la propriété de transformer les ondes lumineuses (photons) en électricité : c'est l'effet photoélectrique. [5]

### I.5.6 L'énergie éolienne :

Le vent est une source intermittente d'énergie puis qu'il ne souffle pas toujours à la vitesse requise pour produire de l'électricité.

C'est un principe vieux comme les moulins à vent, le vent fait tourner les pales qui sont elles- mêmes couplées à un rotor et à une génératrice, elle fonctionne comme suit :

- Le vent traverse les pales de rotor, les faisant tourner.
- L'arbre du rotor peut être fixé à un multiplicateur, qui peut accroître la vitesse, ou encore il peut être fixé directement de la génératrice et produire de l'électricité.
- Plus le vent souffle fort, plus on peut capter de l'énergie et plus on peut produire de l'électricité. Si le vent est trop fort, l'éolienne s'arrêtera en se détournant du vent et en appliquant un mécanisme de frein qui empêche les pales de tourner trop rapidement et de s'endommager. [6]

Il existe deux modèles de base d'éoliennes : le modèle à axe horizontale et le modèle à axe verticale :

#### > Eolienne à axe horizontale :

L'éolienne à axe horizontale ressemble davantage à un moulin à vent avec ses deux ou, plus souvent, trois pales de rotor fixées comme une hélice sur le devant et au sommet de la tour. Sur certaines éoliennes de ce type, les pales de rotor peuvent être posées à plat et basculer vers l'avant et vers l'arrière (ou s'incliner) pour capter le vent. On les appelle éoliennes à pas variable. Le multiplicateur, le frein et la génératrice sont logés dans un coffre, ou une nacelle, derrière les pales de rotor, au sommet de la tour. [6]

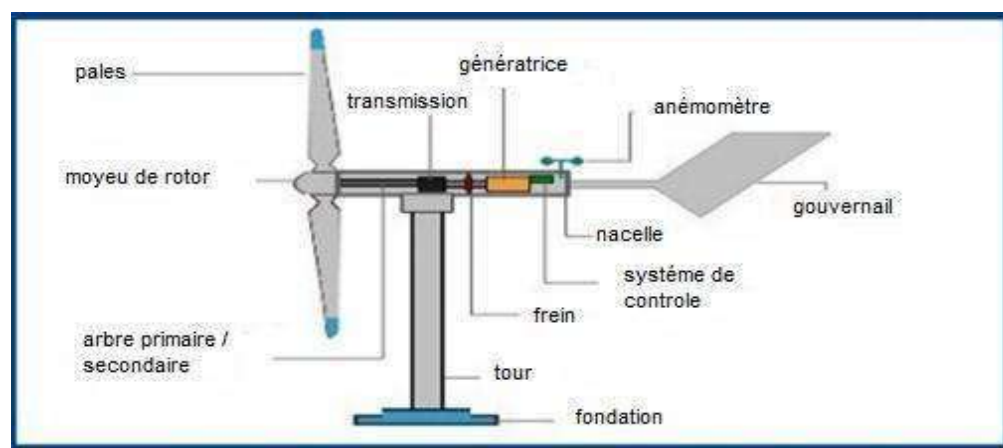


Figure I.8 : éolienne à axe horizontale

➤ **Eolienne à axe verticale :**

L'éolienne à axe vertical ressemble à un batteur à œufs. Les pales de rotor sont fixées au sommet et près du bas de la tour, et sont bombées au centre. Le multiplicateur et la génératrice sont logés dans une structure de protection, à la base de la tour. [6]



**Figure I.9 :** Eolienne à axe verticale

**I.5.7 L'énergie biomasse :**

Grâce à la photosynthèse, les plantes utilisent l'énergie solaire pour capturer le gaz carbonique et stocker sous forme d'hydrates de carbone,

Tout en assure leur croissance. Les premiers hommes ignoraient bien sur ce processus physico-chimique, mais ils ont vite compris l'intérêt de la biomasse pour se chauffer. Employé pour désigner toute la matière vivante, ce terme de biomasse s'applique depuis peu à l'ensemble des végétaux employés comme sources d'énergie. Le bois de feu est bien sur la plus ancienne de ses sources. Aujourd'hui on peut ajouter la biomasse dite « humide » ; déchets organiques agricoles, déchets verts, boues des stations d'épuration, ordures ménagères qui constituent, à une moindre échelle, autant de sources d'énergie, mais pas forcément très écologiques. [7]



**Figure I.10 :** Différents types de biomasse

**A. Bois énergie :**

Le bois est sans doute la source d'énergie la plus intéressante dans la problématique des énergies renouvelables. Tout le monde a en tête les dégâts provoqués par la déforestation dans les régions tropicales. Le bois constitue donc une source d'énergie renouvelable et relativement propre. Sans entrer dans un débat de spécialistes, un petit rappel s'impose ; en brûlant (ou en pourrissant sur le sol), un arbre rejette dans l'atmosphère le gaz carbonique qu'il avait absorbé en grandissant, ni plus ni moins. Dans un pays qui pratique la sylviculture et replante au minimum autant d'arbre qu'il en coupe, le bilan écologique est donc neutre. [7]

**B. Le biocarburant :**

L'autre atout de la biomasse est la possibilité de fabriquer des biocarburants. Il en existe deux types : les éthanol et les biodiesel. Les éthanol, destinés aux moteurs à essence, sont issus de différentes plantes comme le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre. Le procédé consiste à extraire le sucre de la plante pour obtenir de l'éthanol après fermentation.

Quant aux biodiesel, ils sont extraits des oléagineux (colza, tournesol, soja etc.) Les esters d'huile obtenus peuvent alors être mélangés au gazole. En règle générale, ces biocarburants sont mélangés aux carburants classiques,

Essence et gazole. Ils entraînent alors une petite diminution des rejets de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, gaz responsable de l'effet de serre. Mais ces biocarburants ont un énorme inconvénient ; ils occupent des surfaces agricoles au détriment des cultures vivrières. [7]

**C. Le biogaz :**

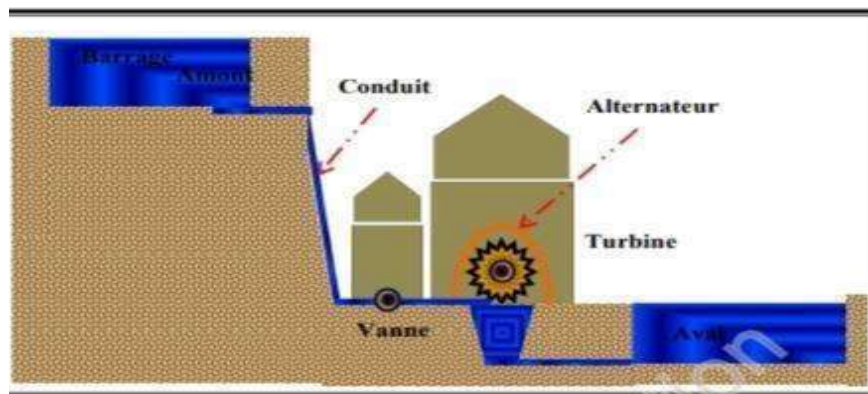
Le biogaz est un mélange composé essentiellement de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ). Suivant sa provenance, il contient aussi des quantités variables d'eau, d'azote, d'hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ), d'oxygène, d'aromatiques, de composés organo-halogénés (chlore et fluor) et des métaux lourds, ces trois dernières familles chimiques étant présentes à l'état de traces. Le biogaz est produit par un processus de fermentation anaérobie des matières organiques animales ou végétales, qui se déroule en trois étapes (hydrolyse, acidogènes et méthanogènes) sous l'action de certaines bactéries. Il se déroule spontanément dans les entres d'enfouissement des déchets municipaux, mais on peut le provoquer artificiellement dans des enceintes appelées "digesteurs" où l'on introduit à la fois les déchets organiques solides ou liquides et les cultures bactériennes. [7]

### I.5.8 L'énergie hydraulique :

Les centrales hydroélectriques convertissent le potentiel d'énergie de l'eau en énergie électrique en créant une chute du dénivelé de l'eau. Certaines centrales hydroélectriques tirent parti d'une chute naturelle du dénivelé d'une rivière. De nombreuses centrales hydroélectriques utilisent toutefois des barrages pour faire monter les niveaux d'eau en amont de la centrale et utilisent la baisse des niveaux pour produire davantage d'électricité ou pour stocker de l'eau et la libérer pour produire de l'électricité en fonction de la demande.

La quantité d'électricité produite dépend de la distance verticale que l'eau franchit et du débit de l'eau :

- L'eau de la rivière ou du réservoir derrière le barrage passe par une ouverture, habituellement une prise d'eau, et ensuite dans un tuyau appelé conduite forcée.
- L'eau traverse la conduite forcée sous pression jusqu'à son extrémité, où se trouve une turbine.
- La force de l'eau fait tourner les aubes de la turbine, qui font tourner l'arbre à l'intérieur.
- L'arbre de la turbine est relié à un alternateur, qui produit de l'électricité.
- Une fois passée la turbine, l'eau circule dans un conduit, appelé aspirateur, sort de la centrale par un canal, appelé canal de fuite, et retourne à la rivière. [4]



**Figure I.11** : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique.

### I.5.9 L'énergie géothermique:

Elle est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. Soit pour la production d'électricité ou bien pour la production de chaleur. Les types de l'énergie géothermique sont :

- a) La géothermie très basse énergie : Profondeur inférieure à 100 m de température moins de 30°C. Elle assure le chauffage.

- b) La géothermie basse énergie : Entre 1 500 et 2 500 mètres de profondeur de température entre 30°C et 90°C : trop faible pour produire de l'électricité mais idéal pour produire de la chaleur.
- c) La géothermie moyenne énergie : Gisements d'eau chaude ou de vapeur humide compris entre 90 et 150°C utilisé pour la production d'électricité.
- d) La géothermie haute température : 1 500 à 3 000 mètres de profondeur, exploite des fluides atteignant des températures supérieures à 150°C, pour produire de l'électricité << zones devolcanisme ou de tectonique active >>.
- e) La géothermie profonde assistée : la chaleur des roches chaudes fissurées situées entre 3 et 5kilomètres elle est utilisée pour la production d'électricité. [3]



**Figure I.12** L'énergie géothermie



**I.6 Conclusion :**

- Le différence entre l'énergie renouvelable et non renouvelable :

**L'énergie renouvelable** est une énergie **produite grâce à un moyen de production renouvelable**. Cela signifie qu'il n'a **pas de quantité limitée**, qu'il sera **toujours disponible**. En produisant de l'énergie renouvelable, il n'y a **pas d'impact véritable sur la planète**, puisqu'on utilise des ressources sans fond.

**L'énergie non renouvelable**, elle, utilise justement des **ressources** dont la **quantité** est naturellement **limitée**. Il s'agit de matières premières qu'on ne peut pas reproduire.

La quantité limitée de matière nécessaire à la production d'énergie oblige à trouver, à terme, de **nouveaux modes de production**.

-par conséquent, l'utilisation des énergies renouvelables dans tous les domaines et recherches est meilleure, plus efficace et moins polluant et nocif pour l'environnement.

C'est ce qui nous a incité à utiliser l'un des types d'énergie renouvelables, c'est l'énergie solaire qui comprend notre projet (le séchage solaire).

**Chapitre II:  
Généralités sur  
Le séchage solaire**

## II.1 Introduction :

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

## II.2 Définition :

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit) [1]. Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide. L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, jusqu'au seuil en deçà duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées. de même que le développement des microorganismes. de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année). L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique.

## II.3 Historique:

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, viandes, poissons, figes, noix, tabac, plantes médicinales, .... etc.), pour l'élaboration des matériaux (briques, céramique, poterie avant cuisson, bois...), ou pour les textiles et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, en fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel ». Le séchage dit « Artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantané », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc. [1].

