



Université Kasdi Merbah Ouargla

N° d'ordre :
N° de série :

**FACULTE DES SCIENCES
ET SCIENCES DE L'INGENIEUR**

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

Présenté par :

Djamel Mennouche

Thème

**VALORISATION DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES
ET DES PLANTES MEDICINALES PAR LES PROCÉDES
DE SECHAGE SOLAIRE**

Soutenu publiquement le : 21 / 06 / 2006

Devant le jury composé de :

Mr. Nouredine Bouzid	Maître de Conférences	Université de Ouargla	Président
Mr. Hamza Bouguettaia	Maître de Conférences	Université de Ouargla	Examineur
Mr. Houcine Benmoussa	Maître de Conférences	Université de Batna	Examineur
Mr. Slimane Boughalie	M.A. chargé de cours	Université de Ouargla	Membre invité
Mr. Bachir Bouchekima	Professeur	Université de Ouargla	Rapporteur

Remerciements

A Monsieur le Professeur Bachir Bouchekima, pour m'avoir suivi durant mon travail dans le cadre de ce mémoire, pour ses conseils précieux, pour sa disponibilité et la compétence de son encadrement.

A Monsieur Neureddine Bouzid, Maître de conférences à l'université de Ouargla pour l'honneur qu'il me fait de présider ce jury de mémoire de magister.

Aux membre du jury, Monsieur Hamza Bouguettaia, Maître de Conférences à l'université de Ouargla, et Monsieur Hocine Benmoussa, Maître de Conférences à l'université de Batna, d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je remercie également, Monsieur Slimane Boughali, et Monsieur Djamel Bechki, Maîtres assistants chargés de cours à l'université de Ouargla, pour leur aide, leurs conseils dans le domaine expérimental, ainsi que leurs encouragements.

Mes remerciements s'adressent aussi au Professeur Taieb Meftah, Directeur du laboratoire de recherche pour ses encouragements, à Monsieur Youcef Babi membre de l'unité de recherche pour son aide et ses conseils, à Monsieur Mohamed Tekha, Maître assistant à l'université de Ouargla pour sa disponibilité durant mon travail expérimental. Une attention particulière à Monsieur Houti Ahmed, le technicien du laboratoire de physique pour son aide dans l'installation du séchoir solaire.

Enfin je remercie mes amis : Azzeddine, Rassime, Nasser, et Nassereddine pour leur soutien moral et leur aide, ainsi que tous ce qui m'ont soutenu et aidé tout au long de cette étude.

À mes parents

À mes beaux parents

À ma femme, et mes enfants

À mon grand frère et sa femme

À mes frères et soeurs

À tous mes amis

Je dédie ce travail

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : LES TRANSFERTS THERMIQUES	
INTRODUCTION	3
1. Transfert par conduction	3
2. Transfert par convection	3
2.1. L'échange de chaleur par convection naturelle	4
2.1.1. Description du phénomène	4
2.1.2. Nombre de Grashof	5
2.1.3. Expression du nombre du Nusselt	6
3. Transfert par rayonnement	7
3.1. Rayonnement solaire	7
3.2. Le corps noir.....	8
3.2.1. Définition	8
3.2.2. Le corps noir et son rayonnement	8
3.2.3. Les lois de corps noir	9
3.3. Grandeurs énergétiques spectrales	10
3.3.1. Facteur d'émission	10
3.3.2. Facteurs de réflexion, d'absorption et de transmission	10
3.3.3. Facteur de forme	11
3.4. L'atmosphère terrestre	11
3.4.1. Coupe transversales de l'atmosphère terrestre	12
3.4.2. Composition de l'atmosphère terrestre	12
3.5. La distance optique atmosphérique	13
3.6. Le rayonnement solaire au niveau du sol terrestre	13
3.6.1. Le rayonnement de l'atmosphère vers le sol terrestre	13
3.6.2. Le rayonnement du sol terrestre vers l'atmosphère	13
3.7. L'éclairement énergétique d'une surface plane au niveau du sol terrestre	14
CHAPITRE 2 : LE SECHAGE DES SOLIDES	
1. GENERALITES	16
1.1. Définition	16
1.2. Humidité absolue	16
1.3. Humidité relative	16
1.4. Hygroscopicité	16
1.5. Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz	17
1.6. Grandeurs caractéristiques des gaz humide	18
1.6.1. Humidité absolue	18

1.6.2. Degré de saturation	18
1.6.3. Humidité relative	18
1.6.4. Point de rosé	19
1.6.5. Température de bulbe humide	19
1.7. Caractéristique d'un solide poreux	20
1.7.1. Porosité volumique d'un produit	20
1.7.2. Compacité d'un produit	21
1.8. Répartition de l'eau dans le matériau	22
1.9. Loi de Fick	23
1.10. Loi de Darcy	24
2. SECHAGE DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRE	25
2.1. Séchage par convection	25
2.2. Activité de l'eau et isotherme sorption	25
2.2.1. Activité de l'eau dans le produit	25
2.2.2. Isothermes de sorption	26
2.3. Les modèles mathématiques des isothermes de sorption	26
2.3.1. Le modèle d'Henderson	26
2.3.2. Model de BET	27
2.4. Détermination des courbes d'équilibre hygroscopique	27
2.5. Dispositif expérimental de sorption	28
2.6. Périodes du séchage	29
2.6.1. Période de mise en température	29
2.6.2. Période à allure constante	30
2.6.3. Période de ralentissement	30
2.7. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	31
2.7.1. Influence de la température de l'air	31
2.7.2. Influence de la vitesse de l'air	31
2.7.3. Influence de l'humidité de l'air	31
CHAPITRE 3 : LES SECHOIRS SOLAIRES	
INTRODUCTION	32
1. Les séchoirs solaires direct	33
1.1. Principe de fonctionnement	33
1.2. Avantages	33
1.3. Inconvénients	33
1.4. Type de séchoirs directs	34
1.4.1. La boîte de séchage ou séchoir coffre	34
1.4.2. Le séchoir intégral à convection naturelle	34
1.4.3. Le séchoir solaire "coquillage"	35
1.4.4. Le séchoir cabane	36
2. Les séchoirs solaires indirects	37
2.1. Principe de fonctionnement	37
2.2. Avantages	38
2.3. Inconvénient	38

2.4. Type du séchoir indirect	39
2.4.1. Le séchoir armoire	39
3. Les séchoirs hybrides	39
3.1. Avantages	40
3.2. Inconvénients	40
3.3. Types des séchoirs hybrides	40
3.3.1. Séchoir hybride à convection forcée	40
3.3.2. Le séchoir hybride solaire – gaz	41
4. Les séchoirs mixtes	42
5. Les capteurs solaires	45
5.1. Captation par effet de serre	45
5.2. Constitution d'un capteur plan	45
5.3. Bilan thermique du capteur	45
5.4. Rendement instantané d'un capteur	46
5.5. Rendement optique d'un capteur	47

CHAPITRE 4 : EXPERIMENTAL

1. SECHAGE DE LA MENTHE VERTE	48
1.1. Description du séchoir solaire	48
1.1.1. Le capteur solaire	49
1.1.2. La chambre de séchage	49
1.2. Fonctionnement du séchoir solaire	49
1.3. Préparation du produit	49
1.4. Appareillages de mesures	49
1.4.1. Mesure du rayonnement solaire	49
1.4.2. Mesures des températures	50
1.4.3. Mesure de l'humidité et de la vitesse de l'air	50
1.4.4. Détermination de la masse sèche du produit	50
1.5. Résultats expérimentaux	51
1.5.1. Variation de la teneur en eau avec le temps	51
1.5.2. Vitesse de séchage	52
1.5.3. Evolution de l'humidité relative de la plante	53
1.5.4. Variation du rayonnement global	54
1.5.5. Variation de la vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de séchage	55
1.5.6. Variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage	56
1.5.7. L'évolution de la température dans le séchoir solaire	57
1.5.8. Influence des paramètres aérothermiques sur la durée de séchage	58
2. SECHAGE DE LA TOMATE	63
2.1. Préparation du produit	63
2.2. Protocole expérimental	63
2.3. Appareillage de mesures	63

