

**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 des Propriétés Physicochimiques et Séchage**  
**Solaire des Tranches de Citron**

---

**Préparé par :**

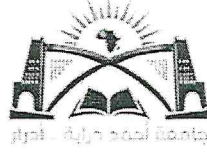
**M. CHAFAI Sid Ahmed**

**M. TIDJANI Abdallah**

**Membres de jury d'évaluation :**

<b>M. HARROUZ Abdekader</b>	<b>Président</b>	<b>Pr</b>	<b>Univ. Adrar</b>
<b>M. MEDIANI Ahmed</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>MRB</b>	<b>URERMS (CDER)</b>
<b>M. MOUNGAR Houcine</b>	<b>Examineur</b>	<b>MRA</b>	<b>URERMS (CDER)</b>
<b>MM DJEDID Kheira</b>	<b>Co-Rapporteur</b>	<b>MAA</b>	<b>Univ. Adrar</b>

**Année Universitaire : 2021/2022**



## شهادة الترخيص بالإيداع

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

### Etude des Propriétés Physicochimiques et Séchage Solaire des Tranches de Citron

من إنجاز الطالب(ة): شافعي سيد أحمد

و الطالب(ة): تيجاني عبد الله

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).

26 جوان 2022

ادرار في: 2022/06/20

- امضاء المشرف:



مساعد رئيس القسم

رئيس قسم المحروقات والطاقات المتجددة  
بكلية العلوم والتكنولوجيا

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَصَلَّى اللَّهُ عَلَى سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ وَعَلَى آلِهِ وَصَحْبِهِ وَسَلَّمَ تَسْلِيمًا

# Dédicace

Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

Nos chers parents, qui nous ont toujours soutenus dans nos études.

Tous nos frères et sœurs chacun avec son nom.

Tous nos familles chacune par son nom

Tous nos collègues chacun son nom

# Remerciements

Louange à Dieu, prières et paix sur le Messager de Dieu, que  
Dieu le bénisse et lui accorde la paix.

Ces maisons n'auraient pas été possibles sans l'intervention  
consciente d'un grand nombre de personnes. Nous en profitons  
pour exprimer nos sincères remerciements et notre  
gratitude à nos parents. Leurs encouragements et leur amour  
inconditionnel ont toujours été avec nous. Sans eux, nous ne  
serions certainement pas là. Nous leur devons tout et nous  
leur dédions ce message. Nous remercions également le Dr. **MEDIANI  
Ahmed** pour ses précieux conseils, son aide, sa  
patience et son soutien tout au long de cette période. Ce qui  
nous a permis de mener à bien notre travail. Les ingénieurs de labo de  
séchage **Tigani Cherif et Djaber Abdelkrim** . Nous remercions également le  
Dr : **MOUNGAR Houcine** pour le soutien et l'assistance qu'il nous a apportés

En tant que tel Nous remercions toutes les personnes qui ont  
contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

## La liste des figures

Figure I.1	Centrale hydraulique	9
Figure I.2	Schéma de la centrale géothermique de la Bouillante (Guadeloupe) (© geothermieperspectives.fr (ADEME/BRGM))	10
Figure I.3	Centrale biomasse	11
Figure I.4	Centrale hydrolienne	12
Figure I.5	Une Eolienne	13
Figure I.6	Une installation solaire	15
Figure I.7	Compositions d'un panneau photovoltaïque	16
Figure II.1	Présentation schématique d'un produit humide	19
Figure II.2	Principe de séchage à l'air libre	20
Figure II.3	Le principe d'un séchoir solaire direct	20
Figure II.4	Le principe d'un séchoir solaire indirect	22
Figure II.5	Le principe d'un séchoir solaire mixte	23
Figure II.6	Un séchoir solaire hybride	24
Figure II.7	Vitesse de séchage $-dM/dt=f(t)$	30
Figure II.8	Vitesse de séchage $-dM/dt=f(M)$	30
Figure III.1	Parties du citron	37
Figure III.2	Séchoir solaire à l'URERMS Adrar	39
Figure III.3	Préparation du produit dans les claies	39
Figure III.4	Couper le citron en tranchés	39
Figure III.5	Détermination de pH	40
Figure III.6	Détermination de l'acidité de titrage	41
Figure III.7	Détermination de l'activité d'eau	42
Figure III.8	Détermination de Teneur en eau	43
Figure III.9	Répartition des capsules dans le four à moufle	44
Figure III.10	Détermination de sucres totaux par réfractomètre	45
Figure III.11	Le Clevenger (hydrodistillateur standardisé)	46
Figure III.12	Séparation de l'huile essentielle	46
Figure III.13	Courbe d'étalonnage d'humidité	48
Figure III.14	Courbe d'étalonnage de MS	48
Figure III.15	Courbe d'étalonnage de MO	49
Figure III.16	Courbe d'étalonnage de MM	49

Figure III.17	Courbe d'étalonnage de pH	50
Figure III.18	Courbe d'étalonnage d'acidité	51
Figure III.19	Courbe d'étalonnage d'AW%	51
Figure III.20	Courbe d'étalonnage des Sucres	52
Figure III.21	Courbe d'étalonnage du rendement	52
Figure III.22	La cinétique de séchage du produit dans le séchoir solaire	53
Figure III.23	La cinétique de séchage du citron durant 28/03/2022	
Figure III.24	Comparative entre le séchage à l'air et dans le séchage indirect	54
Figure III.25	Le lissage des courbes de cinétique de séchage à l'air libre par trois modèles mathématiques	55
Figure III.26	Le lissage des courbes de cinétique de séchage direct par trois modèles mathématiques	57
Figure III.27	Le lissage des courbes de cinétique de séchage indirect par trois modèles mathématiques.	58
Figure III.28	Evolution de la température à l'entrée et au milieu de la chambre de séchage en fonction du temps	60
Figure III.29	Evolution de l'humidité relative de l'air entrant et milieu de la chambre	61
Figure III.23	Evolution de l'humidité relative et température de l'air à l'entrée	61
Figure III.31	Evolution de l'humidité relative et de la température du milieu de la chambre	62
Figure III.32	Evolution des températures et l'humidité relative à l'entrée et en milieu du séchoir en fonction du temps	62

## Liste des tableaux

Tableau I.1	Quelques avantages et inconvénients de certains carburants et énergies renouvelables	5
Tableau II.1	Quelques exemples des méthodes de séchage	25
Tableau II.2	Différents modèles mathématiques de séchage	33
Tableau III.1	Les résultats d'analyses physico-chimiques	47
Tableau III.2	Résultat de l'humidité	47
Tableau III.3	Résultat de la MS	48
Tableau III.4	Résultat de la MO	49
Tableau III.5	Résultat de la MM	49
Tableau III.6	Résultat de la PH	50
Tableau III.7	Résultat de l'acidité	50
Tableau III.8	Résultat de l'activité	51
Tableau III.9	Résultat du dosage des Sucres	52
Tableau III.10	Résultat du rendement	52
Tableau III.11	Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour le séchage à l'air	56
Tableau III.12	Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour le séchage direct	57
Tableau III.13	Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour le séchage indirect	59



# Liste des abréviations

<b>Symbole</b>	<b>Désignations</b>
BRG	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
M	
CFG	Services et Ingénierie Spécialisée
AM	L'air masse
PV	Photovoltaïque
Ha	Humidité absolue. (kg <sub>v</sub> /kg <sub>a</sub> )
Ma	Masse de gaz (kg)
Me	Masse de l'eau(kg)
Hr	Humidité relative. (W. m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )
Pv	Tension de vapeur (Pascale)
Ps	Pression de saturation (Pascale)
T	Température (k)
cp <sub>a</sub>	Chaleur massique de l'air (J.kg <sup>-1</sup> )
H	Enthalpie de l'air humide (J.kg <sup>-1</sup> )
Θ	Température (k)
L <sub>v</sub>	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C (J.kg <sup>-1</sup> )
RMSE	Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
K <sub>m</sub>	coefficient de transfert de masse (kg.m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
E	épaisseur du produit (m)
D	coefficient de diffusion (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
W	humidité du produit (kg H <sub>2</sub> O/kg <sub>ms</sub> )
P	masse volumique du produit (kg.m <sup>-3</sup> )
Bi	Biot
Q	flux de chaleur (W)
J	coefficient de conduction (conductivité thermique) (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
S	surfaces d'échange (m <sup>2</sup> )
T	température (K)
X	coordonnée spatiale (m).
h	coefficient de transfert convectif de chaleur (W.m <sup>-2</sup> . °C <sup>-1</sup> )
T <sub>p</sub>	température de la surface
T <sub>∞</sub>	température du fluide loin de la surface de contact (K)
X <sub>r</sub>	La tenure en eau réduite
X <sup>2</sup>	carré réduits
X* <sub>exp,i</sub>	Représente la ieme humidité absolue réduite expérimentale.
X* <sub>pre,i</sub>	Représente la ieme humidité prédite selon le modèle approprié
N	Est le nombre de points expérimentaux
n	Désigne le nombre de constante de chaque modèle.
A	acidité

## Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE. I : énergies fossiles et énergies renouvelable	
I. Introduction .....	2
I.1 Définitions .....	3
I.1.a Les énergies fossiles .....	3
I.1.b Les énergies renouvelables .....	3
I.2 Parmi les énergies fossiles .....	3
I.2.1 Pétrole .....	4
I.2.2 Le charbon .....	4
I.2.3 Le gaz naturel .....	4
I.2.3.1 Les différents types de gaz naturel .....	4
I.2.4 L'énergie nucléaire .....	5
I.3 Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables .....	8
I.3.1 L'énergie hydraulique .....	8
I.3.1.1 Fonctionnement d'une centrale hydraulique .....	8
I.3.2 L'énergie de la Géothermie .....	9
I.3.2.1 Principe de Fonctionnement de la Géothermie .....	10
I.3.4 L'énergie de la Biomasse.....	10
I.3.4.1 Principe de Fonctionnement.....	11
I.3.5.1 Principe de Fonctionnement d'une centrale hydrolienne.....	12
I.3.6 L'énergie éolienne .....	13
I.3.6.1 Principe de fonctionnement .....	13
I.3.7 L'énergie solaire .....	14
I.3.7.1 Fonctionnement d'une installation solaire .....	14
I.3.8 L'effet photovoltaïque.....	15
I.4 Conclusion .....	16
CHAPITRE .II: Le séchage solaire	
II.1 Introduction .....	17
II.2 Définition du séchage solaire.....	17
II.3 Historique .....	18
II.4 Principes de séchage .....	18
II .5 type des séchoirs solaires.....	19
II.5.1 Séchoirs naturels.....	19
II.5.2: Séchoirs directs.....	20
II.5.2.1 Les avantages.....	21
II.5.2. 2 Inconvenient .....	21

II.5.3: Les séchoirs solaires indirects .....	21
II.5.3.1. Les avantages.....	22
II.5.3.2. Les inconvénient.....	22
II.5.4. Les séchoirs solaires mixtes.....	22
II.5.4.1: Les avantages.....	22
II.5.4.2: Les inconvénient.....	22
II.5.5. Les séchoirs solaires hybrides .....	23
II.5.5.1: Les avantages.....	24
II.5.5.2. Les inconvénient.....	24
II.6.Inconvénients du séchage .....	24
II.7: Différents Mode de séchage .....	25
II.7.1 Séchage mécaniques .....	25
II.7.2 Séchage chimique .....	25
II.7.3 Séchage thermique .....	25
II.7.3.1 Séchage par ébullition.....	26
II.7.3.2: Séchage par entraînement.....	26
a. Les séchoirs actifs.....	27
b. Les séchoirs passifs.....	27
II.8. Caractéristiques de l'air de séchage.....	27
II.8.1. humidité.....	27
II.8.1.1 humidité absolue .....	27
II.8.1.2 Humidité relative .....	28
II.8.2 Enthalpie de l'air humide .....	28
II.8.3Température.....	28
II.8.3.1 Température sèche.....	28
II.8.3.2 Température humide du gaz .....	28
II.8.3.3 Température de rosée (Point de rosée) .....	29
II.9. Vitesse de séchage .....	29
II.9.1Courbes de séchage .....	30
II.9.2. Cinétique du séchage .....	30
II.10. Lois physiques du séchage.....	31
II.10.1 Mode de contrôle du séchage .....	31
II.10.2 Mécanisme de transfert de l'eau d'un produit .....	32
II.10.3 Transferts de chaleur .....	32
II.10.3.1 Transfert par conduction.....	32
II.10.3.2 Transfert par convection.....	32
II.11 Modèle de séchage en couche mince.....	33

II.11.1. Paramètres statistiques utilisés .....	34
II.12 Conclusion .....	34

### CHAPITRE .III: Parte expérimentale

III.1 Introduction : .....	36
III.2 Objectifs : .....	36
III. 3.Définition de la plante Tranches de citrons .....	36
III.4 Ordre, famille .....	37
III.5 Classification botanique : .....	38
III.6 Préparation des séchoirs solaires : .....	38
III.7 Préparation du produit: .....	39
III.8 Détermination de composants de citron : .....	40
III.8.1.Determination de pH: .....	40
<input type="checkbox"/> Principe: .....	40
<input type="checkbox"/> Mode opératoire : .....	40
III.8.2: l'acidité titrage : .....	40
<input type="checkbox"/> Principe : .....	40
<input type="checkbox"/> Mode opératoire : .....	40
<input type="checkbox"/> Expression des résultats .....	41
III.8.3:Activité d'eau .....	42
III.8.4. Teneur en eau .....	42
<input type="checkbox"/> Principe .....	42
<input type="checkbox"/> Mode opératoire .....	42
<input type="checkbox"/> Expression des résultats .....	42
III.8.5. Teneur en cendre / matière organique.....	43
<input type="checkbox"/> Principe .....	43
<input type="checkbox"/> Mode opératoire .....	43
<input type="checkbox"/> Expression des résultats .....	44
III.8.5:Teneur en sucre .....	44
<input type="checkbox"/> Principe.....	44
<input type="checkbox"/> Mode opératoire .....	44
III.8.6.Extraction de l'huile essentielle .....	45
<input type="checkbox"/> Principe : .....	45
<input type="checkbox"/> Mode opératoire : .....	45
<input type="checkbox"/> Expression des résultats : .....	47
III.9 Résultats et Deskussion .....	47
III.9.1 Les résultats d'analyses physico-chimiques : .....	47
III 9.1.1. Détermination de la H% .....	48

III.1.2.Détermination de la MS% .....	48
III.1.3.Détermination de la MO% .....	49
III.1.4.Détermination de la MM% .....	50
III.1.5.Détermination de la PH% .....	50
III.1.6.Détermination de la A % .....	51
III.1.7.Détermination de l'activité.....	51
III.1.8.Détermination de la Sucres.....	52
III.1.9.Détermination du rendement .....	53
III.10 Résultats expérimentaux et modélisation: .....	53
III.10.1 Etude de la cinétique de séchage solaire: .....	53
III.10.2 Comparative entre le séchage à l'air et dans le séchage indirect :.....	54
III.10.3 Modélisation de la cinétique de séchage: .....	55
III.10.4 Variation de la température à l'entrée et milieu de la chambre de séchage: .....	61
III.10.5 : Variation temporelle de l'humidité relative entrée et milieu de la chambre : .....	61
III.10.6 : Variation temporelle de l'humidité relative et température en entrée :.....	62
III.10.7 : Variation temporelle de l'humidité relative et température de milieu de la chambre. ....	62
III.10.8 : Variation temporelles des températures et l'humidité relative à l'entrée et en milieu séchoir : .....	63
III.11 Conclusion :.....	63
<b>Conclusion Générale</b>	
Conclusion générale.....	65
Références bibliographiques: .....	66

# **Introduction générale**

# Introduction Générale

---

## **Introduction générale :**

Le mot "énergie" désigne tout ce qui relève des sources d'énergie, de la production d'énergie, de la consommation et de la conservation des ressources énergétiques. Étant donné que toutes les exigences économiques nécessitent une source d'énergie, sa disponibilité et son prix font partie des préoccupations fondamentales de notre vie. Alors que la consommation d'énergie est apparue ces dernières années comme l'un des facteurs les plus importants à l'origine du réchauffement climatique, ce qui en a fait un problème fondamental dans tous les pays du monde. L'énergie est l'une des principales composantes des sociétés civilisées, et elle est nécessaire pour la conduite de la vie quotidienne, du fonctionnement des appareils électroménagers, des moyens de transport, de la gestion des usines, etc., et pour le monde entier. Il peut fonctionner à l'énergie pendant un an s'il utilise l'énergie qui provient des rayons du soleil à la surface de la Terre pour une heure seulement. Mais nous avons juste besoin de savoir comment collecter et utiliser cette énergie. Le rôle de cette énergie (énergie solaire) est apparu dans le chauffage, l'éclairage, le pompage, la distillation et le séchage des produits agricoles, qui est l'objet de notre étude.

Le séchage au soleil est l'une des méthodes de séchage les plus anciennes. De nombreux fruits et légumes sont séchés de cette manière. Grâce au processus de séchage, de nombreux types d'aliments peuvent être conservés pendant des périodes indéfinies. Le processus de séchage se fait en extrayant l'eau des aliments, ce qui empêche la croissance bactérienne de type pathogène, et par conséquent avoir un produit sain et apte à la consommation humaine.

Les méthodes de séchage ont été soignées et développées en raison de la nécessité de fournir de nombreux produits alimentaires en contre-saison, d'où l'objectif principal du développement des opérations de séchage était de raccourcir la période de séchage, ce qui aide à maintenir le caractère de base du produit alimentaire et parmi les produits agricoles qui se sont considérablement séchés ces derniers temps : le fruit du citron, parce qu'il a une saveur aigre et un arôme agréable, et le citron séché est l'une des ingrédients et des arômes les plus importants et largement utilisés dans les cuisines. Il présente également des avantages médicaux et semi-médicaux tels que les problèmes digestifs et la réduction du cholestérol en extrayant ses huiles essentielles de sa peau par le processus de distillation.

Dans le présent travail, constitué de trois chapitres, on va entamer le séchage solaire comparatif des tranches de citron par trois modes : direct, indirect et sous l'air libre, en vue de l'extraction des huiles essentielles, puis l'évaluation de la cinétique de séchage par les

# Introduction Générale

---

modèles mathématiques connus dans ce domaine, à savoir le modèle logarithmique, two terme et Verma et al.

Pour cela, ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre donne des généralités sur les différents types d'énergies, le deuxième chapitre est consacré au séchage solaire ; séchoirs et cinétique de séchage, dans le troisième chapitre, les modes opératoires, les résultats expérimentaux et la discussion seront présentés.

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale, regroupant les différents et importants résultats, et donnant lieu aux perspectives et suggestions.