## II.4 Principes de séchage:

Le séchage implique deux types de transferts : le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. La vitesse du séchage est directement liée à ces deux modes de transfert [2].

## II.4 le but:

Le but du séchage est de déshydrater un produit de façon à abaisser sa teneur en eau en dessous d'une valeur permettant sa conservation à température ambiante. Il consiste à extraire une part importante de l'eau pour réduire fortement les réactions diverses participant à la décomposition de l'aliment. Cette eau est éliminée par évaporation dans l'air environnant. Pour cela, il faut fournir de l'énergie (énergie d'activation) et, grâce à cette énergie, faire en sorte que cette eau migre de l'intérieur à la surface du produit [3].

## II.5 Différents méthodes du séchage:

### II.5.1 Séchage mécanique:

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

### II.5.2 Séchage chimique:

C'est un procédé basé sur l'utilisation des produits déshydratants (chlorure de calcium,.. ) pour extraire l'eau [5].

### II.5.3 Séchage thermique:

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une activation de l'eau par une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur. Les deux transferts se déroulent en une phase externe et une phase interne [6]:

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

#### II.5.3.1 Séchage par ébullition :

L'ébullition d'un liquide se produit lorsque sa température est telle que la pression de vapeur  $p_v$  de l'eau de ce liquide est égale à la pression total ambiante  $P_t$ :  
 $P = P_t$

- Pour l'eau pure, à pression atmosphérique, la température nécessaire est 100°C.

- Pour des solutions aqueuses, la pression de vapeur d'eau est abaissée par la présence des corps dissous : la température nécessaire est donc supérieure à 100 °C.
- Pour des « solides » humides enfin, les phénomènes sont analogues : selon l'état de l'eau dans le produit, celle-ci bout à 100°C ou plus haut.

Dans tous les cas, la température d'ébullition dépend aussi de la pression, et en particulier est plus basse sous vide. Cette opération, utilisée en industries alimentaires et pharmaceutiques, s'effectue généralement sous vide, sur le produit préalablement congelé[4].

#### **II.5.3.2 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[4] :

- Qu'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 en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

## **II.6 Les processus de séchage :**

### **II.6.1 Par conduction :**

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...). La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du composé à sécher : le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition s'il atteint sa température d'ébullition[7] .

### **II.6.2 Par convection :**

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à une contacte direct entre le solide humide et le gaz caloporteur[7]

### **II.6.3 Par les rayonnements :**

Les techniques d'énergies radiantes (Ultra violet, Infra rouge, Haute fréquence, Micro onde) permettent d'assurer, lorsque le produit le permet, un séchage de très bonne qualité et de réduire considérablement les dépenses liées au poste énergie[7] .

### II.6.4 Par perte diélectrique :

Le séchage par perte diélectrique est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non Conductrices (diélectriques). Lorsqu'un matériau isolant est placé dans un champ électrique, Ces molécules se polarisent. Lorsque la polarité des électrodes est inversée[8] .

### II.6.5 Par lyophilisation :

La lyophilisation est une opération de déshydratation à basse température qui consiste à éliminer par sublimation, la majeure partie de l'eau contenue dans un produit. Elle autorise une conservation à long terme grâce à l'abaissement de l'eau du produit[8] .

## II.7 Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage :

**II.7.1 Humidité absolue :** On appelle humidité absolue ou spécifique, ou teneur en humidité, ou plus simplement humidité d'un gaz, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par  $H_a$  est donnée par la relation suivante [2] :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \dots\dots\dots(1)$$

$M_a$  : Masse de l'eau

$M_e$  : Masse de l'air sèche

Si on considère  $P$  la pression totale du mélange de gaz et de vapeur, on peut écrire dans le cas de l'air humide [2] :

$$H_a = 0.622 \left[ \frac{P}{P - P_v} \right] \dots\dots\dots(2)$$

**II.7.2 Humidité relative :** La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur si  $P_v \leq P_s(T)$  on définit alors l'humidité relative ou degré hygrométrique  $H_r$  de l'air par la relation[7] :

$$H_r = \frac{P_v}{P_s(T)} \cdot 100 \dots\dots\dots(3)$$

$P_v$  : La pression partielle de la vapeur dans le mélange.

$P_s(T)$  : La pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.

**II.7.3 Degré de saturation :** Le degré de saturation est le rapport de l'humidité spécifique de l'air à l'humidité spécifique de l'air saturé à la même température [7]

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} \dots\dots\dots(4)$$

Dans le cas où  $P_v$  et  $P_s$  sont tous deux petits devant  $P$  (cas de l'air humide sous la pression Atmosphérique et pour des températures peu élevées), on peut écrire [8]:

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} = \frac{P_v}{P_s} \dots \dots \dots (5)$$

**II.7.4 Température caractéristique de l'air humide :** La chaleur à transférer au milieu à sécher est apportée par un gaz vecteur chaud qui assure aussi le transport des vapeurs hors de l'enceinte de séchage. On distingue classiquement quatre températures remarquables [2].

**II.7.4.1 Température du bulbe sec TS :** La température du bulbe sec TS ou plus exactement température « sèche », est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec[9] .

**II.7.4.2 La température humide Th:** C'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation n'est prélevée que sur l'air [2].

**II.7.4.3 La température de rosée Tr:** Il s'agit de la température pour laquelle l'air devient saturé pour la pression de vapeur d'eau  $P_v$  considérée. Or  $P_v$  intervient dans l'expression de l'humidité spécifique, si bien que la température de rosée représente encore la température de saturation à humidité spécifique constante[9] .

**II.7.4.4 Température de saturation adiabatique TGs :** La température de saturation adiabatique correspond à la température atteinte par le gaz vecteur sortant, saturé en vapeur du liquide, d'une enceinte adiabatique contenant le liquide à la température  $T_s$  [2]

## II.7 CARACTERISTIQUES DES SOLIDES HUMIDES :

**II.7.1 Humidité absolue:** L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau ou humidité à base sèche s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche[10].

$$X = \frac{M_H - M_S}{M_S} \dots \dots \dots (6)$$

**II.7.2 Humidité relative:** L'humidité relative d'un solide appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide[10]

$$\omega = \frac{M_H - M_S}{M_H} \dots \dots \dots (7)$$

**II.7.3 Hygroscopicité:** Après égouttage, la présence d'humidité dans un solide, se manifeste par une certaine tension de vapeur  $P_m$  qui est fonction de la nature du liquide, de celle du solide et

de la température. La valeur de cette tension de vapeur permet de distinguer deux grandes catégories de solides [10].

Lorsque le liquide adhère à la surface externe d'un solide, il est retenu par des forces superficielles peu intenses : la tension de vapeur  $P_m$  du liquide n'est alors fonction que de la température et elle est égale à la tension maximale de la vapeur du liquide à température considérée [10].

La rétention du liquide par adsorption à l'intérieur des pores, met en jeu des forces Capillaires d'autant plus intenses que les interstices sont plus fins. Dans le cas de gros capillaires, l'humidité n'est retenue que faiblement. Au cours du séchage, qui s'effectue par évaporation du liquide superficiel, ce dernier est peu à peu remplacé par du liquide provenant des interstices du solide; il en résulte que la tension de vapeur  $P_m$  du liquide est, ici encore, égale à la tension maximale du liquide pour la température où l'on se trouve [10].

## **II.8 Les avantages et Inconvénients de séchage :**

### **II.8.1 Les Avantages [15] :**

Les principaux avantages du procédé de séchage sont :

- La simplicité de la méthode avec généralement un bon rendement.
- Une durée de conservation des aliments déshydratés qui peut être de plusieurs mois
- La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments.
- L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité d'eau.
- Sa capacité à être utilisée à des fins commerciales permettant de limiter les pertes de récoltes.
- La diminution des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises en raison de la réduction massique.

### **II.8.2 Inconvénients [15]:**

Comme tous les traitements thermiques, le séchage peut entraîner, en particulier,

- des pertes d'arômes, de vitamines et de pigments
- des réactions de brunissement, des durcissements superficiels. Des modifications irréversibles de texture et donc de capacité à la réhydratation,
- des pertes de constituants volatils. La modification de la répartition de l'humidité dans le produit.
- Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération

## **II.9 Les Différents types de séchoirs solaires:**

Le séchoir solaire est un appareil qui permet le séchage des produits agricoles pour la conservation et le stockage pendant une période plus longue.



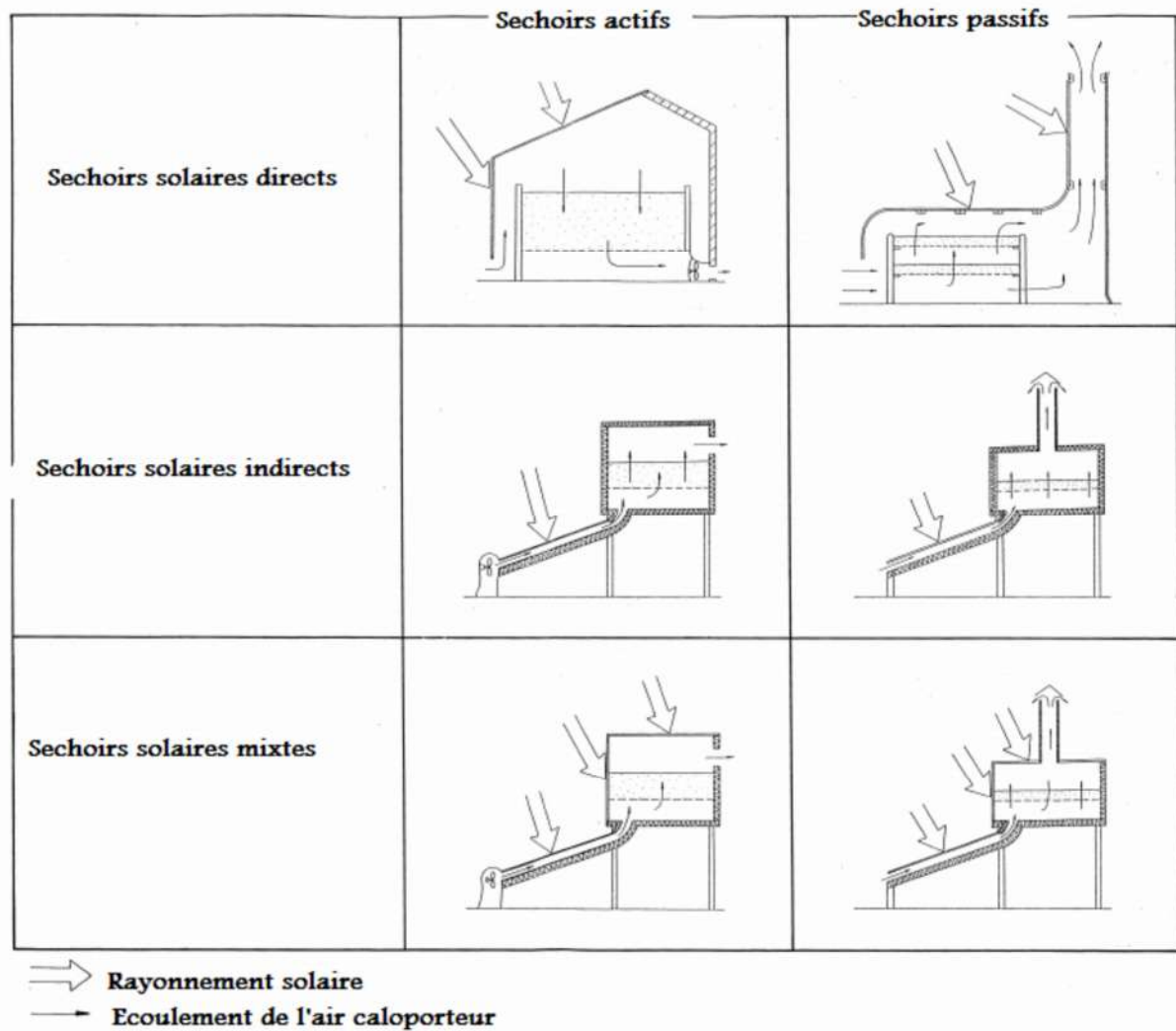


Figure II.1: Différents types de séchoirs solaires [2].

