

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Énergies renouvelables

Spécialité : Énergies renouvelables en mécanique

**Thème**

**Etude expérimentale du séchage solaire des  
plantes feuillues**

Devant le jury composé de :

ZINE Ali                      Président  
KAROUA Houssine      Examineur  
LAOUINI Abdeldjalil    Encadreur

Présenté par :

- TOUATI TLIBA Marouane  
- DRIHEM Badreddine

2017-2018

# التشكرات

الحمد لله حتى يبلغ الحمد منتهاه

نتقدم بجزيل الشكر والعرفان للمشرف " لعويني عبد الجليل " الذي كان سندنا لنا

فلقد منحنا فرصة العمل معه، جعل اللطف والتواضع و الأمور أكثر سهولة

وكانت خبرته ونصائحه ضرورية بلا شك لتوجيه هذا العمل خلال فترة البحث

لم يكن من الممكن إكمال التجارب بدون نصيح ومساعدة بعض الأساتذة في قسم الميكانيك

ونحن نقدر بامتنان أساتذة قسم الميكانيك ولا سيما : " الأستاذ منصور خالد "

و جزيل الشكر والتقدير للأستاذ حاتم حوجو " - أستاذ بجامعة محمد خيضر بيسكرة على دعمه ومساعدته لنا.

شكر خاص لجميع حاملي شهادة الماستر دفعة 2017

وزملاء في تخصص طاقات متجددة و تخصص طاقة.

# الإهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نهدي هذا العمل لكل الأشخاص الذين قدموا لنا الدعم والمساعدة

والتشجيع في هذه المسيرة الدراسية الطويلة

إلى والديا المتوفيين رحمهما الله

إلى الوالدين الغاليين

"توأتي طيبه طيبه - العمارة اليابنة"

الذين ينيرون طريقي طوال سنوات حياتي "حفظهم الله لي"

و إلى الإخوة الأعزاء و لجميع أفراد عائلتنا

و لجميع أصدقائنا

# SOMMAIRE

Remerciements

Liste des Symboles

List des Figures

List des Tableaux

INTRODUCTION GENERALE..... 1

## CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE (GISEMENT SOLAIRE)

Introduction: ..... 2

I.1. Le gisement solaire: ..... 2

I.1.1. Le soleil:..... 2

I.1.2. Caractéristiques du soleil ..... 2

I.1.3. Présentation générale ..... 3

I.1.4. A1.Le système terre-soleil ..... 5

I.2 L'énergie solaire ..... 6

I.2.1. L'énergie solaire Origine ..... 7

I.2.2. Caractères particuliers..... 7

I.2.3. Captation ..... 7

I.2.4.Constante solaire:..... 8

I.3. Le rayonnement solaire:..... 9

I.3.1.Composante du rayonnement solaire ..... 10

I.3.2. Le rayonnement solaire direct : ..... 11

I.3.3.Le Rayonnement solaire diffus ..... 12

I.3.4.Le Rayonnement solaire réfléchi ..... 14

I.3. 5. Le rayonnement solaire global : ..... 14

I.4 Transfert de chaleur ..... 16

I.4.1 Champ de température ..... 16

I.4.2 Flux de chaleur..... 16

I.4.3 Les type de transfert de chaleur ..... 17

I.4.3.1 La conduction..... 17

I.4.3.2 La convection..... 18

I.4.3.3 Le rayonnement..... 18

I.5. Le gisement solaire en Algérie: ..... 19

CONCLUSION ..... 21

## CHAPITRE II: Généralités Sur Le Séchage Et Les Séchoirs Solaires

Introduction ..... 22

II.1 Séchage..... 22

II.1.1 Définition : ..... 22

II.1.2 Historique : ..... 22

II.1.3 Intérêt du séchage [20]..... 23

II.1.4 Principes de séchage [20] ..... 23

II.1.5 Différents méthodes du séchage ..... 23

II.1.5.1 Séchage mécanique..... 23

II.1.5.2 Séchage chimique ..... 24

II.1.5.3 Séchage thermique..... 24

II.1.5.4 Séchage par ébullition..... 24

II.1.5.5 Séchage par entrainement ..... 25

II.1.6 Caractéristiques de l'air de séchage..... 26

II.1.6.1 humidité ..... 26

II.1.6.1.2 humidité absolue..... 26

II.1.6.1.3 Humidité relative ..... 26

II.1.6.1.4 Température sèche..... 26

II.1.6.1.5 Température humide du gaz ..... 26

II.1.7	Caractéristiques des solides humides.....	27
II.1.7.1	Humidité absolue.....	27
II.1.7.2	Teneur en eau à base humide.....	27
II.1.7.3	Taux d'humidité.....	27
II.1.7.4	Taux d'humidité à l'équilibre.....	27
II.1.8	Activité de l'eau.....	28
II.1.8.1	Activité de l'eau dans un produit.....	28
II.1.8.2	Transfert de masse d'un produit humide.....	29
II.1.9	Vitesse de séchage.....	30
II.1.9.1	Courbes De Sechage.....	30
II.1.9.2	Cinétique du séchage.....	30
II.1.9.3	Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide.....	31
II.1.9.3.1	Période de mise en température (région a).....	31
II.1.9.3.2	Période à allure constante (région b).....	32
II.1.9.3.3	Période de ralentissement (région c).....	32
II.2	Les séchoirs solaires.....	33
II.2.1	Classification des systèmes du séchage solaire.....	33
II.2.2	Types de séchoirs solaires.....	33
II.2.2.1	Les séchoirs solaires directs.....	34
II.2.2.1.1	Principe de fonctionnement.....	34
II.2.2.1.2	Les avantages et les inconvénients.....	34
II.2.2.2	Séchoirs naturels (traditionnels).....	35
II.2.2.3	Séchoirs solaires indirects.....	36
II.2.2.3.1	Principe de fonctionnement.....	36
II.2.2.3.2	Avantages et les inconvénients.....	36
II.2.2.4	différentes types de séchoirs solaire.....	37
II.2.2.5	Les séchoirs mixtes.....	38
II.2.2.6	Les séchoirs hybrides.....	38
II.2.2.6.1	Les Avantages et les inconvénients.....	38
II.2.3	Capteurs Solaire.....	39
II.2.3.1	Capteurs Plans.....	39
II.2.3.2	Capteurs à Concentrations.....	39
II.2.3.2.1	Concentrateurs cylindro-paraboliques.....	39
II.2.3.2.2	Concentrateurs paraboliques.....	40
II.2.3.2.3	Système de centrale à tour (héliostat).....	41
	CONCLUSION.....	41
	<b>CHAPITRE III: Préparation du produit à sécher (plantes à feuilles)</b>	
	INTRODUCTION.....	42
III.1	Séchage de la menthe.....	42
III.1.1	Généralité sur la menthe.....	42
III.1.2	Utilisation de la menthe.....	42
III.1.3	La composition chimique de la menthe.....	43
III.1.4	Préparation du produit.....	43
III.1.5	Protocole expérimental.....	43
III.2	Séchage de la romarin.....	44
III.2.1	Généralité sur la romarin.....	44
III.2.2	Utilisation de la romarin.....	45
III.2.3	Préparation du produit.....	45
III.2.4	La composition chimique de romarin.....	45
III.2.5	Protocole expérimental.....	45
III.4	Séchage de la Laurel.....	46
III.4.1	Généralité sur la Laurel.....	46
III.4.2	Utilisation de la Laurel.....	47
III.4.3	La composition chimique de Laurel.....	47
III.4.4	Préparation du produit.....	47

III.5 Le but du séchage de ces produits (romarin , laurel , menthe) .....	48
Conclusion.....	48

## **CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS**

Introduction .....	49
IV.1 Le système utilisé dans l'étude .....	49
IV.2 Description du système de séchage et leur des composants.....	50
IV.2.1 Réflecteur ( miroir) .....	50
IV.2.2 Le récepteur.....	50
IV.2.3 Chambre de séchage.....	51
IV.2.4 le support.....	51
IV.2.5 Système de poursuite manuel.....	52
IV.2.6 Moteur ventilateur .....	53
IV.3 Le cas de la menthe.....	53
IV.3.1 Variation de teneur en eau en fonction de temps .....	53
IV.3.2 Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps.....	54
IV.3.3 Variation de la vitesse de séchage au cours du temps.....	55
IV.3.4 Variation de la température ambiante et la chambre et la température de récepteur au cours du temps .....	56
IV.3.5 Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps .....	57
IV.3.6 Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps .....	58
IV.4 Le cas de la romarin.....	59
IV.4.1 Variation de teneur en eau en fonction de temps .....	59
IV.4.2 Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps.....	60
IV.4.3 Variation de la vitesse de séchage au cours du temps.....	61
IV.4.4 Variation de la température ambiante et la chambre et la température de récepteur au cours du temps .....	62
IV.4.5 Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps .....	63
IV.4.6 : Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps .....	64
IV.5 Le cas de la laurel.....	65
IV.5.1 Variation de teneur en eau en fonction de temps .....	65
IV.5.2 Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps.....	66
IV.5.3 Variation de la vitesse de séchage au cours du temps.....	67
IV.5.4 Variation de la température ambiante et la chambre et la température de récepteur au cours du temps .....	68
IV.5.5 Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps .....	69
IV.5.6 : Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps .....	70
Conclusion.....	70
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>71</b>

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et est disponible presque universellement et le plus souvent parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, la source de presque toutes les sources d'énergie utilisées dans le monde. Ce qui résume les concepts généraux de l'énergie solaire et du soleil.

Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, à atteindre un seuil à partir de laquelle les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des microorganismes

Le séchage est l'un des processus les plus importants pour maintenir de nombreux produits alimentaires, et c'est souvent le dernier processus (généralement après évaporation) pour la fabrication de produits. C'est un procédé de séparation thermique, qui implique l'élimination de tout ou partie d'un liquide que l'on voit soi-disant "humide" évaporer ce solvant. Le produit final est appelé "sec", bien qu'il contienne de l'humidité résiduelle.

L'utilisation de séchoirs solaires aide à maintenir une utilisation optimale Pour les produits agricoles (plantes Feuillues).

Etude expérimentale du séchage solaire à travers un Concentrateurs paraboliques pour des plantes Feuillues , et ensuite effectuer quelques tests sur des produits agricoles (plantes Feuillues) tels que la Menthe, le Laurel, le Romarin.

Ce mémoire contient quatre chapitres:

- Le chapitre I: est consacré à la recherche bibliographique et aux concepts généraux de l'énergie solaire, des applications, du transfert thermique et solaire
- Le chapitre II :fournit des informations générales sur le séchage et les séchoirs solaires et sur leur fonctionnement.
- Le chapitre 3 :décrit les produits agricoles (plantes Feuillues) à sécher.
- Le chapitre IV :comprend certains des résultats du séchage des produits agricoles Comme la Menthe, le Romarin et le Laurel. Enfin, il résume la conclusion générale et le contenu de cette étude.



# LISTE DES SYMBOLES

$a_w$ :l'activité de l'eau	[%]
$dx$ :l'humidité du produit au début et a la fin de l'opération	[kg <sub>eau</sub> /kg <sub>a,s</sub> ]
$h$ :hauteur du soleil	[degré]
$H_a$ :humidité absolue	[kgv.kga,s <sup>-1</sup> ]
$H_{umi}$ :humidité de l'air ambiant	[%]
$H_r$ :L'humidité relative	[%]
$I_c$ :constante solaire corigé	[w /m <sup>2</sup> ]
$I_{dif}$ :rayonnement diffu	[w /m <sup>2</sup> ]
$I_{dir}$ :rayonnement direct	[w /m <sup>2</sup> ]
$I_G$ :rayonnement Global	[w /m <sup>2</sup> ]
$L$ :longitude	[degré]
$l$ :l'altitude	[km]
$m$ :le numéro du mois dans l'année	
$m_{clai}$ :la masse de la claie	[kg]
$M_a$ :humidité absolue	[kg]
$M_e$ :la masse d'eau	[kg]
$M_h$ :la masse de matériau humide[kg]	[kg]
$M_r$ :l'humidité relative	[%]
$M_{h_0}$ :masse humide initiale	[kg]
$M_{h_f}$ :masse humide finale	[kg]
$M_v$ :masse d'eau évaporée	[g]
$N$ :le numéro du jour dans l'année	
$P$ :pole austral	
$P'$ :pole austral	
$R$ :la vitesse de séchage	[kg <sub>eau</sub> /m <sup>2</sup> s]
$S$ :la surface de séchage	[m <sup>2</sup> ]
$P$ :La puissance du Soleil	[W]
$\Phi_s$ :flux de lumière	[W/m <sup>2</sup> ]
$a,b$ :coefficients traduisant les troubles atmosphériques.	
$h$ : hauteur du soleil.	[m]
$P$ : pression atmosphérique du lieu	[Pa]
$P_{vp}$ :pression partielle de vapeur d'eau dans l'air	[Pa]
$P_{vs}$ : pression partielle de vapeur saturante	[Pa]

# LISTE DES SYMBOLES

$G_{dir_h}$ :éclairage énergétique direct reçu sur un plan horizontal.	[W/m <sup>2</sup> ]
$\theta$ :angle d'incidence des rayons solaires	[degré]
$G_{dif_1}, G_{dif_2}$ :rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement	[W/m <sup>2</sup> ]
Alb :albédo du sol.	
$i$ :angle d'inclinaison du plan du capteur par rapport à l'horizontale.	[degré]
$\Phi_{st}$ :Flux de chaleur stocké	[W]
$\Phi_g$ :Flux de chaleur généré	[W]
$\Phi_e$ :Flux de chaleur entrant	[W]
$\Phi_s$ :Flux de chaleur sortant	[W]
$\lambda$ :Variable d'espace dans la direction du flux	[m]
$X_r$ :Teneur en eau à base humide	[%]
$X_{eq}$ :Taux d'humidité à l'équilibre	

# List des figures

<b>FigI .1:</b> Structure du soleil .....	4
<b>FigI .2:</b> Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons .....	5
<b>FigI .3:</b> le flux de lumière solaire .....	6
<b>FigI .4:</b> Spectre Solaire [4] .....	9
<b>FigI .5:</b> Répartition du rayonnement solaire .....	10
<b>FigI .6:</b> représentation des rayons diffus avec la puissance .....	12
<b>FigI .7:</b> Schéma descriptive .....	13
<b>FigI .8:</b> Composante du rayonnement solaire incident [4] .....	14
<b>FigI .9:</b> Composantes du rayonnement solaire reçu au niveau du sol terrestre .....	14
<b>FigI.10:</b> Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre [4] .....	15
<b>FigI.11:</b> Principe de l'expérience de William Herschel .....	19
<b>FigI.12:</b> Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [15] .....	19
<b>FigI.13:</b> Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [16] .....	20
<b>FigII.1:</b> Représentation de l'activité de l'eau .....	28
<b>FigII.2:</b> Représentation schématique d'un solide humide .....	29
<b>FigII.3:</b> Vitesse de séchage $-dM/dt=f(t)$ .....	30
<b>FigII.4:</b> Vitesse de séchage $-dM/dt=f(M)$ .....	30
<b>FigII.5:</b> périodes du séchage .....	31
<b>FigII.6:</b> Différents systèmes du séchage solaire .....	33
<b>FigII.7:</b> Le séchoir solaire directs .....	34
<b>FigII.8:</b> Séchage naturel Ou au soleil .....	35
<b>FigII.9:</b> Séchoir solaire indirect .....	36
<b>FigII.10:</b> Capteur plan .....	39
<b>FigII.11:</b> Concentrateur cylindro-parabolique .....	40
<b>FigII.12:</b> Concentrateur parabolique .....	40
<b>FigII.13:</b> système de centrale à tour .....	41
<b>FigIII.1:</b> Représente de la menthe .....	42
<b>FigIII.2:</b> La menthe avant et après le séchage (séchage indirect ) .....	44
<b>FigIII.3:</b> Représente de la romarin localement (en EL oued ) .....	44
<b>FigIII.4:</b> La Romarin avant et après le séchage (séchage indirect ) .....	46
<b>FigIII.5:</b> Représente de la Laurel .....	46
<b>FigIII.6:</b> La Laurel avant et après le séchage (séchage indirect ) .....	48
<b>FigIV.1:</b> Le système utilisé (séchoir solaire indirect forcée à concentrateur parabolique)..	49
<b>FigIV.2:</b> Représente de Le Récepteur .....	50
<b>FigIV.3:</b> Représente de la Chambre de séchage .....	51
<b>FigIV.4:</b> Représente le support .....	52
<b>FigIV.5:</b> Représente Système de Poursuite Manuel .....	52
<b>FigIV.6:</b> Représente de le Moteur ventilateur .....	53
<b>FigIV.7:</b> Variation de teneur en eau en fonction de temps (la Menthe) .....	53

# List des figures

<b>FigIV.8:</b> Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps (la menthe).....	54
<b>FigIV.9:</b> Variation de la vitesse de séchage au cours du temps (la menthe) .....	55
<b>FigIV.10:</b> Variation de la température ambiante et la chambre et la température de récepteur au cours du temps (la menthe).....	56
<b>FigIV.11:</b> Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps (la menthe).....	57
<b>FigIV.12:</b> Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps (la menthe) .....	58
<b>FigIV.13:</b> Variation de teneur en eau en fonction de temps (la romarin) .....	59
<b>FigIV.14:</b> Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps (la romarin) .....	60
<b>FigIV.15:</b> Variation de la vitesse de séchage au cours du temps (la romarin) .....	61
<b>FigIV.16:</b> Variation de la température ambiante, température de la chambre et de la récepteur au cours du temps (la Romarin) .....	62
<b>FigIV.17:</b> Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps (la romarin) .....	63
<b>FigIV.18:</b> Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps (la romarin) .....	64
<b>FigIV.19:</b> Variation de teneur en eau en fonction de temps (laurel) .....	65
<b>FigIV.20:</b> Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps (la laurel) .....	66
<b>FigIV.21:</b> Variation de la vitesse de séchage au cours du temps (la laurel) .....	67
<b>FigIV.22:</b> Variation de la température ambiante et la chambre et la température de récepteur au cours du temps (la laurel) .....	68
<b>FigIV.23:</b> Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps (la laurel) .....	69
<b>FigIV.24:</b> Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps (la laurel) .....	70

# List des Tableaux

<b>Tableau I.1 :</b> Caractéristiques principales du soleil .....	3
<b>Tableau I.2 :</b> Répartition spectrale du rayonnement thermique .....	9
<b>Tableau I.3 :</b> Emission du rayonnement solaire .....	10
<b>Tableau I.4 :</b> Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique .....	11
<b>Tableau I.5 :</b> Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude .....	12
<b>Tableau I.6 :</b> Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques .....	20
<b>Tableau II.1:</b> Quelques exemples des méthodes de séchage .....	23
<b>Tableau II.2:</b> Différents types de séchoirs .....	37
<b>Tableau III.1:</b> La composition chimique de la menthe .....	43
<b>Tableau III.2:</b> La composition chimique de romarin .....	45
<b>Tableau III.3:</b> La composition chimique de Laurel .....	47
<b>Tableau IV.1:</b> Caractéristiques géométriques du réflecteur .....	50

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et est disponible presque universellement et le plus souvent parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, la source de presque toutes les sources d'énergie utilisées dans le monde. Ce qui résume les concepts généraux de l'énergie solaire et du soleil.

Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, à atteindre un seuil à partir de laquelle les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des microorganismes

Le séchage est l'un des processus les plus importants pour maintenir de nombreux produits alimentaires, et c'est souvent le dernier processus (généralement après évaporation) pour la fabrication de produits. C'est un procédé de séparation thermique, qui implique l'élimination de tout ou partie d'un liquide que l'on voit soi-disant "humide" évaporer ce solvant. Le produit final est appelé "sec", bien qu'il contienne de l'humidité résiduelle.

L'utilisation de séchoirs solaires aide à maintenir une utilisation optimale Pour les produits agricoles (plantes Feuillues).

Etude expérimentale du séchage solaire à travers un Concentrateurs paraboliques pour des plantes Feuillues , et ensuite effectuer quelques tests sur des produits agricoles (plantes Feuillues) tels que la Menthe, le Laurel, le Romarin.

Ce mémoire contient quatre chapitres:

- Le chapitre I: est consacré à la recherche bibliographique et aux concepts généraux de l'énergie solaire, des applications, du transfert thermique et solaire
- Le chapitre II :fournit des informations générales sur le séchage et les séchoirs solaires et sur leur fonctionnement.
- Le chapitre 3 :décrit les produits agricoles (plantes Feuillues) à sécher.
- Le chapitre IV :comprend certains des résultats du séchage des produits agricoles Comme la Menthe, le Romarin et le Laurel. Enfin, il résume la conclusion générale et le contenu de cette étude.

**CHAPITRE I**

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

**(GISEMENT SOLAIRE)**



## **Introduction:**

L'énergie solaire est une source d'énergie propre, disponible dans presque toutes les parties du monde et la plus courante de toutes les sources d'énergie renouvelables, source de presque toutes les sources d'énergie utilisées dans le monde.

L'efficacité de ce type d'énergie a été la cause des études sur l'énergie telles que notre thème dans ce chapitre, qui traite des concepts généraux de l'énergie solaire et du soleil.

### **I.1. Le gisement solaire:**

Le gisement solaire représente sous forme de rayonnement. L'énergie solaire est le moteur de toutes les grandes sources d'énergie naturel. Les ressources énergétiques mondiales peuvent être classées en le soleil et l'énergie solaire [1],[2]

#### **I.1.1. Le soleil:**

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [1], [3]

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [1].

#### **I.1.2. Caractéristiques du soleil :**

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de sépare de Cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [4].

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [4].

### I.1.3. Présentation générale [4]:

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil.

- Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau I.1 :

<b>Diamètre (km)</b>	<b>1392000</b>
<b>Masse (kg)</b>	<b><math>2.10^{30}</math></b>
<b>Surface (km<sup>2</sup>)</b>	<b><math>6,09.10^{12}</math></b>
<b>Volume (km<sup>3</sup>)</b>	<b><math>1,41.10^{18}</math></b>
<b>Masse volumique moyenne (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1408</b>
<b>Vitesse (km/s)</b>	<b>217</b>
<b>Distance du centre de la voie lactée (km)</b>	<b><math>2,5.10^{17}</math></b>

**Tableau I.1:** Caractéristiques principales du soleil. [4]

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de :

- Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de  $25 \times 10^4$  (km), elle présente les caractéristiques suivantes [4] :

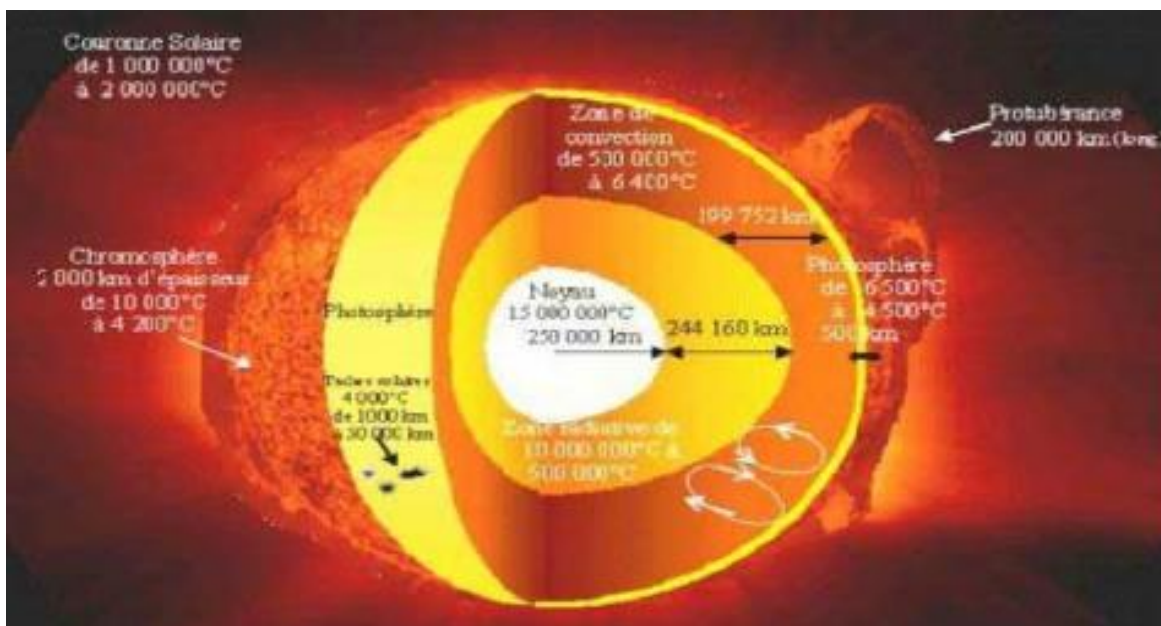
- ❖ Une température de  $15 \times 10^6$  (C°).
- ❖ Une densité est de 1015 (kg/m<sup>3</sup>).
- ❖ Une pression de 109 (ATM).

- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [4] :

- ❖ Une épaisseur de 244160 (km).
- ❖ Une température variant de  $10.10^6$  (C°) à  $50.10^4$  (C°).

- La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection Turbulente, elle présente les propriétés suivantes [4] :
  - La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [4] :
    - ❖ La température de surface décroît de 6400 (C°) à 4500 (C°).
    - ❖ Une épaisseur de 500 (km).
    - ❖ Une pression de 1/100 (ATM).
  - La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes [4] :
    - ❖ Une épaisseur 2000 (km).
    - ❖ Une température augmentant de 4200 (C°) à  $10^4$  (C°).
  - La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont [4] :
    - ❖ Elle est sans limite précise.
    - ❖ La température augmente de  $10^6$  (C°) à  $2 \times 10^6$  (C°).

La figure I.1 montre la structure du soleil.



**Fig I.1:** Structure du soleil. [4]

### I.1.4. A1. Le système terre-soleil :

Le soleil est une sphère de matière gazeuse, composée principalement d'hydrogène et d'hélium, dont le diamètre atteint environ 1,4 million de km.

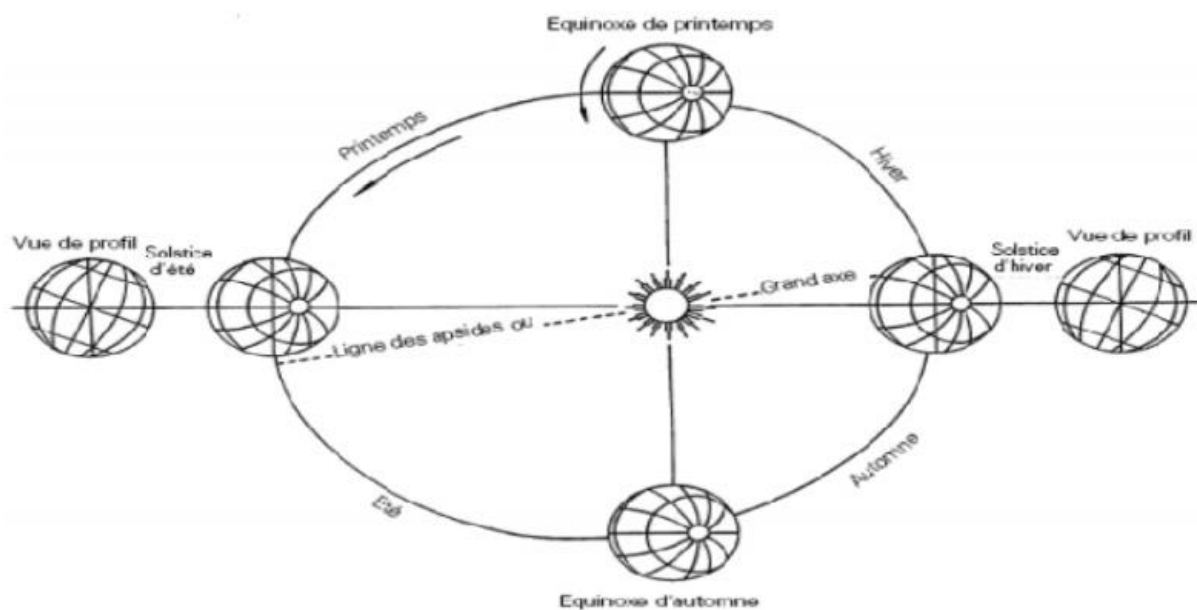
La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Sa distance moyenne est de 149,6 millions de km, avec une variation de  $\pm 1,7\%$ .

La terre traverse le grand axe de l'ellipse le 2 janvier (position la plus proche) et le 2 juillet (la plus éloignée du soleil). Depuis la terre, le diamètre apparent du soleil est vu sous un angle de  $0,5^\circ$ .

L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de  $23^\circ 27'$  par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison l'angle formé par l'axe terre-soleil, avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison 'd' vaut donc  $+ 23^\circ 27'$  au solstice d'été,  $- 23^\circ 27'$  au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes. Dans l'approximation d'une trajectoire circulaire, la déclinaison s'écrit, pour chaque jour de l'année :

$$\sin \delta = 0,4 \times \sin t \quad (\text{I.1})$$

Où : t désigne la coordonnée angulaire de la terre en prenant l'équinoxe de printemps pour Origine. [4]



**Fig I.2 :** Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons. [4]

## I.2 L'énergie solaire

Ce que l'on désigne par énergie solaire est le rayonnement émis dans toutes les directions par le Soleil, l'énergie solaire provient du rayonnement du soleil et les rayons sont constitués de photons, qui nous en arrivent comme vecteurs d'énergie. Ce terme d'énergie solaire s'emploie aujourd'hui pour désigner l'électricité solaire et l'énergie thermique obtenues à partir de l'exploitation du rayonnement du soleil sous ces deux formes photovoltaïque ou photo-thermique. [5]

La distance séparant la terre du soleil est  $r=1,496.10^{11}$ (m) du Soleil, si chaque mètre carré reçoit un flux de lumière  $\Phi_s = 1368$  (W/m<sup>2</sup>), alors une sphère de rayon  $R$  dont la surface  $S = 2,81. 10^{23}$ m<sup>2</sup> recevra une puissance  $P$  :

$$P = \Phi_s \times S \quad (I.2)$$

La puissance  $P$  du Soleil est donc  $P = 3,84. 10^{26}$  W pour une surface perpendiculaire à la direction Terre-Soleil [6].

Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion suivant la latitude du lieu et les conditions météorologiques ; au niveau du sol la puissance restante est de l'ordre de 1 (kW.m<sup>-2</sup>) sous nos latitudes [5,7].



**Fig.I.3:** le flux de lumière solaire.[7]

### I.2.1. L'énergie solaire Origine

Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire.

Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X.

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à  $3,7 \times 10^{26}$  (j/s).

### I.2.2. Caractères particuliers

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes [8]:

- ❖ Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de  $1 \text{ (kW/m}^2\text{)}$  à midi par ciel bleu sur toute la planète.
- ❖ La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol ( $1 \text{ kW/m}^2$ ) est peu dense on parle alors d'énergie diffuse.
- ❖ Elle est abondante, notre planète reçoit plus de  $10^4$  fois l'énergie que l'humanité consomme.
- ❖ Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.
- ❖ L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.
- ❖ Elle est propre.

### I.2.3. Captation

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie à savoir:

#### ❖ L'énergie solaire thermique

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

- ❖ En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- ❖ En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.
- ❖ **L'énergie solaire thermodynamique**

Le solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales héliothermoélectriques [8], [9]. Trois types principaux de centrales sont utilisées [8]:

- ❖ Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 (C°).
- ❖ Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000 (C°) ou plus.
- ❖ Les centrales à tour pour atteindre 1000 (C°).
- ❖ **L'énergie solaire photovoltaïque**

Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque [8].

Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé ; cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux [8]

#### **I.2.4.Constante solaire:**

La constante solaire représente le flux du rayonnement solaire reçu par une surface unitaire disposée perpendiculairement aux rayons solaires. Supposons que toute l'énergie émise par le soleil est reçue par la terre (absence de l'atmosphère) on aura alors [10]:

$$\text{conste solaire} = S_0 = \sigma T_S^4 \left( \frac{R_S}{D_{ST}} \right)^2 \quad (I.3)$$

$R_S$ = rayon du soleil,  $D_{ST}$ = distance terre-soleil,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}(\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4)$  Ce flux mesuré hors atmosphère terrestre a pour valeur moyenne  $(S_0)_{\text{ext}} = 1353(\text{Wm}^{-2})$ . Cette valeur est une valeur moyenne puisque la distance terre soleil (14.945.000(km)  $\pm 1.7\%$ ) varie au cour de l'année. Il faut donc appliquer à la constante solaire une correction en fonction du quantième n du jour

de l'année (compté a partir du 1°janvier). La constante solaire hors atmosphère pour un jour quelconque s'écrit selon:  $(S_0)_{ext} = 1353(1+0,033\cos0.984n)$  où n représente le quantième annuel (de 1 à 365). [10]

### I.3. Le rayonnement solaire:

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de 3.10 les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et 8(μm).[4]

On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une température de 5762 (K) dite température apparente du soleil ne correspondant pas à la réalité physique [4].

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans( le tableau I.2)

Longueur d'onde (μm)	0-0,38	0,38-0,78	0,78
Pourcentage (%)	6,4	48	45,6
Energie (W/m2)	87	656	623

Tableau I .2: Répartition spectrale du rayonnement thermique [4]

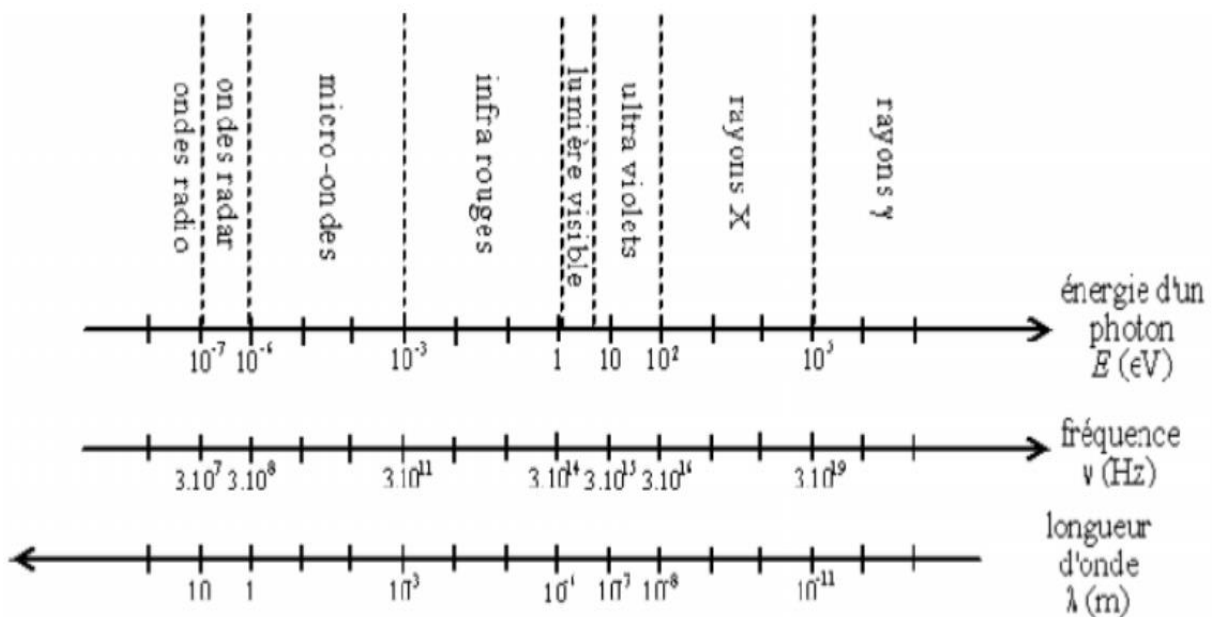


Fig I .4: Spectre Solaire [4]



### I.3.1.Composante du rayonnement solaire

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 (K). A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible, c'est-à-dire dans une gamme de longueur d'onde allant de 0,3 (µm) (violet-bleu) à 0,7 (µm) (rouge). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction.

Tout un éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune. Chacune de ces couleurs est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde. William Herschell (Vers 1800) qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au de là du rouge.

Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis par le soleil. Les 10% restant du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultra violet). [4]

Longueurs d'onde constituant le rayonnement solaire température 6000 (K)		
Domaine ultraviolet inférieure à 0,3(µm) (violet-bleu)	Domaine visible de 0,3(µm) (violet-bleu) à 0,7(µm) (rouge)	Domaine infrarouge au-delà de 0,7(µm) (rouge)
10%	40%	50%

Tableau I .3 : Emission du rayonnement solaire.[4]

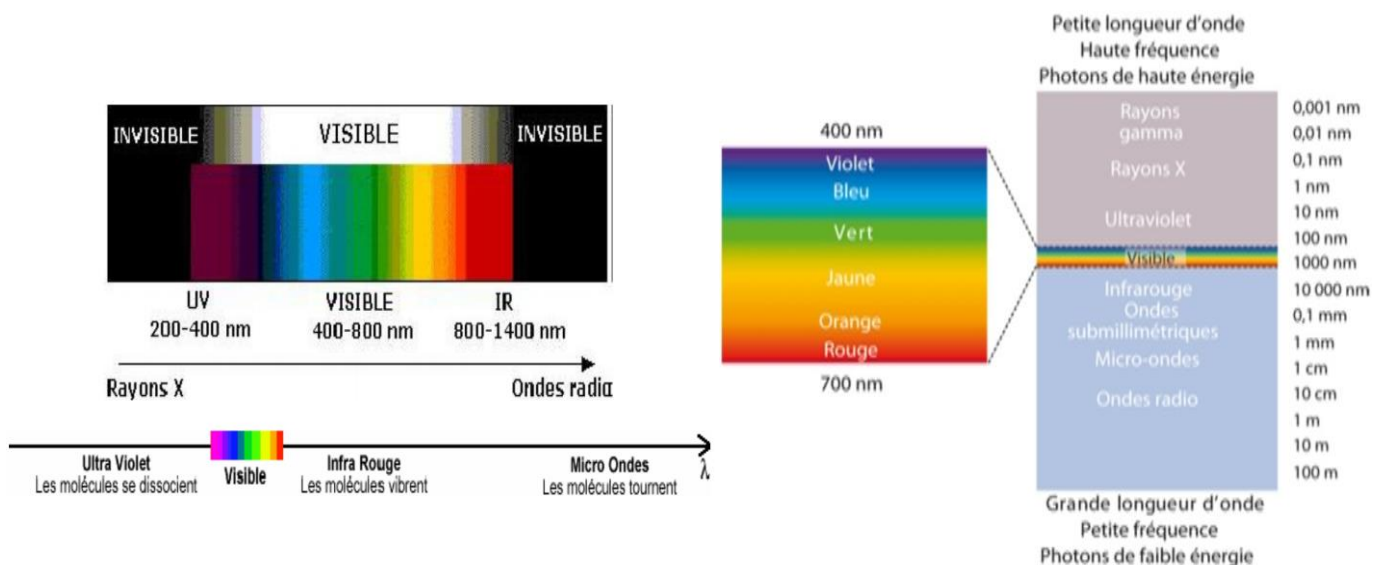


Fig I.5 : Répartition du rayonnement solaire.[4]

Le rayonnement solaire au sol se divise en plusieurs rayonnements, directs, diffus, réfléchis et globale ; à partir des conditions physiques quelque soit l'atmosphère (les caractéristique de l'atmosphère soit massique ou thermique).à travers l'année.

### I.3.2. Le rayonnement solaire direct :

C'est le rayonnement solaire qui se forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair [4].

L'état du ciel est défini par deux coefficients, a et b qui symbolisent le trouble atmosphérique du lieu où se trouve le capteur solaire (tableau I.4).

La transmissivité totale de l'atmosphère pour le flux solaire incident direct est donnée par [4]:

$$\tau_{dir} = a \times \exp \frac{-p \times b}{1000 \times \sin h} \quad (I.4)$$

Où:

- **a,b**: coefficients traduisant les troubles atmosphériques.
- **h**: hauteur du soleil.
- **P** : pression atmosphérique du lieu.

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
A	<b>0.87</b>	<b>0.88</b>	<b>0.91</b>
B	<b>0.17</b>	<b>0.26</b>	<b>0.43</b>

**Tableau I.4:** Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique [4]

Le tableau I.5 donne la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude :

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	5000
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

**Tableau I.5:** Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude [4]

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par [4] :

$$G_{dirh} = C^* \times \tau_{dir} \tag{I.5}$$

- $G_{dirh}$  : éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal.

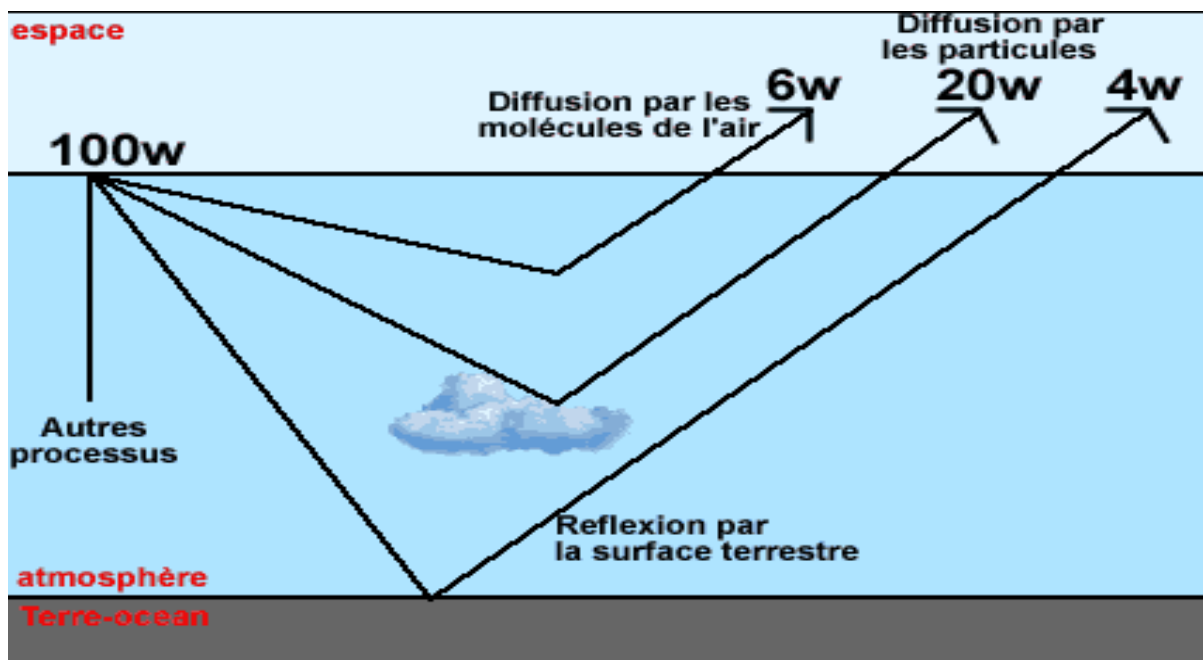
L'éclairement énergétique  $G_{dir}$  reçu sur un plan incliné est donné par [4]:

$$G_{dir} = G_{dirh} \times \cos\theta \tag{I.6}$$

$\theta$ : angle d'incidence des rayons solaires.

### I.3.3. Le Rayonnement solaire diffus

C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère ; pour un observateur au sol, le rayonnement diffus est un ensemble des directions rayonnées.



**Fig I.6:** représentation des rayons diffus avec la puissance, Solaire incidente de 100 (w).[4]

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voûte céleste [4].

La relation entre le coefficient de transmission du flux direct et diffus est [4]:

$$\tau_{\text{dif}} = 0.272 - 0.2939 \times \tau_{\text{dir}} \quad (\text{I.7})$$

Le flux diffus reçu sur un plan horizontal est défini par [4]:

$$G_{\text{difh}} = C^* \times \sin(h) \times \tau_{\text{dif}} \quad (\text{I.8})$$

Le flux diffus reçu sur un plan incliné est défini par [4]:

$$G_{\text{dif}} = g_{\text{dif1}} + g_{\text{dif2}} \quad (\text{I.9})$$

$$G_{\text{dif1}} = G_{\text{dif}} \times \frac{1 + \cos(i)}{2} \quad (\text{I.10})$$

$$G_{\text{dif2}} = \text{alb} \times \frac{1 + \cos(i)}{2} \times (G_{\text{difh}} \times \sin(h) + G_{\text{difh}}) \quad (\text{I.11})$$

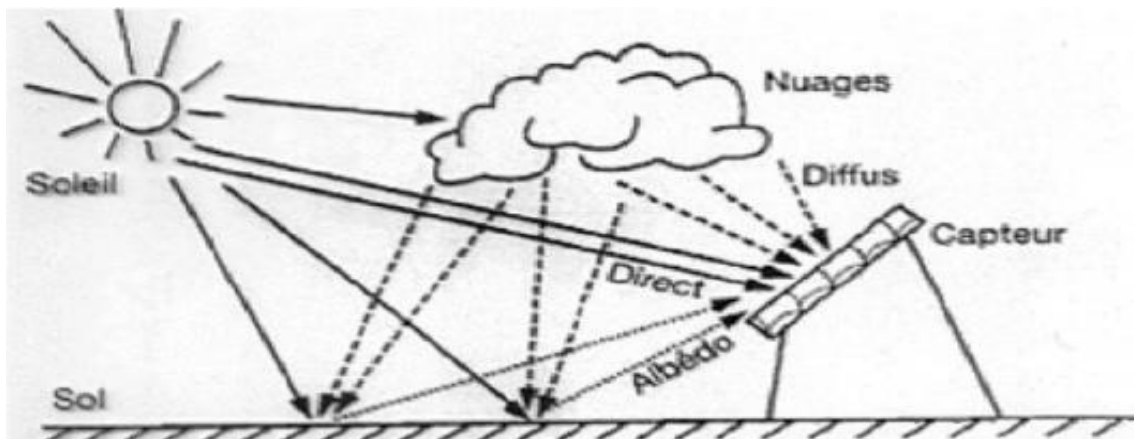
- **G<sub>dif1</sub>, G<sub>dif2</sub>**: rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement.
- **Alb** : albédo du sol.
- **i**: angle d'inclinaison du plan du capteur par rapport à l'horizontale.

❖ **L'albédo :**

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant.

$$\text{Albédo} \quad \text{Alb} = \frac{\text{energie réfléchi}}{\text{energie recue}} \quad (\text{I.12})$$

Ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.



**Fig I.7:** Schéma descriptive.[4]

### I.3.4. Le Rayonnement solaire réfléchi

C'est le rayonnement qui provient du sol par suite à la réflexion. Cette composante dépend de la nature du sol et de sa couleur.