**CHAPITRE. I : énergies fossiles et  
énergies renouvelables**

**I. Introduction :**

L'énergie est très importante car elle contribue à la croissance économique d'un pays. Actuellement face à l'augmentation rapide de la population mondiale, les besoins en énergies ne cessent aussi d'augmenter. De ce fait on doit trouver d'autres sources d'énergies comme les énergies renouvelables pour faire face à l'épuisement des réserves d'énergies fossiles comme le pétrole et ses dérivés. Dans ce chapitre nous allons voir ce qu'on appelle énergie renouvelable et énergie fossile puis de savoir quelles sont les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables. [1]

**I.1 Définitions :****I.1.a Les énergies fossiles :**

Sont obtenues par la combustion des combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Ces énergies sont classées parmi les énergies non renouvelables donc ils sont épuisables. [1]

**I.1.b Les énergies renouvelables :**

Comme son nom l'indique, les énergies renouvelables proviennent des « ressources naturelles renouvelables ». Ces énergies proviennent essentiellement de cinq éléments qui constituent les cinq familles d'énergies renouvelables à savoir : le soleil, le vent, les chutes d'eau (hydroélectricité), la chaleur de la terre (géothermie) et la biomasse.

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Les sources d'énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera. [1]

**I.2 Les Energies Fossiles :**

On distingue les énergies chimiques qui proviennent du pétrole, du charbon et du gaz naturel.

**I.2.1 Pétrole :**

Le pétrole vient du mot latin *petra-oleum*, soit « huile de roche ». C'est une huile minérale naturelle extraite d'un gisement et utilisée comme source d'énergie. Une vase riche en matière organique en décomposition se dépose au fond d'une mer pauvre en oxygène. Sa dégradation en milieu anaérobique fait naître un mélange de matière organique : le kérogène (futur pétrole).

D'autres terrains recouvrent les roches pétrolifères (sédimentation) : lentement en profondeur le kérogène évolue en pétrole. Moins dense que les autres roches le pétrole produit migre vers le haut à travers des couches poreuses. [2]

**I.2.2 Le charbon :**

Le charbon est une roche organique sédimentaire. Il s'est formé surtout lors de la période géologique du carbonifère (de 350 à 290 millions d'années).

Le charbon résulte de l'enterrement et de la sédimentation de grandes quantités de bois et de débris végétaux, accumulés dans les marais et les tourbières. Les gisements de charbon se situent près de la surface de sol ou sont enfouis à des kilomètres de profondeur. [2]

**I.2.3 Le gaz naturel :**

Le gaz naturel est un gaz hydrocarboné provenant du sous-sol terrestre. Composé en grande majorité de méthane. Le gaz naturel libère son énergie chimique par combustion en émettant relativement peu de substances polluantes. Ses gisements sont souvent liés à ceux du pétrole et l'exploitation de champs pétrolifères amène généralement à une production simultanée de pétrole et de gaz naturel. Leur composition et le type de réservoirs dans lesquels ils se trouvent. Néanmoins

Ce gaz est toujours composé principalement de méthane et issu de la désagrégation anciens organismes vivants. [2]

**I.2.3.1 Les différents types de gaz naturel :**

- Gaz naturel associé (à un réservoir de pétrole).
- Gaz naturel conventionnel non associé.
- Gaz de couche (ou gaz de houille).
- Gaz de réservoir compact.
- Gaz de schiste. [2]

**I.2.4 L'énergie nucléaire :**

La théorie de la relativité d'Einstein a permis de démontrer que la matière peut se transformer en énergie et inversement : c'est le principe d'équivalence masse-énergie. Cette équivalence est la base de la réaction nucléaire de fusion et de fission. Dans le cas de la fission, le noyau atomique se sépare en deux noyaux dont la masse totale est inférieure à la masse totale du noyau initial. Le défaut de masse est transformé en énergie qui est libérée sous forme d'énergie cinétique des fragments et de rayon gamma.

Il faut remarquer que d'un point de vue sociétal, une source d'énergie est souvent associée à une forme d'énergie (énergie solaire, énergie hydraulique,...), cependant cette association forme- source d'énergie est erronée du point de vue scientifique. [2]

**Tableau I.1: Quelques avantages et inconvénients de certains carburants et énergies renouvelables**

énergie	Avantages	inconvénients
solaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie disponible partout à la surface de notre planète</li> <li>• Les panneaux photovoltaïques s'intègrent particulièrement bien aux toitures.</li> <li>• Les capteurs solaires thermiques peuvent être intégrés aux toitures ou aux façades.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie renouvelable qui demande une technologie très avancée pour le stockage.</li> <li>• Panneaux photovoltaïques encore très chers.</li> <li>• Le niveau de production maximal dépend de la surface de capteur exposée au soleil.</li> <li>• Énergie renouvelable toujours dépendante de la saison et du lieu où l'on se trouve.</li> </ul>

Eolienne [3]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non polluante</li> <li>• inépuisable (énergie du vent)</li> <li>• peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés)</li> <li>• peut-être complémentaire des filières traditionnelles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent)</li> <li>• bruit des pales</li> <li>• impact visuel</li> <li>• interférences électromagnétiques.</li> </ul>
Géothermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La géothermie n'est pas dépendante des conditions atmosphérique.</li> <li>• Cette énergie ne produit aucun déchet.</li> <li>• Le cout d'entretien des systèmes géothermiques est généralement moins élevé que les systèmes de chauffage classique.</li> <li>• Tant que la quantité d'énergie captée n'est pas supérieure à la chaleur provenant du centre de la terre, la ressource est inépuisable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les systèmes géothermiques utilisent une source d'énergie renouvelable, mais doivent faire appel a une source électrique pour fonctionner qui elle n'est pas toujours renouvelable.</li> <li>• L'achat d'un tel système demande un investissement initial assez important. Il est souvent le double d'une installation utilisant une énergie classique.</li> </ul>
Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large disponibilité de la ressource sur la terre, sauf dans les régions les plus arides ou le bois est rare.</li> <li>• Faibles émissions polluantes et pas de contribution à l'effet de serre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• C'est une source d'énergie peu dense. Pour se chauffer durant un hiver, il faudra un grand volume de bois, ce qui nécessitera beaucoup</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.</li> </ul>	<p>de transport, de manutention et un vaste espace de stockage.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>L'exploitation des bois et forêts doit s'accompagner d'une nouvelle plantation. Dans le cas contraire, on dégrade l'écosystème et on détériore la ressource.</li> </ul>
Photovoltaïque [4]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.</li> <li>L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, Dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.</li> <li>L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.</li> <li>Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.</li> <li>Le coût très élevé.</li> <li>Faible rendement de conversion.</li> <li>S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augment.</li> </ul>
Pétrole	<ul style="list-style-type: none"> <li>Facilité de transport des zones production aux zones de consommation</li> <li>Fournit du carburant qui fonctionne avec notre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas permanent</li> <li>Pollue l'air</li> <li>Plus la demande de pétrole est importante, plus il s'épuisera</li> </ul>

	infrastructure. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut être utilisé de plusieurs façons.</li> </ul>	rapidement, et donc son prix augmentera.
Gaz Naturel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très sûr et respectueux de l'environnement.</li> <li>• Il n'a ni odeur ni couleur.</li> <li>• Le gaz naturel peut être utilisé dans la production d'électricité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les stations de gaz naturel ne sont pas largement disponibles.</li> </ul>

### I.3 Energies Renouvelables :

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, dont on cite les suivantes :

#### I.3.1 L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins.

Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermo haline, etc.), les centrales hydrauliques produisent de l'énergie mécanique convertie la plupart du temps en électricité (hydroélectricité). [5]

##### I.3.1.1 Fonctionnement d'une centrale hydraulique :

Le fonctionnement d'une centrale hydraulique ou barrage consiste à utiliser l'énergie donnée par une quantité d'eau en mouvement pour pouvoir produire de l'énergie électrique.

Un barrage est donc utilisé pour retenir une grande quantité d'eau sous la forme d'un lac de retenue. Quand on veut produire de l'électricité, on ouvre les vannes du barrage, l'eau rentre par ces vannes et passe par une conduite dans le barrage qui va lui permettre d'augmenter sa vitesse. Après cette conduite, l'eau, grâce à cette vitesse va faire tourner une turbine qui est reliée à un alternateur qui va produire de l'électricité. L'eau est ensuite libérée au pied du barrage et reprend son cours normal. [5]

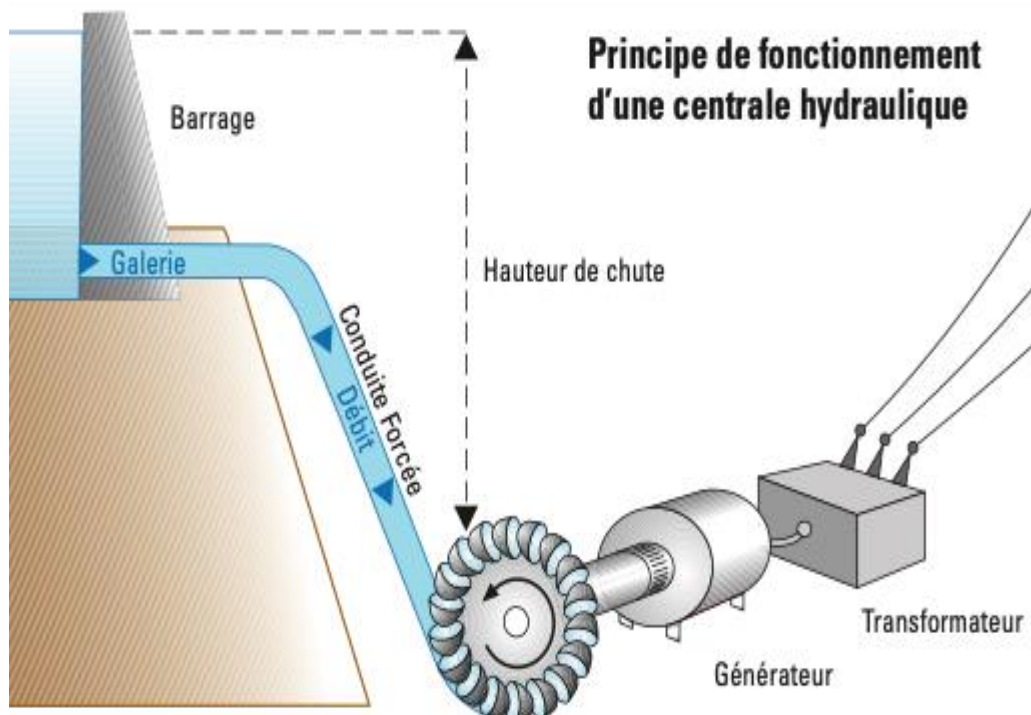


Figure I.1 : Centrale hydraulique [5]

### I.3.2 L'énergie de la Géothermie :

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. [6]

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité. [6]

L'énergie géothermique est localement exploitée pour chauffer ou disposer d'eau chaude depuis des millénaires, par exemple : en Chine, dans la Rome antique et dans le bassin méditerranéen.

L'augmentation de la consommation et du coût des différentes énergies ainsi qu'une certaine volonté d'émettre moins de gaz à effet de serre la rendent plus attrayante. En 2007, en France le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et l'Ademe ont créé un

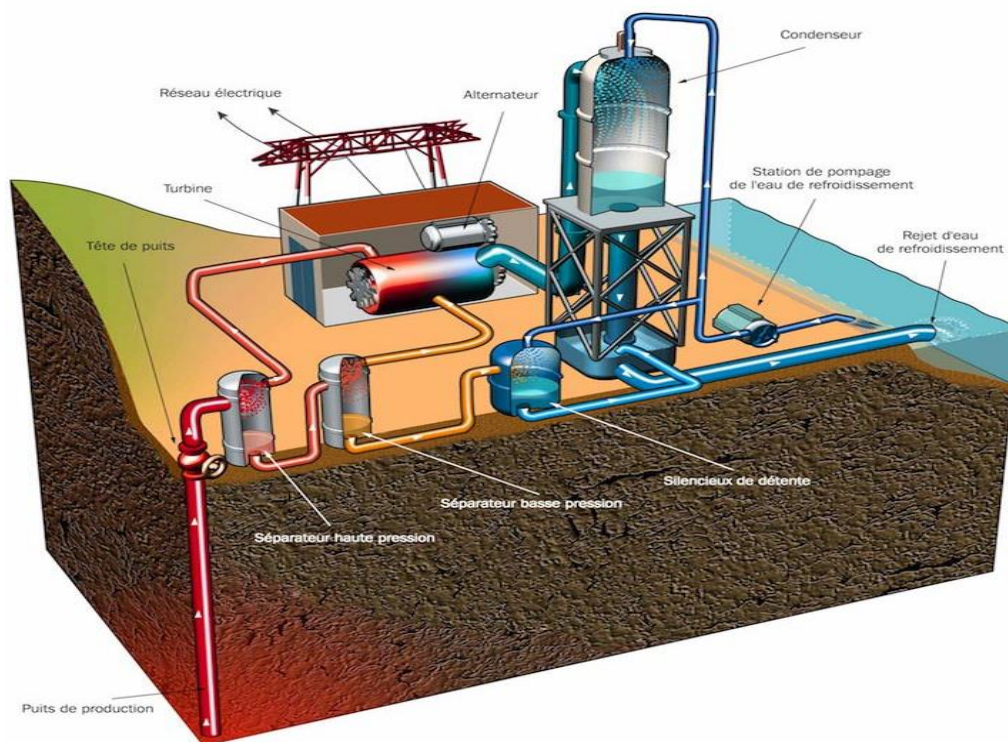


département géothermie pour la promouvoir, après s'être associés à différents programmes de recherche et de travaux de service public.

Deux de leurs filiales, CFG Services (services et ingénierie spécialisée) et Géothermie bouillante (qui exploite la centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe), sont impliquées dans la géothermie. [6]

### I.3.2.1 Principe de Fonctionnement de la Géothermie :

Une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet de faire tourner une turbine et un alternateur. [6]



**Figure I.2:** Schéma de la centrale géothermique de la Bouillante (Guadeloupe) (© geothermieperspectives.fr (ADEME/BRGM). [6]

### I.3.4 L'énergie de la Biomasse :

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies, le terme de biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique (champignons) pouvant devenir source d'énergie par combustion (ex : bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (agro-carburant). [6]

L'énergie tirée de la biomasse est considérée comme une énergie renouvelable et soutenable tant qu'il n'y a pas surexploitation de la ressource, mise en péril de la fertilité du sol et tant qu'il n'y a pas de compétition excessive pour l'usage des ressources (terres arables, eau, etc), ni d'impacts excessifs sur la biodiversité, etc. De plus, bien que présentant de nombreux avantages sur le plan écologique et du développement local, elle peut être polluante (CO, CO<sub>2</sub>, fumées, goudrons) si mal utilisée ou si la biomasse utilisée est polluée par des métaux lourds, radionucléides, etc. (sachant que les ressources fossiles sont également naturellement contaminées par des métaux, souvent plus que le bois). [6]

#### I.3.4.1 Principe de Fonctionnement :

Le fonctionnement d'une centrale biomasse classique, l'énergie de la biomasse est transformée en énergie thermique par combustion. Cette énergie transforme de l'eau en vapeur, qui actionne ensuite une turbine à vapeur accouplée à un alternateur, qui transforme enfin l'énergie mécanique en énergie électrique. Une partie de la vapeur ou énergie thermique restante peut être utilisée, par exemple, pour alimenter un circuit de chauffage. Il s'agit alors de cogénération. [6]

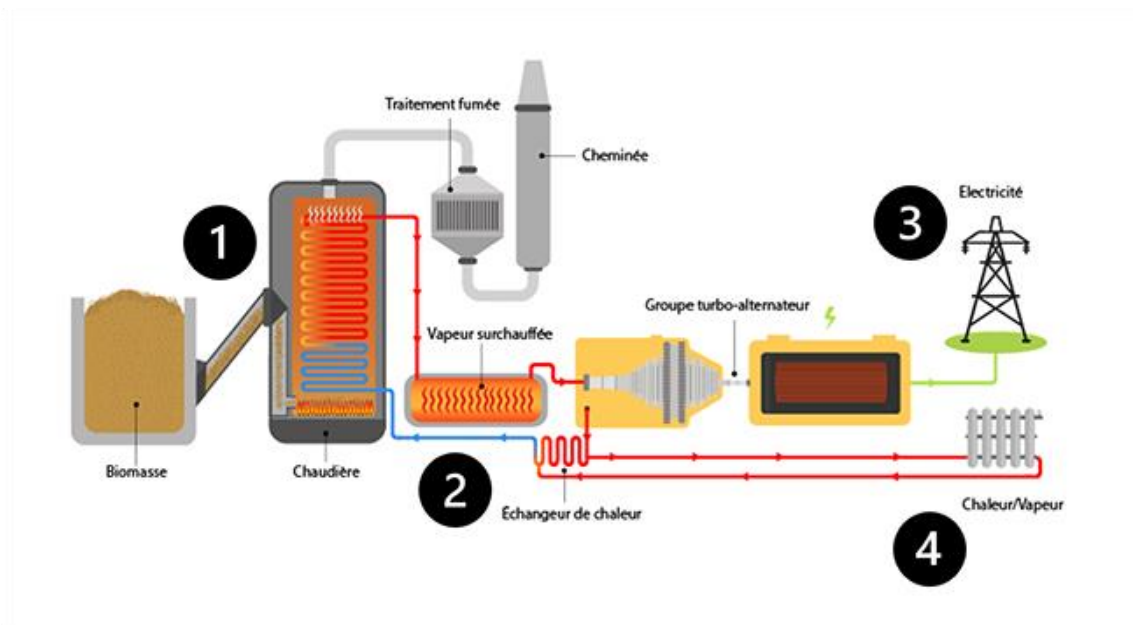


Figure I.3 : Centrale biomasse. [11]

### I.3.5 L'énergie de la Marine :

L'énergie marine est une source d'énergie renouvelable qui dépend des ressources naturelles des eaux de la mer et des océans. Elle permet de fabriquer de l'électricité, essentiellement grâce aux mouvements de ces eaux.

L'eau recouvre en grande partie notre planète, principalement à travers les mers et les océans. Elle constitue donc une source d'énergie importante, aujourd'hui encore peu exploitée.