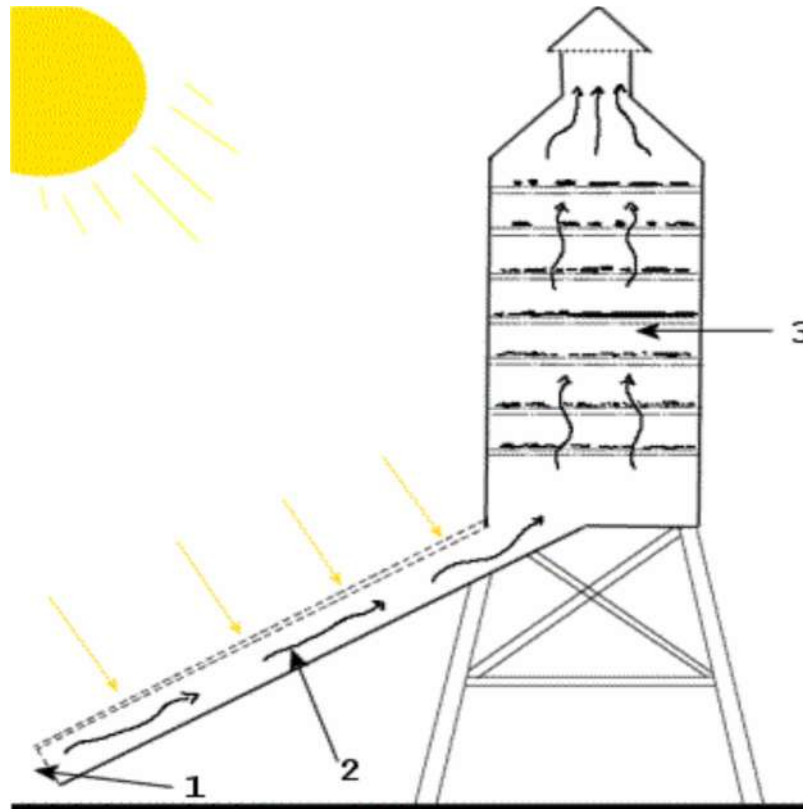
**II.9.1 Séchoir solaire direct:**

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chères comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles). Néanmoins l'interaction direct rayonnement solaire produit engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments[10].

**II.9.2 Séchoir solaire indirect :**

Le séchoir solaire indirect (Fig. II.2) se compose essentiellement de deux parties: en amont un isolateur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur où l'air asséchant est chauffé et monte par convection naturelle ou forcée jusqu'à la chambre de dessiccation contenant les produits à

sécher où un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours du fluide caloporteur. Ce dernier sort vers l'extérieur de la chambre de dessiccation par le biais d'une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits. Ces systèmes possédant des isolateurs plans en amont sont plus performants et plus répandus que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : (couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive.....etc.) .Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agroalimentaires [10].



1. Entrée d'air 2. insolateur plan 3. claies 4. cheminée

Figure II.2: Séchoir solaire indirect [10].

### II.9.3 Séchoirs solaires mixtes :

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoir, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage [10].

### II.9.4 Séchoirs solaires hybrides :

Dans ce type de séchoir hybride (Fig. II.3) on utilise une des sources d'énergies auxiliaires (Électrique, gaz, fuel, bois, biomasse.....) Pour parer aux aléas climatiques et ajuster la température de l'air asséchant à la température fixe de consigne moyennant des thermoregulateurs. Les séchoirs solaires hybrides sont plus performants que les séchoirs

Solaires passifs, car ils peuvent fonctionner par temps couvert ou pendant la nuit. Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient: un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, nécessité d'approvisionnement local en électricité, gaz, pièce de rechange et demande un personnel qualifié pour la maintenance [10].

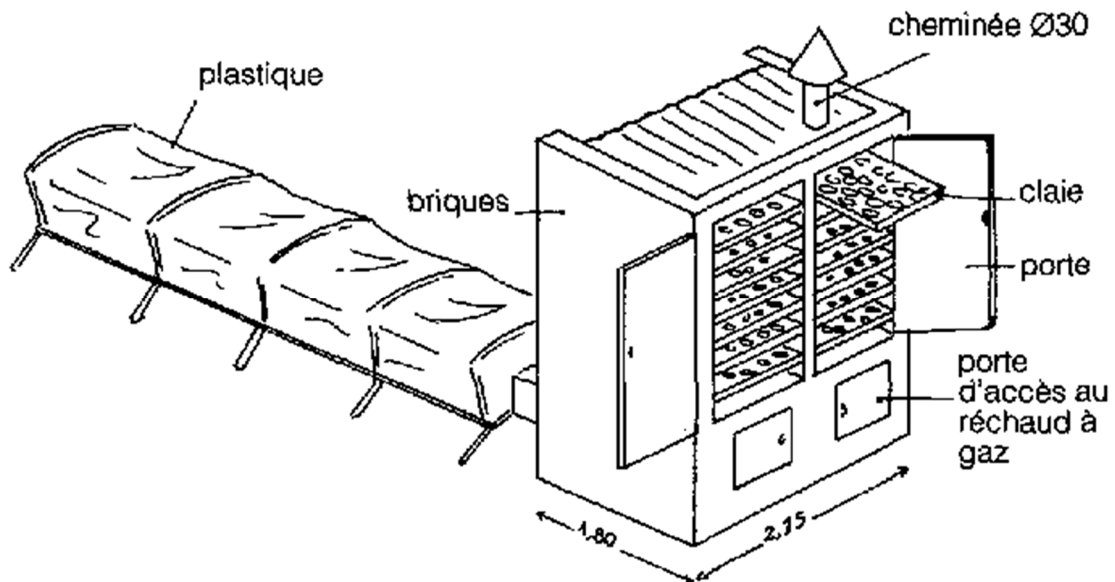


Figure II.3: Séchoir solaire hybride solaire gaz [10]

## II.10 Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire :

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients pour les différents types de séchoirs solaires

Type de séchoir solaire	Les avantages	Les inconvénients
Séchoir direct	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel [10].</li> <li>• pas besoin de main-d'œuvre qualifié [2].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Température élevée en fin de séchage [2].</li> <li>• Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil [10].</li> <li>• Jaunissement des légumes verts [10].</li> <li>• Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure [10].</li> </ul>
Séchoir indirect	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le produit n'est pas exposé directement au soleil [10].</li> <li>• Le produit conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C)</li> <li>• Température limitée (55°C) [10].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût important [2].</li> <li>• Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir [2].</li> </ul>
Séchoir hybride	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Affranchissement par rapport aux conditions climatiques [7].</li> <li>• Meilleur contrôle du séchage [7].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de production et d'investissement élevé [7].</li> <li>• Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz</li> </ul>

## II.10 La vitesse de séchage:

$$V_s = -\frac{dM_V}{S_s \cdot dt} = \frac{M_s dX}{S_s dt}$$

$$M_V = M_s dX$$

$$dX = X_e - X_s$$

$M_V$  : La masse d'eau évaporée.

$M_s$  : La masse de produit sec.

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

$X_s$  : Teneur en eau de produit à la sortie.

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

$S_s$  : La surface de séchage.

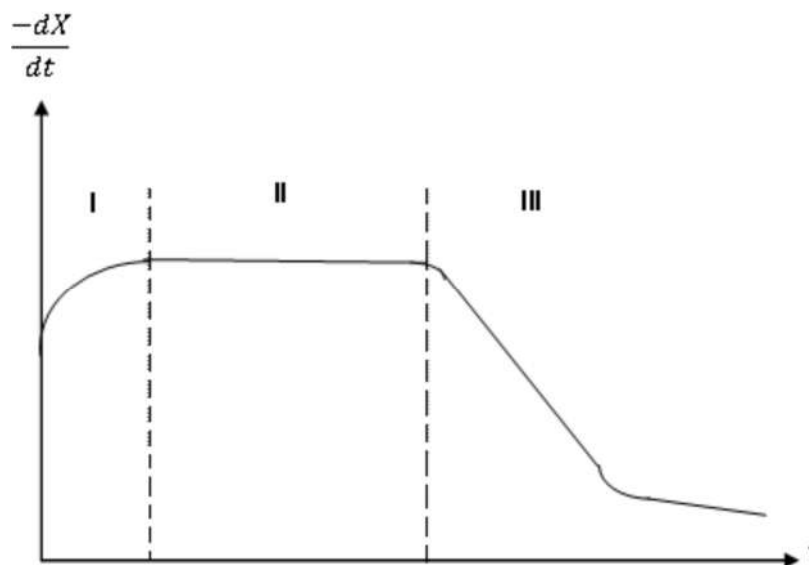


Figure II.4 : Vitesse de séchage en fonction du temps [11].

Dans la courbe ci-dessus est schématisée la variation de la vitesse de séchage en fonction du Temps, comme on observe l'opération de séchage se fait en trois périodes :

- **La première période : Période de mise en température (région I)** : La période de Mise en température disparaît pratiquement quand le produit est en particules ou en Feuilles, elle correspond à la montée en température du matériau humide, jusqu'à Atteindre la température de bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global [11]. Dans cette période, l'humidité du produit varie mais pas sensiblement, et la Température du produit varie (croît ou décroît) jusqu'à la température humide [11].

- **La deuxième période : Période à allure constante (région II) :** Cette période n'existe que si l'eau libre s'évapore en surface; l'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide; l'activité de l'eau ( $a_w$ ) à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit enthalpie. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaires à l'évaporation de l'eau sortant du produit [11].
- **La troisième période : Période de ralentissement (région III) :** Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage [11].

### II.11 La cinétique de séchage [12] :

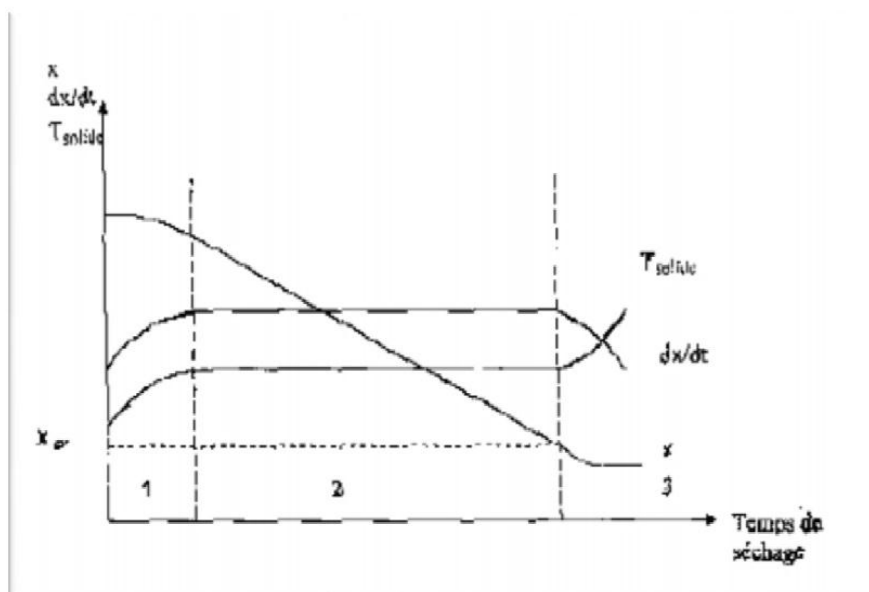


Figure II.5 : Cinétique de séchage [12]

- **Période (1) : période transition.**

L'humidité du produit dans cette période varie mais pas sensiblement et la température du produit varie (croît ou décroît) jusqu'à la température humide.