2.3.1. Mesure du rayonnement solaire	63
2.3.2. Mesure de la vitesse et de la température de l'air dans le séchoir	64
2.3.3. Mesure de la température du produit	64
2.3.4. Les Mesures externes	64
2.3.5. Mesure de l'humidité de l'air	64
2.3.6. Détermination de la masse sèche du produit	65
2.4. Résultats expérimentaux	66
2.4.1. Variation de la teneur en eau dans le séchoir solaire	66
2.4.2. L'effet du rayonnement sur la température	68
2.4.3. Evolution de l'humidité relative du produit dans le séchoir solaire	69
2.4.4. Evolution de l'humidité relative de l'air dans la chambre de séchage	71
2.4.5. Evolution de la température dans le séchoir solaire.....	72
2.4.6. Variation de la température du produit au cours du séchage	74
2.4.7. Etude de la cinétique de séchage	74
2.4.8. Etude comparative du séchage direct au soleil, et du séchage indirect dans le séchoir solaire	75
CONCLUSIONS	79

NOTATIONS

Symbols	Désignations	Unités
λ_c	conductivité thermique	W/(m.K)
T	température	K
S	surface	m ²
h_c	coefficient de convection thermique	W/(m ² .K)
M	emittance	W/ m ²
λ	longueur d'onde	μm
F_e	facteur d'émission	
F	facteur de forme	
m_h	distance optique atmosphérique	
β	coefficient de dilatation	m/s ²
g	accélération de pesanteur	m/s ²
ρ_f	masse volumique	kg/m ³
μ_f	viscosité cinématique	kg/(m.s)
Gr	nombre de Grashof	
Nu	nombre de Nusselt	
$M_{\lambda,T}^0$	emittance monochromatique	W/(m ² . μm)
σ_s	constante de stefan	W/(m ² K ⁴)
φ_i	flux direct incident	W
φ_r	flux réfléchent	W
φ_a	flux absorbant	W
φ_t	flux transmittant	W
δ	épaisseur de couche limite	μm
ρ_r	facteur de réflexion	
α_a	facteur d'absorption	
τ_t	facteur de transmission	
φ_g	flux globale	W
φ_d	flux diffuse	W
X	teneur en eau du produit à base sèche	kg eau / kg (MS)
X_r	teneur en eau du produit à base humide	kg eau / kg (Mh)
X_f	teneur en eau finale	kg eau / kg (MS)
M_S	masse sèche du produit	kg
M_h	masse humide du produit	kg
M_a	masse du gaz	kg
M_e	masse de l'eau	kg
M_T	masse totale	kg
-dx/dt	vitesse de séchage du produit	kg eau / (kg (MS).s)
V	vitesse de l'air	m/s
H_r	humidité relative	%
H_a	humidité absolue	kg eau / kg (as)
H_{as}	humidité absolue de saturation	kg eau / kg (as)

Symbols	Désignations	Unités
P_s	pression de saturation	pascal
P_m	tension de vapeur	pascal
P	pression totale	pascal
Ψ	degré de saturation	%
X_{eq}	humidité d'équilibre	kg eau / kg (MS)
H_{eq}	humidité relative d'équilibre	kg eau / kg (as)
H_r	humidité relative	kg eau / kg (as)
T_r	température de rosé	K
ε	porosité volumique	
C	compacité	m^2/m^3
A	surface d'échange	m^2
k, n	constantes d'Henderson	
n'	nombre de couche adsorbé	
A_w	activité de l'eau	
J	flux massique surfacique	$Kg / (m^2.s)$
C_m	fraction massique	
D_f	coefficient de diffusion	m^2/s
k_f	perméabilité intrinsèque	m^2
R^2	Coefficient de détermination	

Indices

amb	ambiante
as	air sèche
CNTR	centre de la chambre
E-CAP	entrée capteur
E-CHA	entrée de la chambre
ecm	entrée chambre moyenne
ext	externe
i	angle incidence
int	interne
Mh	masse humide
MS	masse sèche
S-CHE	sortie du cheminé

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le séchage est une opération importante dans le domaine agro-alimentaire et industriel, il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide [1]. Le séchage direct au soleil est la méthode la plus utilisée dans la plupart des pays en voie de développement, pour préserver les produits agro-alimentaires [2].

Pendant le séchage par cette méthode, des pertes considérables (en qualités, et en quantités) peuvent se produire en raison de diverses influences telles que les oiseaux, les insectes, les micro-organismes, les poussières, les pluies etc. [3]. L'acide ascorbique (vitamine C) est particulièrement vulnérable à la destruction pendant l'opération de séchage [4]. L'utilisation des séchoirs solaires dans les pays en voie de développement peut réduire les pertes et améliorer la qualité du produit sec [5].

Le séchage solaire est donc un procédé de conservation et de valorisation qui favorise le stockage des aliments et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage, il constitue un moyen rentable pour la déshydratation des produits agro-alimentaires à basses températures [6,7]. En agro-alimentaire d'une façon générale, l'optimisation de l'opération de séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation restreinte de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité aromatique du produit à sécher [6].

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale du séchage solaire d'une plante médicinale (Menthe verte), et d'un produit agro- alimentaire (la tomate), la procédure de séchage s'est déroulée dans un séchoir indirect à convection naturelle. Ce type de séchoir est peut coûteux, simple à réaliser, et adapté au séchage des produits agro-alimentaires. Les choix de la menthe verte et de la tomate sont justifiés par leur abondance et leur grande consommation en Algérie.

En utilisant le prototype de séchoir solaire existant au niveau du laboratoire et dans le souci d'améliorer ses performances nous avons entamé une étude expérimentale afin d'étudier la cinétique de séchage de ces deux produits, et de caractériser ainsi les paramètres d'influence sur la durée de séchage pour la menthe verte et leur impact sur la durée de séchage.

Une étude comparative du phénomène de séchage de la tomate exposée directement au soleil (séchage direct) avec celle effectuée dans le séchoir solaire en question (séchage indirect) à été fait afin de déterminer l'efficacité du séchoir solaire.

La présentation de ce mémoire est résumée selon le cheminement suivant :

Dans le chapitre un, nous avons évoqué une étude théorique qui consiste à résumer les phénomènes de transfert de chaleur.

Dans le chapitre deux, nous avons étudié le phénomène de séchage en générale, et les paramètres d'influence sur ce phénomène, des définitions de certains facteurs indispensables ont également ont été évoqués.

Les différents types d'appareillage de séchoirs solaires et leurs constitutions, ainsi que la présentation des capteurs à air et son rendement fait l'objet du troisième chapitre.

L'étude expérimentale qui a été faite au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables dans les zones arides (LENREZA) de l'université de Ouargla.

Dans cette étude nous avons suivi la cinétique de séchage de la tomate et de la menthe verte en mettant en évidence les paramètres d'influence sur ce phénomène, par ailleurs nous avons fait une comparaison d'un seul produit qui est la tomate, pour deux cas différents, séchage direct au soleil et le séchage dans le séchoir solaire, ceci constitue donc le travail présenté dans le quatrième chapitre.

Enfin nous avons terminé ce modeste travail par une conclusion qui englobe une interprétation générale de l'étude et des suggestions proposées aux éléments du laboratoire afin d'améliorer les qualités du séchoir en question.

CHAPITRE 1

LES TRANSFERTS THERMIQUES

INTRODUCTION

Dans les transferts thermiques on peut distinguer trois modes de transfert : la conduction, la convection et le rayonnement, chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé. En effet, l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses constituants ayant une certaine liberté de mouvement (molécules, atomes).