Les énergies marines n'émettent aucun gaz à effet de serre et leur matière première est disponible dans de nombreux pays du monde. [6]

#### I.3.5.1 Principe de Fonctionnement d'une centrale hydrolienne :

L'hydrolienne est une turbine hydraulique, qui utilise l'énergie des courants marins comme une éolienne utilise l'énergie du vent. La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique qui peut alors être convertie en énergie électrique par un alternateur. [6]

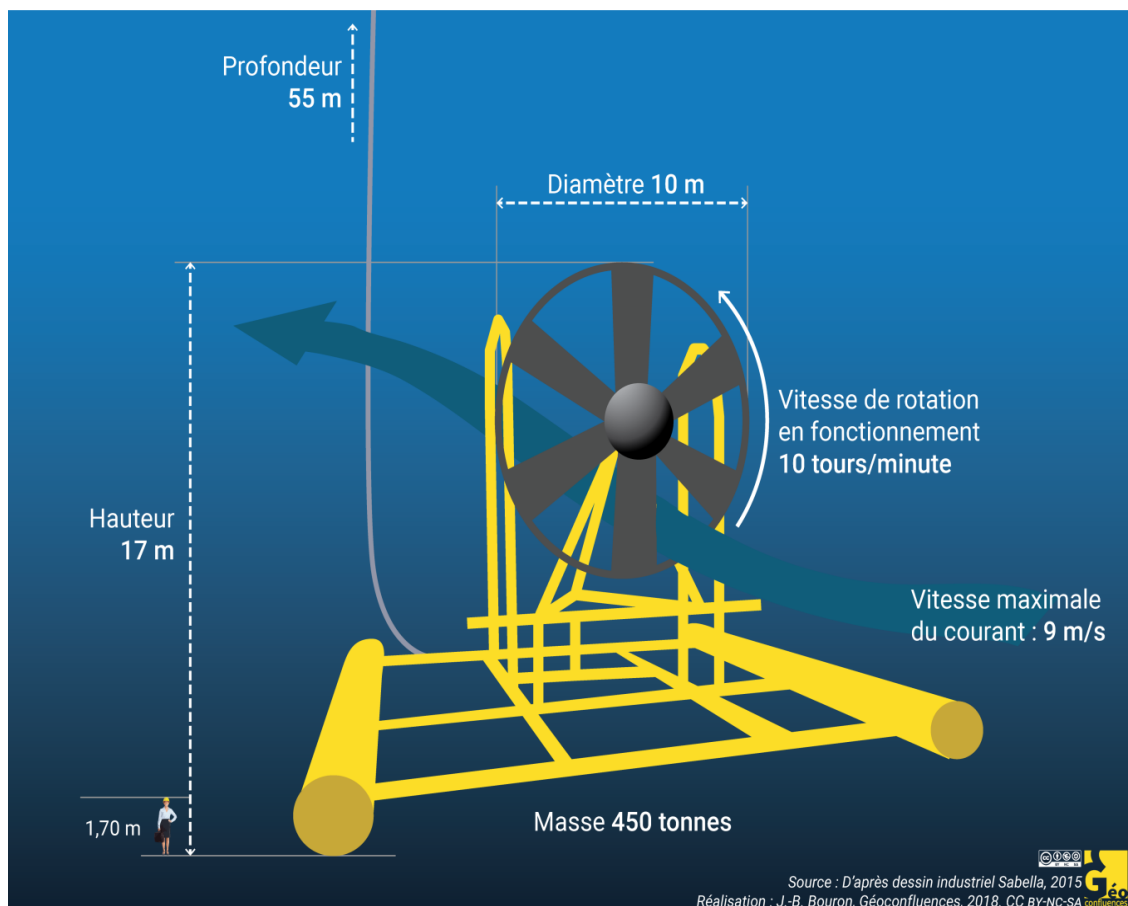


Figure I.4 : Centrale hydrolienne

### I.3.6 L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent. [5]

#### I.3.6.1 Principe de fonctionnement :

- La rotation des pales : sous l'effet du vent, L'hélice se mette en marche.
- La production d'électricité : l'hélice entraîne un axe dans la nacelle, relié à un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité.
- L'adaptation de la tension : un transformateur situé à l'intérieur du mât élevé la tension du courant électrique produit par l'alternateur. [6]

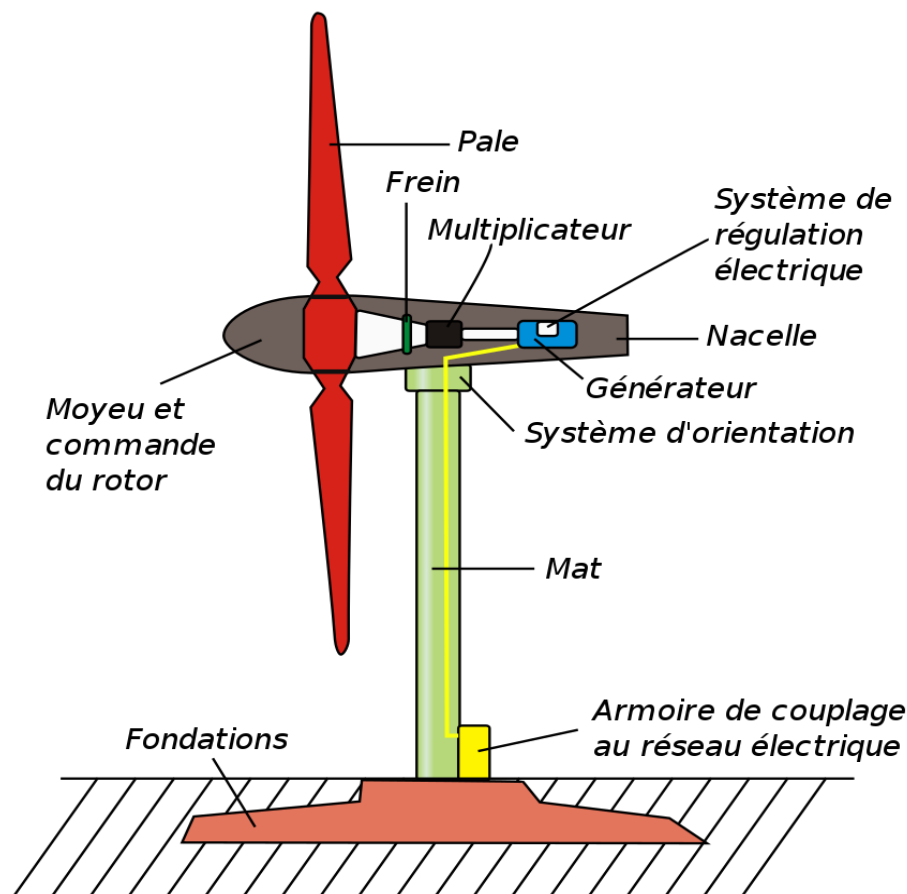


Figure I.5 : Une Eolienne. [10]

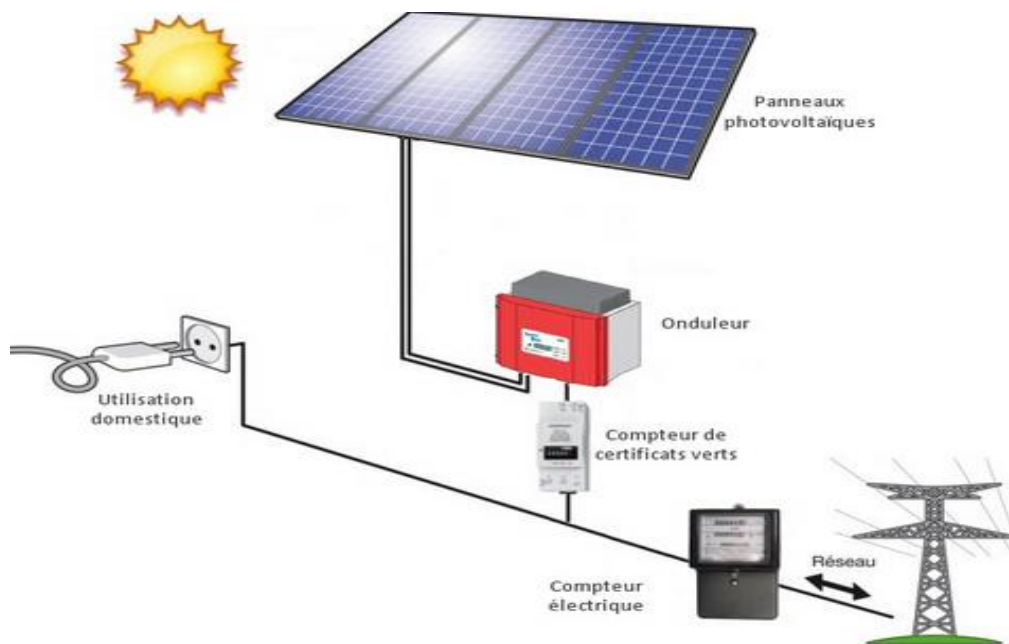
### I.3.7 L'énergie solaire :

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre pendant une heure et pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à  $1367 \text{ W/m}^2$ . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air (AM). Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 \text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000 \text{ W/m}^2$ . [6]

#### I.3.7.1 Fonctionnement d'une installation solaire :

3 éléments sont nécessaires à une installation photovoltaïque : des panneaux solaires, un onduleur et un compteur. Ces trois éléments permettent de récupérer l'énergie transmise par le soleil, de la transformer en électricité puis de la distribuer à l'ensemble des clients connectés au réseau. [6]

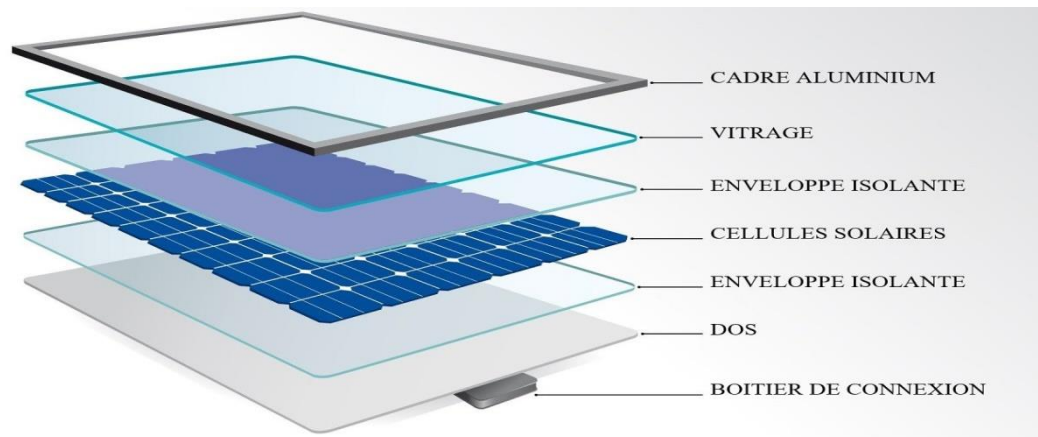
- Intégrés au toit, les panneaux solaires convertissent directement la lumière en courant électrique continu.
- L'onduleur permet ensuite de transformer l'électricité obtenue en courant alternatif compatible avec le réseau.
- Le compteur mesure la quantité de courant injectée dans le réseau. [6]



**Figure I.6 :** Une installation solaire [8]

### I.3.8 L'effet photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque vient du Grec « phos, photos » qui désigne la lumière et de « voltaïque », mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité. Ce terme est associé à la production d'une tension à partir de la lumière ; on s'y réfère souvent par l'abréviation « PV ». Un terme plus courant pour les cellules photovoltaïques est « piles solaires » malgré que celles-ci fonctionnent à partir de n'importe quelle source de lumière, et non uniquement celle du soleil. Donc ce phénomène consiste à établir une force électromotrice (énergie électrique de type continu directement utilisable) lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule. [6]



**Figure I.7 :** Compositions d'un panneau photovoltaïque [9]

#### **I.4 Conclusion:**

Ce chapitre présente la situation géographique et situation énergétique actuelle à niveau nationale, en termes de ressources, de production, de consommation et les énergies renouvelables, l'augmentation de la demande nationale en énergie, fossiles et le changement climatique amorcé au cours des dernières décennies sont des réalités indéniables.

Dans ce contexte énergétique, la mise en œuvre de mesures concrètes est nécessaire. L'intégration des énergies renouvelables dans la régulation de ce défi est primordiale. Ce qui permet d'une part, de garder un environnement propre et sain et d'autre part, assurer la protection de la biodiversité. [7]

## **CHAPITRE .II: Le Séchage Solaire**



## II.1 Introduction

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits, légumes et viandes est l'un des processus des grandes consommations d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduction des dépenses et pertes après les récoltes. Le séchage solaire a été pratiqué partout dans le monde pendant des siècles en plein air. Il a été employé pour sécher des grains, fruits, viandes, poissons et d'autres produits alimentaires destinés à la consommation. [1]

Une grande partie de l'offre du monde en fruits et légumes secs continue à être séchée selon la manière traditionnelle sans l'aide technique. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation de séchage normal en plein air. La méthode traditionnelle du séchage souffre de maints problèmes, parmi ces derniers, le manque de capacité de commander le processus de séchage correctement, l'incertitude du temps, le coût de la main d'œuvre élevé, la nécessité de zones vastes, l'infection par des insectes et autres corps étrangers. Les solutions impliquant l'énergie solaire ont proposé des dispositifs de collection, ou des séchoirs solaires pouvant réduire les inconvénients cités précédemment et permettent aussi l'amélioration de la qualité des produits. [1]

## II.2 Définition du séchage solaire

Le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant d'un corps, par vaporisation de ce solvant, le produit final dit « sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, éventuellement de « solide divisé » ou de poudre. Le produit passe ainsi d'un état initial dit « humide », selon le cas solide ou liquide, jusqu'à un état final dit « solide sec », même s'il contient encore une teneur en eau (ou solvant) résiduelle ; Le solvant considéré est le plus souvent l'eau, les mêmes principes pouvant s'appliquer à d'autres solvants. Le séchage est une opération de « séparation thermique », dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur. En séchage, on devra donc s'intéresser à la fois aux transferts de matière et de chaleur couplés.

Diverses techniques existent pour séparer l'eau d'un produit, qui ne supposent pas forcément sa vaporisation – pressage, égouttage, essorage centrifuge, etc. – et qu'on appellera d'une façon générale « déshydratation ». Le séchage est donc une technique particulière de déshydratation, le terme de séchage étant réservé au cas de la séparation par vaporisation du solvant. [2]

### II.3 Historique

La déshydratation est l'une des plus anciennes méthodes de préservation des aliments que l'on connaisse. Les peuples primitifs déshydrataient ou faisaient sécher les herbes, les racines, les fruits et la viande en les exposants au soleil. Ils avaient appris que la déshydratation des aliments leur permettait de survivre durant les durs et longs hivers alors que la nourriture était plus rare ou encore inexistante. La légèreté ainsi que la valeur nutritive élevée des aliments déshydratés permettaient aussi aux peuples d'autrefois de parcourir de plus grandes distances lors de leurs voyages de chasses ou d'exploration.

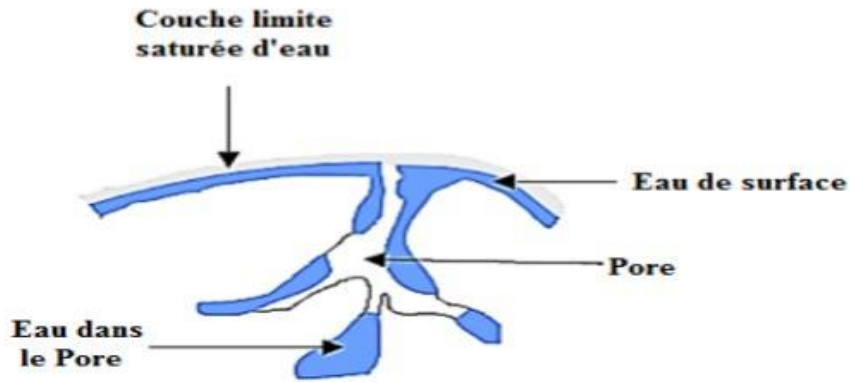
Depuis les débuts de la civilisation, presque tous les peuples de notre planète ont recourt à la déshydratation ou au séchage des aliments. En fait, les plus anciens documents écrits sur le sujet, mentionnent que les Phéniciens ainsi que d'autres peuples pêcheurs de la Méditerranée avaient l'habitude de faire sécher leurs prises au grand air.

Le séchage au soleil des feuilles de thé était très répandu chez les Chinois. Plusieurs autres cultures d'autrefois consommaient divers aliments déshydratés. Par exemple, quand certains anciens tombeaux Égyptiens ont été excavés récemment, les scientifiques ont découvert une variété d'aliments déshydratés, incluant des grains de blé. Ces aliments étaient censés soutenir l'esprit du défunt dans son voyage après la vie. Lors d'une expérience, des grains âgés de plusieurs siècles furent par la suite réhydratés. Miraculeusement, ils germèrent, prouvant que la déshydratation est véritablement un moyen naturel et viable de préservation de la nourriture à long terme

À l'époque des explorateurs du 15ème et 16ème siècles, la plupart des marins mangeaient une variété d'aliments séchés afin de garder la santé durant leurs voyages en mer.[1]

### II.4 Principes de séchage

La première idée qui vient à l'esprit pour sécher un produit est de le porter à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. En réalité, ce principe n'est pas le plus employé et l'on préfère souvent opérer à température moins élevée en utilisant l'air comme gaz d'entraînement. [3]



**Figure II.1** : Présentation schématique d'un produit humide [3]

## II .5 Type des Séchoirs Solaires

On peut classer les séchoirs suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects [SECAAR]. Pour chacun de ces types de séchoir, l'écoulement de l'air asséchant peut se dérouler par convection forcée ou par convection naturelle. Dans le cas où l'écoulement d'air est par convection forcée, les séchoirs sont appelés séchoirs solaires actifs. Lorsque l'écoulement se fait par convection naturelle, ils sont appelés séchoirs solaires passifs. [4]

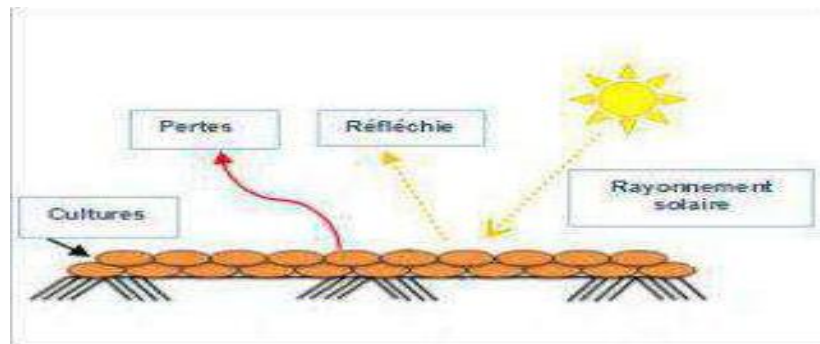
### II.5.1 Séchoirs naturels

Ils utilisent directement le soleil et l'air, où les produits sont répartis sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé même au sol. (Le principe de séchage à l'air libre est simple, le rayonnement solaire tombe sur la surface de la culture et une partie de l'énergie est réfléchi vers l'environnement (Figure. II-2).