- **Période (2) : période à vitesse de séchage constant.**

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

forces capillaires ne peuvent plus soutenir la vaporisation de surface, et couvre généralement une grande partie du temps séchage.

- **Période (3) : période à vitesse de séchage décroissante.**

La quantité d'eau amenée à la surface par les forces capillaires est insuffisante pour maintenir une vaporisation constante.

Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :

Disparition de l'eau libre en surface de produit :

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

- L'épaisseur du produit :

Si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie le ralentissement de l'allure de séchage.

- La diffusivité de l'eau dans le produit :

Elle varie avec la teneur en eau du produit. Plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

- La résistance mécanique des parois cellulaires intactes:

Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

- Le croutage:

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

## II.12 Les paramètres influents sur la cinétique de séchage [13] :

- Température de l'air de séchage ( $T_a$ )
- Humidité relative de l'air de séchage ( $H_r$ )

- La vitesse de l'air de séchage ( $V_a$ )
- Le taux de recyclage de l'air de séchage
- Le calibre du produit à sécher
- L'épaisseur du produit à sécher ( $E_p$ )

### **II.12.1 Influence de la température de l'air de séchage ( $T_a$ ):**

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage.

Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air.

Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air élevée. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau dans le produit deviennent importantes.

### **II.12.2 Influence de l'humidité de l'air de séchage ( $H_r$ ):**

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.

### **II.12.3 Influence de la vitesse de l'air de séchage ( $V_a$ ):**

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.12.4 Influence de taux de recyclage de l'air de séchage:**

Le recyclage est d'une grande importance dans les opérations de séchage car quoique l'air sortant du séchoir soit plus humide, sa température est élevée.

### **II.12.5 Le calibre du produit à sécher:**

La vitesse de déshydratation dépend en outre de la vitesse de diffusion intracellulaires de l'eau de dilution du suc cellulaire; fonction elle-même de l'épaisseur du fruit. Le comportement de la datte au séchage dépend de leurs caractéristiques morphologiques. De ce fait, la datte est utilisée entièrement pour se rapprocher des conditions réelles des dattes dans l'industrie.

### **II.12.6 Influence de L'épaisseur du produit à sécher ( $E_p$ ):**



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

### II.13 modélisation mathématique de la cinétique du séchage [14] :

L'approche empirique de courbe de séchage en couche mince est très utilisable grâce à la facilité de mise en œuvre d'une part, et à la fiabilité de décrire le séchage en couche mince des produits agricoles et des plantes aromatiques et médicinales, d'autre part. Ce au suit quelques modèles mathématiques semi-empiriques et empiriques été utilisés pour décrire la cinétique de séchage.

**Tableau II.2.** Modèles mathématiques de la cinétique du séchage

Modèle	Equation
Newton	$X_r = \exp(-kt)$
Page	$X_r = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$X_r = a \exp(-kt)$
Logarithmic	$X_r = a \exp(-kt) + c$
Wang and Singh	$X_r = 1 + at + bt^2$
Two-Term Exponential	$X_r = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$
Page modifié	$X_r = \exp(-(kt)^n)$
Approche Diffusionnelle	$X_r = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$

Dans ces équations,  $X_r$  représente la teneur en eau réduite calculée suivant la relation :

$$X_r = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$$

$X$  : est la teneur en eau au temps  $t$  (kg d'eau/kg de m.s)

$X_0$  : la teneur initiale en eau (kg d'eau/kg de m.s)

$X_e$  : la teneur en eau à l'équilibre (kg d'eau/kg de m.s )

**II.14 Conclusion :**

Ce chapitre présente une définition du phénomène du séchage solaire, de l'ampleur de son effet, de son utilisation, ce dernier étant représenté par des dispositifs appelés séchoirs solaires.

Ces types de séchoirs solaires sont mentionnés dans ce chapitre, tels que direct, indirect, mixte, hybride, etc.

# **Partie pratique**

# **Chapitre III:**

## **partie expérimentale**

### III.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale du processus du séchage carotte dans lequel nous allons déterminer les courbes de cinétique et faire une comparaison de la composition physico-chimique de différentes variétés, en plus déterminer un modèle mathématique approprié du séchage de produit (la carotte).

### III.2. Matériels et méthodes :

#### III.2.1 Le choix de la plante végétale :

Nous avons choisi la carotte à la base des critères suivants :

- La disponibilité de la plante carotte.
- Un produit indispensable dans la cuisine mondiale et surtout Algérienne.
- Un produit utilisé pendant toutes les saisons.
- L'importance dans l'industrie alimentaire.

#### III.2.2. Le lieu de prélèvement de carotte :

Carotte est retenues du marché de Bouda à Adrar dans le mois de mars.

#### III.2.3. Produit végétal :

##### III.2.3.1. Carotte :

La carotte (*Daucus carotta*) est une plante bisannuelle de la famille des apiécées (aussi appelée ombellifère), largement cultivée pour sa racine pivotante charnue, comestible de couleur généralement orangée. C'est une racine riche en carotène, son apport énergétique est de 31 kilocalories par 100g.



Figure III.1 : morceaux des carottes

##### III.2.3.2. Méthodes d'analyses :

- 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.2.3.3. Protocole de séchage :

Pour suivre la quantité d'eau de carotte évaporée pendant un certain temps. Nous Suivons les étapes suivantes :

- préparer les carottes
- Couper les carottes en fines lanières de 5 mm.
- Répartir les tranches en 4 échantillons, chaque échantillon contenant 0.8 Kg dans 4 clés de séchage
- Enumérer les clés (1, 2, 3 et 4).
- Entrer les échantillons 1et 2 dans le séchoir indirect ; 3 reste a l'aire et 4 dans le séchoir directe.



Figure III.2 : les 4 échantillons des carottes avant et après le séchage

### III.2.3.4. Détermination de composants de carotte :

#### III.2.3.4.1. Détermination de pH :

➤ **Principe :**

Détermination et unité pH de la différence de potentiel existant cote deux électrodes en verre plongées dans une solution aqueuse de la pomme de terre broyée.

➤ **Mode opératoire :**

- 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 volumed'eau distillée.
- Chauffer au bain-marie pendant 30 mn en remuant de temps avec une baguette deverre.
- 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.3 : Détermination de pH

#### III.2.3.4.2. L'acidité Titrage:

##### ➤ Principe :

Titration de l'acidité d'une solution aqueuse avec une solution d'hydroxyde de sodium en présence de phénolphthaléine comme indicateur.

##### ➤ Mode opératoire :

- Peser à 0.01g près au moins 25g de l'échantillon à analyser.
- Placer l'échantillon dans une fiole conique avec 50 ml d'eau distillée, puis mélanger jusqu'à l'obtention d'un liquide homogène.
- Adapter un réfrigérant à reflux à la fiole conique puis chauffer le contenu au bain-marie pendant 30 mn.
- Refroidir, transvaser quantitativement le contenu de la fiole conique dans une fiole jaugée de 250 ml et compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée, bien mélanger puis filtrer.
- Prélever à la pipette 25 ml du filtrat et les verser dans un bêcher.
- Ajouter 0.25 à 0.5 ml de phénolphthaléine et tout en agitant, titrer avec de la solution d'hydroxyde de solution 0.1 N jusqu'à l'obtention d'une couleur rose persistante pendant 30 secondes



Figure III.4 : Détermination de l'acidité

➤ **Expression des résultats :**

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

$$A\% = \frac{250.V_1.100}{V_0.M.10} . 0.07 \dots\dots\dots(8)$$

M : La masse, en grammes de produits prélevé.

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

V1 : le volume en millilitres de la solution d'hydroxyde de solution utilisée (0.1 N).

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

**III.2.3.4.3. 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.



Figure III.5 : détermination de l'activité d'eau

**III.2.3.4.4. Teneur en eau:**

➤ **Principe :**

La teneur en eau est déterminée sur 3g de la carotte dans une capsule en porcelaine puis séchée dans une étuve, à la pression atmosphérique, à une température de 103±2°C.

➤ **Mode opératoire :**

- 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 3g de carotte 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 60 minutes).

#### ➤ Expression des résultats

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

$$H\% = \frac{(M_1 - M_2)}{P} \cdot 100 \dots \dots \dots (9)$$

M1 : la masse de la matière fraîche avant séchage.

M2 : la masse de la matière fraîche après séchage.

P : masse de la prise d'essai.

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



Figure III.6 : Détermination de Teneur en eau

#### III.2.3.4.5. Teneur en cendre / matière organique:

##### ➤ Principe :

La carotte est calcinée à 550 °C dans un four à moufle jusqu'à obtention d'une Cendre blanchâtre de poids constant.

##### ➤ Mode opératoire :

La carotte (3g) est introduite dans une capsule pendant 24 heures à 105°C

- Placer les capsules dans un four réglé 550 °C durant 5 heures jusqu'à l'obtention d'une

couleur grise, claire ou blanchâtre.

- Retirer les capsules du four et les mettre à refroidir dans le dessiccateur, puis les peser.



Figure III.7 : répartition des capsules dans le four

**Expression des résultats :**

$$MO\% = \frac{(M1-M2)}{P} \cdot 100 \dots \dots \dots (10)$$

Soit:

MO%: Matière organique

M1: Masse de la capsule + prise d'essai

M2: Masse de la capsule + cendres

P : Masse de la prise d'essai.

La teneur en cendres (Cd) est calculée comme suit :

$$Cd = 100 - MO \% \dots \dots \dots (11)$$

**III.2.3.4.6. Teneur en sucre :**

➤ **Principe :**

Le dosage des sucres réducteurs est effectué par la méthode de phénol/acide sulfurique introduite par Dubois et Cool, il se forme des chromophores de couleur jaune-orange. Leur apparition est suivie en mesurant l'augmentation de la densité optique (D.O) à 400 nm (Linden, 1994).

➤ **Mode opératoire :**

- Préparation d'échantillon :

On prépare 1g(p) +300ml d'eau distillée +3g de CaCO<sub>3</sub> puis on réchauffe le mélange pendant 30min jusqu'à ébullition avec le maintien d'agitation. Après le refroidissement du mélange on lui ajoute l'eau distillée jusqu'à un litre de solution, de notre produit et une quantité d'acétate de plomb.

- 1<sup>er</sup> filtration :

On réalise la première filtration pour éliminer les protéines par l'acétate du plomb, ensuite on ajoute une petite quantité d'oxalate de potassium.

Saccharose= (sucre totaux-sucre réducteur)\*0.95

- 2<sup>ème</sup> filtration :

Le but de la 2<sup>ème</sup> filtration, est d'éliminer le plomb précipité par l'oxalate de potassium.

- le dosage:

Après la 2<sup>ème</sup> filtration, on a eu un extrait filtré duquel on a pris 1 ml qu'on le mélange avec 1 ml de phénol (5%) et 5 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré avec le maintien d'agitation, puis on a lu la D.O du témoin et de l'échantillon. Pour pouvoir calculer la concentration en sucres réducteurs de l'échantillon utilisé on a préparé différentes concentrations du glucose (hexose) et d'arabinose (pentose) dont leur D.O est respectivement lues à 490 nm et 485 nm. Les concentrations pour les deux sucres, sont les suivantes : 0.01 ,0.02 ,0.1 ,0.2 ,0.5 ,1 . Par un simple calcul, on a pu avoir la concentration en hexose et pentose de notre échantillon.