1. Transfert par conduction

La conduction est la transmission de la chaleur dans la matière par vibration moléculaire. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement [8].

▪ Loi de Fourier

$$\Phi = -\lambda_c \cdot S \frac{dT}{dX} \quad (1.1)$$

Φ : Flux de chaleur.

λ_c : Conductivité thermique.

2. Transfert par convection

Le transfert de chaleur par convection est complexe, car il résulte de la superposition de deux phénomènes :

- Conduction entre les particules de fluide qui se rencontrent;
- Mélange de ces particules par suite du mouvement d'ensemble du fluide.

Si ce mouvement n'est provoqué que par les seules différences de températures (donc de densité), la convection est dite libre ou naturelle. Si ce mouvement résulte d'une action mécanique (pompe, ventilateur, etc.), la convection est dite forcée.

Le transfert par convection est régie par la loi de Newton qui stipule que le flux de chaleur transmis est proportionnel à l'écart entre la température T_1 du corps solide qui reçoit ou transmet de la chaleur et la température T_2 du liquide ou du gaz qui transmet ou reçoit cette chaleur. Le coefficient de proportionnalité de la loi de Fourier est appelé coefficient de convection thermique est noté h_c [9].

Le flux calorifique (puissance) transmis par convection s'exprime alors par l'équation fondamentale suivant :

$$\Phi = h_c \cdot S(T_2 - T_1) \quad (1.2)$$

Avec :

Φ : Puissance transmise en W.

h_c : Coefficient de transmission thermique par convection, ou coefficient de convection thermique en $W/m^2.K$.

S : Surface d'échange considérée en m^2 .

T_1 : Température la plus chaude (paroi ou fluide en $^{\circ}C$).

T_2 : Température la plus froide (fluide ou paroi en $^{\circ}C$).

$\frac{1}{h_c}$: Résistance thermique en $m^2.K/W$.

2.1. Echange de chaleur par convection naturelle

Dans la convection naturelle, le mouvement du fluide est dû à la variation de sa masse volumique provenant des échanges de chaleur entre le fluide et la paroi.

Ces échanges jouent un grand rôle en pratique, associés souvent à des échanges par rayonnement.

2.1.1. Description du phénomène

Considérons une plaque plane (figure 1.1) verticale chaude (dont la température de paroi est T) au contact d'un fluide (dont la température de mélange est T_m), au voisinage de la plaque existe une zone perturbée appelée couche limite de convection naturelle.

Dans cette zone, le fluide s'élève et sa température varie selon le profil ci-dessous.

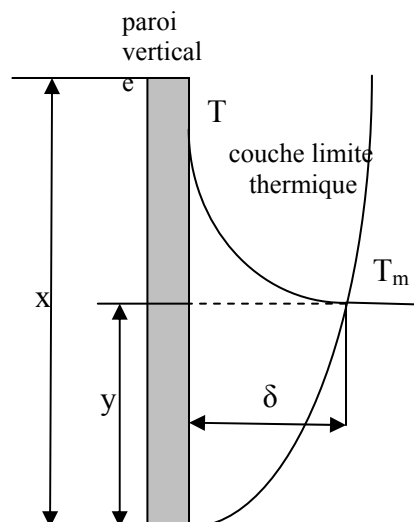


Figure 1.1 : Phénomène de convection naturelle

De plus, l'épaisseur δ de la couche limite évolue au fur et à mesure que la distance y ; au bord inférieur de la plaque; augmente et se stabilise par suite ($y > 30$ cm).

La densité de flux thermique varie donc avec y et l'on définit un coefficient moyen de convection naturelle h , tel que le flux de chaleur échangé sur toute la plaque, soit égale à :

$$\Phi = h.S_p(T-T_m) \quad (1.3)$$

S_p étant la surface de la plaque.

2.1.2. Nombre de Grashof

On définit pour la convection naturelle un groupe adimensionnel appelé nombre de Grashof tel que :

$$Gr = \frac{x^3 \cdot \rho_f^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu_f^2} \quad (1.5)$$

Où :

x : est une dimension linéaire permettant de calculer la surface d'échange (hauteur d'une plaque verticale, diamètre d'un cylindre, côté d'un carré, etc.),

β : Le coefficient de dilatation volumique du fluide à pression constante,

Pour l'air (et les gaz) : $\beta = \frac{1}{T}$ (T est la température du gaz en degré kelvin),

$\Delta T = T - T_m$: est la différence de température entre la paroi chauffante et le fluide,

g : est l'accélération de pesanteur,

ρ_f et μ_f : sont respectivement la masse volumique et la viscosité dynamique du fluide.

Le nombre de Grashof joue le même rôle en convection naturelle que le nombre de Reynolds en convection forcée. Sa valeur conditionne la nature laminaire ou turbulente de l'écoulement dans la zone perturbée.

- $Gr > 10^9$: Convection turbulente.
- $Gr < 10^9$: Convection laminaire.
- $Gr = 10^9$: Valeur critique.

2.1.3. Expression du nombre du Nusselt

Les relations numériques sont en généralement de la forme [8] :

$$Nu = C.(Gr.Pr)^n \quad (1.6)$$

Les grandeurs physiques sont calculées à la température du film laminaire : $T_m = \frac{T_m + T}{2}$.

L'exposant n aux valeurs suivantes :

- $n = \frac{1}{4}$: lorsque la convection est laminaire,
- $n = \frac{1}{3}$: lorsque la convection est turbulente.

La valeur du coefficient C dépend du régime de convection ainsi que de la géométrie et de l'orientation de la paroi. Elle est donnée par le tableau (1.1) :

Géométrie et orientation de la paroi	Dimension caractéristique x par le calcul de Gr et de Nu	Coefficient C	
		Convection laminaire n = 1/4	Convection turbulente n = 1/4
Plaque verticale ou cylindre vertical de grand diamètre par rapport à l'épaisseur de la zone perturbé	Hauteur	0,59 $10^4 < Gr.Pr < 10^9$	0,13 $10^9 < Gr.Pr < 10^{13}$
Cylindre horizontal	Diamètre Extérieur	0,53 $103 < Gr.Pr < 10^9$	0,10 $109 < Gr.Pr < 10^9$
plaque horizontale chauffant vers le haut	Largeur	0,54 $10^5 < Gr.Pr < 2.10^7$	0.14 $2.10^7 < Gr.Pr < 3.10^{10}$
plaque horizontale chauffant vers le bas	Largeur	0,27 $3.10^5 < Gr.Pr < 3.10^{10}$	0,07 $3.10^{10} < Gr.Pr < 10^{13}$

Tableau 1.1 : Les valeurs du coefficient C

3. Transfert par rayonnement

3.1. Rayonnement solaire

Toutes les énergies issues directement du soleil (énergie solaire) ou indirectement (énergie éolienne, hydraulique et biomasse, l'énergie issue de magma terrestre (géothermie) et énergie issue de la gravitation (énergie marimotrice) sont considérées comme énergies renouvelables [10].

Les diverses énergies que l'on pourrait tirer des océans, telles que l'énergie de la houle, des courants marins ou des gradients thermiques des mers, sont également issue indirectement de l'énergie solaire et font partie du champ des énergies renouvelables [10].

Les énergies renouvelables n'exercent que peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou des déchets dangereux.

La terre reçoit, à un rythme assez régulier, une grande quantité de l'énergie principalement grâce au rayonnement du soleil mais également, dans une moindre mesure, de son rayon en fusion et de l'interaction gravitationnelle avec la lune. Une partie de cette énergie est dégradé à la surface de la terre par les cycles naturels météorologiques, une autre partie plus faible est utilisée par les êtres vivants (flore et faune) dont les humains. Ces derniers ont depuis quelques décennies, atteint un tel niveau d'activité qu'ils produisent de la chaleur à grande échelle par la combustion des carburants fossiles, de la biomasse mais aussi des combustibles nucléaires (la consommation totale d'énergie représente environ $1/6000^{\text{ème}}$ de l'énergie rayonnée au sol par le soleil) [11].