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

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

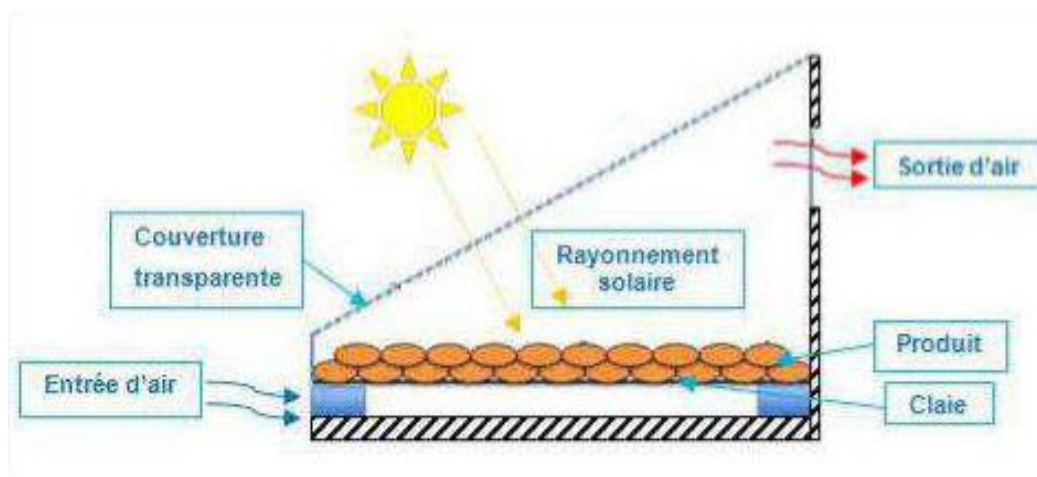
Il présente cependant, des inconvénients, qui sont : pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage, destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières).[4]



**Figure II.2 :** Principe de séchage à l'air libre [4]

### II.5.2: Séchoirs directs

Dans ces séchoirs, les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire. Ces séchoirs peuvent avoir plusieurs formes en fonction du produit et de la quantité à sécher. La forme la plus courante est celle d'un séchoir solaire dont la surface transparente est inclinée suivant un angle bien déterminé dépendant de la position et orienté généralement au Sud (Figure. I-2). La chaleur est générée par absorption des rayonnement solaire incidents sur le produit proprement dit, à travers la surface transparente qui couvre la chambre de séchage.[4]



**Figure II.3:** Le principe d'un séchoir solaire direct [4]

### II.5.2.1 Les Avantages

- Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.

- Pas besoin de main-d'œuvre qualifié. [ 4]

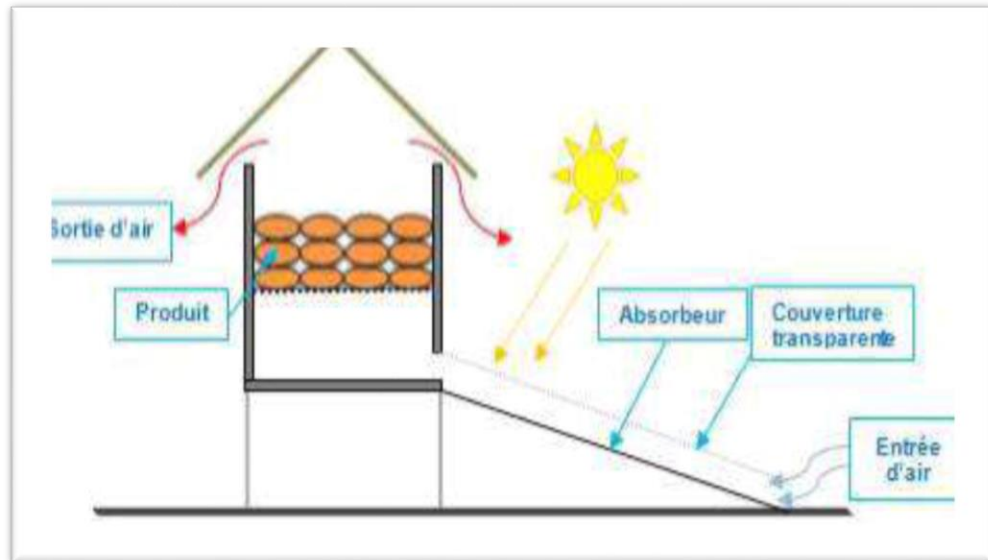
### II.5.2. 2 Inconvénient

- Température élevée durant le séchage
- Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil
- Jaunissement des légumes verts

- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure. [4]

### II.5.3: Les Séchoirs Solaires Indirects

Le mode de séchage direct ne permet pas l'obtention d'un produit séché de bonne qualité, à une teneur en eau souhaitée. Aussi, il est nécessaire de contrôler la température et la teneur en eau de l'air asséchant au cours du séchage. Le séchage indirect permet d'assurer ce contrôle. Pour ce type de séchoir, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au flux solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une armoire de séchage. L'air est préchauffé par des isolateurs à air puis acheminée dans l'armoire de séchage par des conduits. La circulation de l'air dans le séchoir qui se déroule par convection forcée contribue, par rapport au séchage direct passif, à réduire la durée de séchage et à améliorer la qualité du produit séché, aussi bien dans le mode direct que le mode indirect actif. Lorsque le produit à sécher est simultanément soumis au flux solaire et à l'air préchauffé dans des isolateurs, le mode de séchage s'effectue sous mode mixte. La conception et la construction de ce type de séchoir solaire sont généralement plus complexes que pour le séchoir solaire direct. Ce type de séchoir peut être utilisé pour le séchage de produits sensible au flux solaire et qui nécessitent une maîtrise de la température de l'air asséchant au cours du séchage. Le produit séché conserve ses principales propriétés gastronomiques ou médicinales.[5]



**Figure II.4** : Le principe d'un séchoir solaire indirect.[5]

#### II.5.3.1. Les avantages

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il présente l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive.
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles. [6]

#### II.5.3.2. Les Inconvénients

- Cout important.

Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir. [6]

#### II.5.4. Les séchoirs solaires mixtes

Les séchoirs solaires mixtes associent les principes des séchoirs directs et indirects. Les produits à sécher sont soumis au flux solaire et à l'air préchauffé dans un isolateur disposé au-dessous de l'armoire de séchage. Les parois supérieures de la chambre de séchage et de celle de l'isolateur sont recouvertes de vitres ou de films transparents.[7]

##### II.5.4.1: Les Avantages

- Forte augmentation de la production par rapport à l'autre type des séchoirs solaires.[ 8]

##### II.5.4.2: Les Inconvénients

- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir. [8]

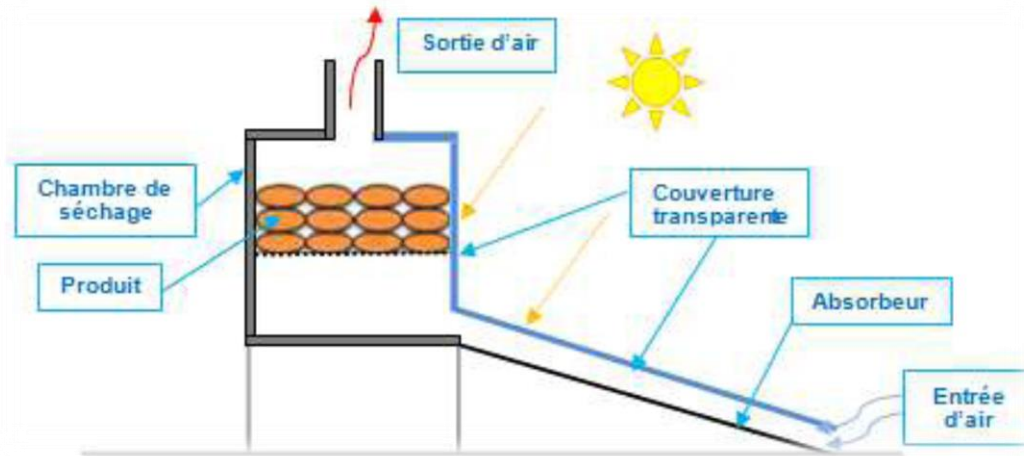


Figure II. 5 : Le principe d'un séchoir solaire mixte.[5]

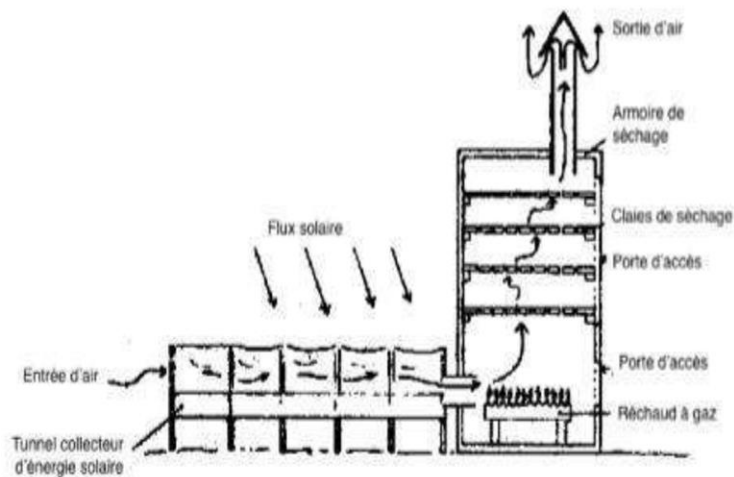
### II.5.5. Les Séchoirs Solaires Hybrides

Ces séchoirs utilisent, en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'énergie solaire sert souvent, dans ce cas, de préchauffage de l'air. Ces systèmes, plus coûteux, sont généralement réservés à des applications à grande échelle, ou à des applications commerciales pour lesquelles la qualité et le débit du produit fini ne peuvent dépendre des conditions climatiques. [7,3 ]

Ces systèmes, plus coûteux, sont généralement réservés à des applications à grande échelle, ou à des applications commerciales pour lesquelles la qualité et le débit du produit fini ne peuvent dépendre des conditions climatiques.

Les méthodes de séchage les plus utilisées dans l'industrie sont les suivantes :

- Le séchage par air chaud ou séchage 'traditionnel'.
- Le séchage à la vapeur surchauffée
- Le séchage par pompe à chaleur



**Figure II.6** Un séchoir solaire hybride [4]

### II.5.5.1: Les Avantages :

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques
- Meilleur contrôle du séchage
- Forte augmentation de la productivité par rapport au séchoir solaire car le m peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin. [8]

### II.5.5.2. Les Inconvénients

- Coûts de production et d'investissement élevés.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz, pièces de rechange.
- Personnel qualifié pour la maintenance. [8]

## II.6. Inconvénients du Séchage

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 et la modification de la répartition de l'humidité dans le produit. En général, le séchage a globalement moins d'inconvénients que d'autres procédés de conservation (appertisation, congélation ou traitement aseptique). Le séchage des fruits, des légumes et des épices reste encore une méthode très répandue de conservation de ces aliments.



## II.7: Différents Modes de séchage

### II.7.1 Séchage mécaniques

C'est l'élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation,...). Certains processus de pré concentration et de pré séchage peuvent se réaliser sans transfert thermique mais par simple transfert de quantité de mouvement. [9]

**Tableau II.1: Quelques exemples des méthodes de séchage**

Operation	Technique	Mechanism	Applications
Concentration	Centrifugation	Sédimentation force	Jus de tomate
	Filtration	Tamisage	Boues résiduaires
	Ultrafiltration	Tamisage moléculaire	Lactosérum
Séchage	Egouttage	Gravité	Fromage
	Essorage	Tamisage	Cristaux de sucre
	Pressage	Expression	Fourrages

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

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

### II.7.2 Séchage Chimique

C'est un procédé basé sur l'utilisation de produits déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium,...) pour extraire l'eau. [ 9]

### II.7.3 Séchage Thermique

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

- Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le coeur 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. [9]

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

### II.7.3.1 Séchage par Ebullition

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

- Par conduction, à partir d'une surface chauffée au contact du produit.
- Par génération interne de chaleur due à l'exposition à un rayonnement infrarouge ou de micro-ondes ou par un chauffage diélectrique.
- Par convection, à partir de vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide chauffant.[ 9]

### II.7.3.2: Séchage par Entraînement

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que. [ 10 ]

- 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.

Un exemple typique du début de séchage d'un produit très hydraté, Les concentrations de l'air en eau sont exprimées en pressions partielles d'eau (en Pascal). Le séchage est dit 'isenthalpique ' si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par l'air chaud. L'air sert donc à la fois de fluide chauffant et de gaz vecteur pour l'eau enlevée : entrant sec et chaud dans le séchoir, il en ressort humide et moins chaud.

Le séchage par entraînement est plus important par rapport au séchage par ébullition. Généralement l'intérêt se limite à ce premier mode de séchage.

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

**a. Les Séchoirs Actifs**

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

D'une manière générale, ces séchoirs sont dits indirects et ce genre de séchoir est isenthalpique. [10]

**b. Les Séchoirs Passifs**

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

Quant aux séchoirs mixtes qui sont peu présentés, ce sont des séchoirs dont une seule partie du produit reçoit et absorbe le rayonnement. Naturellement les séchoirs passifs ne sont pas isenthalpique. [10]

**II.8. Caractéristiques de l'air de séchage**

Le mode de séchage le plus répandu dans l'industrie chimique est le séchage par convection; il consiste à faire agir sur la matière à sécher un courant de gaz ou d'air (de faible humidité) et chaud qui vaporise l'humidité du solide et entraîne la vapeur en se transformant en un gaz ou air humide refroidi.

Le mélange air sec et vapeur d'eau constituent l'air humide. Nous définissons ci-après les importantes grandeurs caractérisant l'air humide. [11]

**II.8.1. Humidité**

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage. [11]

**II.8.1.1 Humidité Absolue**

On appelle humidité absolue ou teneur en humidité, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par  $H_a$  est donnée par la relation suivante : [12]

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} [\text{kg}_e \cdot \text{kg}_{\text{as}}^{-1}] \dots \dots \dots (\text{II},1)$$

### II.8.1.2 Humidité Relative

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température. :[12]

$$H_R = \left[ \frac{P_V}{P_S}(T) \right] \cdot 100 \quad 0\% \leq H_r \leq 100\% \dots\dots\dots (II,2)$$

### II.8.2 Enthalpie de l'Air Humide

L'enthalpie de l'air humide définit le contenu énergétique de cet air.

L'enthalpie notée H de 1kg d'air sec associée à Y kg de vapeur d'eau à  $\theta^\circ$  C représente la quantité de chaleur à fournir à ce mélange sous une pression constante pour l'amener de la température de référence  $0^\circ$  C à la température de  $\theta^\circ$  C. Les états de référence à considérer sont l'eau liquide et le gaz sec à  $0^\circ$ C. [11]

L'enthalpie de l'air humide H est la somme de l'enthalpie de l'air et de l'enthalpie de l'eau.

$$H = c_{p_a} \theta + Y(L_v + c_{p_a} \theta) \dots\dots\dots (II,3)$$

Où  $c_p$  et  $c_p$  sont respectivement les chaleurs massiques de l'air et de l'eau à l'état gazeux et  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation de l'eau à  $0^\circ$  C.

### II.8.3 Température:

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

#### II.8.3.1 Température Sèche :

On nomme température sèche d'un gaz la température indiquée par une sonde de température placée dans le courant gazeux. Il s'agit de la température d'un gaz au sens Courant. [12]

#### II.8.3.2 Température Humide du Gaz :

On nomme température humide (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans le courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température prise par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement. [12]

### II.8.3.3 Température de Rosée (Point de Rosée)

Dans un mélange de gaz et de vapeur, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas. Quand on refroidit ce mélange sous pression totale constante, la pression partielle de la vapeur demeure inchangée mais par contre, la tension maximale  $P_s$  de la vapeur diminue, tant que cette tension maximale  $P_s$  est supérieure à la pression partielle  $P_v$  de la vapeur dans le mélange, la vapeur reste sèche et l'humidité (absolue) du gaz reste constante.

Pour une certaine température  $T_r$ , la tension maximale  $P_s$  devient égale à la pression partielle  $P_v$ . La vapeur devient saturante et les premières traces de phase condensée (liquid généralement) apparaissent a cette température  $T_r$  : on donne le nom de point de rosé.

A la température  $T_r$  on a donc  $H_r = 1$ , un refroidissement au-dessous de  $T_r$  provoque une condensation de la vapeur (brouillard) et par la suite une diminution de l'humidité du gaz. [13]

### II.9. Vitesse de Séchage :

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporée de solide à sécher par unité de temps et de masse de solide sec, ou tout simplement la limite du quotient de la différence de la teneur en eau " $\Delta m$ " par l'intervalle de temps " $\Delta t$ ", c'est la grandeur qui caractérise pratiquement l'allure du transfert.

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse de l'air.[10]

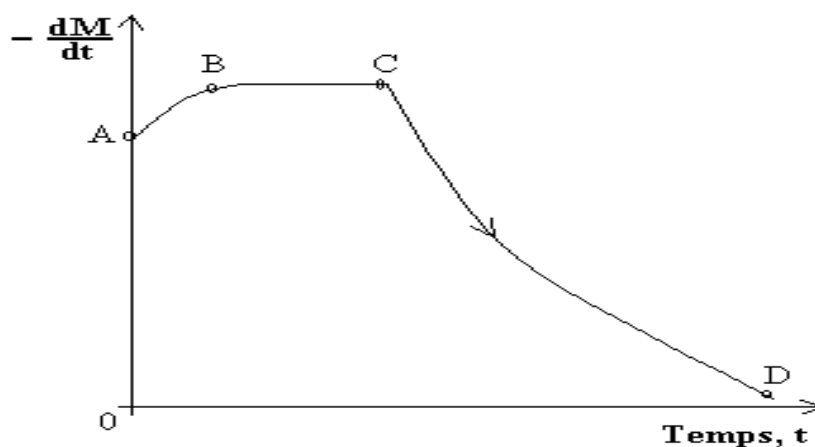
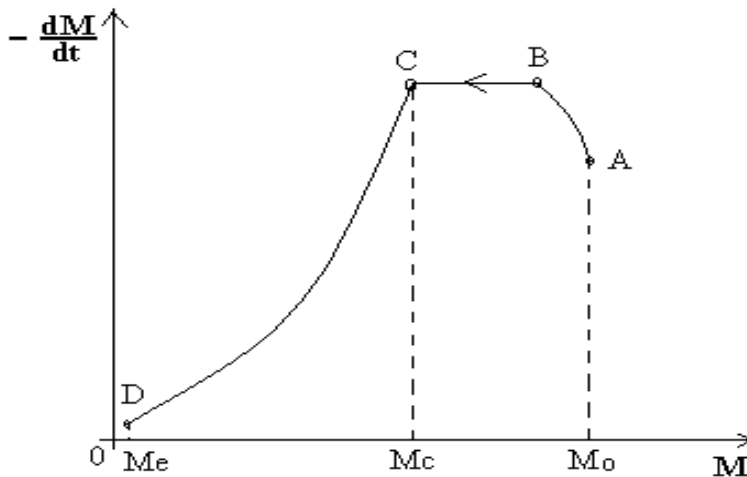


Fig. II.7: Vitesse de séchage  $-dM/dt=f(t)$



**Fig. II.8:** Vitesse de séchage  $-dM/dt=f(M)$

### II.9.1 Courbes de Séchage.

Les courbes de séchage sont représentées soit par les variations de l'humidité absolue ( $X$ ) du produit en fonction du temps, soit par la variation de la vitesse de séchage ( $-dX/dt$ ) en fonction du temps  $t$  ou même la courbe proposée par Krisher ( $dX/dt$ ) en fonction de l'humidité absolue  $X$ . [9]

### II.9.2. Cinétique du Séchage

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau ( $\text{kg d'eau} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (températures, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit pendant l'opération de séchage en fonction du temps. Les courbes de cinétique de séchage varient suivant le produit à sécher et contiennent de une à trois principales périodes de la cinétique de séchage, tout dépend du produit. [9]

On obtient la courbe de séchage expérimentale en suivant la variation de l'humidité absolue du produit par des pesées successives au cours du séchage jusqu'à atteindre l'humidité absolue d'équilibre du produit. Pour chaque produit il existe une valeur d'humidité optimale d'équilibre pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses propriétés organoleptiques et nutritionnelles [10]

On doit impérativement atteindre cette valeur optimale à la fin de l'opération de séchage qui est dans notre cas pour la tomate de  $\varphi_{eq} = 11\%$ .