#### Remarque :

Le témoin est composé de 1 ml d'eau distillée, 1ml de phénol (5 et 5 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré)



**Figure III.8 :** Détermination du sucre réducteur par spectrophotomètre

**III.2.3.4.7. Détermination de la teneur en protéines :****➤ Principe**

Le principe de la méthode est basé sur la transformation de l'azote organique en sulfate d'ammonium sous l'action de l'acide sulfurique en présence d'un catalyseur, et dosé après déplacement en milieu alcalin et distillation sous forme d'ammonium.

**➤ Mode opératoire**

- Introduire dans un matras de minéralisation 1 g d'échantillon, ajouter une pincée de catalyseur (sulfate de cuivre et de potassium) ;
- Ajouter 15 ml d'acide sulfurique pur ;
- Utiliser un chauffage progressif ; d'abord une attaque à froid pendant 15 mn jusqu'à l'apparition de vapeur blanche d'anhydride sulfurique, puis le chauffage est rendu plus énergique, attaque à chaud pendant 4 à 5 heures ;
- Quand la solution devient limpide, elle est refroidie et complétée à 100 ml avec de l'eau distillée ; La distillation se fait dans un distillateur automatique (VELP) où l'ajout de 20 ml de lessive de soude à 35 % dans le matras et 25 % d'acide borique dans une fiole de 250 ml est réalisée;
- Le dégagement d'ammoniac est récupéré dans une solution d'acide borique contenant l'indicateur coloré (mélange de bleu de méthylène et rouge de méthyl). L'excès d'ammoniac est alors dosé par l'acide sulfurique 0,05 N dans un triturateur automatique.

**NB :** Un témoin est réalisé dans les mêmes conditions sans échantillon.

**✓ Expression des résultats :**

La teneur en azote total est déterminée par la formule suivante :

$$N\% = \frac{V}{V'} * (N - N') * 0.05 * 1.4}{P} \dots\dots\dots(12)$$

$V$  : Solution minéralisée et complétée à 10 ml ;

$V'$  : Solution de la soude ajoutée 20 ml ;

$N$  : La quantité d'acide sulfurique lue après titration ;

0,05 : Normalité d'acide sulfurique ;

$P$  : Masse de la prise d'essai 1 g.

$$\text{Protéine} = \text{N\%} * 6.25 \dots \dots \dots (13)$$

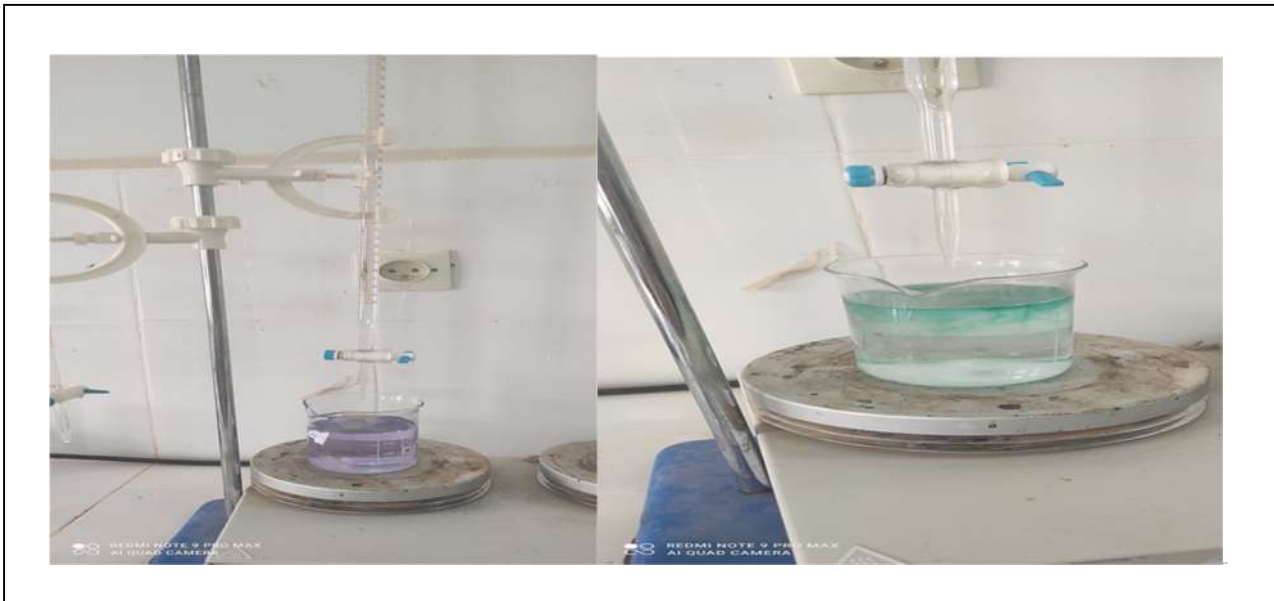


Figure III.9. Détermination de la teneur en protéines

#### III.2.3.4.8. Détermination de la teneur en lipides :

##### ➤ Principe

Les corps gras sont les substances organiques qui peuvent être extraites à partir des fruits par des solvants organiques non polaires au moyen de l'appareil Soxhlet.

##### ➤ Mode opératoire

- Sécher le ballon de 500 ml à l'étuve à 105 °C pendant une heure;
- Refroidir le ballon au dessiccateur pendant 30 mn ;
- Peser le ballon à la précision de 0,001g ;
- Broyer 25 g d'échantillon dans un mortier ;
- Peser 20 g environ de broyat ;
- Introduire le broyat dans la cartouche en papier filtre ;
- Placer la cartouche avec la prise d'essai à l'intérieur de l'appareil Soxhlet ;
- Verser 200 ml de l'éther de pétrole dans le ballon et 50 ml dans l'extracteur ;
- Chauffer le ballon sur le chauffe ballon pendant 4 heures (20 siphonages par heure) jusqu'à épuisement de la matière grasse ;
- Après, éliminer le solvant du ballon par distillation ;
- Sécher le résidu du ballon dans une étuve à 70-80 °C ;

- Refroidir le ballon au dessiccateur pendant 30 mn ;
- Peser le ballon avec l'huile à la précision de 0,001 g ;
- Répéter l'opération de séchage jusqu'à l'obtention d'un poids constant du ballon.

➤ **Expression des résultats :**

La teneur en matière grasse est déterminée selon la formule suivante :

$$MG\% = \frac{(P_1 - P_2)}{P_3} \cdot 100 \dots \dots \dots (14)$$

**Soit :**

$P_2$  : Poids du ballon avec l'huile extraite (g).

$P_1$  : Poids du ballon vide (g).

$P_3$  : Masse de la prise d'essai (g).



Figure III.10 : Détermination de la teneur en lipides

**III.3. Résultats et discussion :****III.3.1. Les composants physico-chimies de produits :**

Après la réalisation des analyses de produits, nous avons trouvé les résultats suivants :

**Tableau III.1: Les composants physico-chimies de produits**

	(avant le séchage)	directe (après le séchage)	Indirecte (après le séchage)	à l'air (après le séchage)
H%	90.26	6.077	6.3896	6.936
MS%	9.74	93.923	93.6104	93.064
MO%	6.835	80.477	89.888	78.088
MM%	2.905	13.446	3.7224	14.976
MG%	0.65	1.690	1.320	0.760
pH	6.430	6.140	6.160	6.220
Acidité	0.070	1.96	2.17	1.050
Sucre réducteur	8.30	15.73	14.60	7.4
Activité d'eau	0,901	0.061	0.064	0.07
protéine	0.5	0	0.284	1.26

Nous remarquons que l'humidité et l'activité d'eau sont plus élevées avant séchage par rapport à leur taux après le séchage.

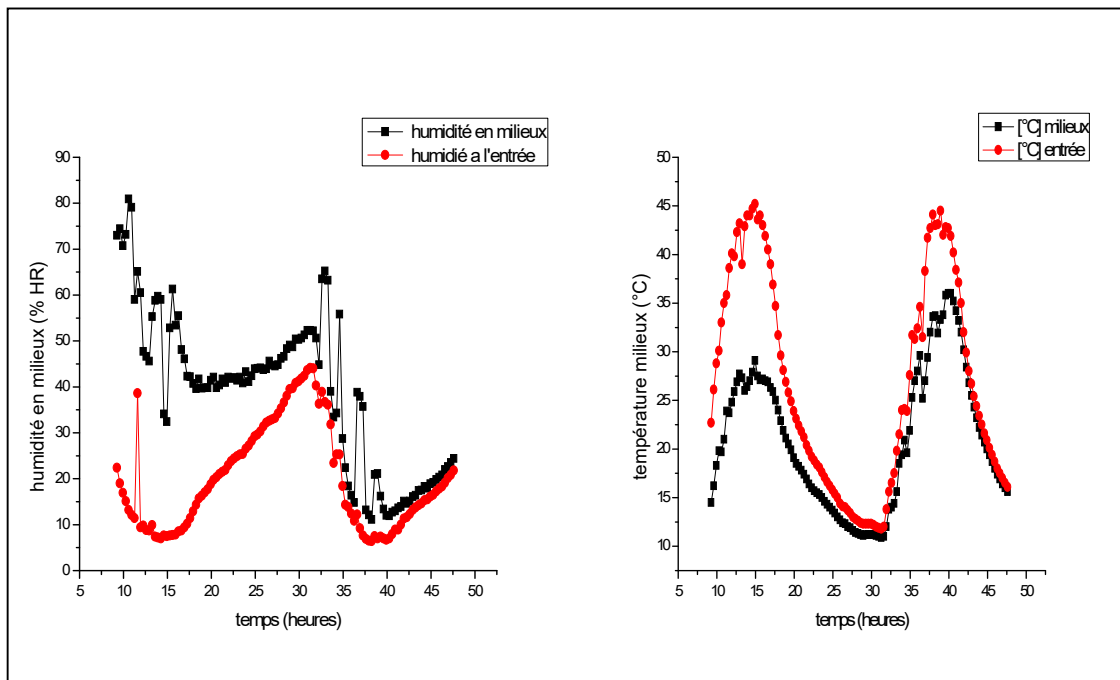
-si on l'on compare leur taux après séchage, nous constatons que le séchage direct est le plus efficace car son taux est la plus petites que le séchage indirect et dans l'aire.

En ce qui concerne le sucre, le protéine et la matière organique elles sont inversement proportionnelles avec l'eau (elles augmentent avec la diminution du taux d'eau), ca veut dire que la matière après les séchage à un meilleure valeur alimentaire .