Le soleil est composé à 80 % d'hydrogène et 19 % d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, il est généralement accepté que la source d'énergie du soleil est une réaction thermonucléaire hydrogène-hélium. Le soleil rayonne comme s'il s'agissait d'un corps noir ayant un diamètre de 1,39 millions de km et porté a une température de 5752 K. Cette température dite température apparente du soleil ne correspond pas à la réalité physique car on estime en effet que dans les couches gazeuses internes, les températures peuvent atteindre 10 à 20 millions de K [12].

La puissance rayonnée à la surface du soleil est donc à peu près égale $3.79 \cdot 10^{26}$ W seul une puissance de l'ordre de $1.7 \cdot 10^{17}$ W est interceptée par la terre ; 30% de ce flux est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbé et réémet vers l'espace sous forme de rayonnement dans l'infrarouge, 23% sert de source d'énergie avec un cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère et 0.5% se retrouve sous forme de photosynthèse dans les plantes [12].

3.2. Le corps noir

3.2.1. Définition

Un corps capable de recevoir un flux d'énergie rayonnant sans le réfléchir et sans le transmettre est appelé noir. Un tel corps absorbant totalement le rayonnement n'est, évidemment, que pure abstraction.

3.2.2. Le corps noir et son rayonnement

Le corps noir, à une température et une longueur d'onde données, émet le maximum de flux par rayonnement : son facteur d'émission est égal à 1.

De façon générale, tous les corps chauffés, émettent de la lumière dans toutes les longueurs d'ondes, la figure 1.2 représente l'émittance monochromatique d'un corps noir $M_{\lambda,T}^0$ en fonction de λ pour différentes températures.

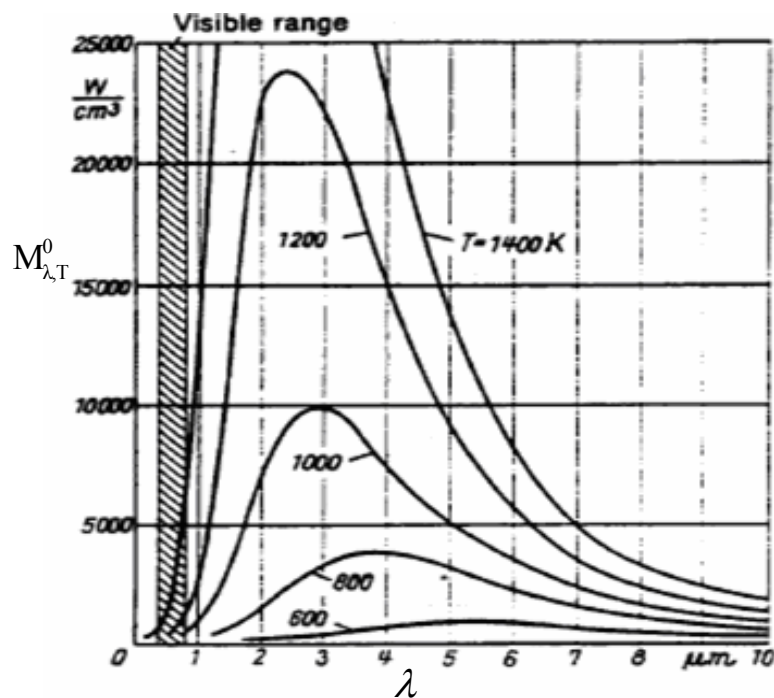


Figure 1.2 : Quelques isothermes de corps noir

3.2.3. Les lois de corps noir

Les corps noir, parfaitement absorbant deviennent, en conséquence, un émetteur parfait, les cinq lois suivantes caractérisant son rayonnement [13].

- **Lois de Lambert** : la luminance du corps noir ne dépend pas de la direction d'observation.
- **Première loi de Wien** : La valeur de l'émittance maximale $M_{\lambda_{\max}}^0$ du spectre d'émission du corps noir à lieu pour une longueur d'onde maximale λ_{\max} telle que :

$$\lambda_{\max} T = 2898 \quad (1.3)$$

Avec λ_{\max} exprimé en μm et T en degrés K.

- **Seconde loi de Wien** : A température donnée, l'émittance spectrale énergétique maximale $M_{\lambda_{\max}}^0$ est proportionnelle à la cinquième puissance de la température absolue :

$$M_{\lambda_{\max}}^0 = 12.865 \cdot 10^{-12} T^5 \quad (1.4)$$

Avec $M_{\lambda_{\max}}^0$ exprimée en $\text{wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$.

- **Loi de Stefan –Boltzmann** : L'émittance énergétique totale du corps noir, représentée par l'aire comprise entre l'isotherme et l'axe des abscisses, et proportionnelle à la quatrième puissance de sa température absolue :

$$M^{\circ} = \sigma_s T^4 \quad (1.5)$$

Avec M° exprimée en Wm^{-2} .

La valeur de σ_s dite « constante de Stefan » vaut $\sigma_s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{w m}^{-2}\text{K}^{-4}$.

- **Loi de Planck** : le rayonnement du corps noir peut être représenté par des courbes ayant pour expression mathématique :

$$M_{\lambda,T}^0 = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1} \quad (1.6)$$

Avec :

$$C_1 = 2\pi hc^2 = 2\pi \cdot 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot (3.108)^2 = 3.74 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2.$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 3.10^8}{1.38 \cdot 10^{-23}} = 1.44 \cdot 10^{-2} \text{ mK}.$$

3.3. Grandeurs énergétiques spectrales

Facteur d'émission : Le facteur d'émission est le rapport entre l'émittance M du corps étudié et l'émittance M° , à la même température du corps noir.

Pour une direction Δ le facteur d'émission est donné par :

$$F_e = \frac{M_{\Delta,\lambda}}{M_{\Delta,\lambda}^0} \quad (1.7)$$

3.3.2. Facteurs de réflexion, d'absorption et de transmission : Lorsque un corps noir reçoit un flux incident φ_i sous une incidence quelconque (figure 1.3), sa surface en réfléchit une fraction φ_r , en absorbe une fraction φ_a et en transmet une fraction φ_t de sorte que :

$$\varphi_i = \varphi_r + \varphi_a + \varphi_t \quad (1.8)$$

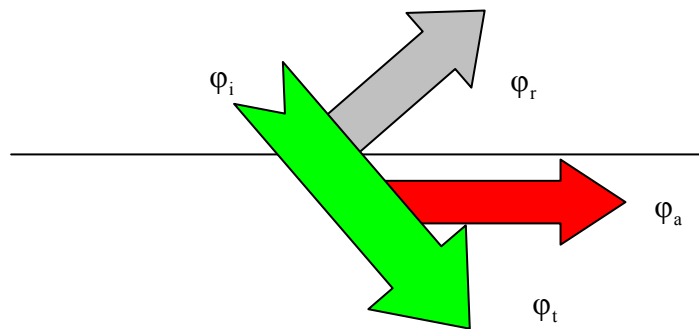


Figure 1.3 : phénomène de réflexion, d'absorption et de transmission

On définit l'aptitude du corps à ces trois phénomènes à l'aide des facteurs suivants :

- $\frac{\varphi_r}{\varphi_i} = \rho_r$ ou facteur de réflexion (1.9)

- $\frac{\varphi_a}{\varphi_i} = \alpha_a$ ou facteur d'absorption (1.10)

- $\frac{\varphi_t}{\varphi_i} = \tau_t$ ou facteur de transmission (1.11)

Ces facteurs sont liés par la relation :

$$\rho_r + \alpha_a + \tau_t = 1 \quad (1.13)$$

- Un corps parfaitement opaque ($\tau_t = 0$) : $\rho_r + \alpha_a = 1$
- Un corps totalement transparent ($\tau_t = 1$) : $\rho_r + \alpha_a = 0$
- Les corps de surface lisse ($\rho_r = 1$) : $\alpha_a + \tau_t = 0$
- Les corps rugueux : la réflexion du rayon incident se fait dans toutes les directions.