## II.10. Lois Physiques du Séchage

Le processus de séchage fait intervenir de multiples mécanismes. En effet, l'énergie nécessaire pour vaporiser l'eau du produit à sécher provient d'un milieu extérieur ou milieu ambiant. Ce milieu extérieur qu'il faut prendre en compte dans les échanges air-produit, est l'air de la sous-couche qui l'entoure: C'est le lieu des interactions les plus proches dont les actions sont prises en compte. La vapeur produite est évacuée dans cette même atmosphère, ou interviennent principalement deux types de transferts: le transfert de matière et le transfert de chaleur.[ 14]

### II.10.1 Mode de Contrôle du Séchage

Le séchage est un processus complexe qui peut être contrôlé par des mécanismes internes, externes, ou mixtes. Le critère de qualification d'un mode de contrôle du processus est défini à partir du nombre diffusionnel de Biot (Bi). Ce dernier se définit par la formule suivante : [14]

$$Bi = \frac{k_m e (x - x_{eq})}{\rho D (w - w_{eq})} \dots \dots \dots (II,4)$$

Avec:

$K_m$ :	coefficient de transfert de masse ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ )
$e$ :	épaisseur du produit (m)
$D$ :	coefficient de diffusion ( $m^2.s^{-1}$ )
$W$ :	humidité du produit ( $kgH_2O/kg_{ms}$ )
$P$ :	masse volumique du produit ( $kg.m^{-3}$ )
$X$ :	humidité absolue de l'air ( $kg/kg_{a.s}$ )
$X_{eq}$ :	humidité absolue d'équilibre de l'air ( $kg/kg_{a.s}$ )

Le nombre de Biot établit une comparaison entre le transfert externe de masse et la diffusion à l'intérieur du produit. Au cours du transfert de matière, le corps séché de teneur en eau (W) cède de la vapeur d'eau à l'air ambiant d'humidité absolue (X). Le phénomène inverse se produit lors de la reprise de masse ou réhumidification. En général pour le séchage, trois cas sont à distinguer : [14]

\*  $Bi < 1$ , il y a un contrôle externe du séchage. Le produit atteint presque instantanément l'équilibre avec le milieu ambiant et le coefficient de transfert de masse n'est pas utile pour modéliser le processus. Il n'y a pas non plus de transfert de masse à l'intérieur. Le profil de l'humidité dans le solide est plat. L'humidité moyenne du produit est égale à celle de l'interface vapeur-solide. Ce contrôle est observé pendant la phase constante de séchage.

\*  $1 < Bi < 100$ , le séchage connaît un contrôle mixte, tant par des mécanismes internes qu'externes. [14]

\*  $Bi > 100$ , le séchage est contrôlé par des mécanismes internes. Il s'établit également un gradient d'humidité dans le produit.

**II.10.2 Mécanisme de Transfert de l'Eau d'un Produit**

Les transferts de matière sont des processus de déplacement de matière sous l'impulsion d'un gradient de concentration ou de pression. On distingue deux types de mécanisme de transfert de masse: le transfert à l'échelle microscopique ou diffusion et le mécanisme de transfert à l'échelle macroscopique ou transfert convectif de matière. En ce qui concerne l'eau, son mécanisme de migration est la diffusion. Cette diffusion concerne tant son état liquide que sa phase vapeur. Ainsi, on distingue : la diffusion moléculaire, capillaire, de KNUDSEN. [14]

**II.10.3 Transferts de Chaleur**

L'évaporation de l'humidité à la surface du produit s'accompagne d'un transfert de chaleur venant soit de l'extérieur, soit de l'intérieur du produit. Les échanges de chaleur entre le produit à sécher et le milieu extérieur peuvent se faire suivant trois modes principaux de transfert de chaleur: la convection, la conduction. [14]

**II.10.3.1 Transfert par Conduction**

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence de la différence de température. La théorie sur la conduction repose sur la loi de Fourier: le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température:

$$Q = \frac{-J.S dT}{dx} \dots\dots\dots (II,5)$$

- $Q$  flux de chaleur (W)
- $J$  coefficient de conduction (conductivité thermique) ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
- $S$  surfaces d'échange ( $m^2$ )
- $T$  température (K)
- $X$  coordonnée spatiale (m). [14]

**II.10.3.2 Transfert par Convection**

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par le déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est décrit par la loi de Newton:

$$Q = h_C S(T_P - T_\infty) \dots\dots\dots (II,6)$$



Avec:

$h$	coefficient de transfert convectif de chaleur ( $\text{W.m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
$S$	surface d'échange ( $\text{m}^2$ )
$T_P$	température de la surface
$T_\infty$	température du fluide loin de la surface de contact (K) [14]

### II.11 Modèle de Séchage en Couche Mince

La modélisation des courbes de séchage solaire à définir une fonction vérifiant l'équation :  $X_r = f(t)$  dite équation caractéristique de séchage.

On relève dans la littérature une abondance de modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes de cinétiques de séchage.

Les diverses équations donnent l'évolution au cours de séchage de la teneur en eau réduite en fonction du temps. Ces équations contiennent des constantes qui sont ajustées pour concorder avec les courbes expérimentales de séchage. Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'étude expérimentale pour lequel elles ont été établies.[15]

Le Tableau II.2 regroupe quelques équations caractéristiques de séchage trouvées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage solaire en couche mince d'un produit

**Tableau II.2 : Différents modèles mathématiques de séchage [15]**

Nom du modèle	Expression du modèle	Références
Newton	$X_r = \exp(-kt)$	W.K. Lewis. 1921
	$X_r = \exp(-ktn)$	L.M. Diamente, P.A. Munro. 1993
Henderson and Pabis	$X_r = a \exp(-kt)$	Q. Zhang, J.B. Litchfield. 1991.
Modified	$X_r = \exp(-(kt)^n)$	D.D. Overhults, G.M. White, M.E. Hamilton, I.J. Ross. 1973
Logarithmique	$X_r = a \exp(-kt) + c$	A.Yagcioglu, A. Degirmencioglu, F. Cagatay. 1999
Two – terme	$X_r = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	S.M. Henderson. 1974
Two – terme exponential	$X_r = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Y.I.Sharaf-Eldeen,J.L. Blaisdell, M.Y. Hamdy. 1980.

Approximation of diffusion	$X_r = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	O.Yaldiz, C.Ertekin. 2001
Verma et al.	$X_r = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	L.R. Verma, R.A. Bucklin, J.B. Endan, F.T. Wratten. 1985
Midilli et al.	$X_r = a \exp(-ktn) + bt$	A.Midilli, H.Kucuk, Z.Yapar. 2002

**II.11.1. Paramètres Statistiques Utilisés**

Le modèle approprié à la description de l’allure de l’humidité absolue réduite d’un produit est choisi selon les paramètres statistiques suivants :

Le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) est l’un des critères pour analyser la précision de l’équation qui décrit les courbes de séchage.

En plus de  $R^2$ , le paramètre statistique  $\chi^2$  – carré réduits ( $\chi^2$ ) est utilisé pour étudier la précision du lissage.[15]

Ces paramètres statistiques sont calculés comme suit :

$$R^n = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{pre,i}^* - X_{pre,i}^*)^2}{\sum_{i=1}^n (X_{exp,i}^* - X_{exp,i}^*)^2} \dots\dots\dots (II,7)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{exp,i}^* - X_{pre,i}^*)^2}{N-n} \dots\dots\dots (II,8)$$

Où:

$X_{exp,i}^*$  Représente la ieme humidité absolue réduite expérimentale.

$X_{pre,i}^*$  : Représente la ieme humidité prédite selon le modèle approprié.

N : Est le nombre de points expérimentaux.

n : Désigne le nombre de constante de chaque modèle.

Tel que:

Coefficient de corrélation ( $R^2$ ) élevé (tendant vers 1),  $\chi^2$ -carrée ( $\chi^2$ ) minimale (tendant vers 0).

**II.12 Conclusion:**

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

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

## CHAPITRE .III: Partie Expérimentale

### III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale du processus du séchage des tranches de citrons 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 module mathématique approprié du séchage de produit (la citons).

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

### III.2 Objectifs

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

### III. 3.Définition de la Plante de Citron

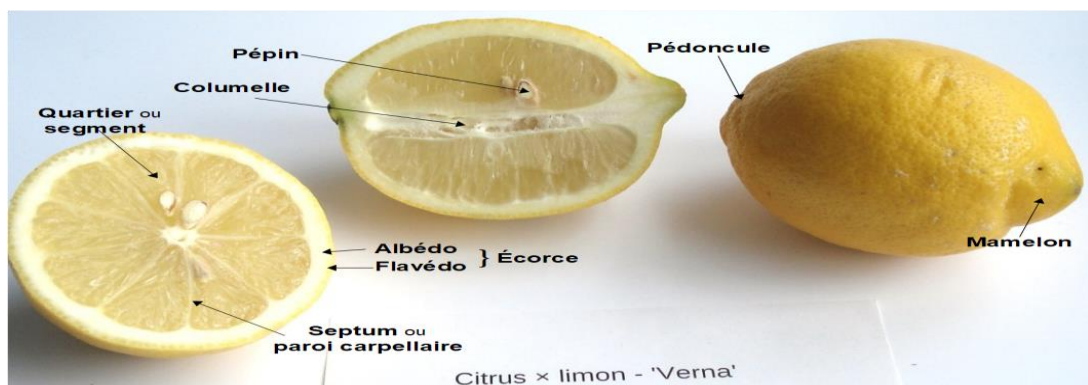
Le citron (ou citron jaune) est un agrume, fruit du citronnier (*Citrus limon*). Il existe sous deux formes : le citron doux, fruit décoratif de cultivars à jus peu ou pas acide néanmoins classé *Citrus limon* (L.) *BURM. f.* (classification de TANAKA) ; et le citron acide, le plus commun de nos jours, dont le jus a un pH d'environ 2,5

Ce fruit, mûr, a une écorce qui va du vert tendre au jaune éclatant sous l'action du froid. La maturité est en fin d'automne et début d'hiver dans l'hémisphère nord. Sa chair est juteuse, le citron acide est riche en vitamine C, ce qui lui vaut - avec sa conservation facile - d'avoir été diffusé sur toute la planète par les navigateurs qui l'utilisent pour prévenir le scorbut. De l'écorce on extrait une huile essentielle qui contient entre autres substances du limonène et du citral.

Au niveau de la morphologie externe, le citron est un fruit charnu particulier, un type de baie appelé hespéridé, issu du développement d'un ovaire multi carpelle. De forme ovale, il est doté chez de nombreuses variétés, d'un mucron ou d'un mamelon cerné d'une aréole, dépression circulaire plus ou moins profonde et large à l'extrémité stylaire. La croissance du pédoncule au cours de la fructification donne naissance à la columelle, axe central plus ou moins fibreux du fruit qui comporte autant de faisceaux libéro-ligneux qu'il y a de carpelles auxquels ils aboutissent. Le calice persistant au niveau de la région pédonculaire, possède sépales verts, soudés en forme de coupe.

Au niveau anatomique, le péricarpe de cet agrume, appelé aussi écorce, est composé de deux couches superposées : la couche externe, également nommée « flavedo » (riche en flavonoïdes, pigments jaunes, du latin flaveo, « jaune »), est formée de l'épicarpe et du mésocarpe externe, et correspond au zeste ; la couche interne blanche et spongieuse, également nommée « albédo » (du latin albedo, « blancheur »), est le mésocarpe interne qui constitue la source la plus importante en pectines et en glucides. Selon la maturité du citron, la couleur du flavedo varie de vert à jaune vif. Il renferme de nombreuses glandes à huile essentielle à l'arôme très typé. Ces glandes, riches en terpènes, constituent une véritable barrière chimique contre les insectes et les microorganismes et permettent de protéger le fruit des attaques extérieures. L'écorce est formée de l'épicarpe et du mésocarpe.

L'endocarpe mince limite la pulpe charnue. Il émet vers l'intérieur des sacs ou vésicules à jus (ces sacs sont des poils endocarpiens, cellules fusiformes constituées d'une grande vacuole où s'accumulent eau, glucides et acide citrique) contenues dans 8 à 12 quartiers (ou segments) bien différenciés séparés par un septum, mince membrane formée à partir de l'épiderme interne des carpelles (cette paroi carpellaire contenant de la cellulose, de l'hémicellulose et des pectines délimite les segments correspondant aux loges carpellaires). Les graines de type pépin se forment dans les loges carpellaires à partir de deux rangs d'ovules placés sur les côtés de l'angle formé par les septa à leur confluence avec la columelle.[1]



**Figure III.1** : Parties du citron

#### III.4 Ordre et Famille

Le citronnier appartient à la famille des *Rutaceae*, ordre des *Térébenthales*. Les *Térébenthales* ont des fleurs à disque nectarifère *inta*-staminal (Disciflores)

Les Rutaceae s'identifient par la présence, sur leurs organes aériens, de poches sécrétrices de type Schizolysigène. Certaines Rutaceae sont des herbacées à petites baies et au goût poivré dont la pluparts sont des arbres odoriférants, à fruits juteux comme le citron. Ils constituent la sous-famille des Aurantioideae

Le caractère distinctif de la sous-tribue des Citrinae ou Hespéridées est le fruit appelé Hespéridie : les parois de ses loges sont garnies de poils vésiculaires, se développant dans la cavité ovarienne en sacs remplis de grosses cellules à paroi mince et contenant le jus. Ce nom est issu de la mythologie grecque où les trois nymphes du couchant aux voix claires, appelées Hespérides, veillaient sur les "pomme d'or" du verger des Dieux.

Les trois genres *Citrus*, *Fortunella* et *Poncirus* regroupent les plantes fruitières exotiques couramment appelées Agrumes. [2]

### III.5 Classification Botanique :

Selon Padrini et Lucheroni (1996), la classification de citron est la suivante :[2]

- Règne : Plantae
- Embranchement : Spermaphytes
- Classe : Eudicotylédones
- Ordre : Sapindales
- Famille : Rutaceae
- Genre : Citrus
- Espèce : Citrus limon

### III.6 Préparation des séchoirs solaires :

La préparation des séchoirs solaires concerne l'assurance de bon fonctionnement des séchoirs par :

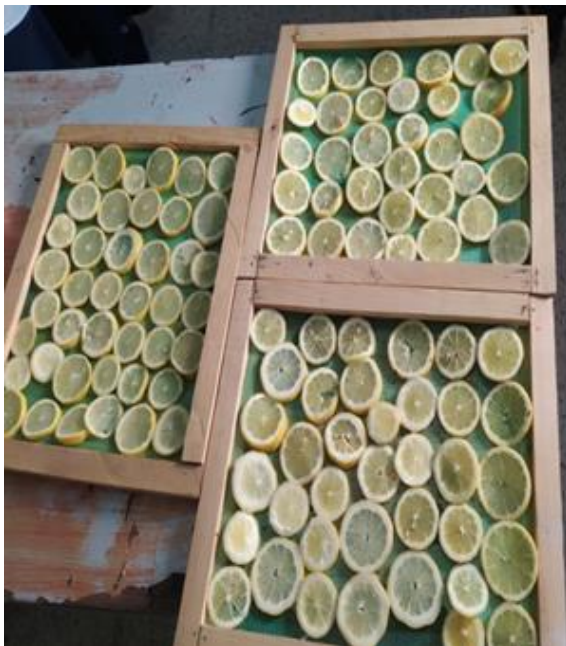
- Le nettoyage de la couverture transparente et de la plaque noir du capteur solaire. et de l'absorbeur



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

### III.7 Préparation du produit:

Les tranches de citron sont préparées avec soin, où les tranches sont d'épaisseur égale. Trois grilles sont préparées. Environ 600 grammes du produit sont placés dans chaque grille. Une grille est placée pour le séchage à l'air libre, une pour le séchage direct, et un pour le séchage indirect.



**Figure III.3 :** Préparation du produit dans les claies



**Figure III.4:** Couper le citron en tranches



### III.8 Analyse Physicochimique du Citron :

#### III.8.1.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 volume d'eau distillée.
- Chauffer au bain-marie pendant 30 mn en remuant de temps avec une baguette de verre.
- Broyer ensuite le mélange obtenu dans un mortier et procéder à la détermination en prenant soins que l'électrode soit complètement immergée dans la solution



**Figure III.5** Détermination de pH

#### III.8.2 Titrage de l'acidité :

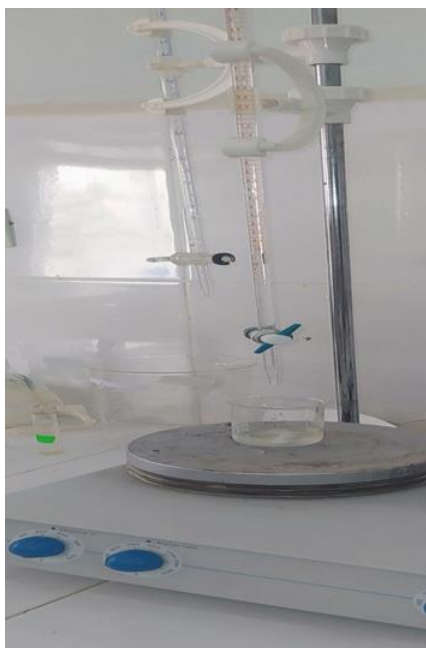
➤ **Principe**

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 phénolphaléine 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.6 :** Détermination de titrage de l'acidité

➤ **Expression des résultats**

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

$$A\% = \frac{250 \cdot V_1 \cdot 100}{V_0 \cdot M \cdot 10} \cdot 0.07 \dots\dots\dots (III.1)$$

**Soit :**

M: La masse, en grammes de produits prélevé.

V<sub>0</sub> : le volume en millilitres de la prise d'essai.

V<sub>1</sub> : 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.8.3 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.7** : détermination de l'activité d'eau

### III.8.4. 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  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ .

#### ➤ Mode opératoire

- Sécher les trois capsules vides à l'étuve durant 15 minutes à  $105^\circ\text{C}$ .
- Mettre les capsules après refroidissement dans un dessiccateur.
- Peser dans chaque capsule 3g de carotte et les placer dans l'étuve réglée à  $105^\circ\text{C}$
- 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 :

$$H\% = \frac{(M_1 - M_2)}{P} \cdot 100 \dots\dots\dots (III .2)$$

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.

$$\text{Matière sèche (\%)} = 100 - H(\%) \dots\dots\dots(\text{III.3})$$



**Figure III.8** : Détermination de la Teneur en eau

### III.8.5. Teneur en cendre / matière organique:

#### ➤ Principe

Le citron est calciné 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.9** : répartition des capsules dans le four à moufle

➤ **Expression des résultats:**

$$MO\% = \frac{(M1-M2)}{P} \cdot 100 \dots\dots\dots (III.4)$$

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 % .... (III.5)**

### III.8.5 Teneur en Sucre :

➤ **Principe**

Un milieu acide permet l'hydrolyse de saccharose en sucres réducteurs, dont l'analyse est plus facile, cette hydrolyse est activée par l'utilisation du chauffage.

➤ **Mode Opératoire**

- prendre 5 ml de notre produit auquel on a ajouté 5 ml de HCl (2N).
- Réchauffer à 100°C au bain marie pendant 30 mn.
- Après refroidissement, prendre 1 ml de cet extrait et procéder au dosage des sucres contenu, comme pour les sucres réducteurs

Le résultat représente la quantité des sucres réducteurs déjà présents ainsi que les sucres réducteurs obtenus par hydrolyse du saccharose, donc se sont les sucres totaux,



**Figure III.10:** Détermination des sucres totaux par réfractomètre

### III.8.6.Extraction de l'huile essentielle

➤ **Principe:**

Pour extraire l'huile essentielle de citron, la technique d'hydrodistillation simple a été utilisée, celle-ci se produit dans l'appareil de Clevenger et consiste à porter à ébullition l'eau à laquelle est mélangée la poudre dans un ballon de laboratoire, et ce, grâce à un chauffe ballon. Les vapeurs hétérogènes ascendantes provenant du ballon progressent dans la puis se condensent sur la surface froide du réfrigérant. Le condensat est récupéré dans la ou l'huile essentielle se sépare de la phase aqueuse grâce à leurs différences de densité. L'eau en excès retourne dans le ballon par la voie qu'un robinet à 3 voies fait.

➤ **Mode opératoire:**

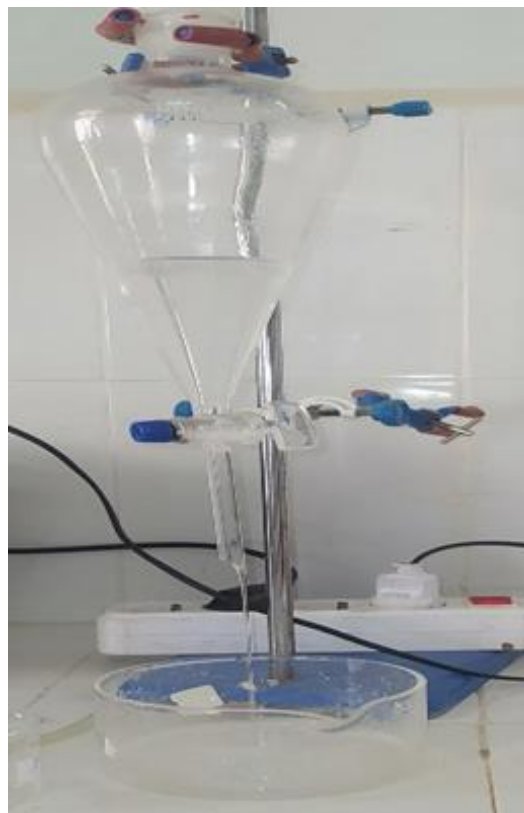
Afin de réaliser cette extraction, les étapes suivantes ont préalablement été réalisées :

- Peser 50 grammes de la poudre du citron, les mélanger à 500 ml d'eau contenue
- dans un ballon de laboratoire d'un litre de volume. Placer ce ballon dans le chauffe-ballon et introduire l'ouverture du Clevenger dans celle du ballon.
- Allumer le chauffe ballon.



**Figure III.11** Le Clevenger (hydrodistillateur standardisé)

Après avoir terminé le processus de distillation et extrait le produit, nous mettons ce dernier dans un entonnoir pour séparer et y ajouter la solution de l'hexane et le sel de table, puis nous tournons l'entonnoir et le laissons pendant 24 heures, puis nous retirons l'eau séparée de l'entonnoir et porter l'huile mélangée à la solution d'hexane au four à une température de 60 °C Celsius pour évaporer les hexane et obtenir de l'huile de citron.



**Figure. III.12** : Séparation de l'huile essentielle

➤ **Expression des résultats**

$$\text{Rendement}\% = \frac{P_2 - P_1}{M} \cdot 100 \dots\dots\dots(\text{III.6})$$

Soit

$P_1$  : poids du ballon vide(g)

$P_2$  : poids du ballon l'huile essentielle (g)

$M$  : masse de la prise d'essai (g)

### III.9 Résultats et Discussion

#### III.9.1 Les résultats d'analyses physico-chimiques :

Par le tableau suivant, on regroupe les propriétés physicochimiques déterminées lors de cette étude au niveau du laboratoire :

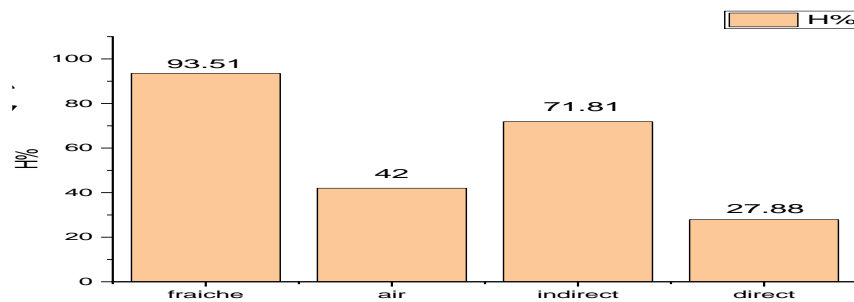
**Tableau.III.1: Les résultats d'analyses physico-chimiques**

	<b>Fraiche</b>	<b>air</b>	<b>indirect</b>	<b>direct</b>
H ( % )	93.51	42	71.818	27.882
MS( % )	6.49	58	28.182	72.117
MM( % )	1.57	1.699	0.35	1.982
MO( % )	4.92	56.3	27.83	70.135
PH( % )	3.34	3.6	3.7	3.57
A ( % )	3.01	7.77	7.14	11.55
AW( % )	0.9351	0.42	0.7181	0.2788
Sucres( % )	8.2	8.22	11	10.78
Re.h ( % )	0.045	0.086	0.05	0.032



**III 9.1.1. Détermination de la H%****Tableau.III.2 : Résultat de l'humidité**

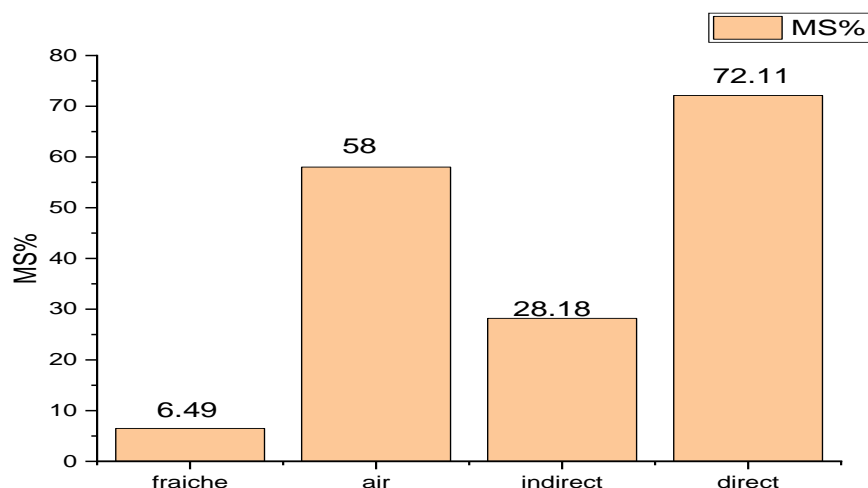
Produit	Fraiche	air	indirects	directs
H( %)	93.051	42	71.818	27.882

**Figure III.13. Humidité de citron**

Nous remarquons que le taux d'humidité est élevé dans les citrons frais avec un pourcentage de 93,51% tandis que dans les citrons séchés (séchage direct) l'humidité est faible par rapport aux citrons frais avec un pourcentage de 27,88% et il reste dans le séchage indirect et l'air est un peu moyen (indirect 71.81%. Air 42%).

**III.1.2Détermination de la MS%****Tableau.III.3 : Résultat de la MS.**

Produit	Fraiche	Air	indirects	directs
MS( %)	6.49	58	28.182	72.117



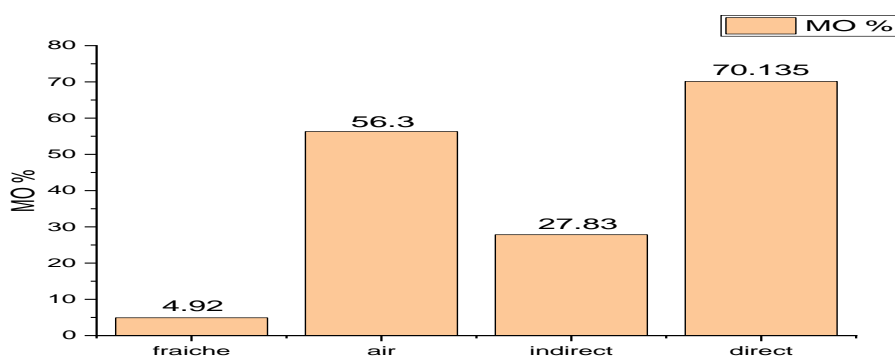
**Figure.III.14** : matière sèche de citron

On note que le pourcentage le plus élevé de matière sèche était dans le citron séché en séchage direct avec un pourcentage de 72,11% alors qu'il était dans le séchoir indirect 28,18% et séché à l'air 58%, tandis que dans le frais il contient le pourcentage de matière sèche le plus faible estimé à 6,49%.

### III.1.3 Détermination de la MO%

**Tableau.III.4** : Résultat de la MO.

Produit	Fraîche	air	indirects	directs
MO( %)	4.92	56.3	27.83	70.135



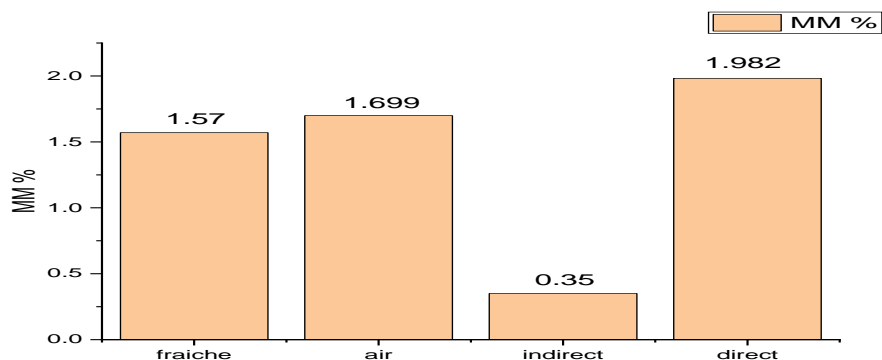
**Figure.III.15** : matière organique de citron

On note que le pourcentage de matière organique est élevé dans le citron lorsqu'il est séché au séchoir direct de 70,13% alors que dans le séchage indirect il est de 27,83% et le séchage à l'air est de 56,3% alors qu'au frais il est de 4,92%.

### III.1.4.Détermination de la matière minérale

**Tableau.III.5.:** Résultat de la MM

Produit	Fraiche	air	indirects	directs
MM( %)	1.57	1.699	0.35	1.982



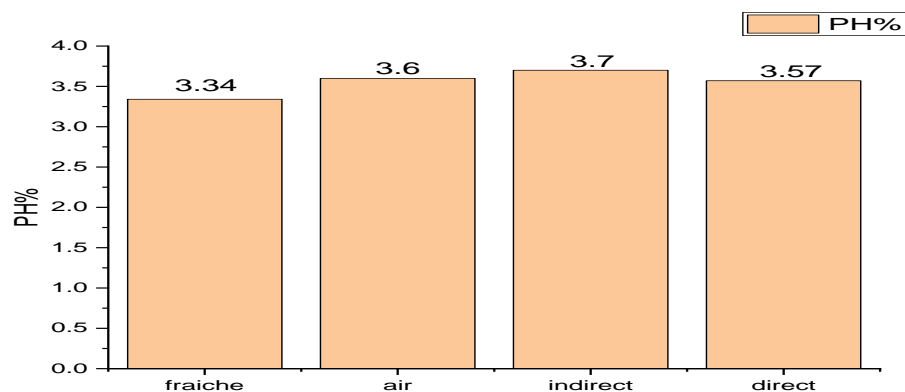
**Figure.III.16:** matière minérale de citron

Nous constatons que le pourcentage de minéraux dans le citron dans toutes les étapes de séchage que nous avons effectuées est très faible. En séchage direct, son pourcentage est de 1,98% en séchage indirect de 0,35% à l'air de 1,69% et en frais de 1,57%.

### III.1.5.Détermination de la pH%

**Tableau.III.6: Résultat de la pH.**

Produit	Fraiche	air	indirects	directs
PH( %)	3.34	3.6	3.7	3.57



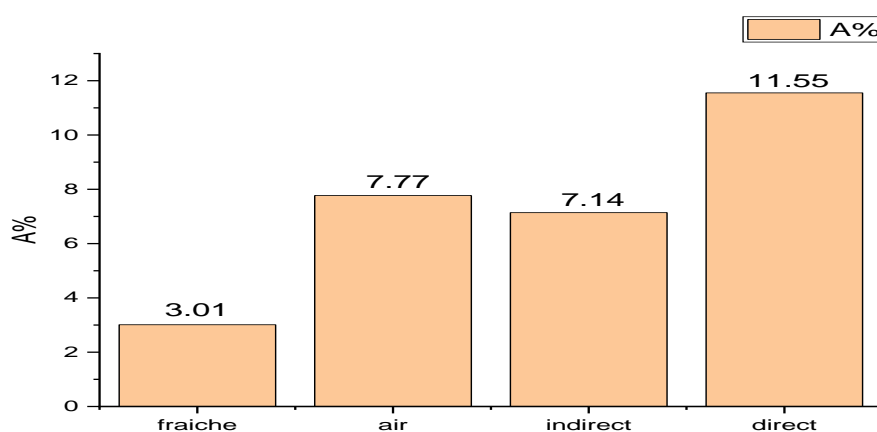
**Figure.III.17:** pH de citron

Nous remarquons une grande convergence du pourcentage d'acidité dans les étapes de citron frais et de séchage que nous avons effectuées.

### III.1.6.Détermination de la A %

**Tableau.III.7: Résultat de l'acidité.**

Produit	Fraiche	air	indirects	directs
A( %)	3.01	7.77	7.14	11.55



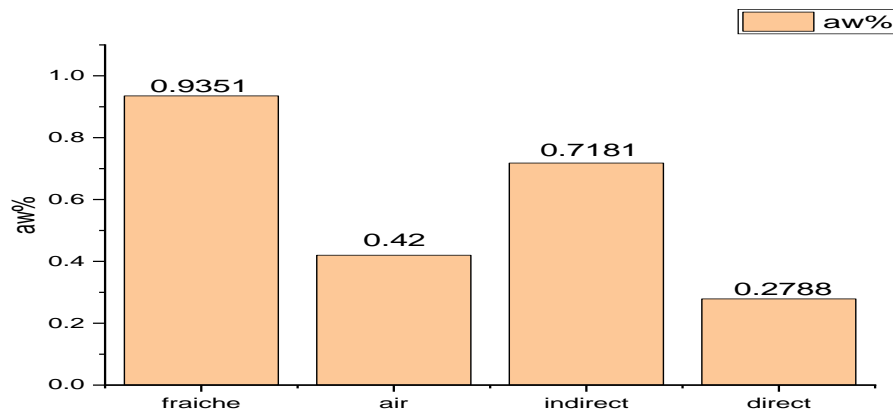
**Figure.III.18** : acidité de citron

On note que l'acidité est élevée dans les citrons séchés en séchage direct par rapport aux autres étapes de séchage par 11,55% alors qu'elle était faible dans les citrons frais par 3,01 % alors qu'il était en séchage indirect 7,14% et séché à l'air 7,77% .

### III.1.7.Détermination de l'activité

**Tableau.III.8 : Résultat de l'activité.**

Produit	Fraiche	air	indirects	Directs
AW( %)	0.9351	0.42	0.7181	0.2788



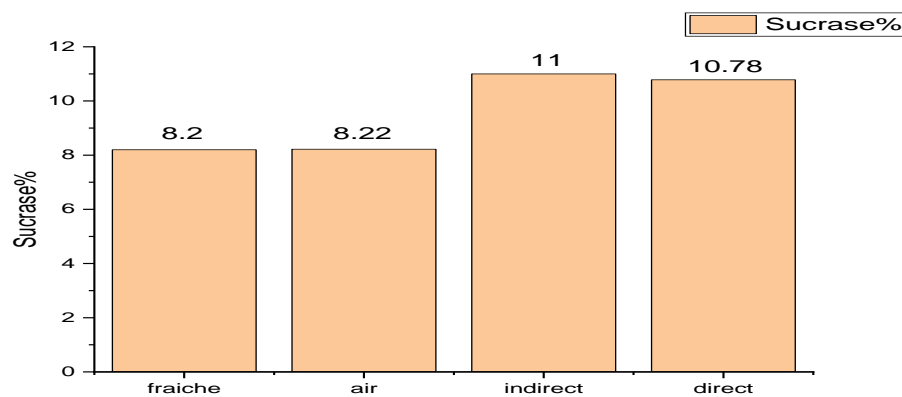
**Figure.III.19** : activité water de citron

Nous constatons que le pourcentage d'activité de l'eau des citrons dans toutes les étapes de séchage que nous avons effectuées est faible, comme il l'était dans les citrons frais 0,9351% et séchage à l'air 0,42% et séchage indirect 0,7181% et en séchage direct 0,2788%

### III.1.8.Détermination de la Sucres

**Tableau.III.9** : Résultat de la Sucres

Produit	Fraiche	air	indirects	directs
Sucres(%)	8.2	8.22	11	10.78



**Figure.III.20** : Sucre de citron

On note l'égal pourcentage de sucre pour les citrons frais et séchés à l'air.