**III.3.2 Cinétique de séchage :**

**III.3.2.1 Variation de la température et de l'humidité :**

Après avoir mis les échantillons dans le séchoir on enregistre la valeur de l'humidité et la température à l'aide de l'appareil «Opus»



**Figure III.11 : Evolution de l'humidité et de la température à l'entrée et au milieu de la chambre indirecte**



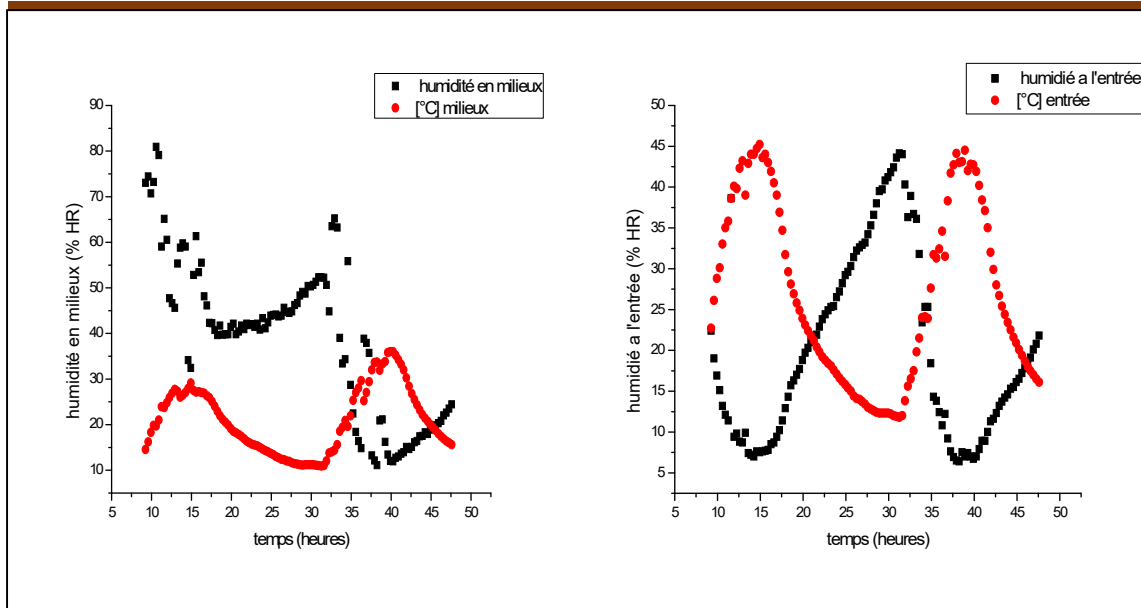


Figure III.12 : comparaisant entre la variation de la température et de l’humidité.

L’analyse de résultats :

Durant le jour, la différence de l’humidité de l’air à l’entrée et celui à la sortie du séchoir augmente avec le temps spécialement pendant les heures de forte irradiation quand la température atteint son niveau maximal. Ceci provoque une augmentation de l’humidité dans le séchoir (l’humidité de l’air est inversement proportionnelle avec sa température). Cette augmentation de température cause une augmentation du taux de séchage ce qui engendre une évaporation signifiante de l’eau (teneur en eau).

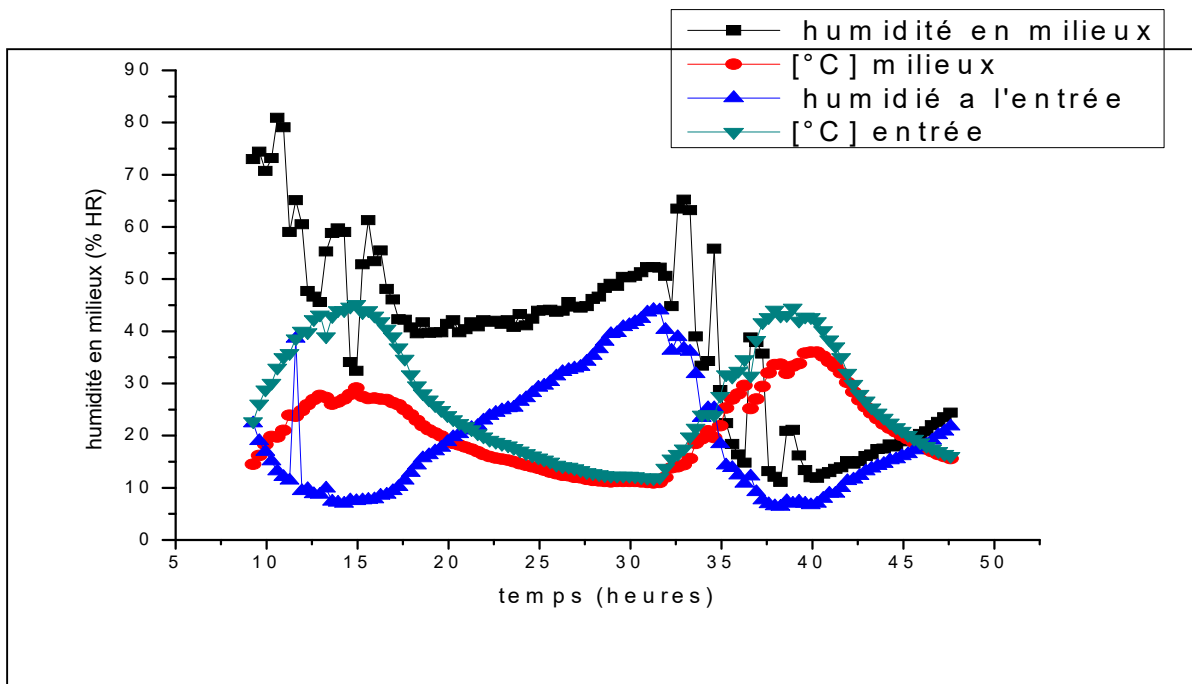


Figure III.13 : variation de la température et l’humidité à l’entrée et au milieu de séchoir en fonction du temps

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 l'humidité de l'air est inversement proportionnelle avec sa température, soit à l'entrée ou bien au milieu de séchoir.

On a aussi constaté des piques au courbes, spécialement dans les courbes d'humidité, et sa à cause d'ouverture le porte de séchoir. Cela provoque la sortie de l'aire saturé d'humidité et chute terrible de l'humidité un retour à la hauteur après la fermeture.

### III.3.2.2 Etude de la cinétique de séchage solaire:

Afin d'étudier la cinétique de séchage, nous avons préparé des tranches des carottes et mis 800g dans chaque claie, nous avons mis quatre claies, deux à l'intérieur de la chambre du séchoir solaire( séchage indirect), une à l'extérieur du séchoir pour être séchée à l'air libre et une en haut de séchoir ( séchage directe). Ensuite, on pèse la masse après chaque heure de séchage, jusqu'à l'obtention d'une valeur constante. Cette opération de séchage a pris 48h pour atteindre des valeurs fixes.

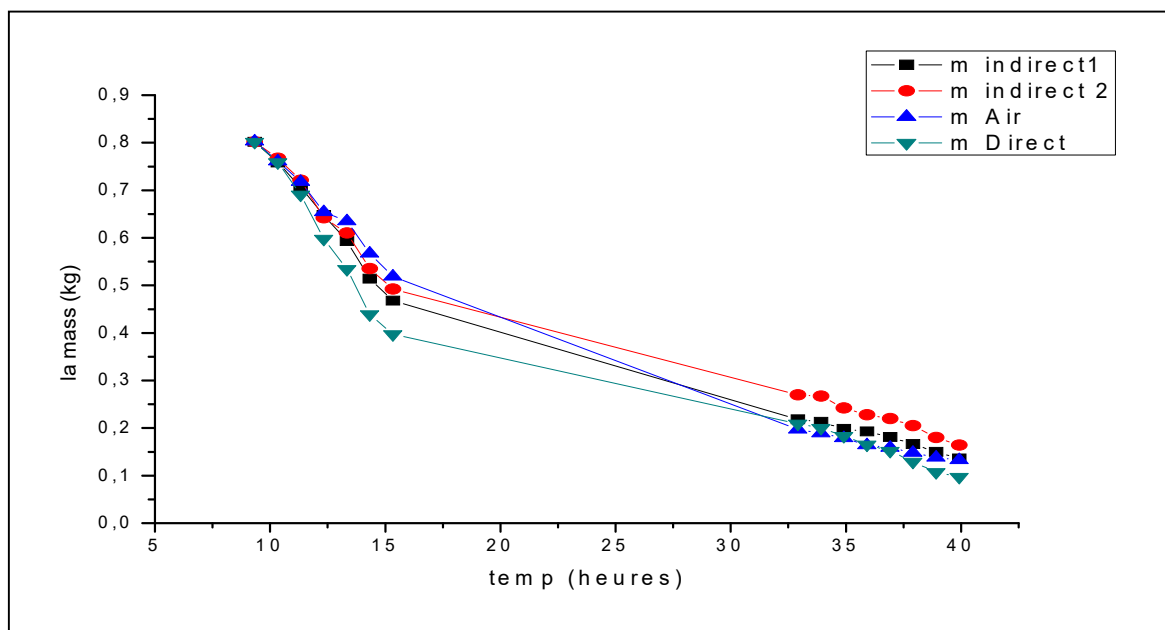


Figure.14: la cinétique de séchage du produit dans le séchoir solaire

La figure .14, Présente la cinétique de séchage du produit pour 48 heures de séchage, on remarque sur cette figure que la masse du produit diminue progressivement, et après 48 heures, elle commence à se stabiliser.

-la courbe de séchage direct (vert) est la plus basse, signifiant que le séchage direct atteint la valeur minimale de la teneur en eau, dans une durée minimale.

III.3.2.3 Comparative entre le séchage à l'air et séchoir solaire (indirecte):

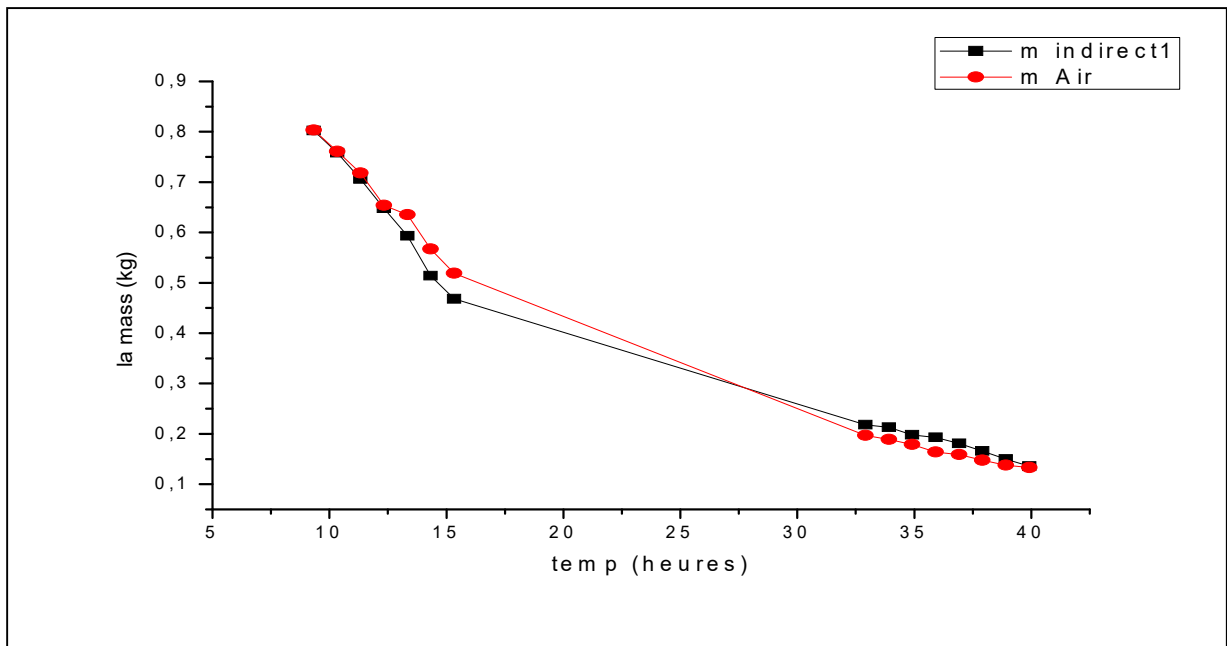


Figure III.15 : comparative entre le séchage à l'air et dans le séchoir solaire (indirect)

Notons également que le séchage dans le séchoir (indirect) a pris moins de temps que le séchage à l'air libre, indique que le séchage au séchoir solaire plus rapide que le séchage dans l'aire libre.