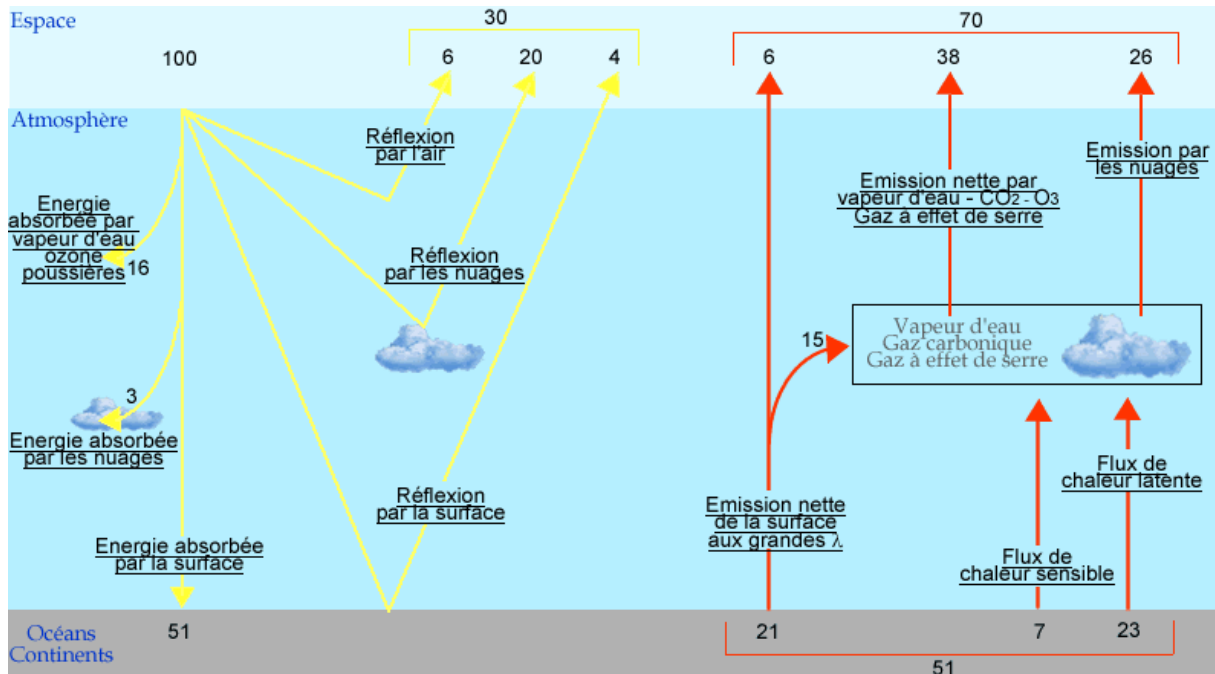


Fig I.8: Composante du rayonnement solaire incident [4]

### I.3.5. Le rayonnement solaire global :

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct [4]:

$$G = G_{dir} + G_{dif} \tag{I.13}$$

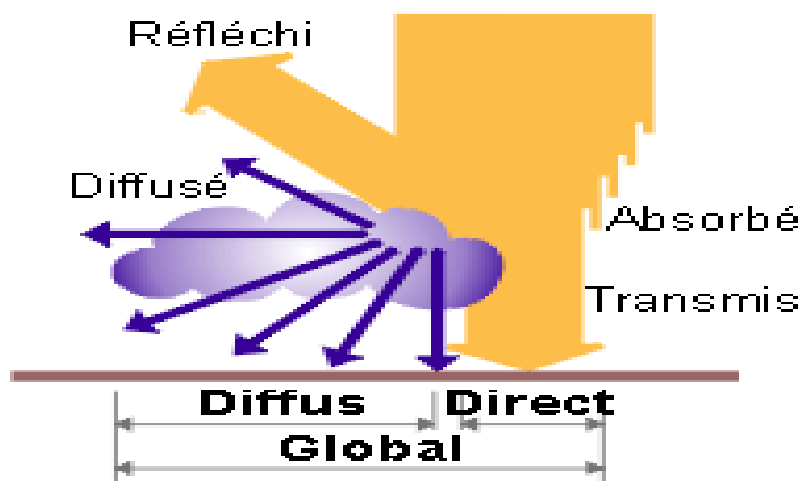
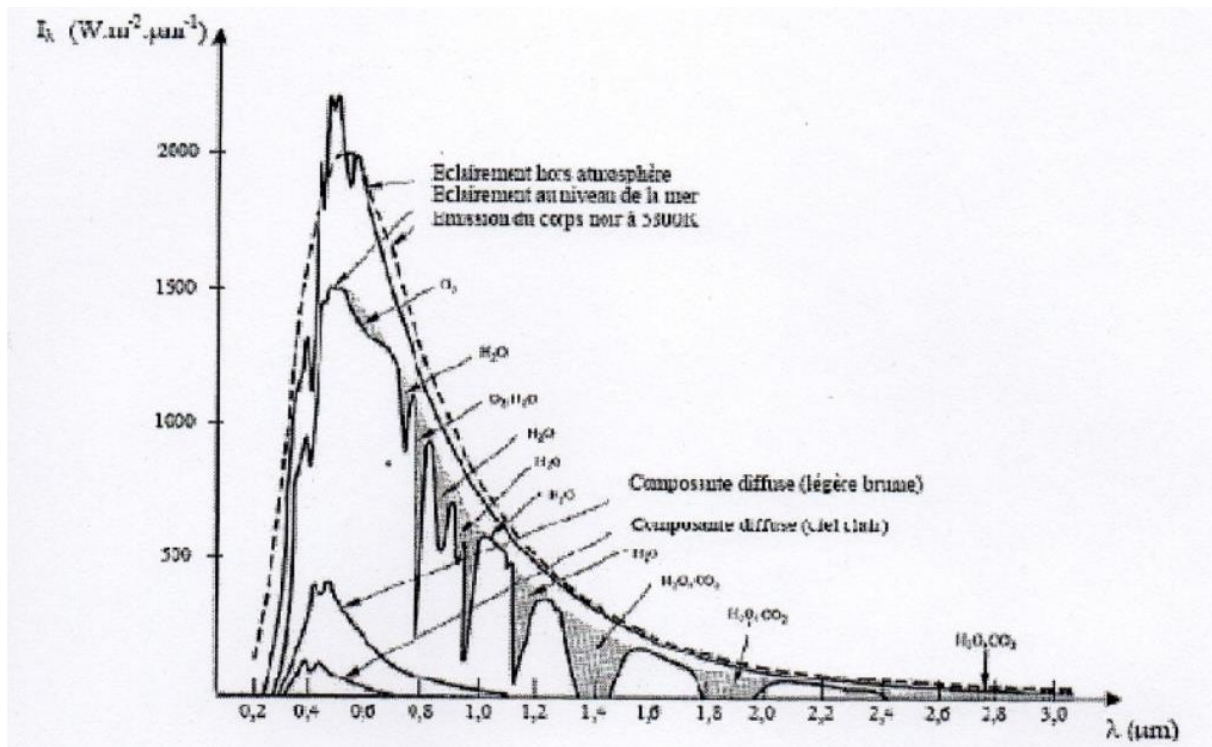


Fig I.9: Composantes du rayonnement solaire reçu au niveau du sol terrestre.[4]

La somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffus constitue le rayonnement solaire global. Le rayonnement solaire global est composé de rayonnement de différentes longueurs d'onde et intensités.

$$I_G = I_{DIR} + I_{DIF} \quad (I.14)$$



**Fig I.10:** Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre [4]

Le maximum d'intensité a lieu dans le rayonnement visible, soit pour une longueur d'onde de  $0,5\mu\text{m}$ . L'énergie totale est pratiquement émise pour des longueurs d'onde situées entre  $0,2$  et  $3,0\mu\text{m}$ . La surface située sous la courbe représente la constante solaire.

Cette énergie émise est échangée avec la terre ou avec tout corps au niveau du sol terrestre et se traduit par une sensation de chaleur.

L'échange de chaleur attribué à l'émission d'ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprise entre  $0,1$  et  $100(\mu\text{m})$ , par la matière du fait de sa température, est appelé rayonnement thermique.

Il ne nécessite pas la présence d'un milieu intermédiaire matériel et obéit aux lois du rayonnement thermique.

## I.4 Transfert de chaleur

### I.4.1 Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température :  $T = f(x, y, z, t)$ , la valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température, nous distinguerons deux cas : champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire. Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire. [11]

### I.4.2 Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures, la quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\Phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (\text{I.15})$$

Où S est l'aire de la surface (m<sup>2</sup>).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface **S** par unité de temps

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{I.16})$$

Il faut tout d'abord définir un système(S)par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être

$\Phi_{st}$ : Flux de chaleur stocké

$\Phi_g$ : Flux de chaleur généré

$\Phi_e$ : Flux de chaleur entrant

$\Phi_s$ : Flux de chaleur sortant

On applique alors le 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$\Phi_e + \Phi_g = \Phi_s + \Phi_{st} \quad (\text{I.17})$$

Il faut ensuite établir les expressions des différents flux d'énergie, en reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, on obtient l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système [11].

### I.4.3 Les type de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou plus généralement entre deux phases, se fait de trois façons :

#### I.4.3.1 La conduction

La conduction est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel (solide, liquide, gaz) sans mouvement de matière et qui fait passer la chaleur des zones chaudes aux zones froides à l'aide de mécanismes à l'échelle microscopique (vibrations atomiques ou moléculaires, diffusion électronique,...).

La conduction est le seul mécanisme qui permet à la chaleur d'être transmise dans un solide. Par contre si un fluide est soumis à un fort gradient thermique, la conduction devient rapidement négligeable devant la convection naturelle. La loi fondamentale de la conduction (loi de Fourier) a pour expression :

$$\vec{\Phi} = -\lambda S \cdot \overrightarrow{grad}(T) \quad (I.18)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\Phi = -\lambda S \frac{dT}{d} \quad (I.19)$$

Avec :

$\Phi$ : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\lambda$ : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S: Aire de la section de passage du flux de chaleur (m<sup>2</sup>)

Elle représente le gradient local de température (c'est-à-dire le taux de variation spatiale de la température au point considéré), le vecteur gradient est par définition perpendiculaire aux isothermes. ( $\lambda$ ) c'est le coefficient de conductivité thermique du milieu de transmission (W.m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>), les conductivités thermiques des matériaux varient d'une façon considérable d'une substance à une autre de sorte que l'on distingue en général les matériaux conducteurs



de la chaleur des matériaux isolants suivant l'ordre de grandeur de leur conductivité thermique, la conductivité thermique dépend également de la température et elle dépend aussi de l'état du matériau considéré (solide, liquide ou gaz) [11,12].

#### **I.4.3.2 La convection**

La convection est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur un milieu matériel avec mouvement de matière, on ne peut donc avoir de convection que dans les liquides et les gaz. Le flux de chaleur transmis par convection entre une paroi à température  $T_1$  et un fluide à température  $T_\infty$  (température mesurée loin de la paroi), peut s'écrire sous la forme :

$$\Phi = h_c S (T_1 - T_\infty) \quad (\text{I.20})$$

(Loi de Newton) où  $h_c$  est le coefficient d'échange par convection ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ).

Ce film est adjacent à la surface avec condition d'arrêt de l'écoulement le long de la paroi (vitesse nulle), il y a deux types de convection :

##### **a. La convection forcée**

Le mouvement du fluide est imposé par des actions mécaniques extérieures (pompes, ventilateurs, ... etc.), l'écoulement est alors laminaire ou turbulent.

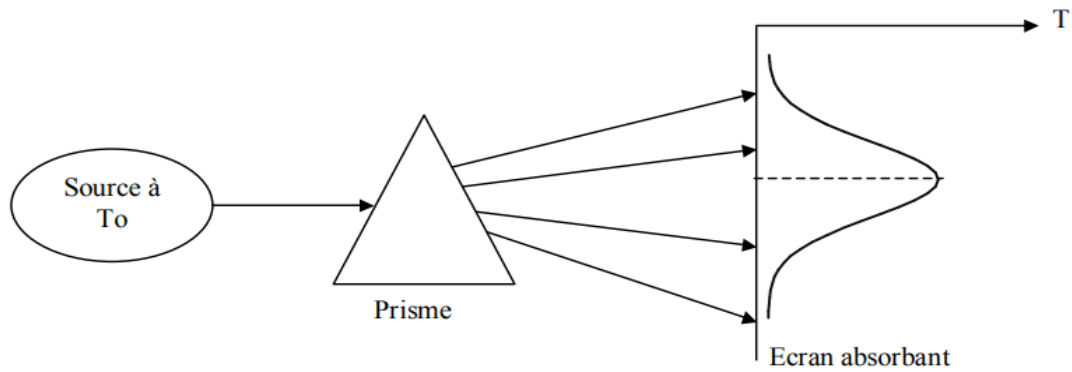
##### **b. La convection libre (ou naturelle)**

Ce type de convection résulte des variations de masse volumique du fluide résultant des échanges de chaleur eux-mêmes (poussée d'Archimède sur les éléments de fluide chaud), il en résulte une convection laminaire ou turbulente [11],[13].

#### **I.4.3.3 Le rayonnement**

Tous les corps, quelque soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur.

Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde comme l'a démontré l'expérience de William Herschel :



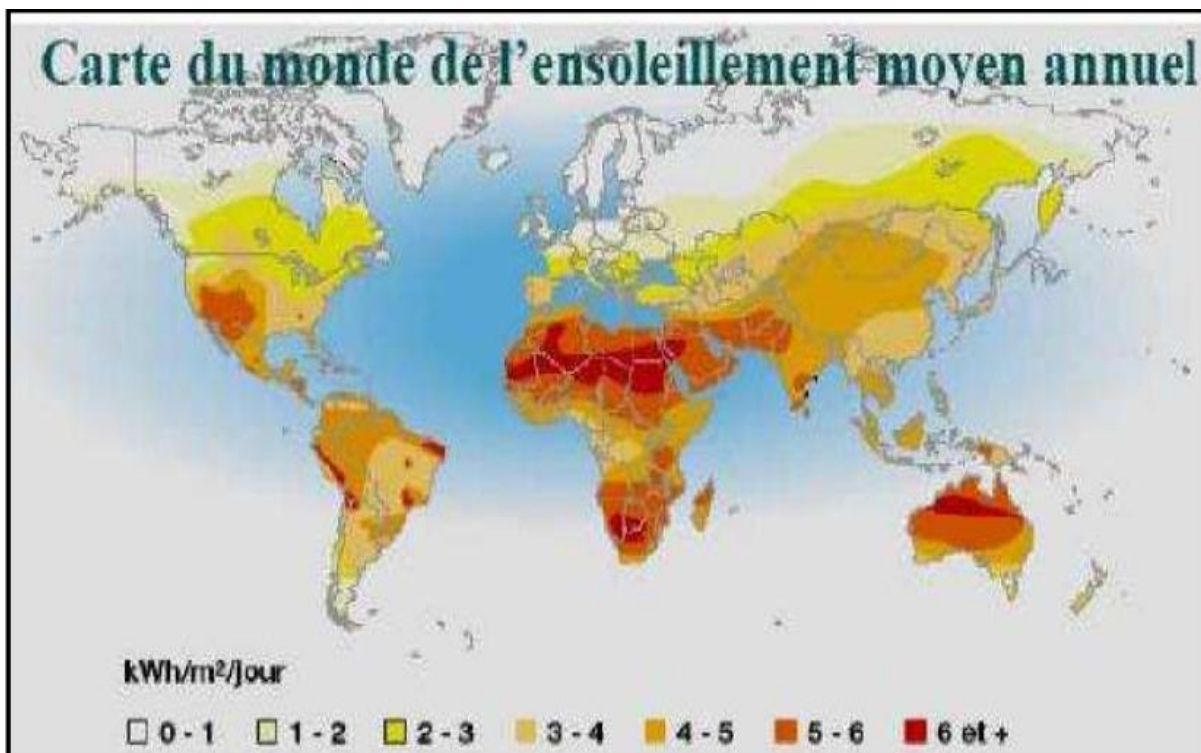
**Fig I.11:** Principe de l'expérience de William Herschel

### I.5. Le gisement solaire en Algérie:

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée.

Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [14].

D'une part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre( la figure I.12) :



**Fig I.12 :** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [15]

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

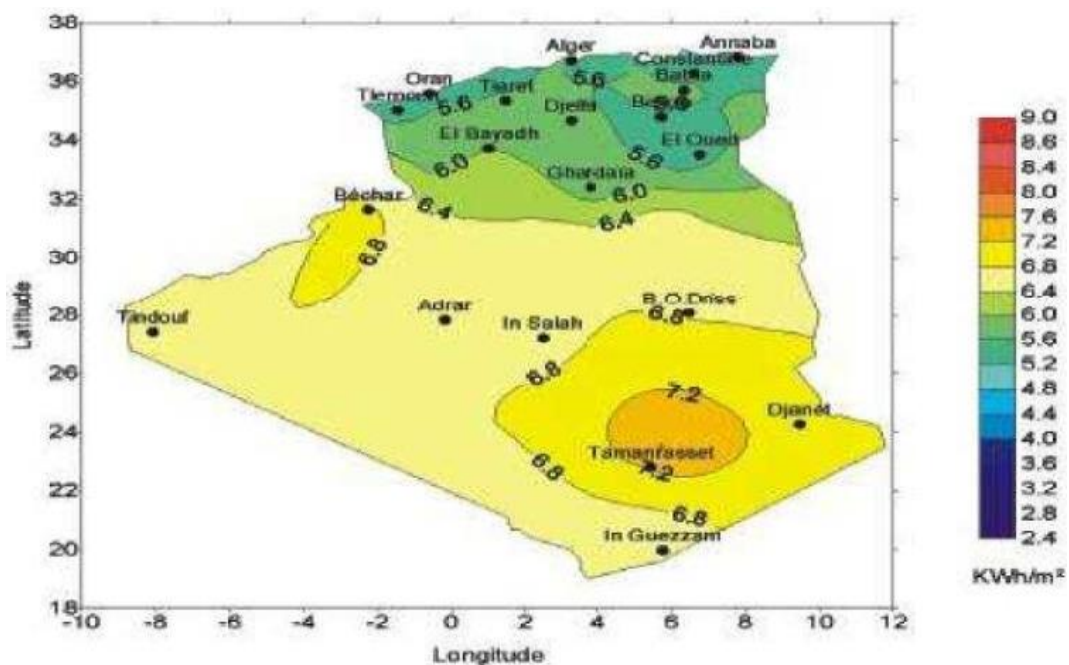
Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel. Solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.6 selon l'ensoleillement reçu annuellement [15]:

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement(h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau I.6 :** Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500(h/an) est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [15].

Le sud de l'Algérie est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (Figure I.13).



**Fig I.13 :** Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [16].

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire algérien [14].

Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage.

La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

## CONCLUSION

Ce chapitre présente certains aspects de l'énergie tels que le champ solaire, L'énergie solaire, etc. sur le système de coordonnées sur la terre, l'heure solaire, Longitude, altitude, etc., où ces critères ont un sens et même un effet sur Le processus de séchage dans les pays ensoleillés du monde (Algérie).

Ces normes pour le système solaire terrestre (rayonnement solaire, etc.) sont prises pour travailler sur le séchage des produits tout en préservant ces propriétés nutritionnelles[4]:

- ❖ Caractéristiques principales du soleil
- ❖ Répartition spectrale du rayonnement thermique.
- ❖ Emission du rayonnement solaire.
- ❖ Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique.
- ❖ Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.
- ❖ Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

## **CHAPITRE II**

# **Généralités Sur Le Séchage Et Les Séchoirs Solaires**

## **Introduction**

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

### **II.1 Séchage**

#### **II.1.1 Définition :**

C'est l'opération unitaire ayant pour but d'éliminer par évaporation un liquide imprégnant un solide ou un liquide. Le terme déshydratation a un sens plus restrictif : il ne concerne que l'élimination de l'eau dans un solide ou dans un liquide.

Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, jusqu'au seuil en deçà duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des microorganismes.[17] [18]

#### **II.1.2 Historique :**

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés, jambons, figes, noix, tabac, etc.), ou pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois,...), ou pour les textiles (lavage, teinture,...) et les peaux.

Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [19]

### II.1.3 Intérêt du séchage [20]

Le séchage a pour intérêt :

- ❖ D'alléger le produit.
- ❖ De permettre (ou de faciliter) surtout sa conservation par diminution de 'l'activité de l'eau'.  
Mais en revanche :
- ❖ Il modifie le produit dans sa forme, sa texture, son goût, ses qualités, ce qui est souvent considéré comme un inconvénient.
- ❖ Il est coûteux, notamment en énergie. Il est utile alors de connaître tout ce qui peut influencer le séchage et en particulier la vitesse de séchage afin de diminuer le coût de cette opération.

### II.1.4 Principes de séchage [20]

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.

### II.1.5 Différents méthodes du séchage [20]

#### II.1.5.1 Séchage mécanique

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

Opération	Technique	Mécanisme	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

Tableau II.1: Quelques exemples des méthodes de séchage

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.1.5.2 Séchage chimique

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

### II.1.5.3 Séchage thermique

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

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

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

### II.1.5.4 Séchage par ébullition

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

- ❖ Par conduction, à partir d'une surface chauffée au contact du produit.
- ❖ Par génération interne de chaleur due à l'exposition à un rayonnement infrarouge ou de micro-ondes ou par un chauffage diélectrique.
- ❖ Par convection, à partir de vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide chauffant. [20]



### II.1.5.5 Séchage par entraînement

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

- ❖ Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température.
- ❖ Un transfert d'eau s'effectue 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 [21]

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 fonctionnent 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.

#### 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; ceux sont des séchoirs dont une seule partie du produit reçoit et absorbe le rayonnement. Naturellement les séchoirs passifs ne sont pas isenthalpique.

## II.1.6 Caractéristiques de l'air de séchage

### II.1.6.1 humidité :

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

#### II.1.6.1.2 humidité absolue :

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

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} [\text{kgv.kgas}^{-1}] \quad (\text{II.1})$$

#### II.1.6.1.3 Humidité relative :

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température[22][23]:

$$H_r = \frac{P_v}{P_{s(T)}} \times 100 \quad 0\% \leq \leq 100\% \quad (\text{II.2})$$

#### II.1.6.1.4 Température sèche : [24]

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.

#### II.1.6.1.5 Température humide du gaz : [24]

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.

### II.1.7 Caractéristiques des solides humides

Le solide à un film d'eau adhère à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présent dans une enceinte, à la même température.

Soit une masse ( $M_h$ ) de matériau humide contenant une masse  $M_e$  d'eau et une masse  $M_s$  de matière sèche [25][17]:

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

#### II.1.7.1 Humidité absolue :

L'humidité autoritaire ou taux d'humidité ou teneur ( $\text{kg}_{av}/\text{kg}_{as}$ ) en eau à base sèche, où plus simplement humidité s'exprime par liquide contenue dans le produit par rapport à sa

masse sèche [25][17]:

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

#### II.1.7.2 Teneur en eau à base humide :

L'humidité relative ou titre en eau (%), ou teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

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

#### II.1.7.3 Taux d'humidité :

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre.

#### II.1.7.4 Taux d'humidité à l'équilibre :

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température. [25]

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

### II.1.8 Activité de l'eau :

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide «  $a_w$  », par le rapport de la pression ( $P_{vp}$ ) (de la vapeur à la surface du produit) et de la pression ( $P_{sat}$ ) (de la vapeur saturante à la température de surface du produit).

Si le corps est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure (lorsqu'il n'y a plus d'échange d'eau entre eux), il en résulte que la pression ( $P_{vp}$ ) s'égalise avec la pression partielle de vapeur ( $P_v$ ) dans l'air et que l'activité de l'eau du produit et l'humidité relative de l'air deviennent identiques ( $a_w = \varphi$ ).

Pour qu'il y ait séchage, il faut que l'humidité relative de l'air soit inférieure à l'activité de l'eau du produit ( $\varphi < a_w$ ) de façon à ce que la pression de vapeur à la surface du produit soit supérieure à la pression partielle de vapeur dans l'air ( $P_{vp} > P_v$ ).

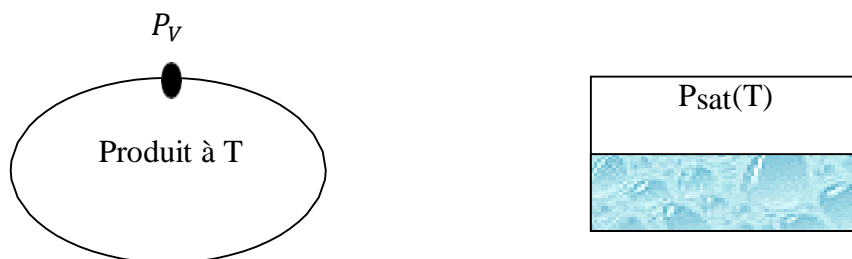
Si le produit est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure, l'activité de l'eau ( $a_w$ ) est identique à l'humidité relative d'équilibre ( $A_w = HRE$ ). Elle est définie comme suit.

$$[26].[27].[28] : \quad A_w = \frac{P_{VP}}{P_{VS}} = \frac{HR(\%)}{100} \quad (II.7)$$

- $P_{vp}$ : pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)
- $P_{vs}$  : pression partielle de vapeur saturante (Pa)
- HR : humidité relative de l'air (%).

#### II.1.8.1 Activité de l'eau dans un produit :

L'activité de l'eau est le rapport entre la pression de vapeur d'eau à la surface du produit et la pression de la vapeur d'eau sur la surface plane d'un liquide à la même température.



**Fig II.1:** Représentation de l'activité de l'eau

$$aw = \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \quad (II.8)$$

Considérons maintenant un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre,  $P_v$ ,  $T$ ,  $P_{va}$  et  $T_a$  étant respectivement les pressions de vapeur d'eau et les températures du produit et de l'air. L'équilibre impose :

- $T = P_v = P_{va}$  : pas de transfert de masse
- $T_a$  : pas de transfert de chaleur

or l'humidité relative de l'air s'écrit : 
$$Hr = 100 \left( \frac{P_{va}}{P_{sat}(T)} \right) \quad (II.9)$$

L'activité de l'eau dans un produit est donc également l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit. Pour qu'un produit puisse se conserver à température ambiante, son activité ( $aw$ ) doit être abaissée en-dessous de 0,6 (les moisissures ne peuvent plus se développer.[26].[27].[28]).

### II.1.8.2 Transfert de masse d'un produit humide :

On peut imaginer la plupart des corps à sécher comme étant constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière.