### III.1.9 Détermination du rendement

Tableau.III.10 : Résultat du rendement

Produit	fraiche	air	indirects	directs
rendement( %)	0.045	0.086	0.05	0.032

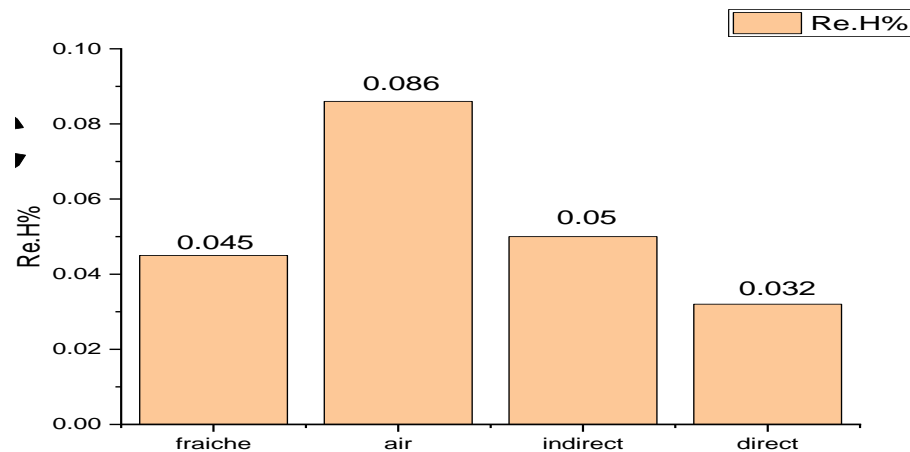


Figure.III.21 : rendement de citron

On remarque que le rendement est faible à toutes les étapes du séchage, alors que le séchoir à air a le rendement le plus élevé en huile de citron.

### III.10 Résultats expérimentaux et modélisation:

#### III.10.1 Etude de la cinétique de séchage solaire:

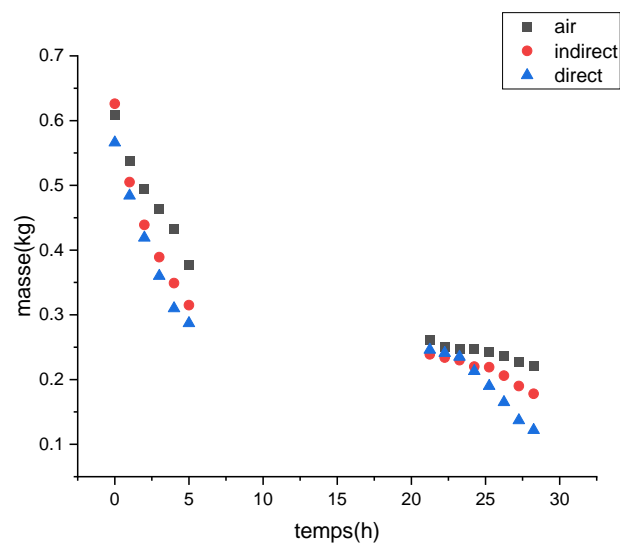
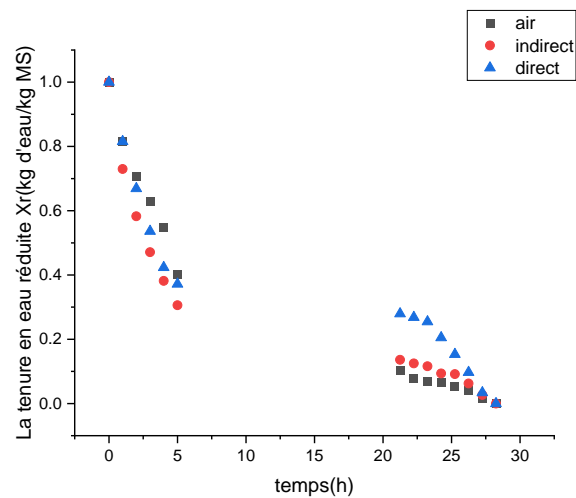


Figure III.22 : l'évolution de la masse de citron au tous de séchage

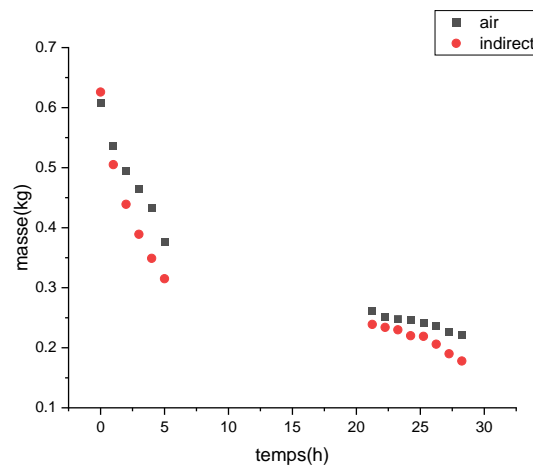
Afin d'étudier la cinétique de séchage, nous avons préparé des tranches de citron et mis environ 600g dans chaque rack, nous mettons quatre racks à l'intérieur de la chambre de séchage solaire et un à l'extérieur de la sécheuse pour sécher à l'air. Puis la masse est pesée après chaque une heure de séchage jusqu'à l'obtention d'une valeur stable. Le processus de séchage a pris 13 heures pour atteindre des valeurs constantes.

Figure III. Présente la cinétique de séchage du produit pour 30 heures de séchage, on remarque sur cette figure que la masse du produit diminue progressivement, et dès la 30 heure elle commence à se stabiliser.



**Figure III.23** : La cinétique de séchage du citron durant 28/03/2022

### III.10.2 Comparative entre le séchage à l'air et dans le séchage indirect :



**Figure III.24 :** Comparative entre le séchage à l'air et dans le séchage indirect

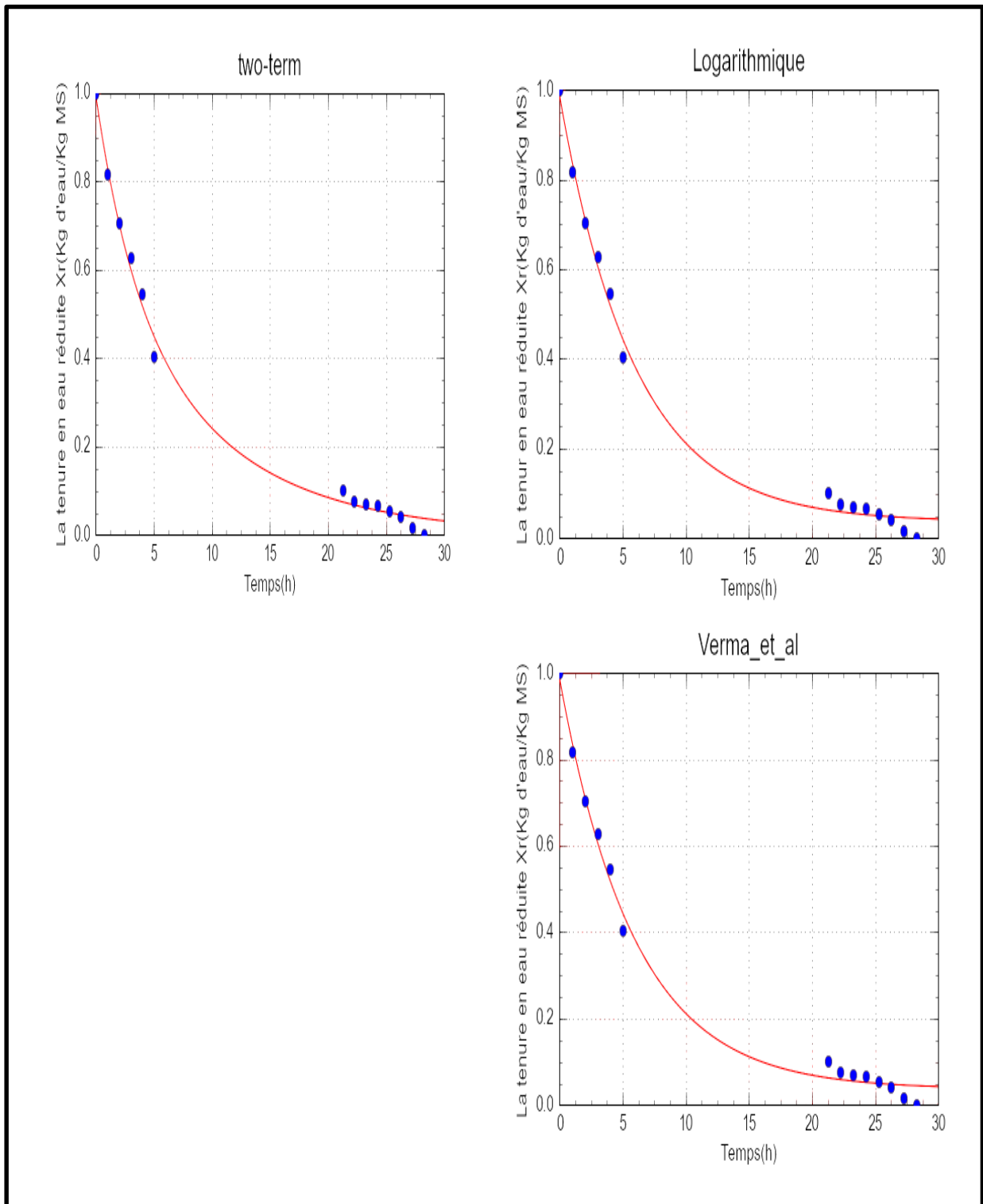
Notons également que le séchage direct dans l'air a pris plus de temps que le séchage dans le séchoir solaire, ce que indique que le séchage au séchoir solaire plus rapide que le séchage dans l'air, ce que nous pouvons expliquer par la différence en valeur de température et d'humidité.

### III.10.3 Modélisation de la cinétique de séchage:

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

L'analyse de régression a été effectuée en utilisant le programme informatique (CurveExpert Professional 2.6.3) et les coefficients de chaque modèle de séchage ont été déterminés.





**Figure III.25 :** le lissage des courbes de cinétique de séchage à l'air libre par trois modèles mathématiques

**Tableau III.11: Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour la séchage à l'air**

Modèle	two-term	Logarithmique	Verma_et_al
équation	$ae^{-k_0x} + be^{-k_1x}$	$ae^{-kx} + c$	$ae^{-kx} - (1 - a)e^{-gt}$
a	0.589732205822983	0.948784311570436	0.948783610284254
b	0.405411756481766	....	....
c	....	0.0369235928092210	....
g	....	....	0.272373271678828
t	....	....	1.20130546129524
K	....	0.169019110924727	0.169018178823149
K0	0.0975028013304730	....	....
K1	0.304421271725313	....	....
Xr	0.997708808199031	0.997144658265638	0.997144658261996
R <sup>2</sup>	0.995422865957930	0.994297469507696	0.994297469500433
RMSE	0.0269480480244091	0.0286792614169871	0.0300790631522767

Tous les modèles utilisés peuvent décrire l'évolution de la teneur en eau réduite des produits avec R<sup>2</sup> variant de 0.994297469500433 à 0.995422865957930 et Xr variant de 0.997708808199031 à 0.997144658265638. Le modèle " Logarithmique " peut être proposé comme étant le modèle le plus fiable pour décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.

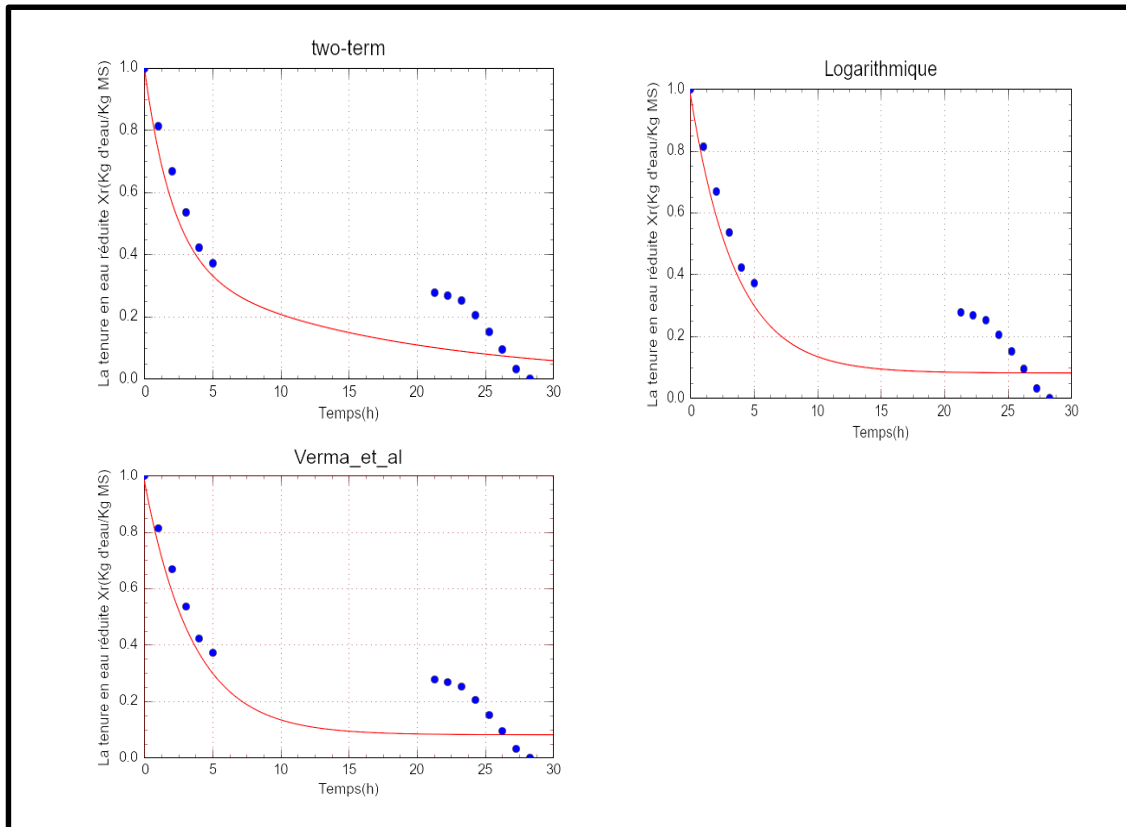


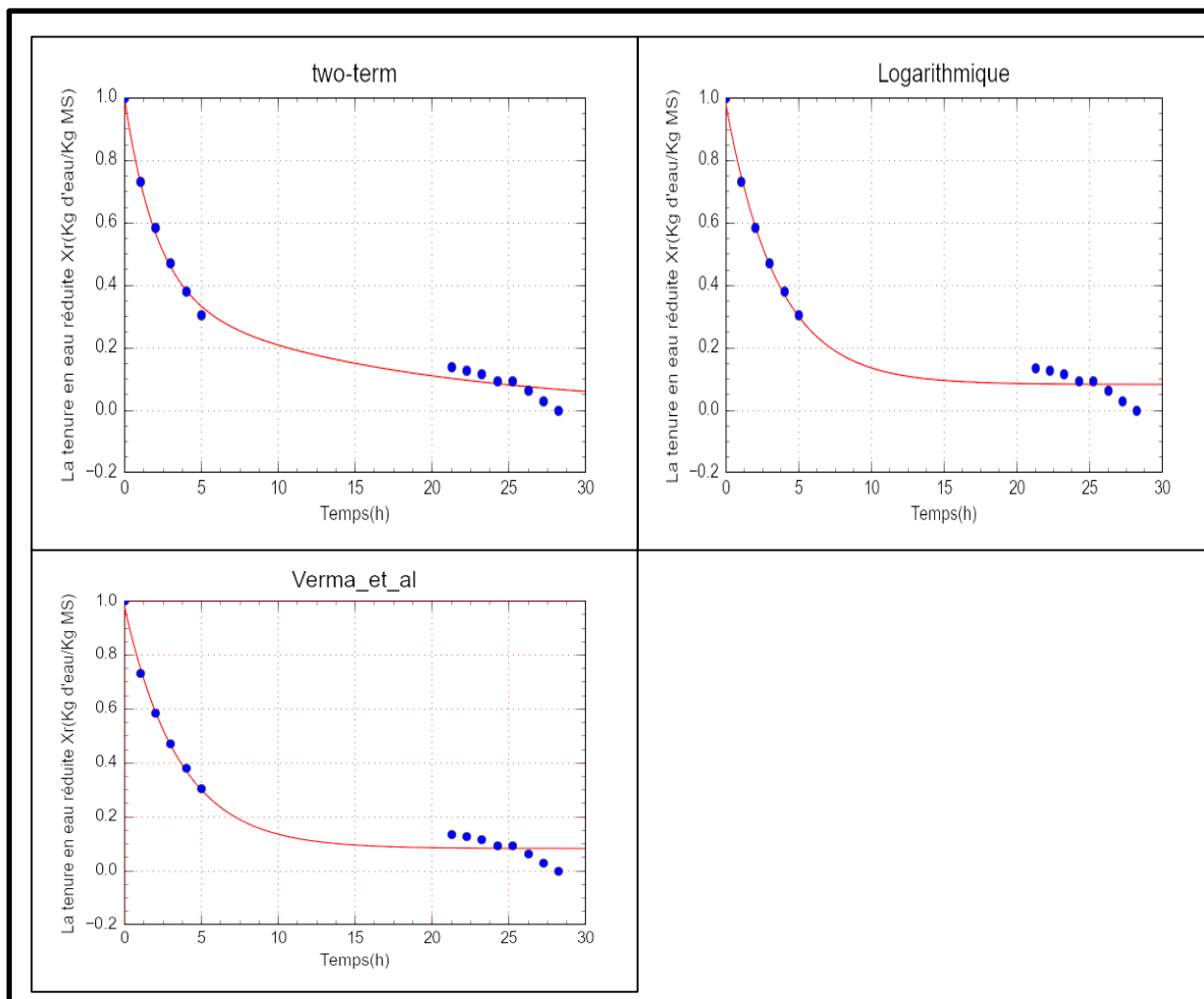
Figure III.26 : le lissage des courbes de cinétique de séchage à directe par trois modèles mathématiques.

Tableau III.12 Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour la séchage à directe.

Modèle	two-term	Logarithmique	Verma_et_al
équation	$ae^{-k_0x} + be^{-k_1x}$	$ae^{-kx} + c$	$ae^{-kx} - (1 - a)e^{-gt}$
a	0.0110070139036835	0.848929048558823	0.848929108697641
b	0.0109273700098766	....	....
c	....	0.158593887016169	....
g	....	....	0.500545063543000
t	....	....	0.0970882819366985
k	....	0.270457590885556	0.270457706380517
K0	0.0752711820139938	....	....

K1	0.0752713057368582	....	....
Xr	0.918926781780535	0.963412873623210	0.963412873623154
R <sup>2</sup>	0.844426430273531	0.928164365062932	0.928164365062823
RMSE	0.133487746806865	0.0864862603691937	0.0907075551204267

Tous les modèles utilisés peuvent décrire l'évolution de la teneur en eau réduite des produits avec R<sup>2</sup> variant de 0.928164365062932 à 0.844426430273531 et Xr variant de 0.963412873623210 à 0.918926781780535. Le modèle " two-term " peut être proposé comme étant le modèle le plus faible pour décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.