III.3.2.4 Comparative entre le séchage solaire (direct) et séchoir solaire (indirect):

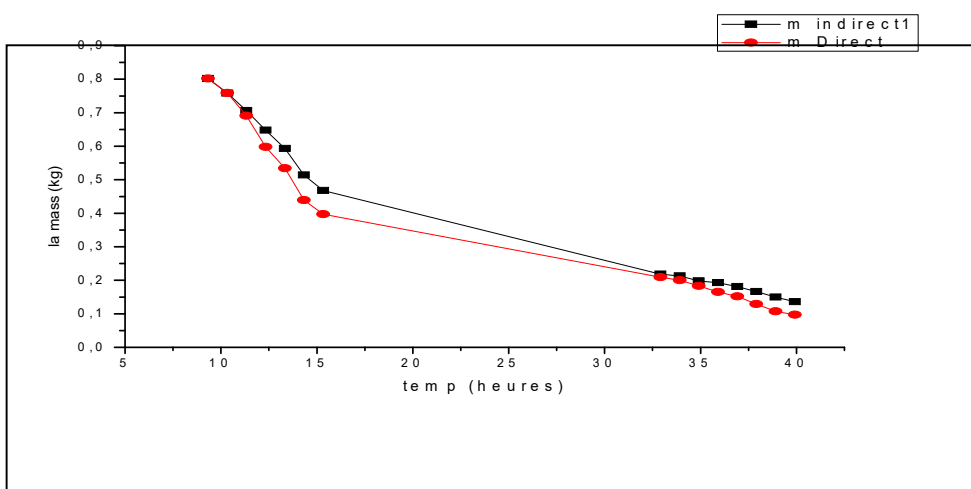


Figure .16 : comparative entre le séchage dans le séchoir solaire (direct) et dans le séchoir solaire (indirect)

On a bien remarqué que le séchage dans le séchoir (indirect) a pris plus de temps que le séchage dans le séchoir direct ce que indique que le séchage au séchoir solaire direct est plus rapide.

-après la stabilisation de masse on voit que la masse de produit résultant de séchage direct est moins que résultant du séchage indirect, ce qui confirme la remarque ci-dessus.

#### III.4 La modélisation :

C'est une représentation ou interprétation abstraite d'une réalité ou d'un phénomène physique, qui est accessible à l'analyse et aux calculs. Les modèles sont sous forme d'équations à une seule ou à plusieurs variables (Allaire, 2005).

##### III.4.1 Modélisation de la cinétique du séchage :

Les données expérimentales de la teneur en eau des carottes obtenues à différentes températures, ont été simulées à l'aide de 4 équations empiriques présentées dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Modèles mathématiques donnés par différents auteurs pour la cinétique de séchage

modèle	Equation du modèle
Wang and Singh	$Y = 1 + at + bt^2$
Two-Term Exponential	$Y = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kt)$
Newton	$Y = \exp(-kt)$
Logarithmic	$Y = a \exp(-kt) + c$

Dans ces équations, Y représente la teneur en eau réduite calculée suivant la relation :

$$Y = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$$

Où Y, est la teneur en eau au temps t (kg d'eau/kg MS), X<sub>0</sub>, la teneur initiale en eau (kg d'eau/kgMS) et X<sub>e</sub>, la teneur en eau à température à l'équilibre (kg d'eau/kg MS). X<sub>e</sub> est négligeable devant X<sub>0</sub> et X, l'équation (III.5) se réduit à :

$$Y = \frac{X}{X_0}$$

Les critères d'évaluation de la qualité de lissage des résultats expérimentaux sont le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>), le ki-carré réduit (x<sup>2</sup>) et la racine carrée de l'erreur

quadratique moyenne (RMSE) ‘Root Mean Square Error’. Ces paramètres sont calculés suivant les relations :

$$x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ei} - X_{pi})^2}{N - n}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{x^2}$$

Où  $X_{ei}$ , est la 1<sup>ière</sup> valeur expérimentale,  $X_{pi}$  la 1<sup>ière</sup> valeur prédite par le modèle,  $N$ , le nombre d’observations et  $n$ , le nombre de constante du modèle.

Le coefficient de détermination  $R^2$  est l’une des premiers critères d’évaluation de la qualité de lissage des résultats expérimentaux. Le modèle qui décrit le mieux la cinétique de séchage est celui pour lequel la valeur de  $R^2$  est la plus grande et les valeurs de  $x^2$  et de RMSE les plus faibles.

Les différents modèles mathématiques examinés sont ajustés aux données expérimentales en appliquant la méthode de régression non linéaire. Le logiciel utilisé est «Curve-Expert».

#### III.4.2 Résultats de la modélisation :

La régression non linéaire est utilisée pour déterminer les constantes du modèle. L’efficacité de ce dernier est indiquée à partir d’un paramètre statistique qui est le facteur de corrélation  $R^2$  ; est l’analyse de résidus. L’analyse de cette régression a été effectuée au moyen d’un programme informatique «curve-Expert ».

III.4.2.1 Résultats de la modélisation de la courbe de carotte : A-Indirect

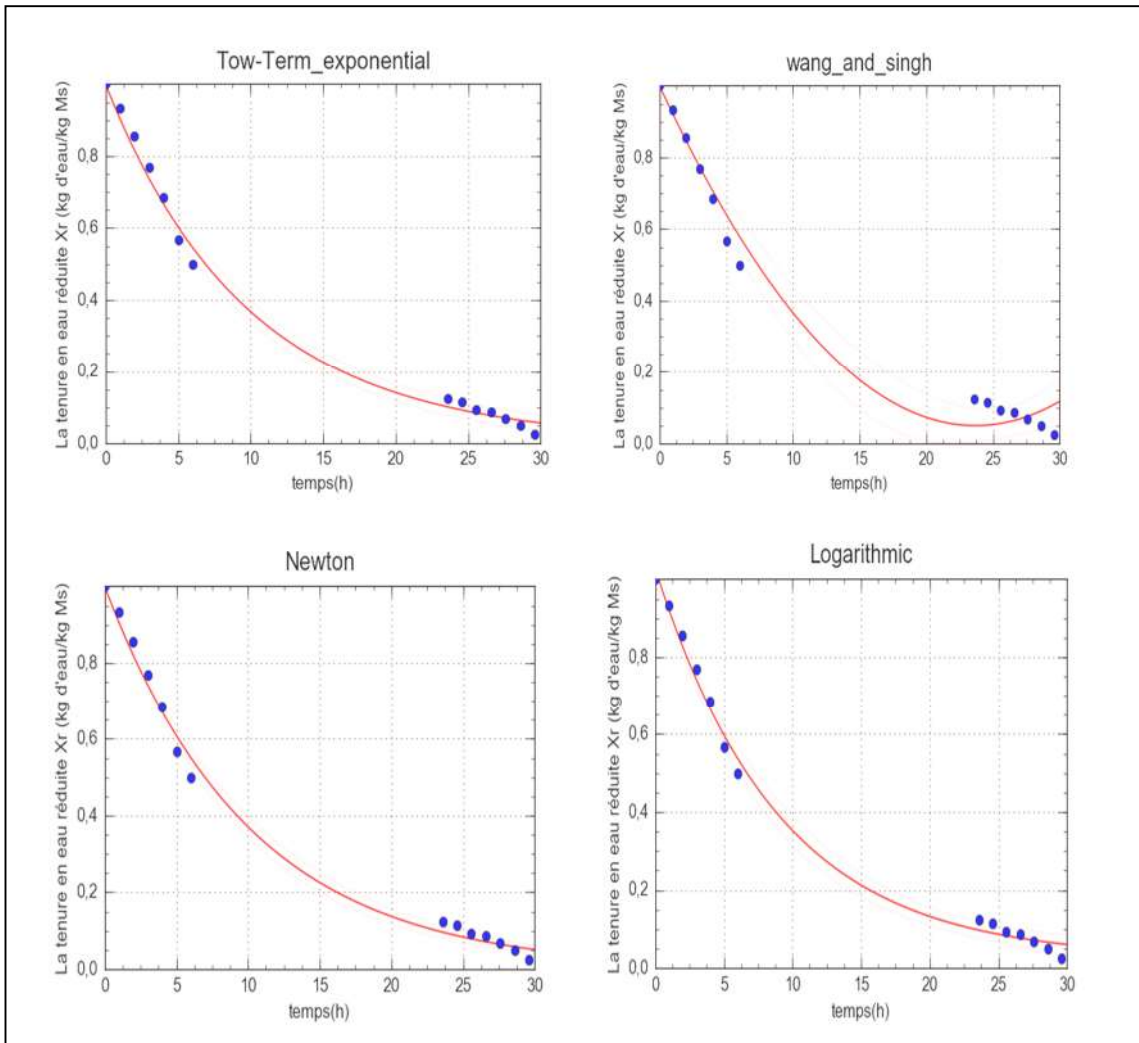


Figure III.17 : lissage des courbes de cinétique expérimentales dans le séchoir solaire par les 4 modèles mathématiques

Tableau III.3: Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduite comme Fonction du temps pour le séchage indirect

modèle	équation	a	B	k	$\chi^2$	RMSE	$R^2$
Newton	$\exp(-kx)$	--	--	0.0992	0.9972	0.0282	0.9944
logarithmic	$a \exp(-kx) + b$	1,0035	0.0252	0.1119	0.9976	0.0281	0.9953
Two-Term	$a \exp(kx) + (1-a) \exp(-kx)$	0.6507		0.1161	0.9973	0.0289	0.9945
Wang and singh	$1 + ax + bx^2$	-0.0802	0.0017	--	0.9909	0.0524	0.982

Tous les modèle utilisés peuvent décrire l'évolution de la teneur en eau réduite des produits avec

$R^2$  variant de 0.982 à 0.9953 et  $X^2$  variant de 0.9909 à 0.9976

Le modèle " Logarithmique "

peut être proposés comme étant le modèle le plus fort pour décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.

### III.4.2.2 Résultats de la modélisation de la courbe de carotte :

**A-direct:**

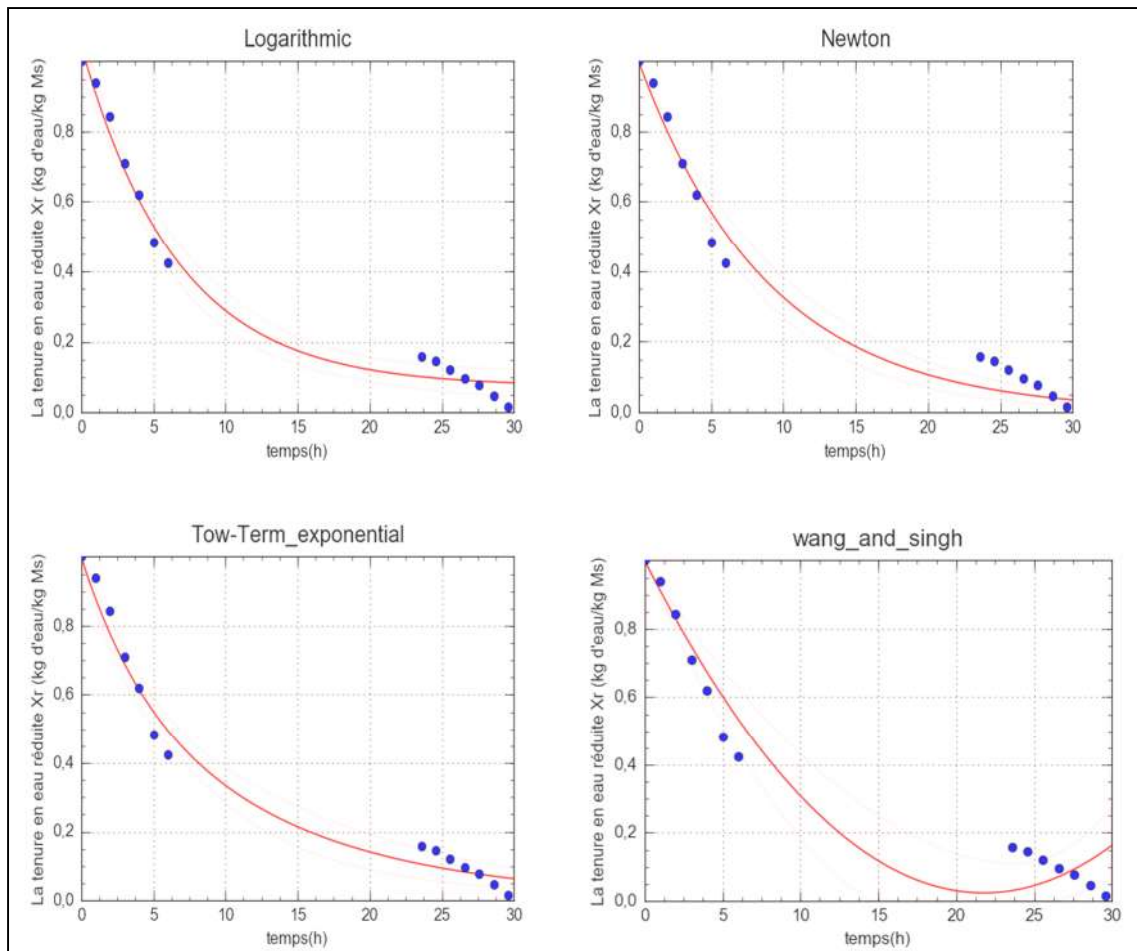


Figure III.18 : lissage des courbes de cinétique expérimentales dans le séchoir solaire direct par les 4 modèles mathématiques.