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique au produit à sécher et dont la source est extérieure à celui-ci. Simultanément se produit la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau. [18]

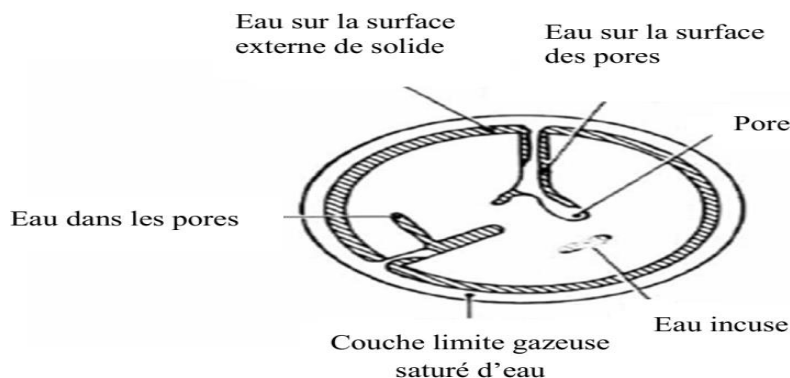


Fig II.2 : Représentation schématique d'un solide humide

### II.1.9 Vitesse de séchage :

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporée de solide séché par unité de temps et de masse de solide sec, ou tout simplement la limite du quotient de la différence de teneur  $\Delta m$  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. [29][21]

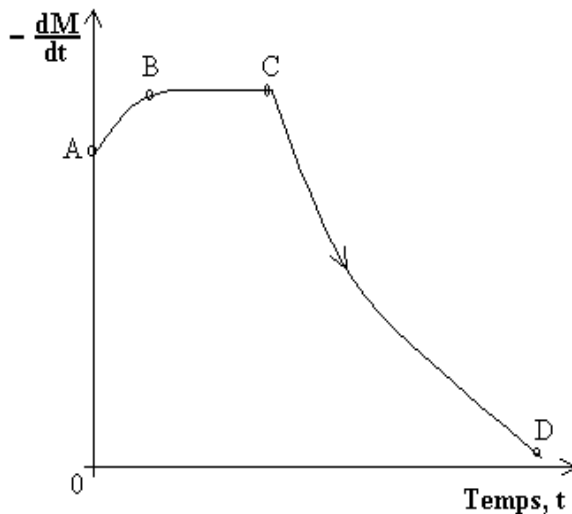


Fig. II.3: Vitesse de séchage  $-dM/dt=f(t)$

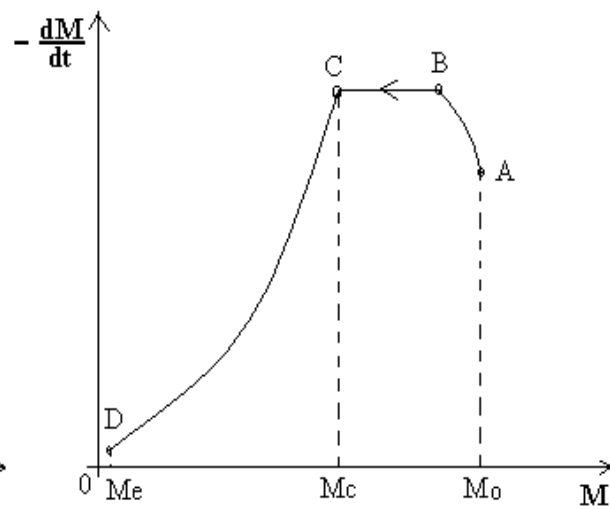


Fig. II.4: Vitesse de séchage  $-dM/dt=f(M)$

#### II.1.9.1 Courbes De Sechage

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  $X$  (Krisher [30]).

#### II.1.9.2 Cinétique du séchage

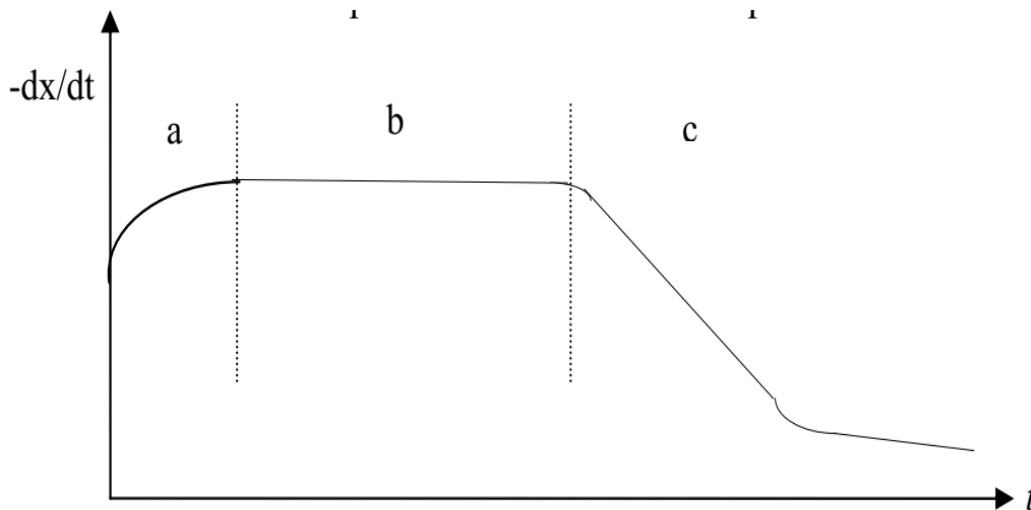
On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage (masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau ( $\text{kg d'eau} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) en fonction du temps. Ces courbes sont généralement 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. [29]

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 [31][21].

On doit impérativement atteindre cette valeur optimale à la fin de l'opération de séchage qui est dans notre cas pour la tomate de  $\varphi_{eq} = 11\%$  [32].

### II.1.9.3 Différentes périodes de la cinétique de séchage d'un produit humide

L'expérience permettant de caractériser la cinétique de séchage consiste à soumettre une couche mince d'un produit à l'action d'un courant d'air de température, humidité et vitesse fixées et de mesurer la masse du produit en fonction du temps.[17]



**Fig II.5:** périodes du séchage

Dans la courbe ci-dessus est schématisée la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps.

Souvent on construit aussi la courbe de la vitesse de séchage en fonction de l'humidité restant dans la matière au cours du séchage. Dans (la figure II.5) on distingue trois périodes :

#### II.1.9.3.1 Période de mise en température (région a)

Quand un produit d'une température de surface ( $T_s$ ) et d'une pression partielle de vapeur d'eau  $P_s$  est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage jusqu'à atteindre la température du bulbe humide caractéristique de l'environnement séchant. Cette période est généralement très courte au regard du temps de séchage global.[17]

### II.1.9.3.2 Période à allure constante (région b)

Cette période de séchage à vitesse constante correspond à l'évaporation du liquide superficiel. Le liquide remonte en surface sous l'action des forces d'aspiration des capillaires et il se renouvelle à une vitesse suffisante pour former une pellicule continue et compenser l'évaporation. Le flux de chaleur échangé par convection entre l'air et le produit est entièrement utilisé pour l'évaporation de l'eau.

Cette période est identique au séchage isenthalpe d'un film d'eau et dépend donc essentiellement des conditions aérauliques entourant le produit à sécher. Lorsque l'humidité superficielle du solide n'est pas renouvelée à une allure suffisante pour maintenir en surface une pellicule continue du liquide, la vitesse cesse d'être constante.

Pour les produits alimentaires et biologiques, on n'observe en général pas de période de séchage à vitesse constante. Ceci s'explique par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure du produit, par la migration des solutés qui obstruent les pores et par le durcissement et la rétraction de la surface du produit [31][17].

### II.1.9.3.3 Période de ralentissement (région c)

Au cours de cette période la surface du produit n'est plus saturée en vapeur d'eau et le transfert de masse est contrôlé par les mécanismes complexes du déplacement de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit [33][17].

Cette période représente souvent la quasi totalité du séchage. Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :

- ❖ **Disparition de l'eau libre en surface de produit** : La zone d'évaporation "front de séchage" qui se trouvait en surface se déplace vers l'intérieur du produit. En amont de cette zone, il y a migration de l'eau libre, tandis qu'en aval c'est l'eau liée et la vapeur d'eau qui sont évacués. La brusque réduction de la surface effective de transfert due à une alimentation insuffisante en eau libre est la cause de ce ralentissement.
- ❖ **L'épaisseur du produit** : si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage.
- ❖ **La diffusivité de l'eau dans le produit** : elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.
- ❖ **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes** : Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.



- ❖ **Le croutage** : Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région b) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.[17]

## II.2 Les séchoirs solaires

C'est un dispositif qui permet le séchage de produits à conserver. Il existe plusieurs types de séchoirs :

### II.2.1 Classification des systèmes du séchage solaire

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de fonctionnement en plusieurs catégories présentées dans la figure (II.6)

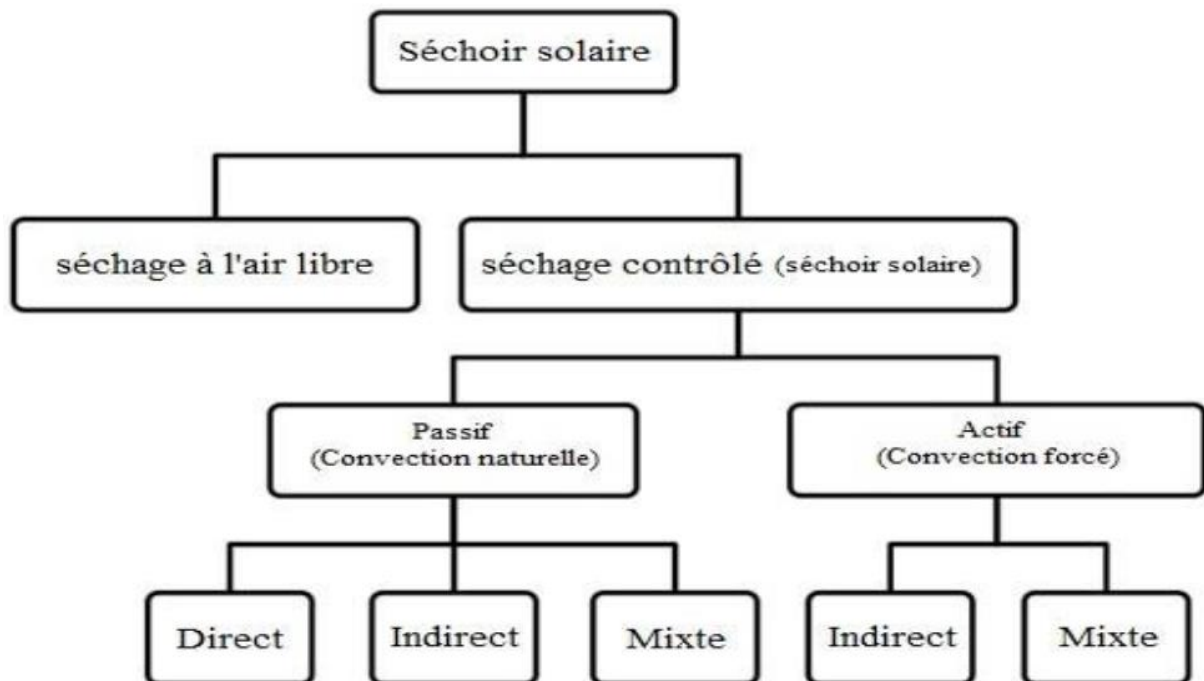


Fig II.6 : Différents systèmes du séchage solaire

### II.2.2 Types de séchoirs solaires

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en plusieurs catégories [34]:

- ❖ Les séchoirs solaires directs.
- ❖ Les séchoirs solaires indirects.
- ❖ Les séchoirs solaires hybrides.
- ❖ Les séchoirs solaires mixtes

### II.2.2.1 Les séchoirs solaires directs

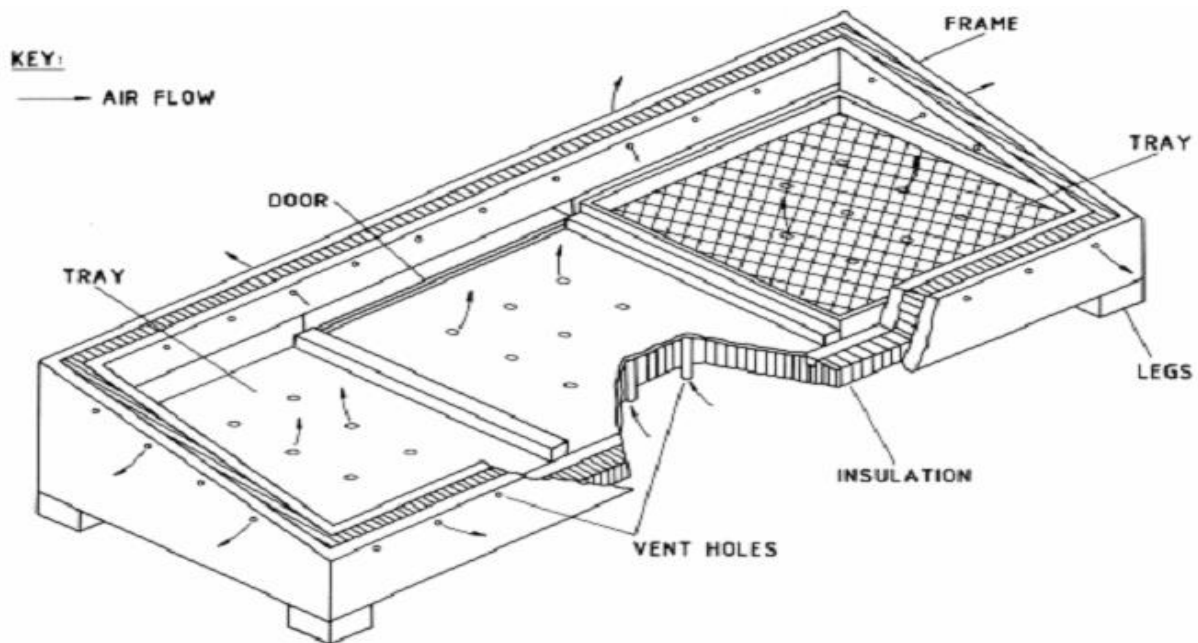
Par définition, les rayons du soleil frappent directement dans ces séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes.

Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet cheminée) ou par action du vent sur les ouvertures, mais rarement à l'aide d'un ventilateur, du fait de la rusticité des modèles.

#### II.2.2.1.1 Principe de fonctionnement

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.

Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles).



**Fig II.7:** Le séchoir solaire directs

#### II.2.2.1.2 Les avantages et les inconvénients

##### a - Les avantages

- ❖ Les produits sont mieux protégés contre les poussières, des mouches et autres insectes, et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- ❖ Pas besoin de main-d'œuvre qualifié.
- ❖ Grandes possibilités de conception.

**b - Les inconvénients**

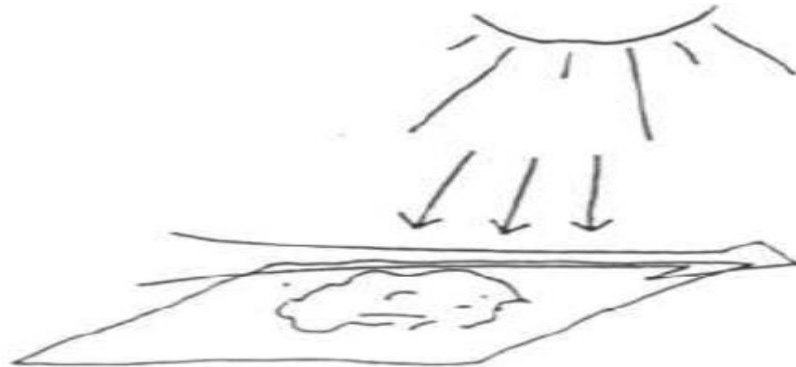
- ❖ Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration.[35]
- ❖ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- ❖ Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments. [36]

**II.2.2.2 Séchoirs naturels (traditional)**

Le séchage naturel est un séchoir direct et effectué en plein air représente le moyen le plus ancien et le plus simple. Ils utilisent directement le soleil et l'air, dont l'action n'est ni particulièrement favorisée, ni contrôlée. Le produit est réparti sur des claies ou des nattes, dans des cribs, ou disposé à même le sol. Les cribs sont orientés perpendiculairement au vent dominant. Ces séchoirs sont très bon marché, mais supposent une Intervention humaine régulière et soutenue : protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent pour éviter la surchauffe dès 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 au problème de la conservation temporaire du produit en attendant la vente ou la consommation. Il présente cependant des inconvénients :

- ❖ Pertes de produits mal sèches 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, poussière). Ainsi, le séchage du poisson sur le sable peut entraîner des pertes allant jusqu'à 50 % du fait du développement de larves.
- ❖ Une longue durée de séchage.
- ❖ L'impossibilité d'obtenir un degré d'humidité précis.
- ❖ L'attaque par les champignons et les insectes (cas du bois).

Toutes ces raisons ont conduit les professionnels à s'orienter vers le séchage artificiel.



**Fig II.8:** Séchage naturel Ou au soleil

### II.2.2.3 Séchoirs solaires indirects

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher. L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur qui le réchauffent en fonction du débit utilisé.

#### II.2.2.3.1 Principe de fonctionnement

Le séchoir solaire indirect se compose de parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit et une cheminée (figure II.9). L'air pénètre dans le collecteur; il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques.

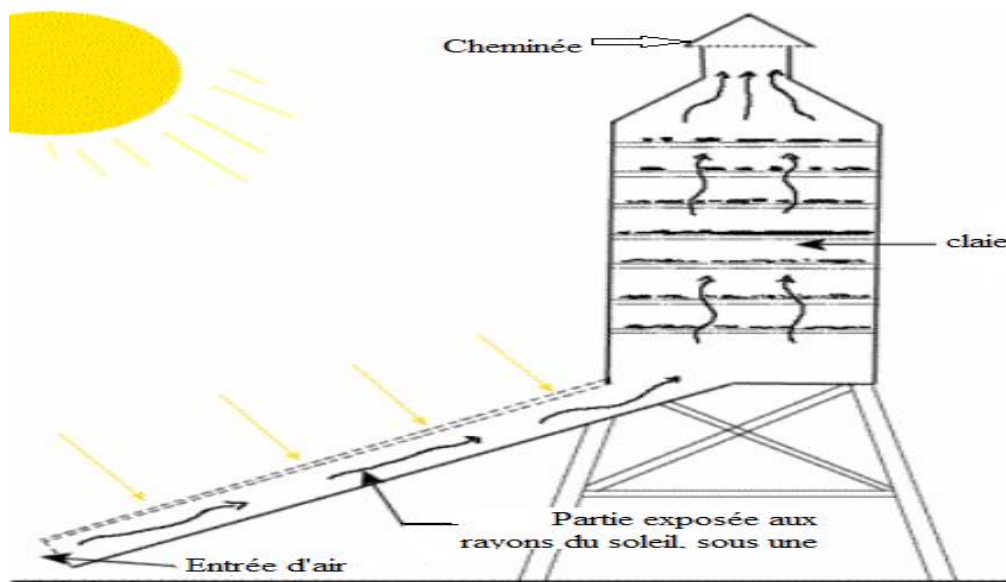


Fig II.9: Séchoir solaire indirect

#### II.2.2.3.2 Avantages et les inconvénients

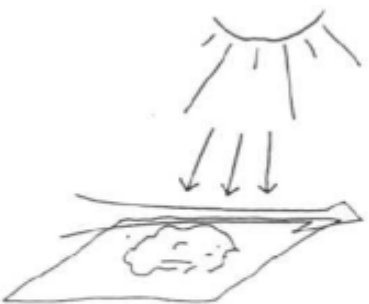
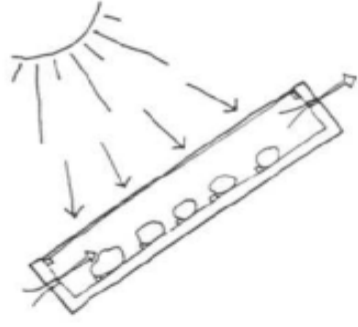
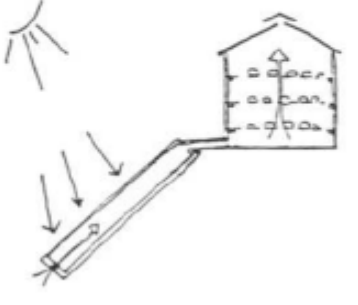
##### a - Avantages :

- ❖ Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- ❖ Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit. [37]
- ❖ Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.[38]

##### b - Inconvénients

- ❖ Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
- ❖ Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

## II.2.2.4 différents types de séchoirs solaire :

Fonctionnement schématique	Type de séchage	Caractéristiques
	<p align="center"><b>Séchage naturel Ou au soleil</b></p>	<p>très faible coût travail important perte de produit</p>
	<p align="center"><b>Séchage solaire direct</b></p>	<p>produit protégé séchage rapide une certaine dégradation du produit</p>
	<p align="center"><b>Séchage solaire indirect</b></p>	<p>produit parfaitement protégé et non dégradé séchage assez rapide coût et complexité plus importants</p>

**Tableau II.2:** Différents types de séchoirs

Le déplacement de l'air peut être produit mécaniquement (ventilateur) mais il est fréquemment possible de faire appel au tirage naturel avec une cheminée solaire éventuellement. Ce type d'appareil est souvent plus compliqué et plus coûteux à construire que le séchoir direct.

Il peut être réalisé à des échelles diverses et il est surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire ou dont le niveau de température doit être contrôlé (séchage pour germination ; produits à faible température Maximum). Il devrait en fait être adopté aussi souvent que possible dans le cas de produits alimentaires. La durée de séchage est très variable et peut être supérieure à celle du séchage naturel. Pendant le séchage, il faut souvent prévoir de faire une ou plusieurs rotations des claies car dans beaucoup de modèles les produits placés dans le haut du séchoir sèchent moins vite que ceux placés en bas.

### II.2.2.5 Les séchoirs mixtes

Dans ces séchoirs, la chaleur nécessaire au séchage est fournie par l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans des capteurs. Les transferts de chaleur et de vapeur d'eau y sont complexes et assez mal connus.

### II.2.2.6 Les séchoirs 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.

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.
- ❖ Le séchage par chambre chaude.
- ❖ Le séchage sous vide.

Les deux derniers procédés de séchage sont utilisés en particulier pour le séchage du bois.

#### II.2.2.6.1 Les Avantages et les inconvénients

##### a. Avantage

- ❖ Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- ❖ Meilleur contrôle du séchage. [39]
- ❖ Forte augmentation de la production par rapport aux autres types de séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

##### b. Inconvénient

- ❖ Coût de production et d'investissement élevé.
- ❖ Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange.  
Personnel qualifié pour la maintenance.

## II.2.3 Capteurs Solaire

### II.2.3.1 Capteurs Plans

Le rayonnement solaire peut être transformé en chaleur à basse température, par des capteurs plans utilisant conjointement l'absorbeur, surface sélective et l'effet de serre créé par le vitrage. Ces capteurs ont l'avantage d'utiliser aussi bien les rayons directs du soleil que les rayons diffusés, c'est à dire que même par temps couvert, le liquide caloporteur de capteur parvient à s'échauffer.

L'autre avantage est qu'il n'est pas nécessaire d'orienter le capteur suivant le soleil. [40]

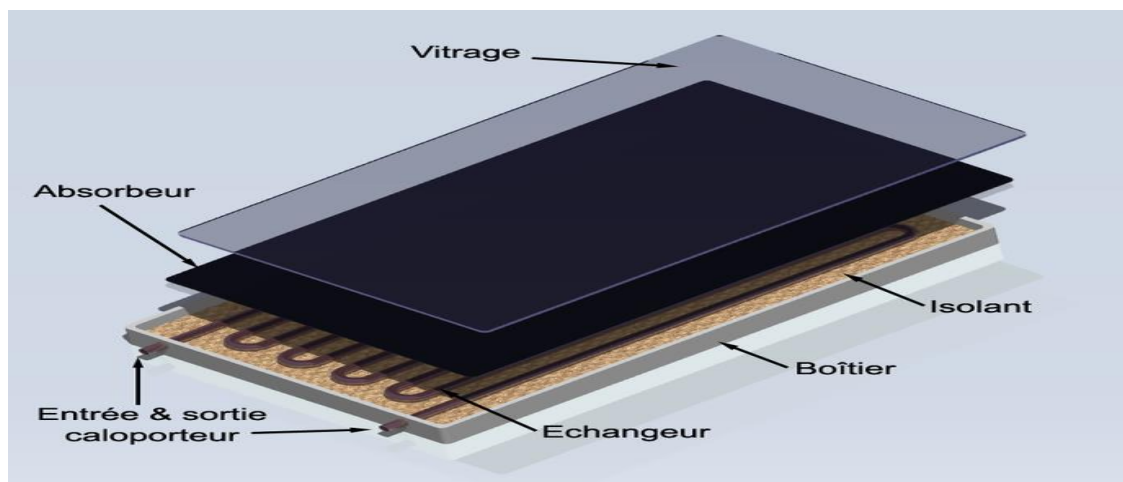


Fig II.10 : Capteur plan

### II.2.3.2 Capteurs à Concentrations

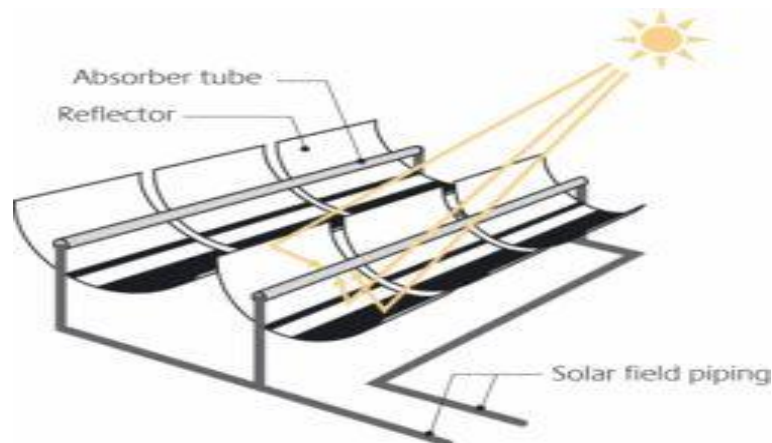
Quand les températures plus élevées sont exigées, des capteurs solaires à concentration sont utilisés. Ils utilisent l'énergie solaire arrivant sur une grande surface réfléchissante, et réfléchi sur une plus petite surface avant qu'elle ne soit convertie en chaleur qui entraînerait de températures plus élevées. La plupart des collecteurs à concentration peuvent seulement concentrer le rayonnement solaire parallèle venant directement à partir du disque du soleil (rayonnement direct), donc ils doivent suivre le mouvement apparent du soleil. On constate de manière évidente que leur utilisation restera très limitée (entre 1500 et 1700 heures d'ensoleillement par an en moyenne). [41] [40].