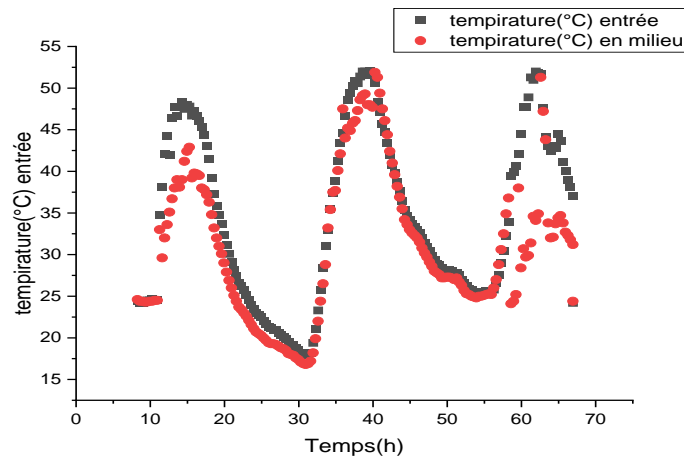
**Figure III.27 :** le lissage des courbes de cinétique de séchage indirect par trois modèles mathématiques

**Tableau III.13 : Coefficients des modèles d'ajustement décrivant le taux d'humidité réduit comme fonction du temps pour la séchage à indirecte.**

Modèle	two-term	Logarithmique	Verma_et_al
équation	$ae^{-k_0x} + be^{-k_1x}$	$ae^{-kx} + c$	$ae^{-kx} - (1 - a)e^{-gt}$
A	0.376237649194065	0.899454096364018	0.899454253622283
b	0.623498573966889	....	....
c	....	0.0809113708046683	....
g	....	....	0.582152351163543
t	....	....	0.373195259502428
k	....	0.282850093412613	0.282850324204389
K0	0.0621039940562463	....	....
K1	0.482405488951504	....	....
Xr	0.995597850476573	0.992648320999987	0.992648320999991
R <sup>2</sup>	0.991215079873572	0.985350689184092	0.985350689184102
RMSE	0.323130238886109	0.0397851451896861	0.0417270123006637

Tous les modèles utilisés peuvent décrire l'évolution de la teneur en eau réduite des produits avec R<sup>2</sup> variant de 0.991215079873572 à 0.985350689184092 et Xr variant de 0.995597850476573 à 0.992648320999987. Le modèle " Logarithmique " peut être proposé comme étant le modèle le plus faible pour décrire l'évolution de la teneur en eau réduite en fonction du temps.

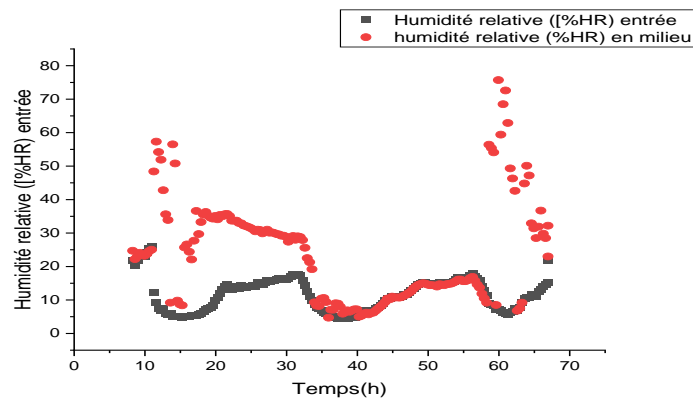
### III.10.4 Variation de la température à l'entrée et milieu de la chambre de séchage:



**Figure III. 28:** Evolution de la température d'entrant et milieu de la chambre de séchage en fonction du temps

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

### III.10.5 : Variation temporelle de l'humidité relative à l'entrée et au milieu de la chambre :



**Figure III.29 :** Evolution de l'humidité relative de l'air entrant et au milieu de la chambre

La courbe représente l'évolution de l'humidité relative de l'air en entrée et du milieu sécheur. On remarque une différence d'humidité de l'air entrant dans le séchoir et son milieu à chaque instant, également une diminution de l'humidité relative avec l'augmentation des heures de clarté où la température est élevée, et nous voyons dans chacun d'eux que l'humidité est bas et régulier, et c'est la preuve de la présence de la nuit.

### III.10.6 : Variation temporelle de l'humidité relative et température en entrée :

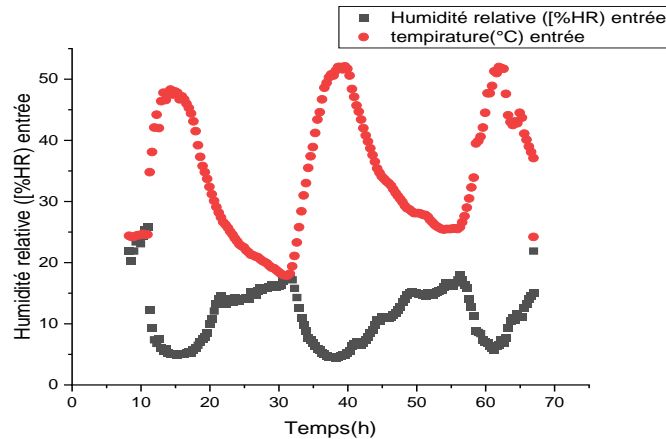


Figure III.30 : Evolution de l'humidité relative et température de l'air entrée

### III.10.7 : Variation temporelle de l'humidité relative et température de milieu de la chambre.

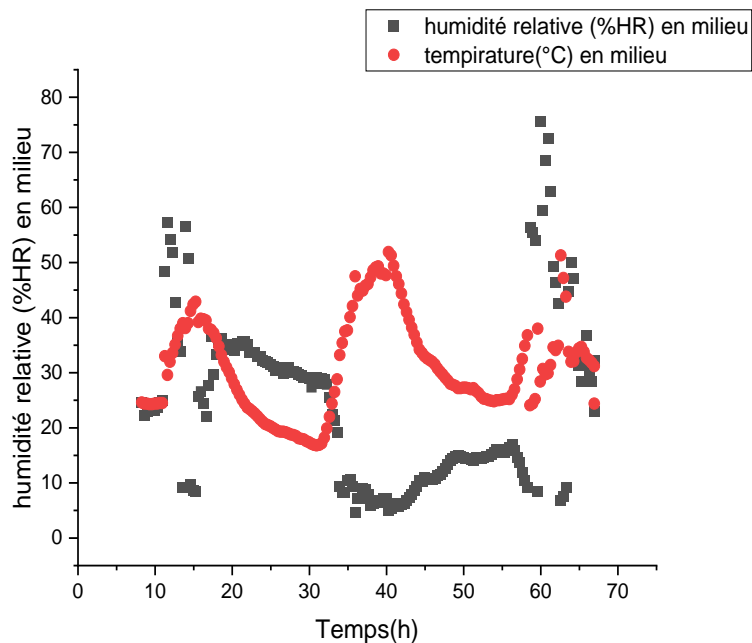
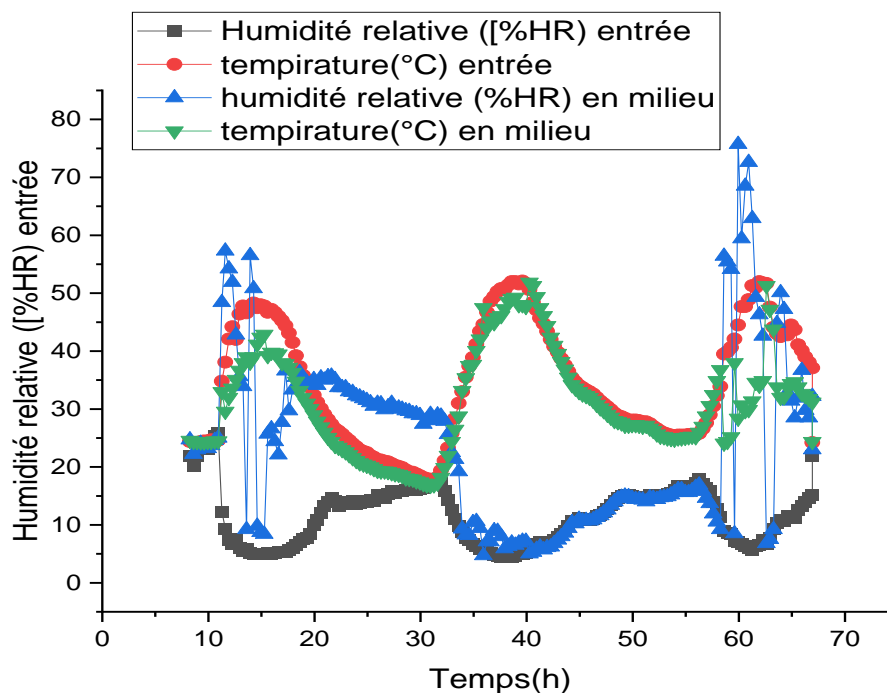


Figure III.31 : Evolution de l'humidité relative et température de milieu de la chambre

### III.10.8 : Variation temporelles des températures et l'humidité relative à l'entrée et en milieu séchoir :



**Figure III.32:** Evolution des températures et l'humidité relative à l'entrée et en milieu séchoir en fonction du temps

Cette figure représente l'évolution des températures des différentes parties du séchoir solaire en fonction du temps, on voit que les courbes ont quasiment la même allure mais à la différence à midi, lorsque l'absorption de la lumière solaire est plus importante, de sorte que l'humidité atteint son maximum et chute brutalement lorsque la porte de la salle de séchage est ouverte, cette différence en vaut la peine.

L'effet de l'absorbant sur le débit d'air à travers le capteur solaire et la consommation de la quantité de chaleur par évaporation de l'eau du produit plus l'humidité de l'air.

### III.11 Conclusion :

Dans cette classe, nous avons étudié le séchage des tranches de citron, où le séchage a duré environ 40 heures, car nous avons observé une diminution de la valeur de l'humidité et de l'acidité, ce qui permet d'inhiber l'action des bactéries nocives. L'étude de la cinétique de séchage permet de déterminer la courbe de la cinétique, puis le calage par des modèles mathématiques permet d'estimer le modèle et les paramètres adaptés à la situation et au



produit. Les meilleurs modèles sont logarithmiques pour le séchage à l'air et two-term de séchage dans un séchoir solaire indirect.

## **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons mené notre étude sur le séchage solaire, direct, indirect et à l'air des tranches de citron. Nous nous appuyons sur le séchage solaire direct et indirect pour étudier la caractérisation physicochimique des tranches de citron pour l'action inhibitrice Bactéries nocives tout en conservant les propriétés nutritionnelles (couleur, goût et odeur).

Le but de cette étude était de vérifier la cinétique de séchage et de trouver les traitements optimaux permettant de réduire l'humidité du produit séché en un temps relativement court. Bref, en établissant une modélisation de la cinétique de séchage, en caractérisant des relations avec des conditions mathématiques et en donnant des résultats proches et empiriques.

Dans le premier chapitre, nous avons conclu que les énergies renouvelables sont les énergies les plus prometteuses pour l'avenir, notamment l'énergie solaire, et dans le deuxième chapitre, le séchage solaire.

Il conserve ses propriétés physiques et chimiques telles que le goût, les vitamines, etc. Dans le troisième chapitre, à travers cette étude, nous avons défini l'un des meilleurs modèles, le modèle logarithmique du séchage à l'air et two-term pour le séchage solaire. **Au final, on apprécie**

**Notre modeste étude, qui consistait à faire sécher des citrons au soleil, pour en faire un futur projet, consiste à extraire des huiles thérapeutiques efficaces.**

Références Bibliographiques

**Références Bibliographiques :**

**Chapitre I :**

- [1] RALAVA Andrianiaina Alain < LES CONTRAINTES AU DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES > Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Maîtrise en Sciences Economiques, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO, 2015 / 2016.
- [2] MODERNE, E. M. A. L. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Certificat d'Aptitude Pédagogique de l'Ecole Normale Supérieure (CAPEN), 2015\_2016.
- [3] Belakehal, S. (2010). Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables.
- [4] Zadjia\_ HAMEL, Zineb\_ DJELLOUD < Valorisation d'un déchet ménager dans le but de produire l'énergie solaire>, Pour l'obtention du diplôme de Master, Université de Ghardaïa, 2020/2021. HAMEL, Z., & DJELLOUD, Z. (2021). *Valorisation d'un déchet ménager dans le but de produire l'énergie solair* (Doctoral dissertation, university ghardaia).
- [5] FAR, M. B., & YAQOT BOUDRAF, S. A. R. A. (2021). *LA PRO DDUCTION PHOTOVOLTAIQUE ELECTRICITE* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [6] Alayat Mahmoud, Boucetta Issam, Maximisation de la production d'un système photovoltaïque à base de MPPT soumis à des éclairagements différents, MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE MOKHTAR BADJI Annaba, juin 2017.
- [7] Kaddouri Houdaifa, Tinamri Adnan. Mémoire De Fin D'étude de Réalisation d'un bilan carbone pour les différents secteurs en Algérie, En vue de l'obtention du diplôme de Master II, Université Kasdi Merbah – Ouargla (2019).
- [8] <http://www.enerxis.mu/produits/>.
- [9] <https://www.jade-technologie.com>.
- [10] <https://fr.wikidia.org>.
- [11] <https://www.be-atex.com>.

**Chapitre II:**

- [1] Mme Soufi Ouahiba «Technologies de séchage Etude de cas: séchage de deux matrices végétales par étuve», Mémoire de Fin de Cycle En vue de l'obtention du diplôme Master. juin 2018, Universiti A. MIRA – Bejaia
- [2]:Chkib SELADJI << modélitions et simulation de séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée >> LE DIPLOME DE MAGISTERE ENERGETIQUE ,le 6/07/2011
- [3]:DRIHEM Badreddine .TOUATI TLIBA Marouane - << Etude expérimentale du séchage solaire des plantes feuillues ; Mémoire de fin d'étude Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE
- [4 ] BEN DJELLOUL Walid & REHAJEM Azzeddine << Réalisation et experimentation d'un prototype séchoir solaire de type serre avec systèmes de stockage thermique, par chaleur latente et sensible>> .LE DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE. UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA. le 25 Juin 2019.
- [5] : Souheyla KHALDI.<< Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie>>. Doctorat d'Énergétique. Thèse présentée et soutenue à « Tlemcen, Algérie », le « 23/06/2018
- [6] : MANSOURI SIDI MOHAMMED LAHRECHE ABDELKHALIQ <<Etude comparative des procédés de séchage solaire, en termes de cinétique. Applications à la valorisation des produits locaux>>LE DIPLOME DE MASTER ENERGETIQUE UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEN le 23 juin 2019
- [7] : Mme AUMPORN Orawan <<TITRE DE LA THESE Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase>> . Préparée au sein de l'école doctorale. Soutenue le 7 décembre 2017. UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA.
- [8]:Bouguetit Mohammed et Bougoffa Sassi << Etude expérimentale et théorique d'un séchoir solaire convectif direct>>. Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER. le : 27/06/2019.
- [9]KHAZZAR Ali, OUNIS Amor << Contribution à l'étude expérimentale de séchage du poivron>>. Mémoire de fin d'étude Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE. Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued le 20/09 /2020

[10] **TOUATI TLIBA Marouane** et **DRIHEM Badreddine** << Etude expérimentale du séchage solaire des plantes feuillues>> thèse de master académique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued , 2017-2018

[11] **Slimane BOUGHALI** . <<ETUDE ET OPTIMISATION DU SECHAGE SOLAIRE DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES DANS LES ZONES ARIDES ET DESERTIQUES>>. le diplôme de **DOCTORAT EN SCIENCES EN GENIE MECANIQUE**. UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA .le : 13/07/2010

[12] **BAHADJ Ahmed** <<Etude expérimentale de séchage solaire de lapomme de terre >>du diplôme de Master en Génie des Procédés . Université Kasdi Merbah Ouargla. le: 07 /06 /2014.

[13] **HOUHOU HATEM**, <<Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires >> , diplôme de **Magister en génie mécaniques**, Université Mohamed Khider – Biskra ,

[14] **KIBANGOU NKEMBO Serge Apollinaire**, << Contribution à l'étude du séchage solaire de la Banane plantain, de la Mangue et du Manioc: Essais de désorption, sorption et modélisation >> , Présentée à ! 'Université Félix Houphouet Boigny-Abidjan en vue de l'obtention du DOCTORAt, 20 Décembre 2013.

[15] [الزيت العطري] Mouna, M. (2015). Présentée et Soutenue publiquement (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA).

### Chapitre III :

[1] [fr.wikipedia.org/wiki/Citron](http://fr.wikipedia.org/wiki/Citron)

[2] Mlle Abderrahmane Fatima Zohra , Mlle Harrati Mansouria <<Etude de l'activité antimicrobienne de l'huile essentielle extraite de Citrus limon, en vue de son utilisation comme conservateur alimentaire, application sur un poisson bleu>> diplôme de Master en biologie , Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem , le 04/07/2017.

### Résumé

Le sujet de notre étude tourne autour du séchage solaire

L'objectif principal de notre travail est une étude expérimentale du séchage des citrons par séchage solaire direct et indirect et séchage à l'air. Ainsi que l'extraction d'huiles essentielles.

La détermination de la cinétique de séchage est nécessaire pour parvenir à une bonne compréhension des mécanismes qui se produisent dans le produit étudié, nous avons donc étudié une modélisation de la cinétique de séchage avec diverses relations mathématiques.

Le sécheur utilisé dans cette expérience permet d'agir simultanément sur la température de séchage, le temps de séchage et la teneur en eau finale du produit, ces facteurs décrivant le comportement cinétique du produit au cours du processus de séchage

#### Les mots clés:

Séchage solaire, Qualité Physique et Chimique, Huile Essentielle, Citron.

#### الملخص

موضوع دراستنا يتمحور حول التجفيف الشمسي

الهدف الأساسي لعلنا هو دراسة تجريبية لتجفيف الليمون عن طريق التجفيف الشمسي المباشر وغير المباشر والتجفيف بالهواء. وكذلك استخلاص الزيوت الأساسية

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

يتيح المجفف المستخدم في هذه التجربة تأثير العوامل الحرارية في نفس الوقت درجة حرارة التجفيف ووقت التجفيف والمحتوى المائي النهائي للمنتج فهذه العوامل هي التي تصف السلوك الحركي للمنتج أثناء عملية التجفيف.

#### الكلمات المفتاحية

الليمون ,الزيت العطري , الجودة الفيزيائية والكيميائية ,التجفيف الشمسي

### Abstract

The subject of Our study revolves around solar drying

The main objective of our work is an experimental study of the drying of lemons by direct and indirect solar drying and air drying. As well as the extraction of essential oils.

The determination of the drying kinetics is necessary to achieve a good understanding of the mechanisms that occur in the studied product, so we have studied a modeling of the drying kinetics with various mathematical relationships.

The dryer used in this experiment makes it possible to act simultaneously on the drying temperature, the drying time and the final water content of the product, these factors describing the kinetic behavior of the product during the drying process.

#### Keywords

SUN Drying, Physical and Chemical quality, Essential Oil, Lemon.