3.3.3. Facteur de forme

Soit deux surfaces émissives en présence l'une de l'autre échangent leur rayonnement :

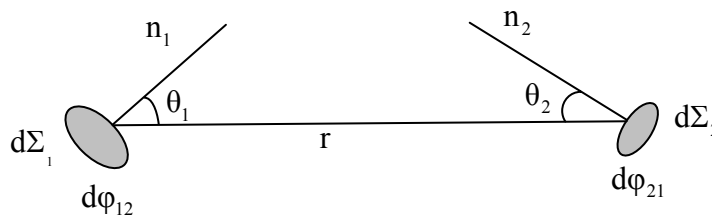


Figure 1.4 : rayonnement de deux surfaces émissives

Le facteur de forme est définie par :

$$F_{12} = \frac{1}{\Sigma_1} \int_{\Sigma_1} \int_{\Sigma_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{r^2} d\Sigma_1 d\Sigma_2 \quad (1.14)$$

$$F_{21} = \frac{1}{\Sigma_2} \int_{\Sigma_2} \int_{\Sigma_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{r^2} d\Sigma_1 d\Sigma_2 \quad (1.15)$$

F_{12} Représente la fraction du rayonnement émis par la surface Σ_1 et intercepté par la surface Σ_2 ;

F_{21} Représente la fraction du rayonnement émis par la surface Σ_2 et intercepté par la surface Σ_1 .

3.4. L'atmosphère terrestre [13,14]

La terre est enveloppée d'une épaisse couche gazeuse, cette enveloppe la protège des excès des rayonnements solaires et arrête les rayons les plus dangereux au développement de la vie, elle joue, en plus, le rôle de régulateur thermique en retenant, la nuit, la majeure partie de la chaleur acquise le jour.

3.4.1. Coupe transversales de l'atmosphère terrestre

La stratification de l'atmosphère en couches, s'étage en trois grandes régions :

- l'homosphère, comprise entre 0 et 90 km, d'altitude
- l'hétérosphère, comprise entre 90 et 700 km.
- l'exosphère, comprise entre 700 et 3000 km.

L'homosphère est subdivisé en trois parties caractérisant les variations des paramètres température et pression :

- La traphosphère, comprise entre 0 et 16 km d'altitude.
- La stratosphère, comprise entre 16 et 55 km d'altitude.
- La mésosphère, comprise entre 55 et 80 km d'altitude.

3.4.2. Composition de l'atmosphère terrestre

La composition de l'atmosphère reste pratiquement constante jusqu'à une altitude de 85 km environ, pour 10^6 de parties d'air sec, on trouve :

- 780836 parties d'azote N_2 (78%);
- 209475 parties d'oxygène O_2 (21%);
- 9340 parties d'argon A (1%);
- 5300 parties de vapeur d'eau H_2O (0,5%);
- 322 parties de bioxyde de carbone CO_2 (0,03%);
- 18.18 parties de néon Ne;
- 5.24 parties de l'hélium He;
- 1.5 parties de CH_4 ;
- 1.14 parties de Krypton;
- 0.6 parties d'hydrogène H_2 ;
- 0.27 parties d'oxyde nitreux N_2O ;
- 0.19 parties de monoxyde de carbone Co;
- 0.087 parties de xénon Xe.

3.5. La distance optique atmosphérique

La distance optique atmosphérique encore appelée masse atmosphérique; est définie par :

$$m_h = \frac{A_0 O}{\sin(h)} \quad (1.16)$$

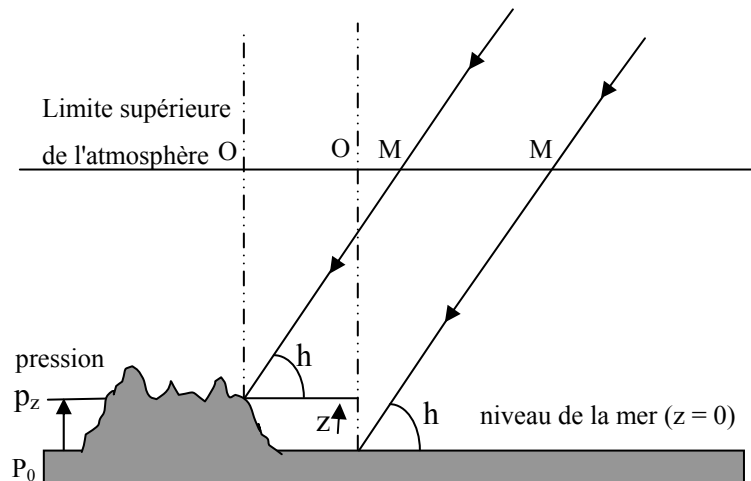


Figure 1.5 : La distance optique atmosphérique

3.6. Le rayonnement solaire au niveau du sol terrestre

Le sol terrestre ne reçoit qu'une fraction du rayonnement solaire primaire, celui-ci venant de subir, lors de sa traversée atmosphérique, les phénomènes multiples de réflexion, de diffusion et d'absorption.

3.6.1. Le rayonnement de l'atmosphère vers le sol terrestre

L'atmosphère terrestre joue le rôle d'écran sélectif au rayonnement solaire : les molécules gazeuses, les aérosols et les nuages absorbent ou diffusent, en effet, certaines des radiations.

Les principales fenêtres de transparence se situent entre 3 et 4 μm , pour la plus large entre 7 et 14 μm .

3.6.2. Le rayonnement du sol terrestre vers l'atmosphère

La terre peut être considérée, dans son ensemble, comme un corps noir, c'est-à-dire absorbant parfaitement toutes les longueurs d'ondes pour des températures comprises entre 240 et 320 K. L'isotherme moyenne du rayonnement terrestre présente un maximum autour de la valeur $\lambda_{\text{max}} = 10 \mu\text{m}$ et des valeurs spectrales vers 5 et 100 μm .

Le sol absorbe une partie du rayonnement atmosphérique reçu et réémet l'autre partie vers l'atmosphère. Le sol reçoit, en outre, des apports d'énergie par conduction thermique établie à partir des couches du sous-sol.

3.7. L'éclairement énergétique d'une surface plane au niveau du sol terrestre

Le sol terrestre est éclairé ou irradié par le rayonnement solaire après sa traversée de l'atmosphère.

- L'éclairement est une densité de puissance, s'exprime en W.m^{-2} .
- L'irradiation représente l'énergie correspondante à l'éclairement sur une durée déterminée, s'exprime en Wh.m^{-2} ou J.m^{-2} .

Les mêmes symboles servent à représenter l'un et l'autre de ces paramètres; on les distingue, dans les calculs, en étoilant les symboles représentatifs de l'éclairement.

La partie du rayonnement solaire qui parvient directement au sol est appelée rayonnement direct I_D (figure 1.15); sa composition verticale est désigné par la lettre S; la partie qui provient du sol, en provenance de l'atmosphère ainsi que sur les divers obstacles terrestres entourant le récepteur, est appelés rayonnement diffus D [13].