Les trois systèmes à concentration les plus importants pour l'application à grande échelle de l'énergie solaire sont :

#### II.2.3.2.1 Concentrateurs cylindro-paraboliques

Les réflecteurs cylindro-paraboliques sont des systèmes en forme de « U ». Ils concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Parfois un tube en verre transparent entoure le tube récepteur afin de réduire les pertes de chaleur.

Ces concentrateurs utilisent souvent un système de pointeur solaire à simple axe ou à double axe. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400(C°).[40] [42]



**Fig II.11:** Concentrateur cylindro-parabolique

### II.2.3.2.2 Concentrateurs paraboliques

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeurs) qui capte la chaleur solaire ainsi concentrée. Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500(C°)) sur le récepteur. [43] [40]



**Fig II.12:** Concentrateur parabolique



### II.2.3.2.3 Système de centrale à tour (héliostat)

Un héliostat utilise un ensemble de pointeurs solaire à double axe qui dirige l'énergie du soleil vers un grand absorbeur situé dans une tour. Ces capteurs possèdent un ensemble de grands miroirs qui suit le mouvement du soleil. Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur le récepteur en haut de la grande tour.

Un ordinateur garde les miroirs alignés afin que les rayons du soleil, qui sont réfléchis, visent toujours le récepteur, où la température peut dépasser 1000 (C°). [43],[44].



**Fig II.13:** système de centrale à tour

## CONCLUSION

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

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

Nous avons mené notre étude par un concentrateur parabolique de séchage des plantes Feuillues (séchage indirect).

# **CHAPITRE III**

## **Préparation du produit à sécher (plantes à feuilles)**

## INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons proposer différentes étapes de séchage. Les plantes à feuilles (menthe, romarin et Laurel comme exemple dans notre expérience) par le séchage solaire (indirect).

### III.1 Séchage de la menthe

#### III.1.1 Généralité sur la menthe:

La menthe poivrée est une plante herbacée appartenant à la famille des lamiacées. la famille des Lamiacées compte plusieurs dizaines d'espèces de menthe, qui quelles qu'elles soient, sauvages ou cultivées . elle est connue et utilisée dans le pourtour méditerranéen depuis l'antiquité.



**Fig III.1:** Représente de la menthe

#### III.1.2 Utilisation de la menthe:

Utilisées à des fins aromatiques (pour le thé par exemple) ou médicinales. la menthe poivrée est cependant l'espèce la plus utilisée en phytothérapie. La menthe est une plante efficace pour lutter contre les flatulences ou l'intestin irritable. utilisée par voie cutanée, elle permet de réduire les douleurs musculaires, les maux de tête et de lutter contre les petites démangeaisons (piqûres de moustique, eczéma, etc.). Elle aurait des vertus digestives, spasmolytiques, carminatives, antiseptiques, toniques et stimulantes. l'équilibre digestif. Par ailleurs, l'huile essentielle de menthe est très utilisée en aromathérapie (surtout la menthe poivrée), en phytothérapie et dans la médecine (surtout la menthe ).

### III.1.3 La composition chimique de la menthe:

les tableaux apportent une information sur la quantité moyenne les pour 100 g menthe:

Composants	Qté.
Eau	82.8 (g)
Protéines	3.54 (g)
Lipides	0.84 (g)
Acides gras saturés	0.22 (g)
Glucides	5.3 (g)
Sucre	5.3 (g)
Fibres	7.4 (g)

**Tableau III.1** : La composition chimique de la menthe[45]

### III.1.4 Préparation du produit:

La menthe a été prise des fermes locales et nous avons choisi les plantes longues et les feuilles minces de grande taille et les avons ensuite lavées manuellement avec de l'eau pure pour enlever les impuretés et les résidus de pesticides et d'autres polluants.

Enfin, ils sont étalés sur l'étagère d'une manière qui laisse les feuilles intactes les unes sur les autres.

### III.1.5 Protocole expérimental:

Après la préparation du produit (menthe) et l'étaler sur la grille du séchoir (250 (g) dans l'étagère), la perte de poids est insérée au niveau plateau suivi d'un départ jusqu'à la fin de l'expérience de 9h30 à 11h30 (séchoir indirect).

Le produit est pesé tous les quarts d'heure en utilisant la balance électrique (taux d'erreur de  $\pm 5$  g). Le processus de séchage est terminé lorsqu'il atteint l'humidité relative dans l'équilibre du produit.

La température ambiante, les mesures de réception et la température sont mesurées à l'extérieur de la chambre de séchage et la vitesse du vent toutes les 15 minutes. À la fin du processus de séchage, les échantillons sont autorisés à refroidir à température ambiante normale, puis placés dans des sacs en plastique.





**Fig III.2:** *la menthe avant et après le séchage (séchage indirect )*

## III.2 Séchage de la romarin

### III.2.1 Généralité sur la romarin:

Le romarin (*Rosmarinus officinalis*), est un arbrisseau de la famille des Lamiacées (ou labiées), poussant à l'état sauvage sur le pourtour méditerranéen, on le trouve principalement dans les terrains arides et ensoleillés, comme les garrigues, et les rocailles. Il n'apprécie pas une sécheresse trop importante mais se contente de l'humidité du littoral.



**Fig III.3:** Représente de la romarin localement (en EL oued )

### III.2.2 Utilisation de la romarin:

utilise Le branche Gastronomie peuvent également se conserver séchées.et saupoudrées pour parfumer un plat ou un dessert. Le romarin est également utilisé pour parfumer les grillades.

Quelques branches sont alors utilisées dans la confection d'une marinade. L'utilisation du romarin en parfumerie est très ancienne.

### III.2.3 Préparation du produit:

La romarin a été prélevée dans les fermes locales et nous avons choisi les branches minces et longues, puis les avons lavées manuellement avec de l'eau pure pour éliminer les impuretés et les résidus d'autres contaminants. Enfin, étaler sur l'étagère le produit(Romarin ) intactes les unes sur les autres.

### III.2.4 La composition chimique de romarin:

les tableaux apportent une information sur la quantité moyenne les pour 100( g) romarin:

Composants	Qté.
Glucides	20,70( g)
Fibres alimentaires	14,1 (g)
Protéines	3,31 (g)
Lipides	5,86 (g)
Saturés	2,838 (g)
Eau	67,77 (g)
Cendres totales	2,35 (g)

Tableau III.2 : La composition chimique de romarin[46][47]

### III.2.5 Protocole expérimental:

Après la préparation du produit (Romarin) et l'étaler sur la grille du séchoir (300 (g) dans l'étagère), la perte de poids est insérée au niveau plateau suivi d'un départ jusqu'à la fin de l'expérience de 9h00 à 14h45 (séchoir indirect).

Le produit est pesé tous les quarts d'heure en utilisant la balance électrique (taux d'erreur de  $\pm 5$  g). Le processus de séchage est terminé lorsqu'il atteint l'humidité relative dans l'équilibre du produit. La température ambiante, les mesures de réception et la température sont mesurées à l'extérieur de la chambre de séchage et la vitesse du vent toutes les 15 minutes à la fin du processus de séchage, les échantillons sont autorisés à refroidir à température ambiante normale, puis placés dans des sacs en plastique.





**Fig III.4:** *la romarin avant et après le séchage (séchage indirect )*

### III.4 Séchage de la Laurel

#### III.4.1 Généralité sur la Laurel:

Laurels nobilis, le Laurel vrai, Laurel -sauce ou simplement Laurel , est une espèce d'arbustes à feuillage persistant de la famille des Lauracées. Il est originaire du bassin méditerranéen. Il est parfois appelé Laurel d'Apollon ou Laurel noble.



**Fig III.5:** Représente de la Laurel

### III.4.2 Utilisation de la Laurel:

#### Alimentaire:

- ❖ Ses feuilles sont utilisées en cuisine pour leur arôme.
- ❖ Les Bédouins l'utilisent pour parfumer le café.
- ❖ Les fleurs de Laurel séchées dans sont utilisées en cuisine.

#### Médicinale:

- ❖ La feuille de laurier-sauce s'emploie également pour traiter les crampes abdominales en infusion.
- ❖ Le savon d'Alep est traditionnellement fabriqué avec de feuilles de Laurel.
- ❖ On utilise Laurel également la feuille broyée en poudre pour lutter contre les fortes migraines

### III.4.3 La composition chimique de Laurel:

les tableaux apportent une information sur la quantité moyenne les pour 100 g Laurel:

Composants	Qté.
Calories	313 (kcal)
Eau	63.1 (g)
Graisse	8,36 (g)
Gras saturés	2,28 (g)
Glucides	74,97 (g)
Fibre	26,3 (g)
Protéines	7.61 (g)
Cholestérol	6,78 (g)

**Tableau III.3 :** La composition chimique de Laurel[48][49]

### III.4.4 Préparation du produit:

La Laurel a été acheté des marché locales et nous avons choisi les plantes longues et les feuilles minces de grande taille et les avons ensuite lavées manuellement avec de l'eau pure pour enlever les impuretés et les résidus de pesticides et d'autres polluants. Enfin, ils sont étalés sur l'étagère d'une manière qui laisse les feuilles intactes les unes sur les autres

### III.4.5 Protocole expérimental:

Après la préparation du produit (Laurel ) et l'étaler sur la grille du séchoir (150 (g) dans l'étagère), la perte de poids est insérée au niveau plateau suivi d'un départ jusqu'à la fin de l'expérience de 9h15 à 12h15 (séchoir indirect). Le produit est pesé tous les quarts d'heure en utilisant la balance électrique (taux d'erreur de  $\pm 5$  (g)).



Le processus de séchage est terminé lorsqu'il atteint l'humidité relative dans l'équilibre du produit. La température ambiante, les mesures de réception et la température sont mesurées à l'extérieur de la chambre de séchage et la vitesse du vent toutes les 15 minutes. À la fin du processus de séchage, les échantillons sont autorisés à refroidir à température ambiante normale, puis placés dans des sacs en plastique.



**Fig III.6:** *la Laurel avant et après le séchage (séchage indirect )*

### **III.5 Le but du séchage de ces produits (Romarin , Laurel , Menthe):**

- ❖ La plupart des utilisations de ces produits sont séchées.
- ❖ Disponible localement de manière significative.
- ❖ Ces produits sont séchés pour le stockage ou doivent être utilisés plus tard.
- ❖ Le séchage est le meilleur moyen d'éviter la détérioration de ces produits lorsqu'ils sont récoltés à très haute valeur.

### **Conclusion**

Les facteurs d'humidité contribuent à la corruption des produits Légumes, légumineuses, noix, feuilles de plantes. Pour éliminer ce problème, nous devons penser à une solution, le séchage solaire est l'une des principales techniques pour maintenir les produits agricoles et alimentaires.

C'est aussi un processus impliqué dans la conservation, le stockage et l'utilisation optimale de nombreux produits agricoles, tels que la Menthe, Laurel, le Romarin.

**CHAPITRE IV**  
**RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous étudierons expérimentalement la température. Pour l'avenir, salle de séchage et contenu environnant.

Eau dans les produits qui ont été séchés (Menthe, Laurel, Romarin), ainsi que l'analyse. Courbes et leurs interprétations.

Après avoir vérifié nos calculs avec des valeurs mesurées pendant l'intervalle. De 9h00 à 13h30 les 17, 19 et 21 avril 2017.

### IV.1 Le système utilisé dans l'étude

Dans cette étude nous avons utilisé un séchoir solaire indirect à convection forcée:(concentrateur parabolique) figure (IV.1).



**Fig IV.1:** Le système utilisé (séchoir solaire indirect forcée à concentrateur parabolique)

## IV.2 Description du système de séchage et leur des composants

### IV.2.1 Réflecteur ( miroir)

Cet élément focalise l'énergie solaire en son foyer, Le Caractéristiques géométriques du réflecteur:

<b>Diamètre de la parabole</b>	<b>d=1.81 (m)</b>
<b>Taille de la parabole</b>	<b>h=0.26 (m)</b>
<b>L'angled'ouverture</b>	<b><math>\Psi_p = 59.7^\circ</math></b>
<b>Distance focale</b>	<b>f=0.78 (m)</b>
<b>Surface d'ouverture</b>	<b>Aa=2.57 (m<sup>2</sup>)</b>

**Tableau IV.1 :** Caractéristiques géométriques du réflecteur

### IV.2.2 Le récepteur

Le métal récepteur doit avoir une bonne conductivité, nous avons choisi le fer (dont la conductivité thermique est de l'ordre de 80 (W/ k.m<sup>2</sup>)), c'est un tube de 17 (cm) de diamètre extérieur et 15 (cm) de longueur, il est muni deux trous le premier trou pour entre l'air et le deuxième pour sorte l'air chaud, contiennent intérieur a des obstacles pour laisser l'air de rester plus longtemps pour le bien chauffée.



**Fig IV.2:** Représente de Le Récepteur



### IV.2.3 Chambre de séchage

Est une boîte ( armoire) bien isolé à trois couche ( bois et endêver et résine) ses dimensions 50 (cm) de longueur et 50 (cm) de largeur et 50(cm) de hauteur, il contient calie métallique pour placer la produit à sécher, il est deux trous de 60 (mm) de diamètre en haute et bas pour permettre de circuler l'air-chaud au sien la chambre à travers les trous.



Fig IV.3: Représente de la Chambre de séchage

### IV.2.4 le support

Le support est un élément qui porte le dispositif. Il est procédé en cornières soudés à l'arc électrique pour diminuer le poids et faciliter la mobilité et le stockage.



**Fig IV.4:** Représente le support

#### IV.2.5 Système de poursuite manuel

Le concentrateur parabolique demande un système de poursuite du mouvement du soleil pour gagner le maximum de flux solaire.

Nous avons choisi un mécanisme de poursuite très simple se fondant sur un (vérins et un axe rotatif) pour tourner le concentrateur solaire à la situation du soleil à tout moment.



**Fig IV.5:** Représente Système de Poursuite Manuel

### IV.2.6 Moteur ventilateur

C'est un élément qui permet de créer un écoulement forcé transformer la température chaud dans le foyer vers la chambre de séchage .



Fig IV.6: Représente de le Moteur ventilateur

## IV.3 Le cas de la menthe

### IV.3.1 Variation de teneur en eau en fonction de temps

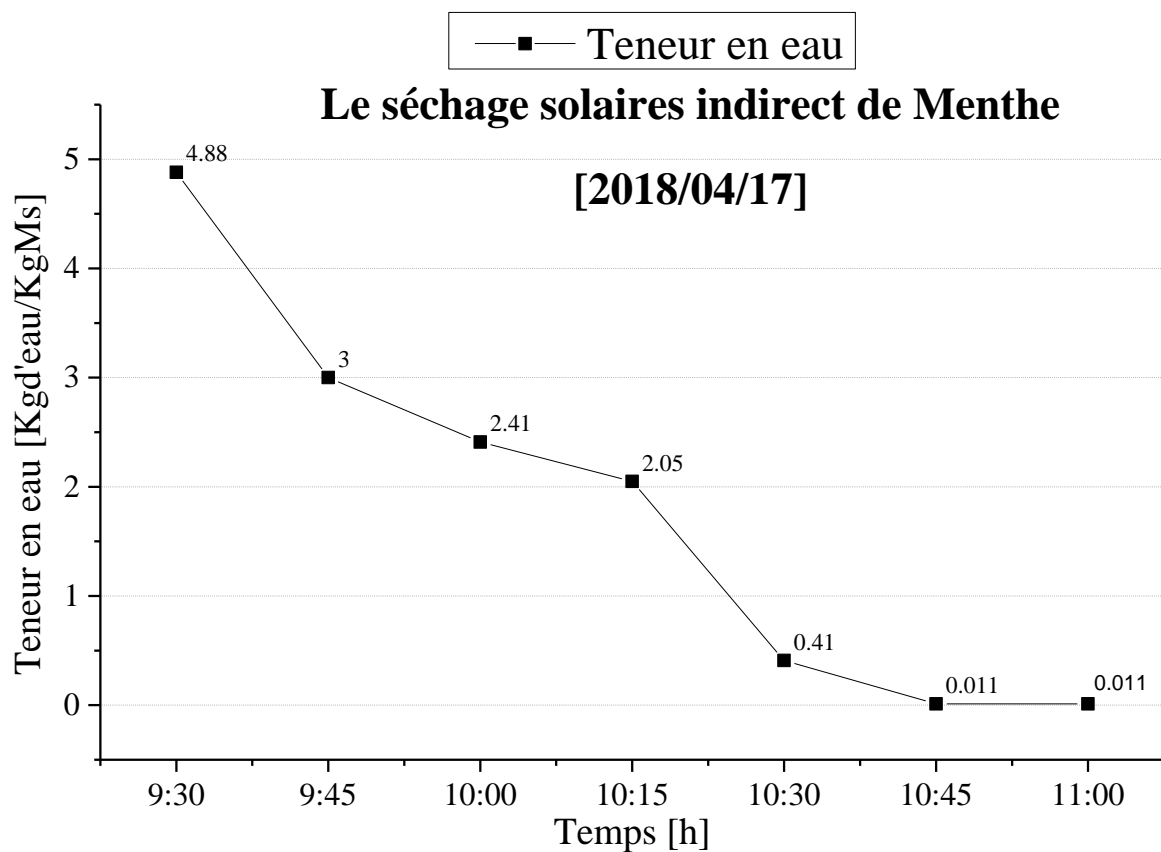
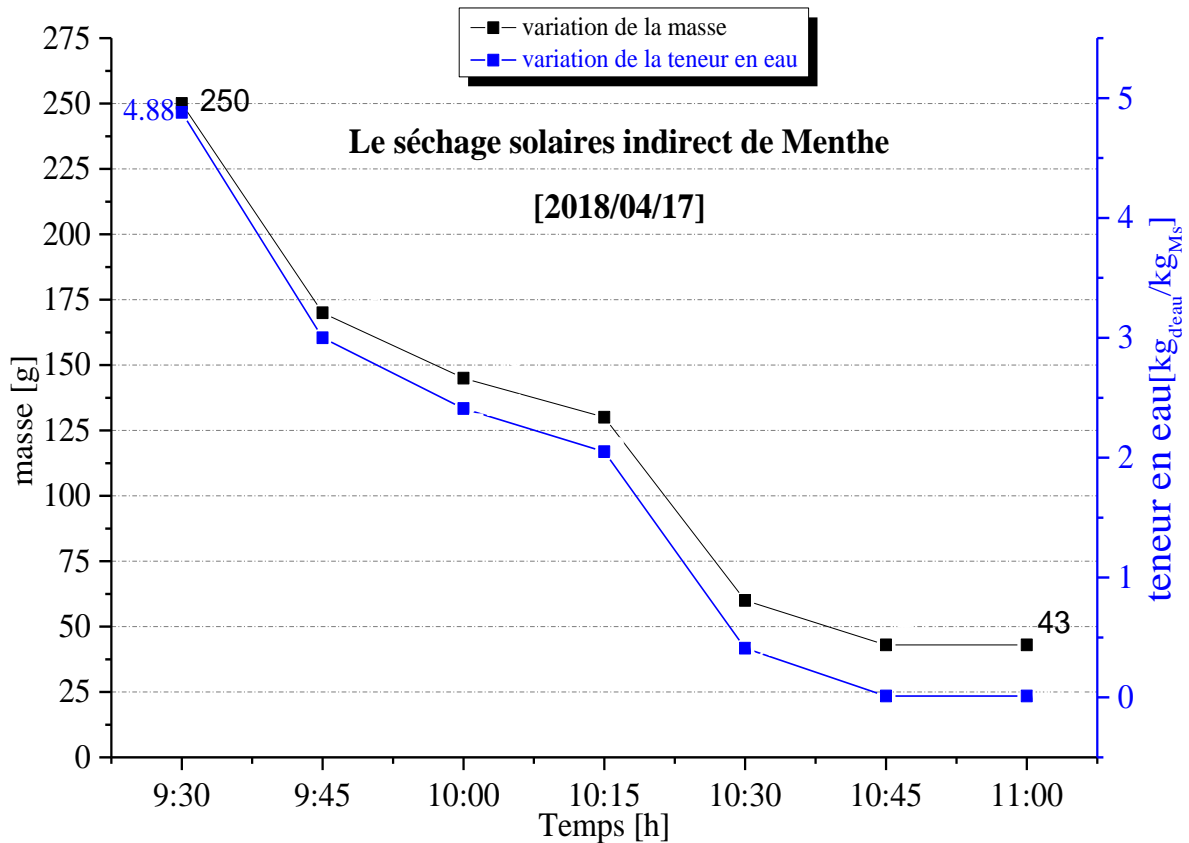


Fig IV.7: Variation de teneur en eau en fonction de temps (la Menthe)

La figure IV.7 montre une diminution de la teneur en eau, la teneur en eau était de 9h00 à 4,88 heures jusqu'à ce qu'elle atteigne presque zéro à 11h00.

Cette diminution est due à l'évaporation de l'eau du produit (menthe) au cours du processus de séchage.

### IV.3.2 Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps

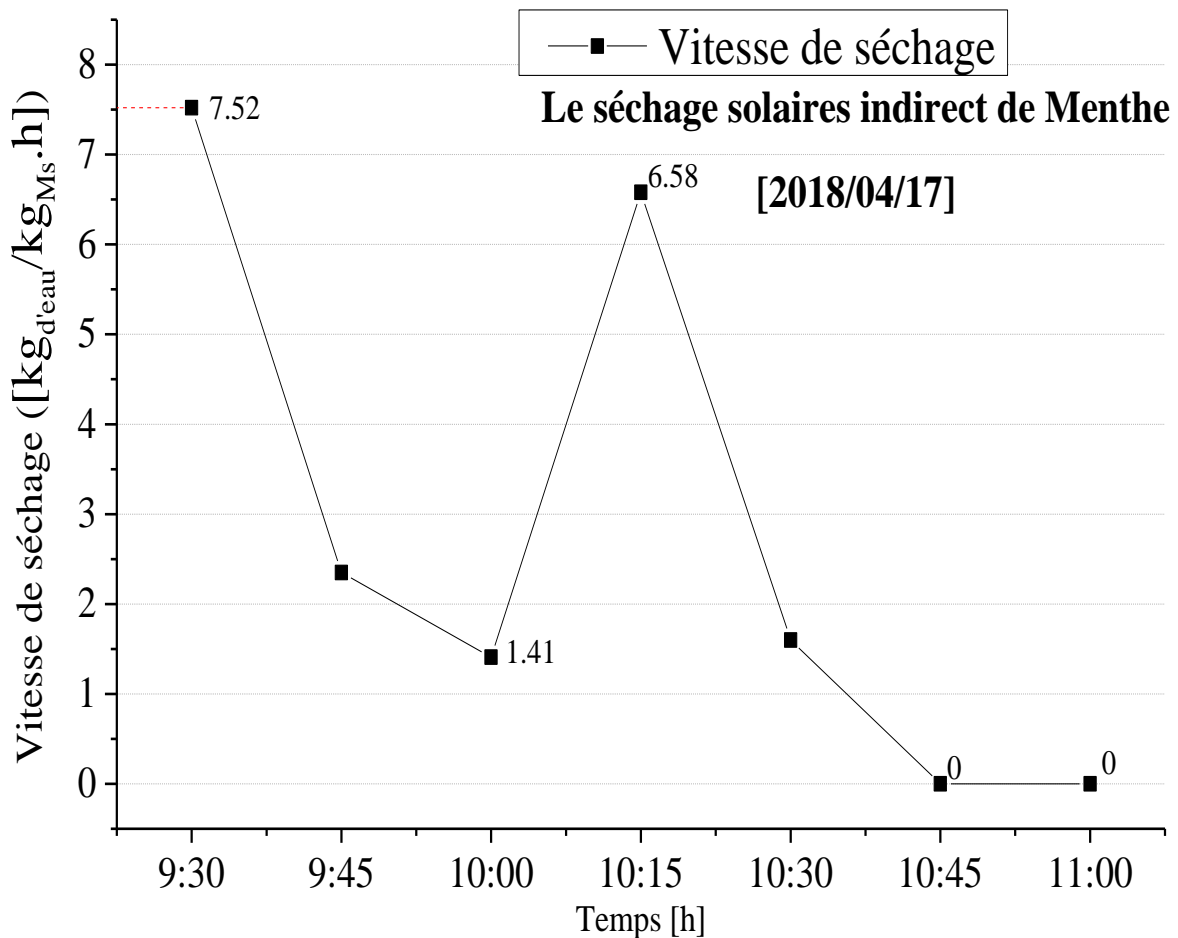


**Fig IV.8:** Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps (la menthe)

La figure IV.8, On observe une diminution relative entre la masse et teneur en eau. Lorsque la quantité est passée de 4,88 à ne pas exister, et une diminution de la masse également de 250 (g) à environ 43 (g) en 90 minutes.