Tableau III.4: Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduite comme fonction du temps pour la séchage direct

modèle	équation	a	B	k	$x^2$	RMSE	$R^2$
Newton	$\exp(-kt)$	----	----	0.1119	0.9875	0.05634	0.9752
logarithmic	$a \exp(-kt) + b$	0.9726	0.0728	0.0150	0.9930	0.0458	0.9861
Two-Term	$a \exp(kt) + (1-a) \exp(-kt)$	0.3326	----	0.2369	0.992	0.0478	0.9835
Wang and singh	$1 + at + bt^2$	-0.0897	0.0026	----	0.9731	0.0859	0.9469

Tous les modèles utilisés peuvent décrire l'évolution de la teneur en eau réduite des produits Avec  $R^2$  variant de 0.9469 à 0.9861 et  $x^2$  variant de 0.9731 à 0.993. Le modèle « logarithmic » peut être proposés comme étant le modèle le plus fort pour décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.

**III.4.2.3 Résultats de la modélisation de la courbe de carotte :**

**A-Lair :**

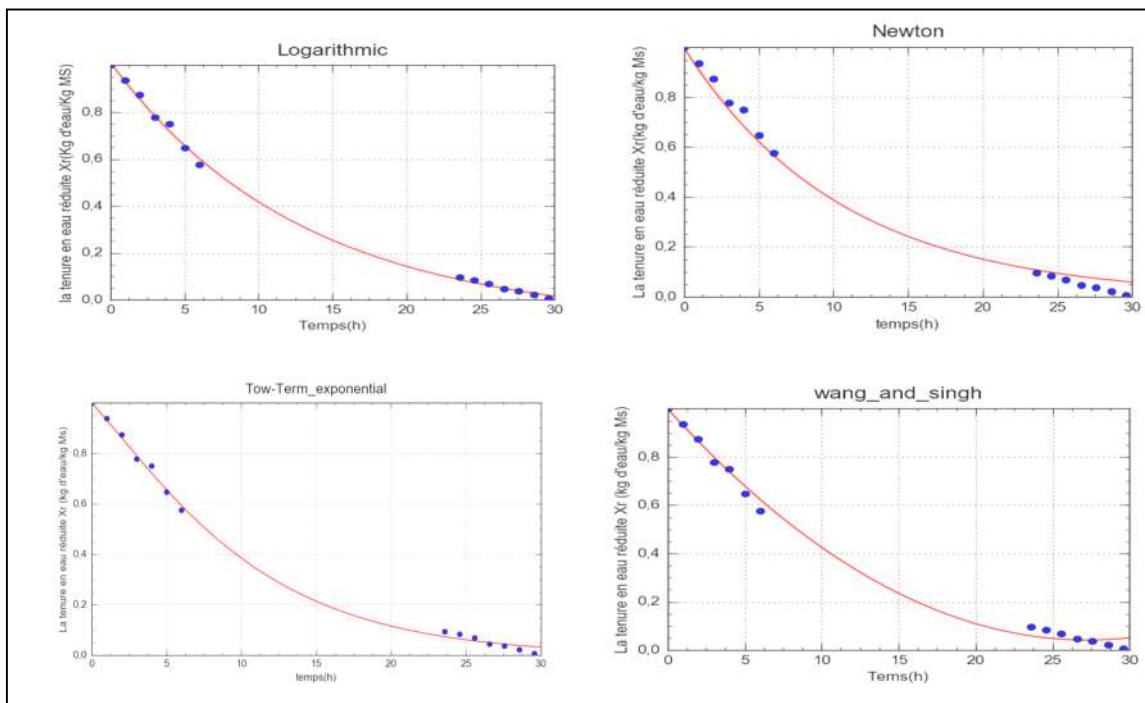


Figure III.19 : lissage des courbes de cinétique expérimentales à L'air par les 4 modèles mathématiques



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

modèle	équation	a	B	k	$\chi^2$	RMSE	$R^2$
Newton	$\exp(-kt)$	---	---	0.0945	0.9961	0.0354	0.9922
logarithmic	$a \exp(-kt) + b$	1,1064	-0.0927	0.0772	0.9993	0.0160	0.9986
Two-Term	$a \exp(kt) + (1-a) \exp(-kt)$	1,7113	----	0.1312	0.9992	0.0169	0.9983
Wang and singh	$1 + at + bt^2$	-0.0703	0.0013	---	0.9977	0.0278	0.9955

Tous les modèles utilisés peuvent décrire l'évolution de la teneur en eau réduite des produits avec  $R^2$  variant de 0.9922 à 0.9986 et  $\chi^2$  variant de 0.9961 à 0.9993. Le modèle "newton" peut être proposé comme étant le modèle le plus faible pour décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.

### III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre de l'étude expérimentale, les analyses physicochimiques de produit objet d'étude, nous ont permis de définir la composition physicochimique du carotte et de définir les courbes de cinétique de séchage solaire,

Enfin la modélisation de ces courbes permet de définir le modèle logarithmique ; le modèle le plus approprié en décrivant ce phénomène.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

Dans ce mémoire, nous avons mené nos recherches sur le séchage du carotte en raison de sa grande importance dans le domaine alimentaire. Nous sommes appuyés sur le séchage solaire direct et indirect pour l'étude de la caractérisation physicochimique des carottes, essentiellement pour diminuer l'activité d'eau qui reflète à l'inhibition de la croissance des micro-organismes pathogène tels que la "*Staphylococcus aureus*"; en préservant les propriétés nutritionnelles et organoléptique (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 direct, indirect 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, le meilleur modèle remarqués, en se basant sur les paramètres statistiques, est le **Logarithmique pour** tous les méthodes de séchage ( $R^2= 0.9861$  et  $RMSE= 0.0458$  pour le séchage direct )et le modèle plus faible c'est celui de **Newton**. 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 carottes . 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

### Références

#### ❖ CHAPITRE I :

[1] wikipedia.org.....27/04/2022

[2] www.cea.fr ...20/12/2017...

[3] : CHABANI Zeyneb ; La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030 ; université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES ; 2014.

[4] : KHELIFA Abdelkrim ; Etude numérique et modélisation d'un capteur solaire hybride PV/T ; université EL-HADJ LAKHDAR- Batna ; 2011.

[5] : Développement de l'énergie solaire.

[6]: RETERI Ahmed et FENTROUCI Ahmed ; Etude du refroidissement des capteurs hybrides photovoltaïque- thermique (PV/T) à l'aide des MCP ; université Abou Bekrbelkaid-Tlemcen ; 2013.

[7]: KABOUCHE AZOUZ ; Architecture et efficacité énergétique des panneaux solaires. Cas d'étude : simulation sous TRNSYS 16.1 d'un appartement d'une tour multifonctionnelle a constantine ; université Mentouri ; 2012.

[8]: TALBI Fouzia et BECHEKOUR Rima ; Etude et dimensionnement d'un système de chauffage solaire application au logement individuel type F3 à Bouira ; université de Bouira Mohand oulhadj ; 2017.

[9]: RAHMANI Djeloul ; Analyse d'un système de concentration solaire pour la production d'hydrogène (cas de l'Algérie) ; université Hassiba Ben Bouali de Chelef ; 2012.

#### ❖ CHAPITRE II :

[1].BEN SEDDIK.ABDELLOUHAB. modélisation et simulation de séchage de la figue par des séchoir solaire indirects fonctionnant en convection forcée . mémoire magistère 2011

[2]. SAID Bachir. Modélisation mathématique de séchage solaire indirect des dattes Deglet-Nour réhumidifiées . mémoire de master :université kasdi merbah Ouargla.2015

[3].AKMEL DJEDJRO CLÉMENT .séchage solaire des feves cacao : étude expérimental et modélisation de la cinétique de séchage .thèse doctorat .2010

[4]: BENAMMAR Roumaïssa et GOURI Kaouthher ; Séchage solaire des produits agricoles. Université KASDI MERBAH OUARGLA ; 2018.

## Références

---

- [5] : BAHADJ Ahmed ; Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre ; université KASDI MERBAH OUARGLA ; 2014.
- [6] : H.Ben cheikch, M.OuldSidimed et Y.Draoui ; Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif ; université KASDI MERBAH OUARGLA ; 2011.
- [7] : S.CHOUICHA.(2010). Etude Expérimentale du Séchage Solaire des Dattes Humides et Impact sur la Qualité .Mémoire de Magister: Université Kasdi Merbah.Ouargla.
- [8] : A.KHENBLOUCHE.(2014). Etude et réalisation d'un nouveau procédé de séchage couplé à un système de chauffe-eau solaire. Mémoire de Master: Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- [9] : E. BENALIA.(2014). Exploitation de la source thermique de l'eau Albien dans le séchage solaire des produits agro-alimentaires .Mémoire de Master: Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- [10] : S. BOUGHALI.(2010). Etude et optimisation du séchage solaire des produits agroalimentaires dans les zones arides et désertiques. Thèse de Doctorat: Université Hadj-Lakhder. Batna.
- [11] : W.BELACHI. (2009). Application du séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaires .Mémoire de Magister: Université Kasdi Merbah .Ouargla.
- [12] : BAFROUH Hesna. DEBAGH Malika(2021). Etude Expérimentale et Modélisation de la Cinétique de Séchage Solaire de la Pomme de Terre . Mémoire de master . Université Ahmed Draya – Adrar
- [13] :BOUSALAH Noura. RAHMAN Meriem( 2018). L'extraction des informations utiles dans le séchage solaire des courbes d'isotherme de sorption des dattes d'Aghmmou de Touat . Mémoire master. Université Ahmed Draya – Adrar
- [14] : IDDER Khadidja. MEBARKI Kenza(2020). Mesure expérimentale des isothermes d'adsorption/désorption de cœur de palmier (jomare) et détermination des propriétés thermodynamiques. Mémoire master. Université Ahmed Draya – Adrar

# Annexe

Annexe

Appareils utilisés durant l'expérimentale:



Séchoir indirect à l'URERMS



L'appareil OPUS et TESTO H-176



Appareil HygroLab pour mesurer l'activité d'eau





**Dessiccateur**



**Etuve**



**Acquisition de données**