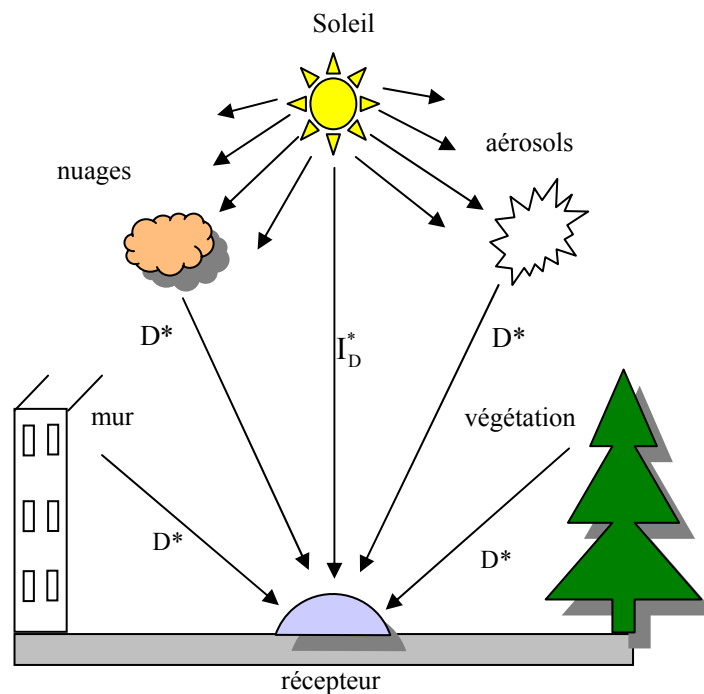


Figure 1.6 : Bilan énergétique du rayonnement solaire

La somme du rayonnement direct φ_i et du rayonnement diffus φ_d constitués le rayonnement global φ_g dans la bande spectrale du rayonnement solaire comprise entre 0,2 et $5\ \mu\text{m}$ (tableau 1.2).

	Eclairement (ou densité de puissance)	Irradiation (ou densité d'énergie)
Unité	Wm^{-2}	Wh.m^{-2} ou J.m^{-2}
Composante du rayonnement	Direct : φ_i^* (S^* pour la projection du direct sur la normale au plan récepteur) Diffus : φ_d^*	Direct : φ_i (S pour la projection du direct sur la normale au plan récepteur) Diffus : φ_d
Résultante	Global : $\varphi_g^* = \varphi_i^* + \varphi_d^*$	Global : $\varphi_g = \varphi_i + \varphi_d$

Tableau 1.2 : Composition du rayonnement solaire au sol

CHAPITRE 2

LE SECHAGE DES SOLIDES

1. GENERALITES [15, 16,17]

1.1. Définition

Le séchage a pour but d'éliminer sous l'action de la chaleur le liquide qui accompagne un solide. Le départ de ce liquide s'effectue par évaporation, par vaporisation ou par sublimation. Le séchage est donc une opération de transfert simultané de matière et de chaleur.

1.2. Humidité absolue

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, ou plus simplement humidité s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (2.1)$$

1.3. Humidité relative

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

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (2.2)$$

1.4. Hygroscopicité

Après égouttage, la présence d'humidité dans un solide, se manifeste par une certaine tension de vapeur P_m qui est fonction de la nature du liquide, de celle du solide et de la température. La valeur de cette tension de vapeur permet de distinguer deux grandes catégories de solides.

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

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

Un solide se comportant de cette manière n'est pas hygroscopique.

b - Lorsque les pores présentés par le solide sont extrêmement fins, les forces capillaires sont intenses et peuvent retenir en profondeur de notables quantités d'humidité. Dans un tel cas, la tension de vapeur P_m du liquide est inférieure à sa tension maximale à la même température, et le solide est dit hygroscopique (charbon actif par exemple).

1.5. Comportement d'un solide mouillé en présence d'un gaz

Considérons un solide mouillé, d'humidité X , soumis à l'action d'un courant gazeux constant, renfermant sous forme vapeur, une certaine quantité du liquide associé au solide. Sous pression constante, et une température déterminés, le mélange gazeux est caractérisé par son humidité relative H_r qui est le quotient de la pression partielle P_v de la vapeur dans le mélange à la même température par la pression de saturation P_s .

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (2.3)$$

Si la tension de vapeur P_m (pression de vapeur à la surface mouillée) du liquide associé au solide est différente de P_v il s'établit entre deux phases en présence, un transfert de matière tendant vers un état d'équilibre qui est atteint lorsque $P_v = P_m$.

- Si $P_v > P_m$ ce transfert d'humidité s'effectue de l'atmosphère gazeuse vers le solide et correspond à un phénomène d'adsorption, c'est-à-dire à un mouillage du solide.
- Si $P_v < P_m$ le transfert de matière s'effectue du solide vers la phases gazeuse et correspond à une désorption, c'est-à-dire à un séchage du solide.
- Lorsque $P_v = P_m$ l'état d'équilibre est atteint et il n'y a pas de transfert de matière : pour une température donnée, la pression restant constante, à chaque valeur de l'humidité relative H_r de l'atmosphère correspondant une valeur de l'humidité à l'équilibre X_{eq} du solide, et on peut construire une isotherme d'équilibre, relative au solide considéré (figure 2-1)

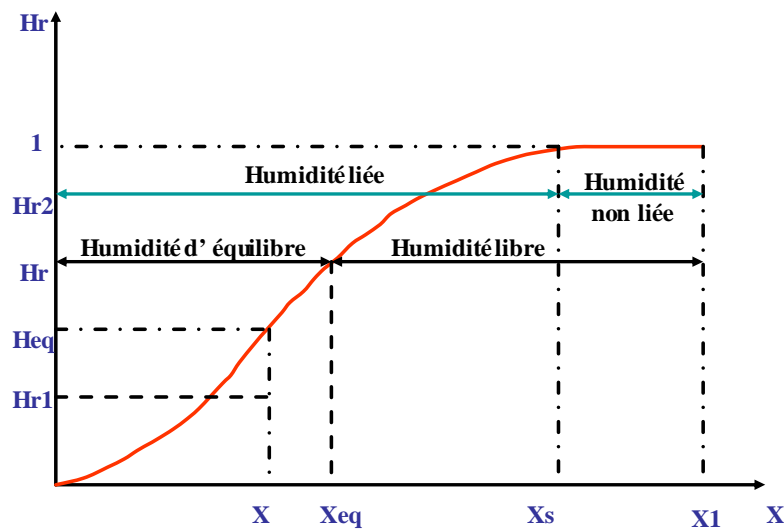


Figure 2-1 : Isotherme d'équilibre

On voit sur la figure 2.1, que l'humidité X d'un solide ne peut être en équilibre qu'avec une atmosphère dont l'humidité relative est H_{eq} . Si l'humidité relative de l'atmosphère est :

- 1- $H_{r1} < H_{eq}$ il y'a désorption c'est-à-dire séchage du solide.
- 2- $H_{r2} > H_{eq}$ il y'a adsorption c'est-à-dire mouillage.

Soit X_s est l'humidité d'un solide en équilibre avec une atmosphère saturée en humidité ($H_r = 1$).

Si un solide d'humidité $X_1 > X_{eq}$ est soumis à un courant gazeux constant, d'humidité relative, il perd son humidité jusqu'à ce que celle-ci devienne égale à X_{eq} qui est l'humidité à l'équilibre du solide correspondant à H_r . Un séjour, même prolongé dans cette atmosphère ne diminue pas son humidité au dessous de X_{eq} . La différence $(X_1 - X_{eq})$ représente l'humidité libre qui seule peut être évaporée.

Lorsque l'humidité d'un solide est inférieure à X_s , elle exerce une pression de vapeur inférieure à celle du liquide pur à la même température ; elle est appelée humidité liée au solide, elle consiste au liquide contenu dans les capillaires fins ou en solution retenu dans les parois cellulaires du solide, ou adsorbé à la surface du solide.

Si au contraire, l'humidité du solide est supérieure à X_s , elle est appelée humidité non liée : la tension de vapeur qu'elle exerce est celle du liquide pur à la température où l'on opère. Cette humidité peut se lire sur le diagramme, elle est égale à $(X_1 - X_s)$.