## IV.3.3 Variation de la vitesse de séchage au cours du temps

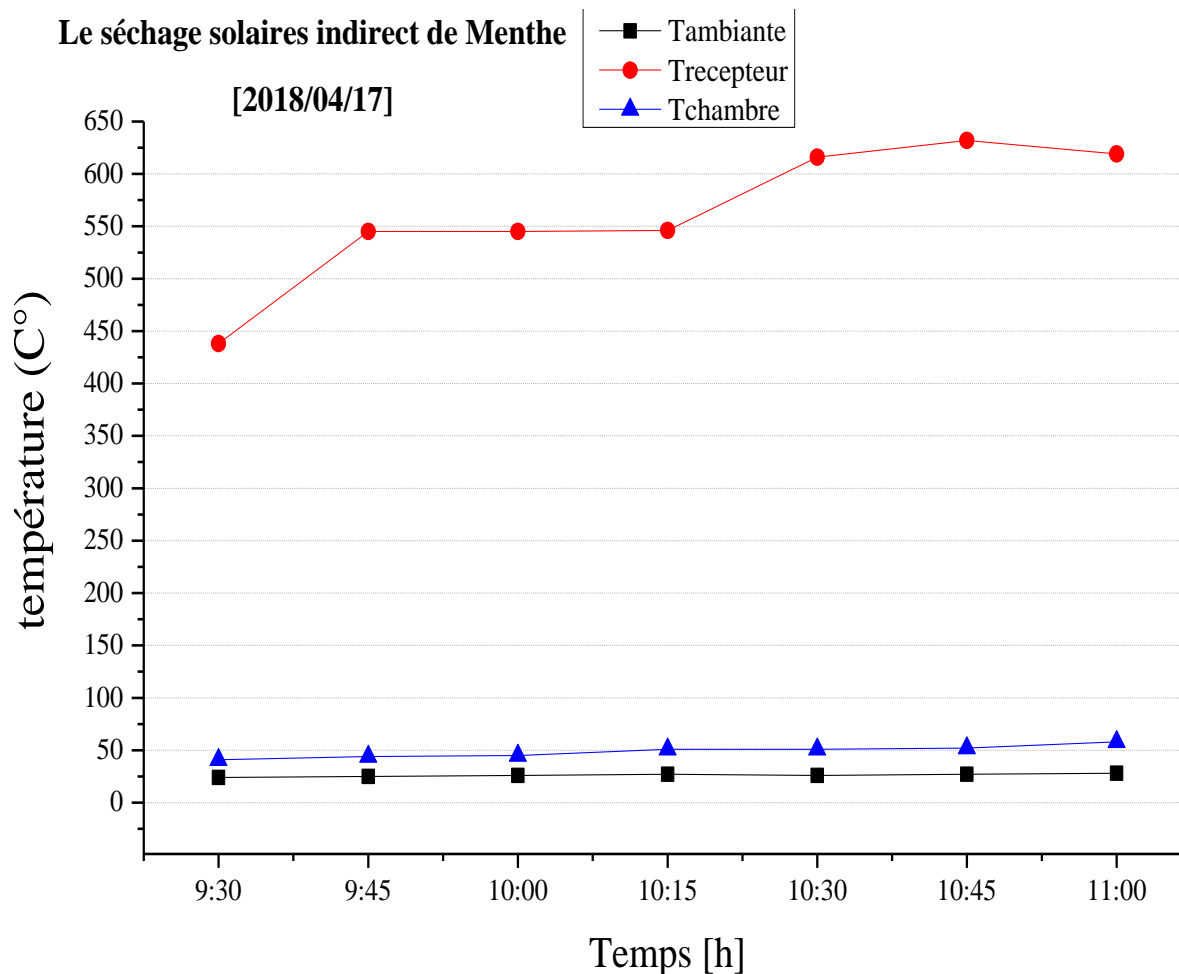


**Fig IV.9:** Variation de la vitesse de séchage au cours du temps (la menthe)

Notez dans cette courbe:

- Etape 1: (de 9h30 à 10h00) La vitesse de séchage passe de 7,52 à 1,41
- Etape 2: (de 10h00 à 10h15) La vitesse de séchage est augmentée de 1,41. à 6.58, Cela est dû au fait que cette période est le produit pendant la période d'échauffement.
- Etape 3: (10.15 à 11.00) La diminution du séchage est due à la fin du opération a partir de cela, nous disons que le contrôleur du taux de séchage est la propagation de l'eau de l'intérieur du produit à sa surface.

### IV.3.4 Variation de la température ambiante et la chambre et la température de récepteur au cours du temps



**Fig IV.10:** Variation de la température ambiante et la chambre et la température de récepteur au cours du temps (la menthe)

La figure IV.10 montre une augmentation relative de la température ambiante et de la chambre et du récepteur.

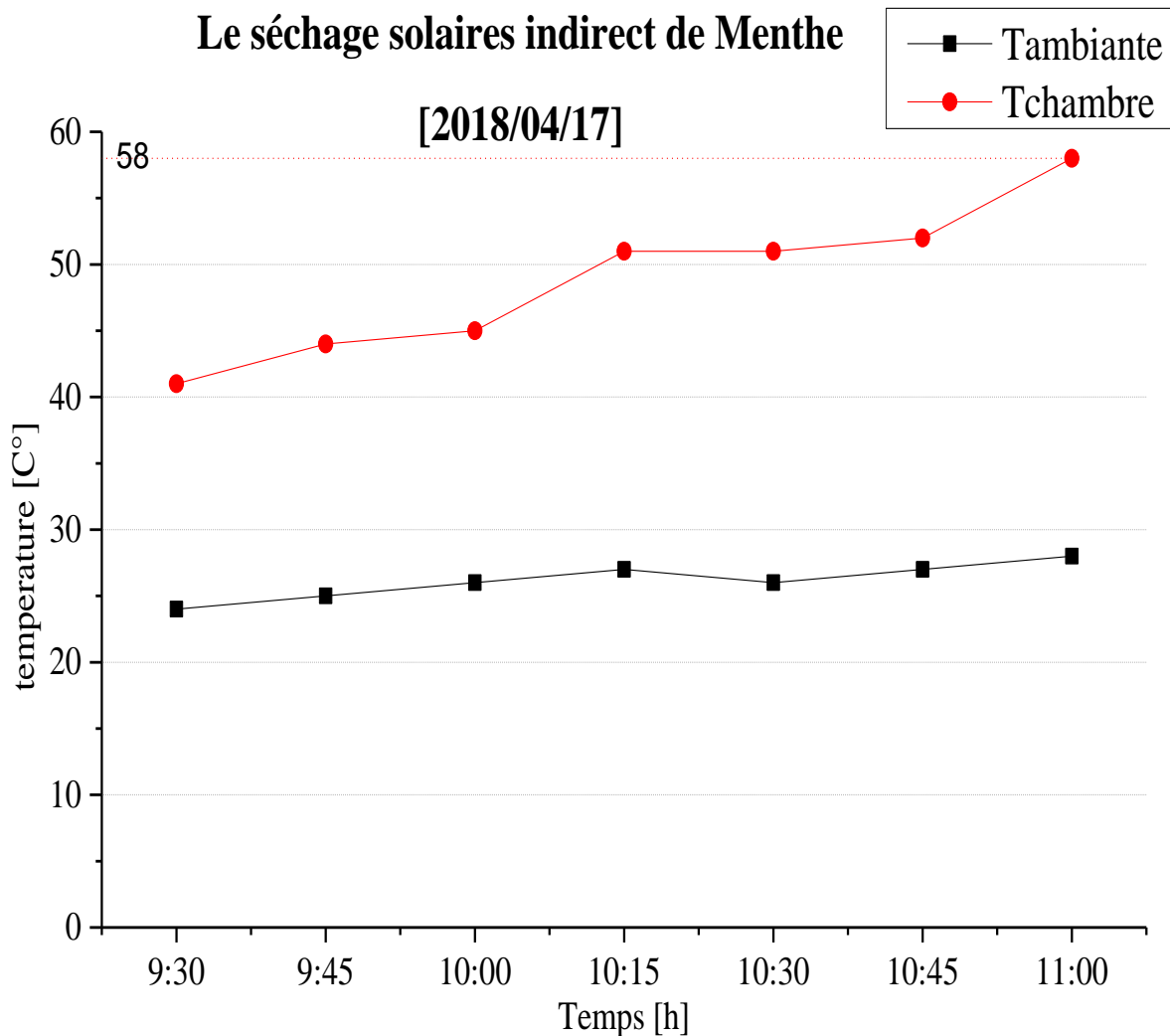
La température dans la chambre de séchage atteint 58(C°) après 90 minutes.

Alors que la température à l'extérieur de la chambre (ambiante) varie de 23(C°) à 28(C°) lorsque le récepteur de 466 à 612(C°).

Cette différence entre le récepteur et la chambre de séchage est due à plusieurs facteurs:

- La longueur du tube entre le récepteur et la chambre de séchage.
- Fuite dans le tube et dans la chambre de séchage.

### IV.3.5 Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps

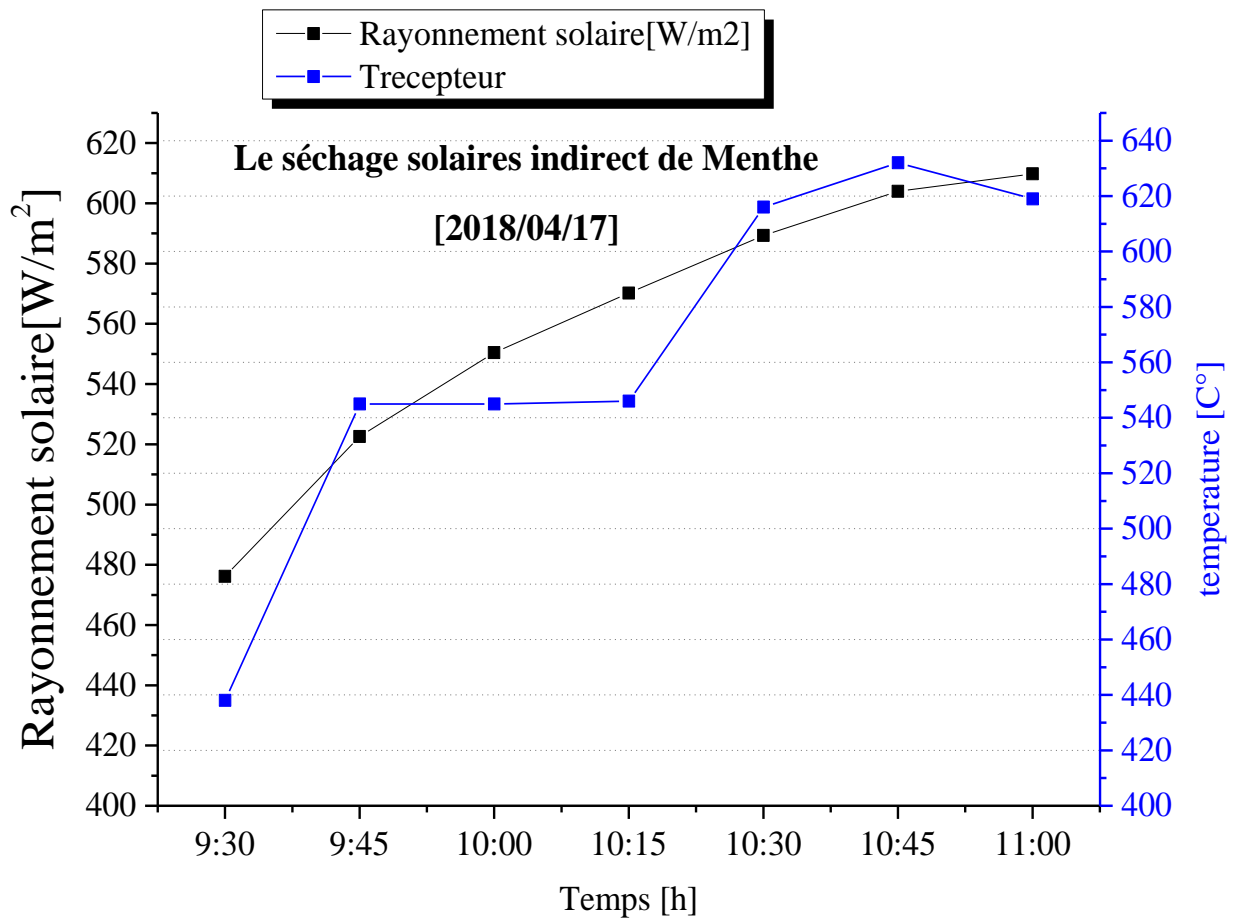


**Fig IV.11:** Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps (la menthe)

On peut observer sur la figure IV.11 une augmentation relative de la température ambiante et de la chambre.

La température dans la chambre de séchage atteint 58(C°)après 90 minutes. Alors que la température à l'extérieur de la chambre (ambiante) varie de 23 à 28(C°).

### IV.3.6 Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps



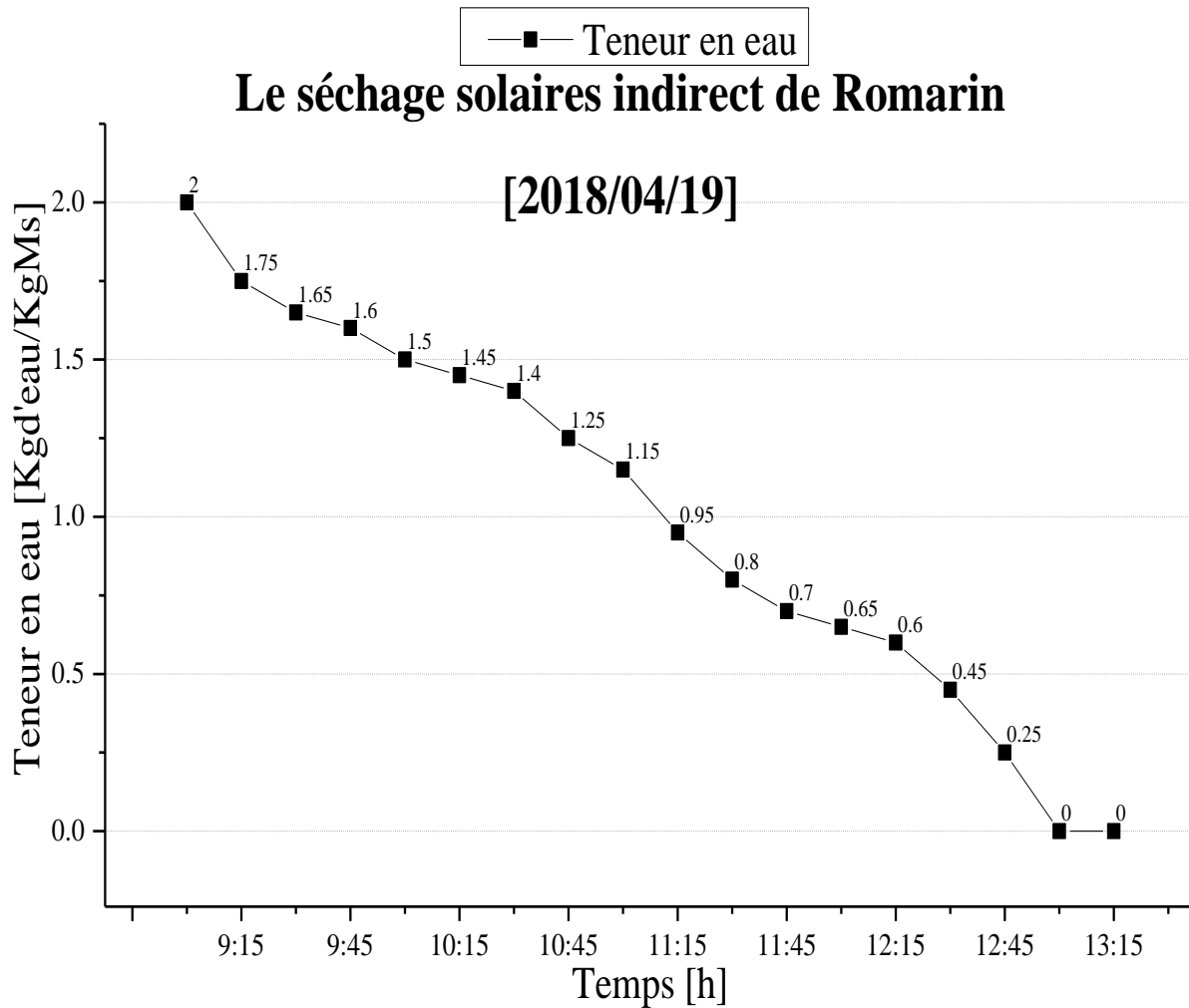
**Fig IV.12:** Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps (la menthe)

Dans la Figure IV.12 nous pouvons observer une augmentation de la température du récepteur à divers degrés, pour atteindre. La température du récepteur est de 438 à 619(C°).

Nous pouvons également observer une augmentation relative du rayonnement solaire à partir de 9:30 Il était de 466(W/m<sup>2</sup>) pour atteindre 612(W/m<sup>2</sup>) à 11:00h.

## IV.4 Le cas de la romarin

### IV.4.1 Variation de teneur en eau en fonction de temps

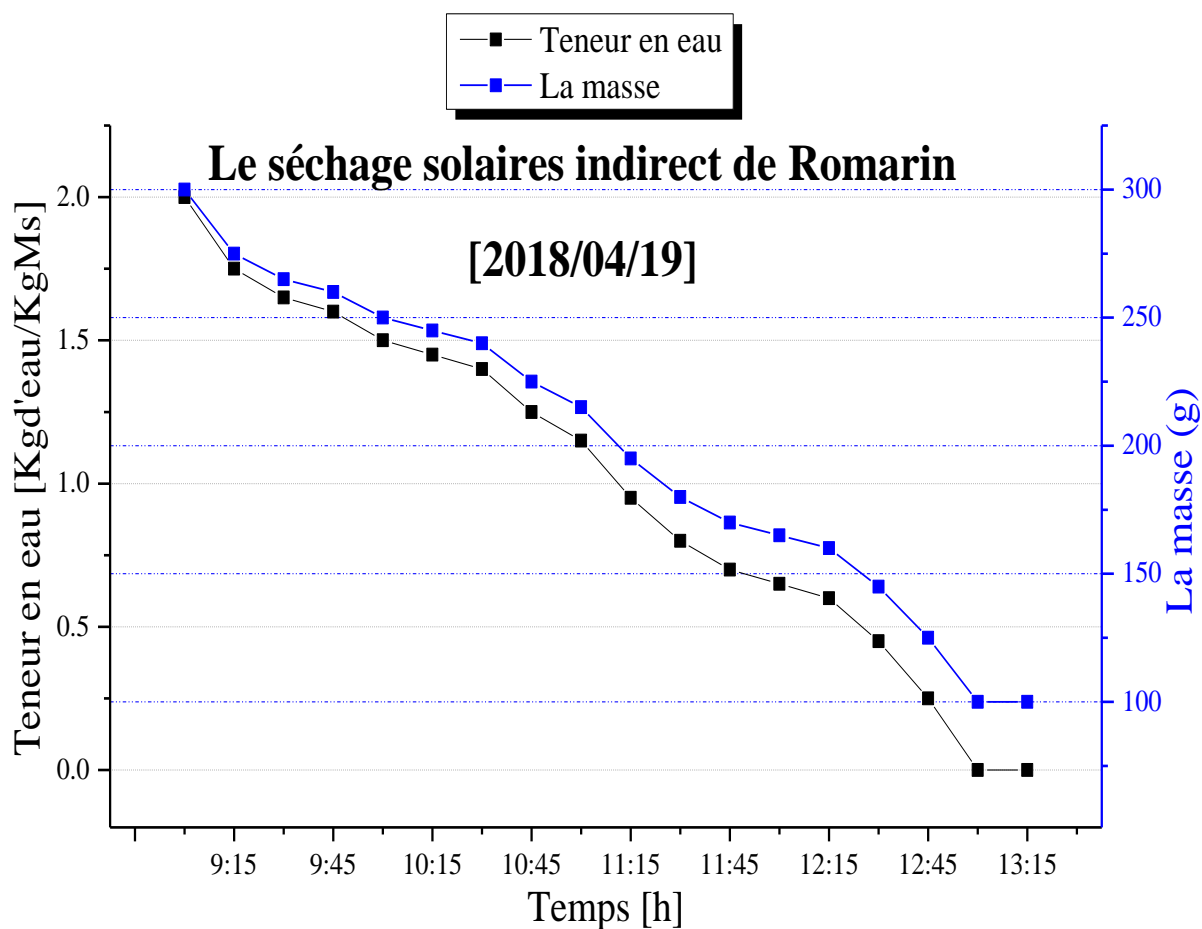


**Fig IV.13:** Variation de teneur en eau en fonction de temps (la romarin)

La figure IV.13 montre la faible teneur en eau de la romarin. La teneur en eau était de 9h15 à 2h00 et a atteint presque zéro à 13h15.

Cette diminution est due à l'évaporation de l'eau du produit (romarin) au cours du processus de séchage.fi.

## IV.4.2 Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps

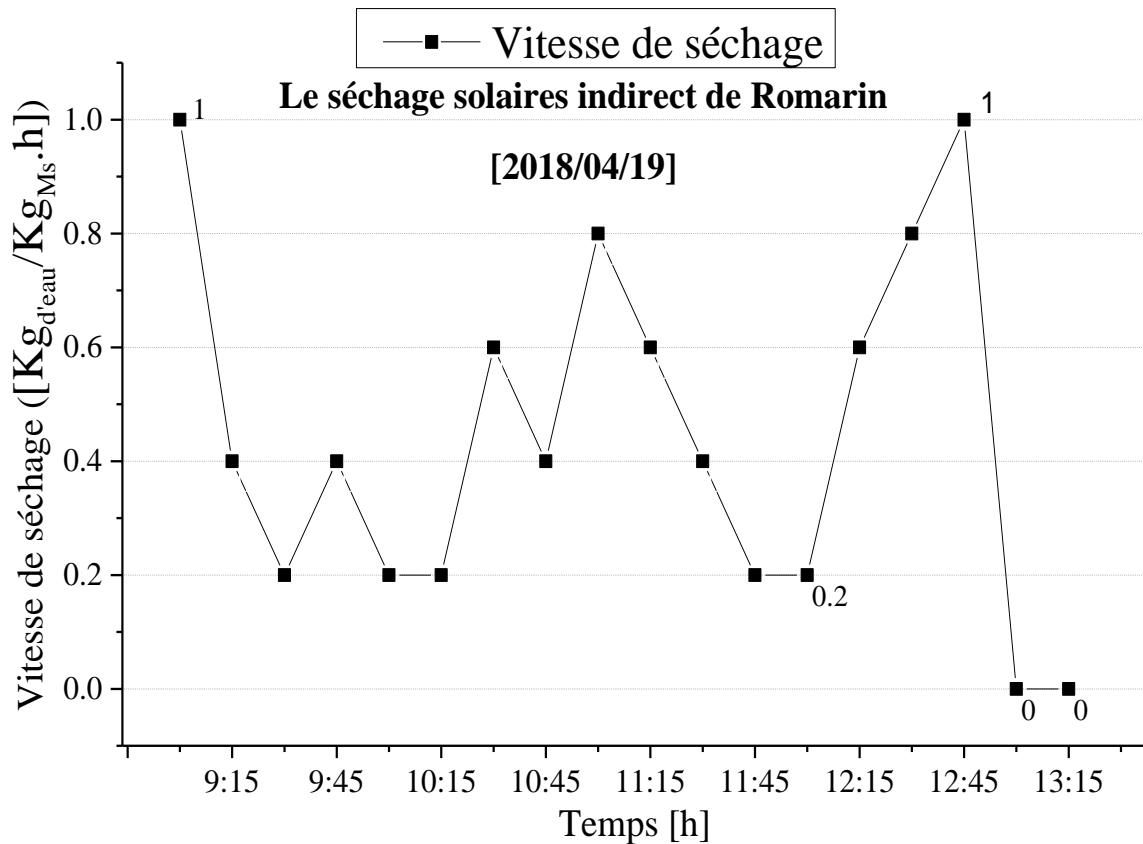


**Fig IV.14:** Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps  
(la romarin)

La figure IV.14 montre la faible teneur en eau et la masse de romarin. La teneur en eau était de 9h15 à 2h00 et a atteint presque zéro à 13h15.

Cette diminution est due à l'évaporation du produit (romarin) au cours du processus de séchage entraînant une diminution de la masse.

## IV.4.3 Variation de la vitesse de séchage au cours du temps

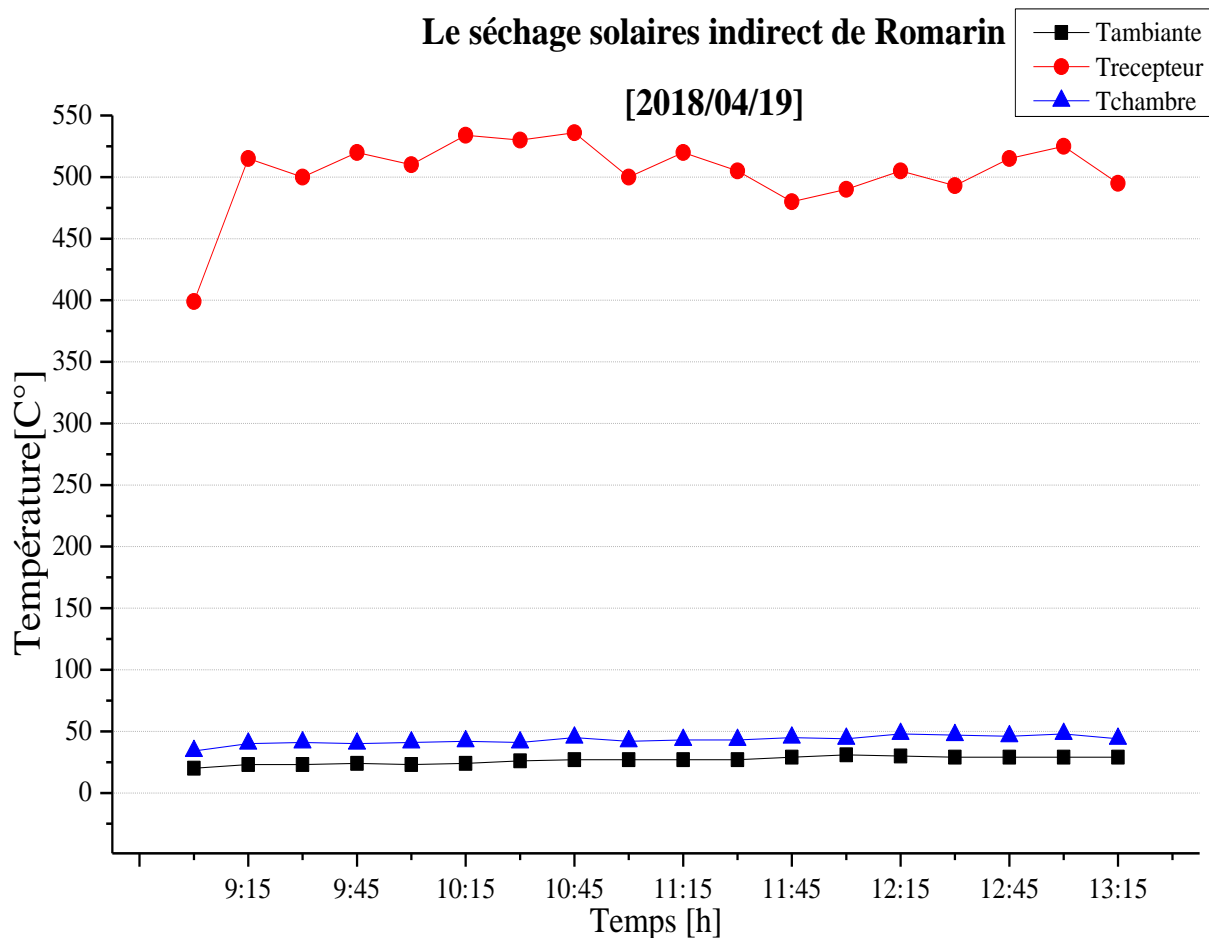


**Fig IV.15:** Variation de la vitesse de séchage au cours du temps (la romarin)

Notez dans cette courbe:

- Étape 1: (de 9h00 à 12h00) La vitesse de séchage commence de 1.00 à 0.2.
- Étape 2: (de midi à 12h30) La vitesse de séchage est augmentée de 0,2. À 1.00, Ceci est dû au fait que cette période est le passage de la période de réchauffement du produit.
- Étape 3: (12h30 à 13h15) La diminution du séchage est due à la fin du processus à partir de cela, nous disons que le contrôleur de taux de séchage répand l'eau de l'intérieur du produit à sa surface.

#### IV.4.4 Variation de la température ambiante et la chambre et la température de récepteur au cours du temps



**Fig IV.16:** Variation de la température ambiante, température de la chambre et de la récepteur au cours du temps (la Romarin)

La figure IV.16 montre une augmentation relative de la température ambiante, de la surface, du récepteur.

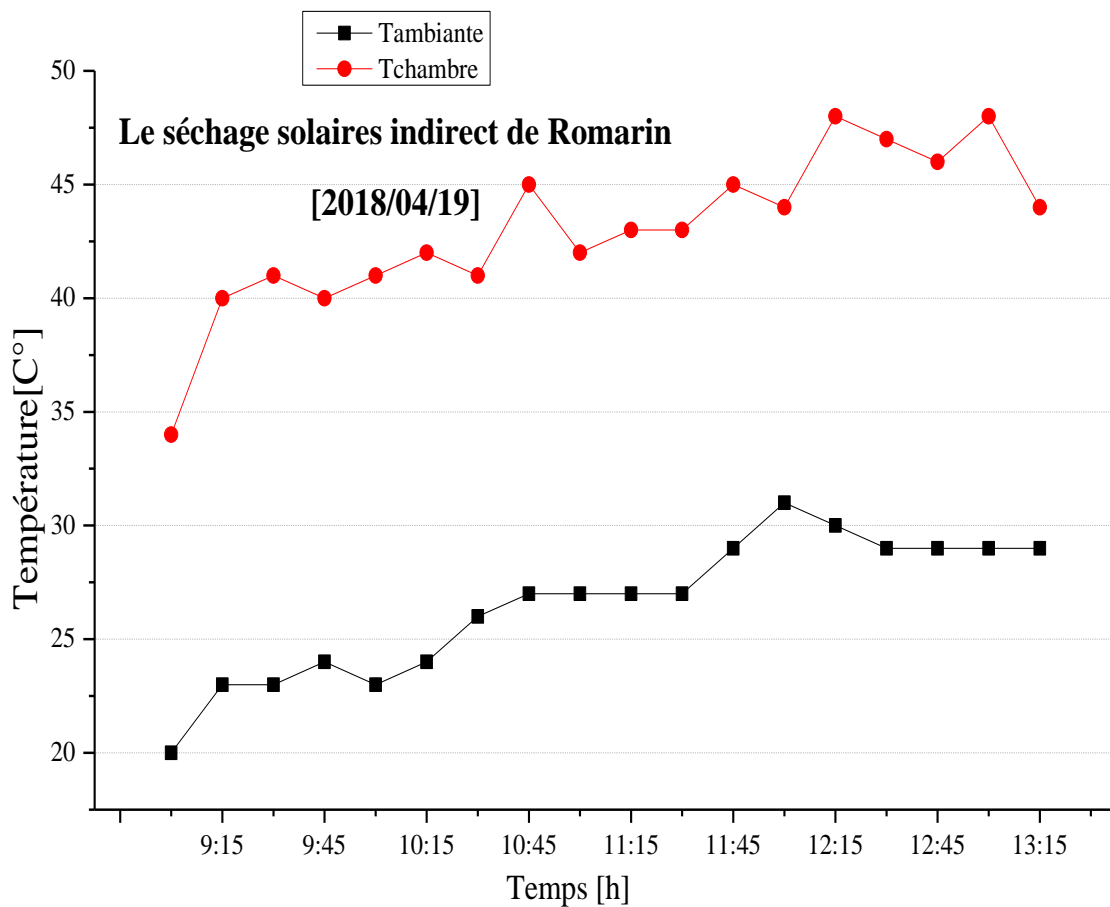
La température dans la chambre de séchage est jusqu'à 48(C°) après 255 minutes. La température ambiante varie de 23 à 31(C°) lorsque le récepteur est de 399 à 551(C°).

Cette différence entre le récepteur et la chambre de séchage est due à plusieurs facteurs:

- La longueur du tube entre le récepteur et la chambre de séchage.
- Fuite dans le tube et dans la chambre de séchage.

#### IV.4.5 Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps





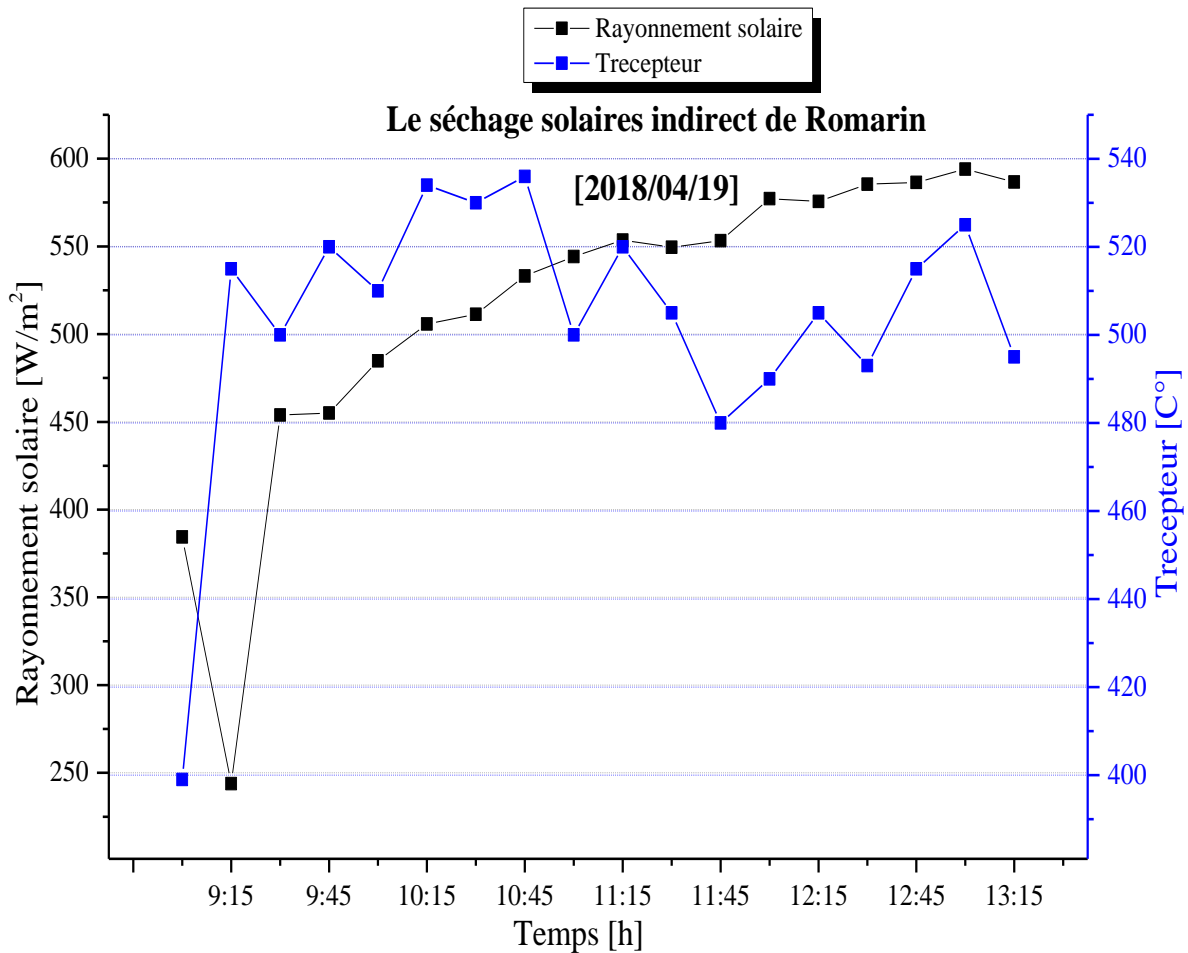
**Fig IV.17:** Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps (la romarin)

On peut observer sur la figure IV.17 une augmentation relative de la température ambiante et de la chambre.

La température dans la chambre de séchage atteint 48 degrés après 255 minutes.

Alors que la température à l'extérieur de la chambre (ambiante) varie de 23 à 31(C°).

#### IV.4.6 : Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps



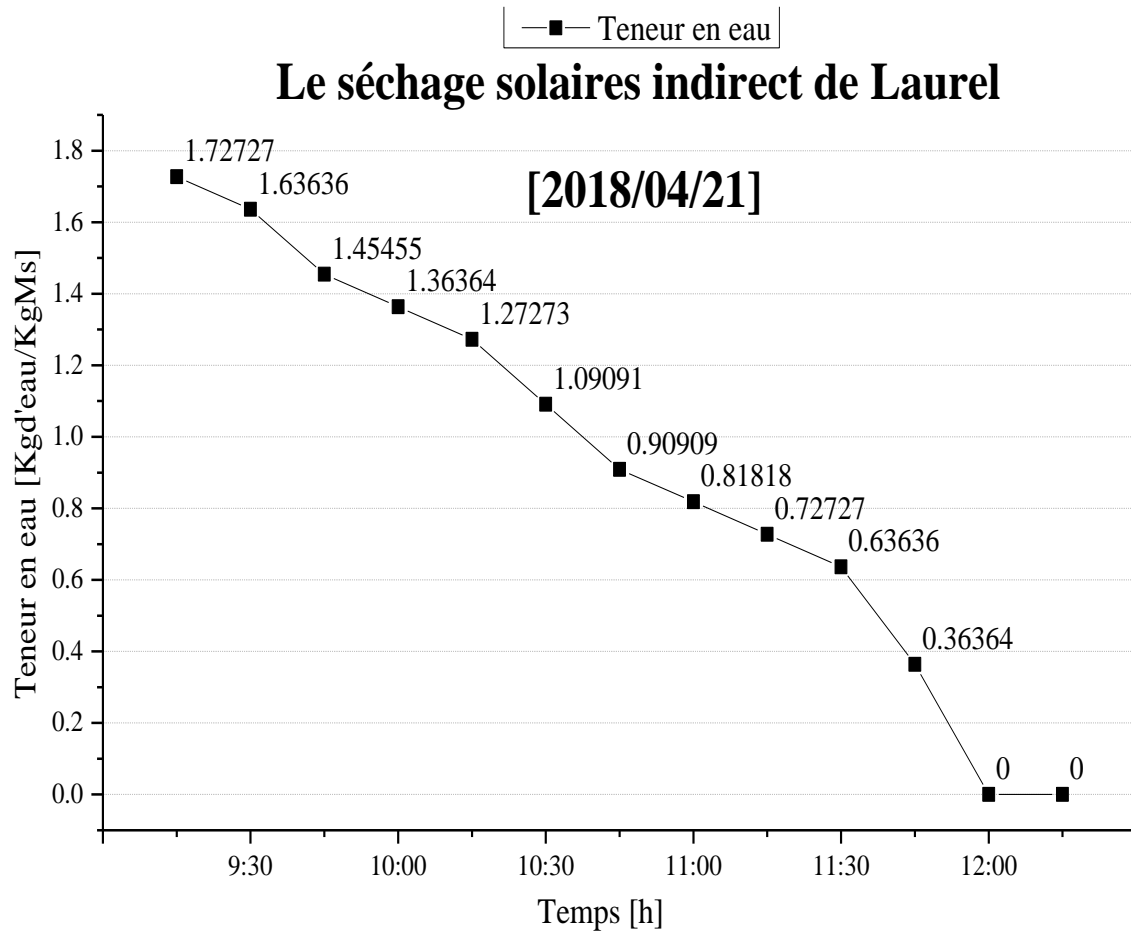
**Fig IV.18 :** Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps (la romarin)

Dans la Figure IV.18, nous pouvons observer une augmentation de la température du récepteur à divers degrés, pour atteindre.

La température du récepteur varie est de 399 à 551(C°). Nous pouvons également observer une augmentation relative du rayonnement solaire à partir de 9:00 Il était de 384.42(W/m<sup>2</sup>) pour atteindre 586.69(W/m<sup>2</sup>) à 13:15h.

## IV.5 Le cas de la Laurel

### IV.5.1 Variation de teneur en eau en fonction de temps

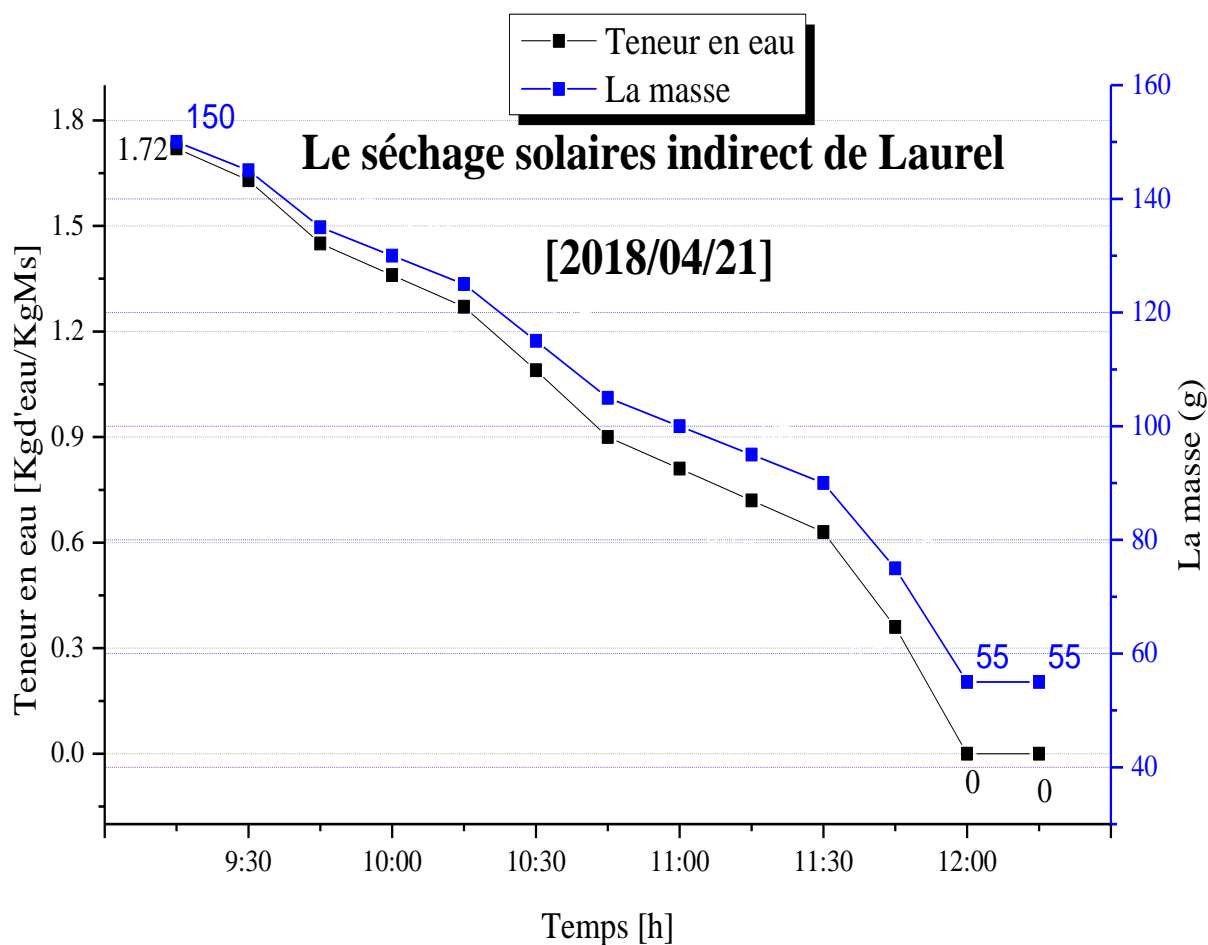


**Fig IV.19:** Variation de teneur en eau en fonction de temps (Laurel)

La figure IV.19 montre la faible teneur en eau du Laurel. La teneur en eau à 9h15 était de 1,72 et atteignait presque zéro à 12h15.

Cette diminution est due à l'évaporation du produit (Laurel) au cours du processus de séchage.

## IV.5.2 Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps

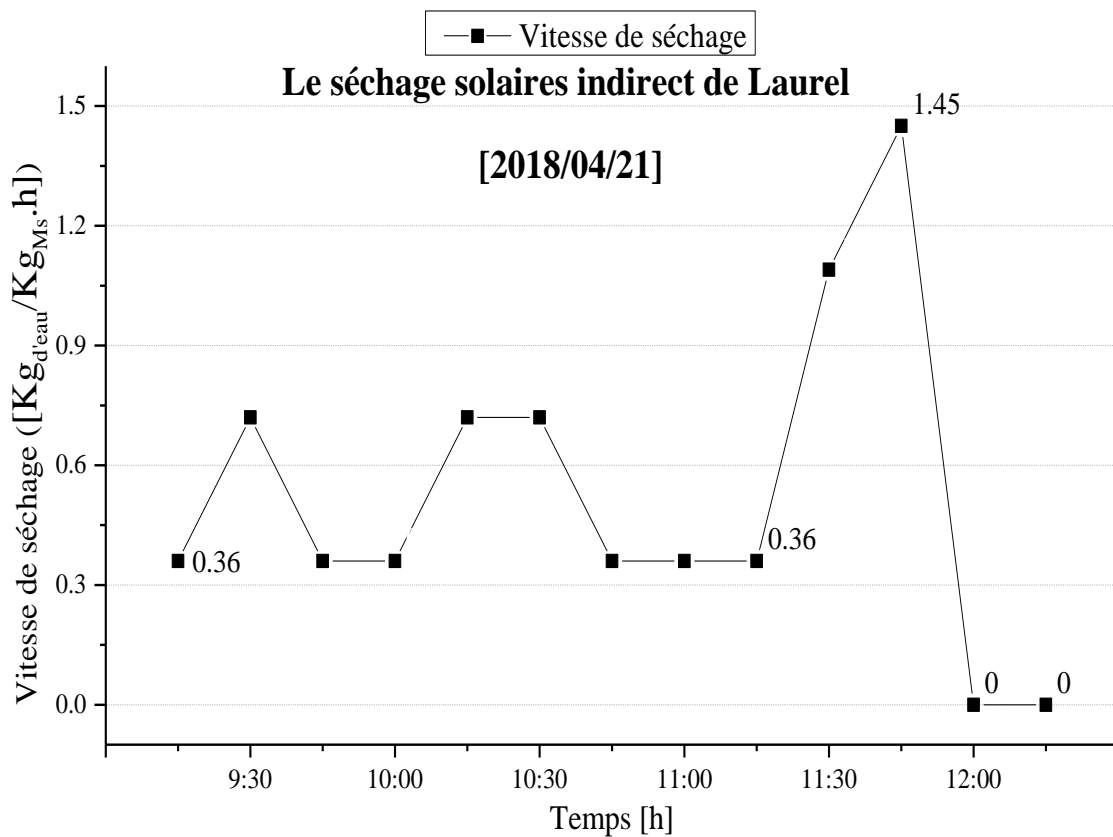


**Fig IV.20:** Variation de la masse de produit et teneur en eau en fonction de temps (la Laurel)

La figure IV.20 montre la faible teneur en eau et la masse de Laurel. La teneur en eau était de 9h15 à 1.72 et a atteint presque zéro à 12h15.

Cette diminution est due à l'évaporation du produit (Laurel) au cours du processus de séchage entraînant une diminution de la masse.