1.6. Grandeurs caractéristiques des gaz humide

1.6.1. Humidité absolue

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

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (2.4)$$

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

$$H_a = \frac{18}{29} \left[\frac{P}{P - P_v} \right] = 0,622 \left[\frac{P}{P - P_v} \right] \quad (2.5)$$

1.6.2. Degré de saturation

Soit H_a la valeur de l'humidité d'un gaz pour une certaine température et H_{as} la valeur de l'humidité correspondant à l'état de saturation pour la même température; on appelle degré de saturation d'un gaz, le rapport :

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (2.6)$$

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

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} = \frac{P_v}{P_s} \quad (2.7)$$

1.6.3. 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.

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (2.8)$$

1.6.4. Point de rosée

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

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

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

1.6.5. Température de bulbe humide

L'évaporation d'un liquide est un phénomène endothermique. Si l'opération est réalisée adiabatiquement (c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur) sous l'action d'un courant de gaz non saturé en vapeur du liquide en cause, la chaleur nécessaire à l'opération ne peut provenir que du système lui-même.

Si la température initiale du liquide est supérieure à la température du gaz, la chaleur nécessaire à l'évaporation est fournie par le liquide dont la température s'abaisse. Mais on observe généralement que cette dernière température se stabilise à une valeur inférieure à celle du gaz; c'est le gaz qui cède alors au liquide, en se refroidissant, une partie de chaleur sensible. Le liquide s'évapore et la vapeur formée se mélange au gaz.

À la diminution de chaleur sensible du gaz correspondant à sa humidité et un abaissement de température qui reste toujours supérieur à celle du liquide.

Nous supposons que la température (bulbe sec) et l'humidité initiales du gaz provoquant l'opération ne changent pas de façon appréciable. Après un certain temps, il s'établit un régime stationnaire, ce qui signifie que la température demeure constante en tous les points du système, car il n'y a en ces points, ni accumulation ni diminution de chaleur, la chaleur sensible cédée par le gaz ne sert alors qu'à l'évaporation du liquide. Lorsque l'état stationnaire est atteint, la température du liquide en un point de sa surface libre est dite température de bulbe humide.

1.7. Caractéristique d'un solide poreux

La caractéristique du solide est liée à la taille des pores ou des canaux poreux, cette taille va conférer au matériau des caractéristiques mécaniques et thermophysiques particulières. L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou des retraits et donc une modification des structures poreuses qui rejaillira sur les caractéristiques de séchage par un ralentissement et même un blocage des transferts (croustage, mais aussi bouchage par entraînement de soluté).

Il est nécessaire de bien connaître l'état du produit à sécher, au cours de séchage, pour infléchir les contraintes liées à l'environnement séchant et pour permettre au produit d'arriver au bout de l'opération tout en ayant gardé ses qualités.

1.7.1. Porosité volumique d'un produit

La porosité volumique ε (figure 2.2) est définie par :

$$\varepsilon = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume apparent du produit}} \quad (2.9)$$

Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc $1 - \varepsilon$

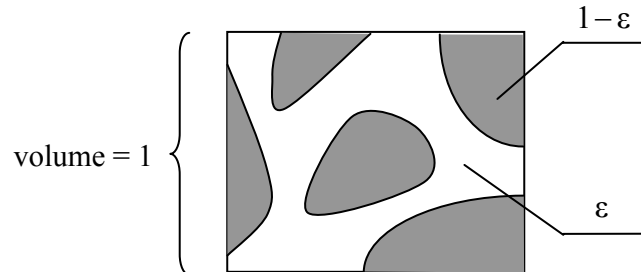


Figure 2.2 : Volume de contrôle microscopique

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure 2.3). La définition est équivalente.

$$\varepsilon = \frac{\text{volumes de l'amas} - \text{volumes du produit}}{\text{volume de l'amas}} \quad (2-10)$$

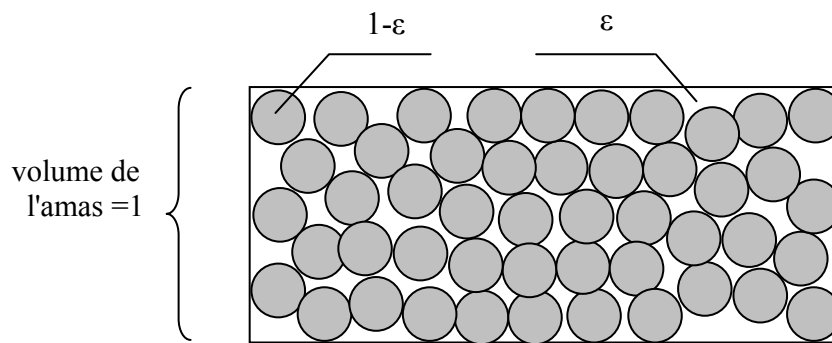


Figure 2.3 : Volume de contrôle macroscopique

1.7.2. Compacité d'un produit

Les échanges convectifs, à toutes les échelles, demandent de quantifier la surface d'échange A contenue dans le volume V dans lequel on caractérise les transferts. Le rapport entre ces deux grandeurs constitue la compacité

$$C = \frac{A}{V} \quad (2-11)$$

A l'échelle du produit, la surface d'échange est la surface extérieure dite surface exposée. Pour des volumes classiques (bille de diamètre d , produit plat d'épaisseur) nous trouvons :

$$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ Bille : } C = \frac{6}{d} \\ \bullet \text{ produit plat (2 faces) : } C = \frac{2}{e} \\ \bullet \text{ produit plat (1 face) : } C = \frac{1}{e} \end{array} \right\} \quad (2-12)$$

Pour le cas d'un amas de produit, la porosité ε de l'amas intervient soit :

$$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ Amas de billes : } C = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \\ \bullet \text{ Amas de produits plats (2 faces) : } C = \frac{2(1-\varepsilon)}{e} \end{array} \right\} \quad (2-13)$$

1.8. Répartition de l'eau dans le matériau

L'eau présente dans un matériau peut se présenter sous trois états (figure 2.4) : eau libre (eau capillaire), eau liée (eau adsorbée) et vapeur d'eau.

L'eau libre remplit la majeure partie des vides de la structure, elle est piégée sous forme liquide par des forces d'origine capillaire; la quantité maximale d'eau libre est directement liée à la porosité du milieu (ε).

L'eau liée est adsorbée sur et dans les parois des structures grâce aux propriétés hydrophiles de leurs constituants. Elle aussi liée à la taille des pores qui indique la proportion eau liée/eau libre dans le matériau (un produit constitué de "petits pores " aura, à l'échelle macroscopique, un caractère hygroscopique plus marqué que s'il était constitué de "gros pores").

La vapeur d'eau mélangée à l'air sec (mélange parfait) occupe les espaces vides non saturés d'eau liquide.