## IV.5.3 Variation de la vitesse de séchage au cours du temps

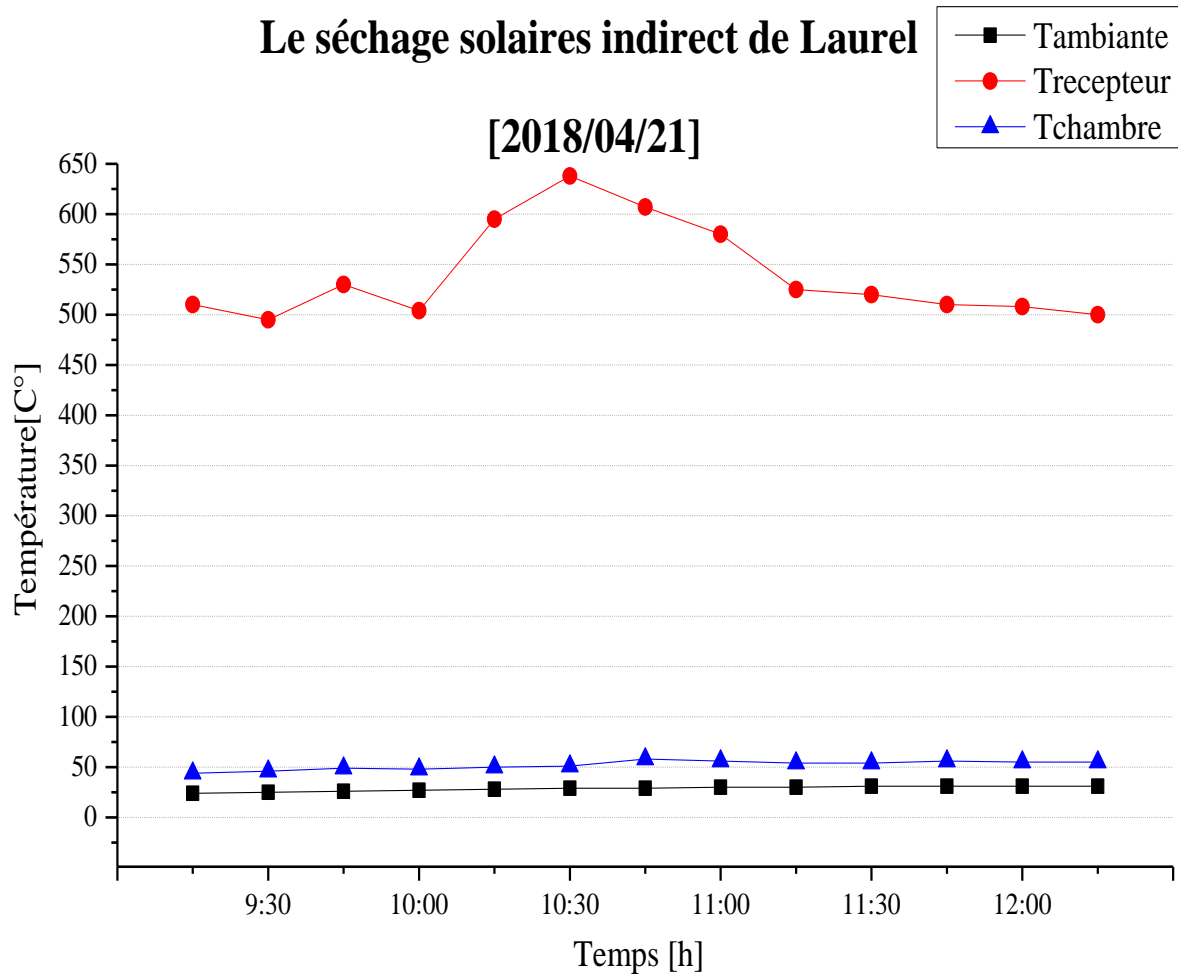


**Fig IV.21:** Variation de la vitesse de séchage au cours du temps (la Laurel)

Notez dans cette courbe:

- Étape 1: (de 9h15 à 11h15) La vitesse de séchage reste constante à 0,36.
- Étape 2: (de 11h15 à 11h45) La vitesse de séchage est augmentée de 0,36. à 1,45, Ceci est dû au fait que cette période est le passage du produit pendant la période d'échauffement.
- Etape 3: (11.45 à 12.15) La diminution du séchage est due à la fin du processus à partir de cela, nous disons que le contrôleur de taux de séchage répand l'eau de l'intérieur du produit à sa surface.

#### IV.5.4 Variation de la température ambiante et la chambre et la température de récepteur au cours du temps



**Fig IV.22:** Variation de la température ambiante et la chambre et la température de récepteur au cours du temps (la Laurel)

La figure IV.22 montre une augmentation relative de la température ambiante, de la surface, du récepteur.

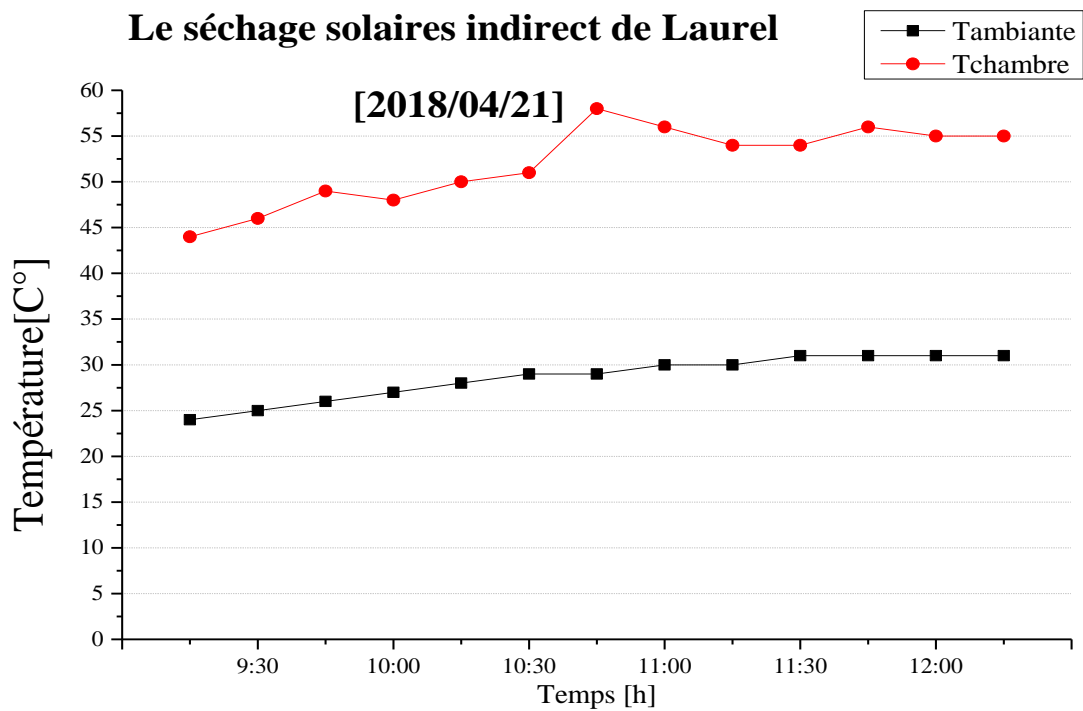
La température dans la chambre de séchage est jusqu'à 58 degrés après 180 minutes.

La température ambiante varie de 24 degrés à 31 degrés lorsque le récepteur varie de 495 à 638 degrés.

Cette différence entre le récepteur et la salle de séchage est due à plusieurs facteurs:

- Longueur du tube entre le récepteur et la salle de séchage.
- Fuite dans le tube et dans la chambre de séchage.

## IV.5.5 Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps



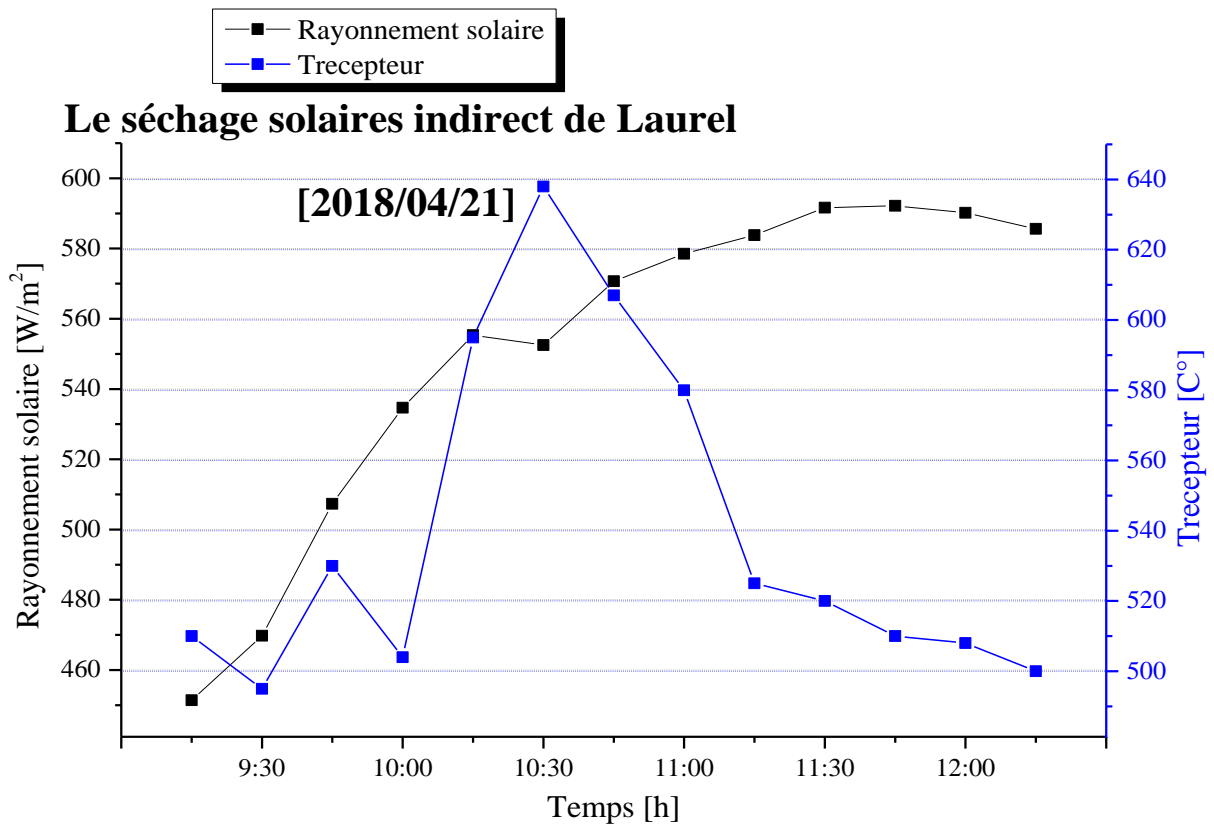
**Fig IV.23 :** Variation de la température ambiante et la chambre au cours du temps (la Laurel)

On peut observer sur la figure IV.23 une augmentation relative de la température ambiante et de la chambre.

La température dans la chambre de séchage atteint 58 degrés après 180 minutes.

Alors que la température à l'extérieur de la chambre (ambiante) varie de 24 degrés à 31 degrés.

### IV.5.6 : Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps



**Fig IV.24:** Variation de la température de récepteur et la rayonnement solaire au cours du temps (la Laurel)

Dans la Fig. IV.24, nous pouvons observer une augmentation de la température du récepteur à des degrés différents, pour l'atteindre. La température du récepteur varie de 495 à 638 ° C. On peut également noter une augmentation relative du rayonnement solaire de 9h15 à 507,31( $W/m^2$ ) pour atteindre 569,1( $W/m^2$ ) à 12h15.

### Conclusion

Notre séchoir solaire indirect montre que le temps de séchage prend beaucoup moins de temps que le séchage libre. Selon les études précédentes. A travers les courbes étudiées nous concluons que le principe de base pour réaliser un produit de séchage est utilisable et correct est de connaître la proportion d'eau et de travailler pour s'évaporer sous la température appropriée. Nous pouvons dire que le contrôleur de taux de séchage répand l'eau de l'intérieur du produit à sa surface.



# **CONCLUSION**

## **GENERALE**

## Conclusion générale

Notre travail comprend une étude expérimentale du séchage solaire des feuilles de menthe, de romarin et de laurier par une convection forcée de l'air chaud fourni par un sécheur solaire indirect (condenseur équivalent). L'air chaud est transféré à travers le tube à la salle de séchage en aluminium et le bois est bien isolé thermiquement.

Notre La partie expérimentale est basée sur le séchage en utilisant l'énergie thermique solaire indirect pour sécher les produits des plantes feuilles (Menthe, Romarin et Laurel).

Ce procédé (séchage solaire) est suivi pendant la journée pour donner des résultats sous la forme de courbes de contraste pour:

La vitesse de séchage, la température de la chambre de séchage, la température ambiante et la teneur en eau changent dans ces plantes feuilles.

L'objectif principal de ces expériences est d'utiliser l'énergie renouvelable gratuite (le soleil) dans pour étudier la cinétique de séchage et la teneur en eau de ces produits (plantes feuilles), Les résultats obtenus dans cette étude sur ces plantes feuilles sont les suivantes: La gamme de température désirée pour sécher la menthe de 41-58 °C en 90 minutes et une la romarin de 40-48 °C dans les circonstances 04 heures et un quart d'heure et le Laurel de 44-58 °C dans une circonstance de 03 heures .

Cette étude nous conduit également à la conclusion que le processus de séchage fonctionne bien pendant les premières heures de la journée (8h00 à 12h00). Cela signifie qu'il ne peut pas être pendant le reste de la journée. Tenir compte de la bonne isolation du tube et de la chambre de séchage pour éviter les fuites de chaleur à travers le tube et la chambre.

La distance entre le produit (les feuilles) dans la chambre de séchage est également importante. Permet au produit d'absorber rapidement à haute température, entraînant une augmentation de la température et l'évaporation de l'eau humide, La vitesse de séchage est augmentée.

Nous pouvons dire que le contrôle du séchage rapide de l'eau se propage de l'intérieur du produit à sa surface.

Enfin, cette étude montre qu'il est appliqué à un projet dans ce domaine pour sécher les différents produits consommés et séchés. Parce que le séchage est le meilleur moyen d'éviter la dégradation de certains produits agricoles récoltés à très haute valeur.

Ce projet est économique (peu coûteux) et sa source principale (le soleil) est gratuite.

## *Références bibliographiques*

- [1] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2] C, Vauge. Introduction générale sur les différentes énergies renouvelables, Techniques de l'Ingénieur, B263. (1982).
- [3] A, H, Khedim. Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [4] BELAID, WAHIBA. Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire. 2014. PhD Thesis.
- [5] F. Dubois, " La terre dans l'univers, la vie et l'évolution du vivant", vol.9, pp : 2, 4,7.
- [6] A. Bonnier, Ph.d "Le soleil démystifié», vol.74, pp : 8, 9, 15, 36, 39.
- [7] N. Poize, " le gisement solaire", Rhône-Alpes énergie-environnement-CNFPT-février 2007, vol.15, pp : 3, 4, 5, 9.
- [8] J, Bonal; P, Rossetti. Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).
- [9] D, K, Edwards. Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).
- [10] Ministère de l'énergie et des mines. [www.mem.algeria.org](http://www.mem.algeria.org)
- [11] A.Ricaud, " Gisement solaire et transferts énergétiques", master énergies renouvelables université de Cergy-pontoise, jan 2011, vol.79, pp ; 66, 67, 69, 71.
- [12] D.Wilgenbus, " L'énergie solaire", La main à la pâte, société française de physique, vol.14, pp : 7, 9.
- [13] D. Marchio et p. Reboux, " Introduction aux transferts thermique", vol.40, pp : 11, 12,21.
- [14] M,Capderou . Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U,Alger (1985).
- [15] A ,Mefti ; M , Y ,bouroubi ; H, Mimouni Evaluation du potentiel énergétique solaire bulletin des Energies renouvelable ,N°2,p 12 ,décembre (2002).
- [16] A,sfeir ; G,guarracino . ingénierie des système solaire, technique et documentation,paris.(1981).
- [17]BOUGHALI, Slimane. Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agro-alimentaires dans les zones Arides et désertiques. 2010. PhD Thesis. Université de Batna 2.
- [18] N.Chalal, Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect. Mémoire de magister. Université Mentouri-Constantine(2007).
- [19]A.Bensedik, Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée. Mémoire de magister. Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen. (2011).

## *Références bibliographiques*

- [20] Technique de l'ingénieur-génie des procédés séchage par André Charreau et Roland Cavaille, J2480-2 ;2480-22 .
- [21] DAGUENET, Michel. Les séchoirs solaires: théorie et pratique. 1985.
- [22] W. Belachi, Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires. Mémoire de magister. Université Kasdi Merbah- Ouargla(2009).
- [23] D.Mennouche "Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par le procédé de séchage solaire", Thèse de Magistère , Ouargla(2006)
- [24] W.L.McCabe,J.C. Smith et P.Harriott "Unit operation of chemical engineering",Hill Book Company(1985)
- [25] H. Ben cheikh,M. Ould Sidimed et Y.Draoui, Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif. Mémoire de l'ingénieur d'état. Université Kasdi Merbah –Ouargla. (juin 2011).
- [26] G. Lewis & M. Randall, 1923, Thermodynamics, New-York, Addition-Wesley Publishing Company,
- [27] W. Scott, 1957, Water relations of foods spoilage microorganisms,Advances in Food Research, 7, pp83-127,
- [28] M. Loncin, 1961, Les opérations unitaires du génie chimique, Edition Dunod, Paris ,France,
- [29] N.Nadir, Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire. Mémoire de magister, université Kasdi Merbah Ouargla(2009).
- [30] A. Charreau et R. Cavaille., Séchage (théorie et calculs), technique de l'ingénieur, J2480, 1-23.
- [31] Jean-jacques Bimbenet. 2002. Génie des procédés alimentaires RIA édition Dunod, Paris.
- [32] I. Doymaz., 2007. Air drying characteristics of tomatoes. Journal of Food Engineering 78, 1291-1297.
- [33] J.P Nadeau , Puiggali J.R., Séchage: des processus physiques aux procédés industriels.Tec & Doc- Lavoisier, 1995.
- [34] H. Communay "Héliothermique, le gisement solaire, méthode et calculs" Groupe deRecherche et D'édition, France (2002).12
- [35] A. Madhlope, S. A. Jones, and J. D. KalengaSaka "A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration ", Renewable Energy, 27 (27 - 37 )(2001).13
- [36] Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A.Jamali, "Thin layer convective solar drying an mathematical modeling of prickly pear peel ", Energy 29 (211 - 244) - (2004).14

## *Références bibliographiques*

- [37] B. K. Bala, M. R. A. Mondol, B. K. Biswas, B. L. Daschowdury and S. Janjai "Solar drying of pineapple using solar tunnel drier", *Renewable Energy* 28(183-90) (2003).18
- [38] I. N. Simatc "Optimization of mixed mode and indirect mode natural convection solar dryers ", *Renewable Energy*, 28 (435 - 453) - (2003).19
- [39] D. R. Pangavhanc, R. L. Sawhcy and P. N. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of new natural convection", *Energy* 27(579-590) (2002).20
- [40]ZEGHIB, Ilhem. Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique. 2005.
- [41] M.Audibert , la concentration du rayonnement solaire. International centre for theoretical physics ‘ 3 séminaire sur l'énergie solaire , 6-17 Septembre 1982.
- [42] Jacques Pereebois, Energie solaires, perspectives économiques, Edition du centre National de la recherche scientifique ,1975 .
- [43] Paul De Neyer ‘Energie solaire thermique, Guide des Energies Renouvelables, mai 2003.
- [44] Alain.Ferriere et Gilles Flamant, Captation, Transformation et conversion de l'énergie Solaire par la technologies à concentration. Thème7, Solaire thermique 2002.
- [45]<http://www.aprifel.com/fiche-nutri-produit-composition-menthe.45.html> .(Samedi 05/05/2018 à 09:33AM)
- [46]BENIKHLEF, Abouseyf. Comparaisant entre les huiles essentielles et leurs effets antibactériens sur Rosmarinus officinalis de la région de Bechar et Ouargla. 2015. PhD Thesis.Pour chaque nutriment, les tableaux apportent une information sur la quantité moyenne\* ainsi que les quantités minimum et maximum\* pour 100 g net de menthe.
- [47] [United States Department of Agriculture \[archive\]](#) .( Le lundi 08/05/2018 à 08h00)
- [48] DERWICH, Elhoussine, et al. Chemical composition and antibacterial activity of leaves essential oil of Laurus nobilis from Morocco. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2009, 3.4: 3818-3824.
- [49] TORGESON, Oscar W., et al. Kiln-drying schedules for 1-inch laurel, madrone, tanoak, and chinquapin. 1956.

**Annexe A:** quelque photo de préparation de chambre du séchage



**Figure A<sub>1</sub>** : la boîte de séchage sans laine de verre et la résine



**Figure A<sub>2</sub>** : la boîte de séchage avec laine de verre





**Figure A<sub>3</sub>** : la boîte de séchage complète avec la résine

**Annexe B** : les appareils de mesure et de poids



**Figure b<sub>1</sub>**: la mesure par thermocouple au niveau la chambre et la récepteur

**Figure b<sub>2</sub>**: La balance électrique

**Titre du mémoire :** Etude expérimentale du séchage solaire des plantes feuillues

**Master:** Énergies renouvelables en mécanique

**Auteur:** TOUATI TLIBA Marouane - DRIHEM Badreddine

### **Résumé:**

Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur le processus de séchage des produits (plantes feuilles) Comme la Menthe, le Romarin, ainsi que le Laurel . Dans ces expériences, nous avons utilisé un sécheur solaire forcé indirect, où dans ce dernier nous croyons La chaleur de la chambre de séchage par un concentrateur parabolique atteint la température qu'il capture au niveau du point focal de 300-700 degrés Celsius . L'objectif principal de ces expériences est d'utiliser l'énergie renouvelable gratuite (le soleil) pour étudier la Cinétique de séchage et la teneur en eau de plantes feuilles . Les résultats obtenus dans cette étude de étaient les suivants : La gamme de température désirée pour sécher la menthe de 41-58 °C en 90 minutes et une la romarin de 40-48 °C dans les circonstances 04 heures et un quart d'heure et le Laurel de 44-58 °C dans une circonstance de 03 heures . le but du procédé de séchage de ces produits est que l'utilisation large de ces produits et est séché.

**Mots clés:** séchage solaire, convection forcée, concentrateur parabolique, Cinétique de séchage, Teneur en eau.

---

**Report title :** Experimental study of solar drying of leafy plants

### **Abstract**

In this thesis, we focused on the drying process of produced (leafy plants) such as Mint, Rosemary, and Laurel . In these experiments, we used an indirect forced solar dryer, where in the latter we maintain a fixed temperature of the drying chamber using a parabolic concentrator where the temperature reaches at the focal point 300-700 degrees Celsius . The main objective of these experiments is to use free renewable energy (the sun) to study the kinetics of drying and the moisture content of these leafy plants . The results obtained in this study were as follows : The desired temperature range for drying mint is from 41-58 ° C in 90 minutes, the rosemary is from 40 ° - 48 ° C in 04 hours and 15 minutes and the laurel is from 44-58 ° C in 03 hours .The purpose of the drying process of these , the wide use of these products in its dry status.

**Key words:** solar drying, forced convection, parabolic concentrator, Kinetics of drying, Moisture content.

---

**عنوان المذكرة :** دراسة تجريبية للتجفيف الشمسي للنباتات المورقة

### **ملخص:**

في هذا العمل نصب اهتمامنا على عملية تجفيف لعدة منتجات (النباتات المورقة ) كالنعناع والإكليل وكذا الغار. حيث استعملنا في هذه التجارب مجفف شمسي قسري غير مباشر حيث في هذا الأخير يؤمن الحرارة لغرفة التجفيف بواسطة مركز شمسي مكافئ تصل درجة الحرارة التي يلتقطها على مستوى الدرجة البؤرية من 300 إلى 700 درجة مئوية . الهدف الرئيسي من هذه التجارب استعمال الطاقة المتجددة المجانية (الشمس ) في دراسة حركية التجفيف ومحتوى الماء في النباتات المورقة. النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة التطبيقية لهذه النباتات الورقية كانت كالتالي : تتراوح درجة الحرارة المطلوبة من أجل تجفيف النعناع من 41-58 درجة مئوية في ظرف 90 دقيقة والإكليل من 40- 48 درجة مئوية في ظرف 04 ساعات وربع الساعة والغار من 44-58 درجة مئوية في ظرف 03 ساعات. الفائدة من عملية التجفيف لهذه المنتجات هي الاستعمال الواسع لهذه المنتجات وهي مجففة .

**الكلمات المفتاحية :** التجفيف الشمسي، التحميل القسري، مركز مكافئ، حركية التجفيف، محتوى الماء.