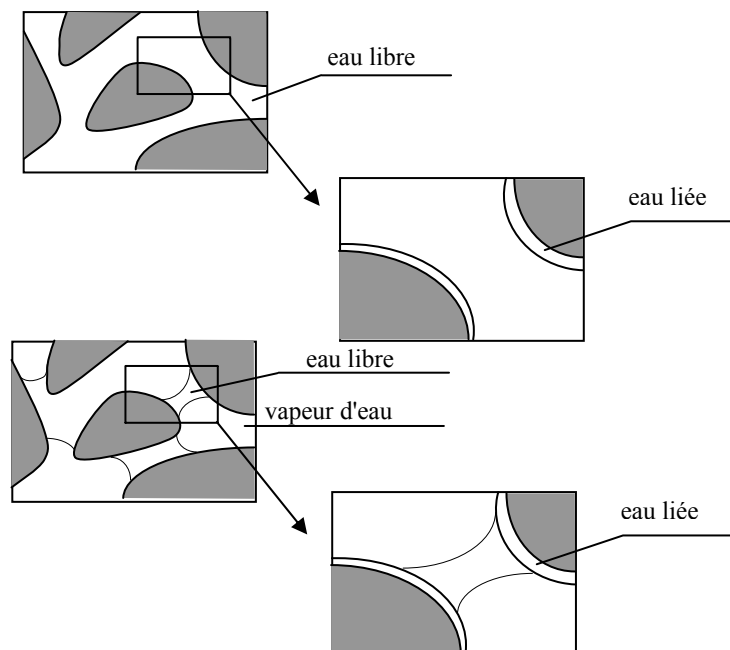


Figure 2.4 : Les différents types d'eau dans le matériau

1.9. Loi de Fick

La loi de Fick caractérisée la diffusion moléculaire d'un fluide de masse volumique ρ_f dans un milieu, elle exprime un flux massique surfacique. Le paramètre pertinent du milieu est D_f le coefficient de diffusion moléculaire :

$$J_c = - \rho_f D_f \frac{dC_m}{dX} \quad (2-14)$$

1.10. Loi de Darcy

La loi de Darcy caractérisée la diffusion d'ensemble d'un fluide de masse volumique ρ_f et de viscosité dynamique μ_f dans un milieu poreux, elle exprime un flux massique surfacique, le paramètre pertinent du milieu est k la perméabilité intrinsèque.

$$J_s = - \rho_f \frac{k_f}{\mu_f} \frac{dP}{dX} \quad (2-15)$$

2. SECHAGE DES PRODUITS AGRO-ALIMENTAIRES

Il existe plusieurs méthodes pour la déshydratation des produits agro-alimentaire. Toutefois le séchage par convection, appelé aussi par entraînement, demeure la technique la plus répandue et la plus utilisée.

2.1. Séchage par convection

Les phénomènes liés au séchage d'un corps humide sont :

- Le transfert de chaleur du gaz vers le corps humide sous l'effet d'un gradient de température.
- Le transfert de matière (d'eau) s'effectue du corps vers le gaz sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

Le séchage est dit isenthalpique si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale a celle apportée par le flux de gaz chaud.

La vitesse avec laquelle des quantités d'eau de produit sont évaporées est appelée vitesse de séchage. Cette dernière est intimement liée au mode d'apport de la chaleur latente de vaporisation au produit à sécher. Dans le séchage par entraînement, la convection devrait être le seul mode d'apport de chaleur. Toutefois, d'autres modes d'apport d'énergie peuvent se réunir pour fournir une petite partie de la chaleur latente de vaporisation.

2.2. Activité de l'eau et isotherme sorption

2.2.1. Activité de l'eau dans le produit

L'activité de l'eau dans le produit (A_w) est une grandeur très liée à l'humidité du produit. Elle exprime pour, une température donnée et par rapport à l'eau pure prise comme état de référence, la variation du potentiel chimique de l'eau absorbée contenue dans le produit.

En d'autres termes l'activité de l'eau est le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit (P_m) et la pression de vapeur de l'air saturé (P_s).

$$A_w = \frac{P_m}{P_s} \quad (2-16)$$

- Si le produit est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure, il n'y a pas d'échange d'eau et le gradient de pression de vapeur entre le produit et l'air s'annule ($P_m = P_v$), donc on peut écrire :

$$A_w = \frac{P_m}{P_s} = H_r \quad (2-17)$$

Ainsi à l'équilibre hygroscopique, l'activité de l'eau dans le produit est identique à l'humidité relative de l'air.

2.2.2. Isothermes de sorption

les isothermes de sorption permettant de déterminer la répartition et l'intensité de liaison de l'eau, ainsi que sa disponibilité fonctionnelle dans les substances biochimique et biologique alimentaires, en effet, les groupes polaires des macromolécules, notamment ceux des protéines et des glucides créent à la surface de celles-ci, un champ de forces électrostatique, responsable de l'adsorption des molécules d'eau en équilibre avec celle dont l'agitation thermique crée la pression de vapeur d'eau dans l'atmosphère environnante[18].

Dans chaque opération de séchage, il y a un équilibre d'humidité air-produit que nous devons prendre en compte. Cet équilibre ou plus exactement valeur de l'humidité d'équilibre diffère d'un produit à l'autre. En pratique l'humidité d'équilibre est déterminée par les isothermes de sorption du produit [2,3]. La détermination des isothermes de sorption est une étape indispensable dans l'étude du séchage du fait qu'elle permet de déterminer la teneur en eau finale à atteindre à la sortie du séchoir en offrant des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique du produit à sécher [19,20].

L'isotherme de sorption est une courbe qui dépend de la température et qui est le rapport la teneur en eau d'équilibre X_{eq} du produit étudié en fonction de l'humidité relative de l'atmosphère qui l'entoure. Ces courbes peuvent éventuellement différer l'une de l'autre, bien qu'on soit à la même valeur de l'humidité relative H_r et une température donnée [21,22].

2.3. Les modèles mathématiques des isothermes de sorption

2.3.1. Le modèle d'Henderson

Le modèle d'Henderson [7], décrit l'ensemble des isothermes de sorption pour différentes. La corrélation exprimant ce modèle s'écrit :

$$X_{eq}(T, H_r) = \left[\frac{-\text{Log}(1-H_r)}{k(1,8T + 492)} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.18)$$

Cette écriture permet de calculer les isothermes de sorption pour n'importe quelle température de travail T. Les constantes k et n dépendent de la température et des caractéristiques du produit. Pour les déterminer, on écrit la relation (2.18) sous la forme :

$$n \log(X_{eq}) + \log(k) = \log(-\log(1-H_r)) - \log(1.8T + 492) \quad (2-19)$$

2.3.2. Model de BET

Ce modèle permet de représenter les phénomènes de fixation et de libération des molécules d'eau [7]. Il s'écrit sous une formes générale comme suit :

$$X_{eq} = \left[\frac{H_r X_M a}{1-H_r} \right] \left[\frac{1-(n'+1)H_r^{n'} + n'H_r^{n'+1}}{1+(a-1)H_r + aH_r^{n'+1}} \right] \quad (2-20)$$

Pour simplifier cette équation en tenant compte que des monocouches adsorbées (n'=1) et en négligeant le termes au carré de l'humidité relative Hr, l'équation (2.18)

$$\frac{H_r}{(1-H_r)X_{eq}} = \frac{1}{aX_M} + \frac{(a-1)}{aX_M} H_r \quad (2-21)$$

En traçant $H_r / [(1-H_r) X_{eq}]$ en fonction de Hr, on obtient une droite dont la pente est $(a-1) / (a X_M)$ et l'ordonnée de l'origine est $1 / (a X_M)$, ce qui permet de calculer les constantes :

$$a = 12,365 \quad \text{et} \quad X_M = 0,064 \text{ kg eau. (kg MS)}^{-1}$$

2.4. Détermination des courbes d'équilibre hygroscopique

La méthode utilisée est la méthode des solutions salines saturées [23]. Diverses solutions saturées en sels connues pour générer une humidité environnante bien définie (tableau ci-dessous) sont préparées : la gamme obtenue permet d'obtenir les teneurs en eau sur l'ensemble de la gamme d'hygrométrie.

T Sels	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
Chlorure de Lithium	11,3 ± 0,3	11,3 ± 0,2	11,2 ± 0,3	11,1 ± 0,2	10,9 ± 0,3
Chlorure de Magnésium	33,1 ± 0,5	32,4 ± 0,5	31,6 ± 0,1	30,5 ± 0,1	29,3 ± 0,2
Carbonate de potassium	43,2 ± 0,3	43,2 ± 0,5	42,3 ± 0,1	45,6 ± 0,1	45 ± 0,1
Bromure de Sodium	59,1 ± 0,4	56,0 ± 0,4	53,2 ± 0,4	50,9 ± 0,6	49,7 ± 0,8
Chlorure de Cuivre	68,4 ± 0,1	68,6 ± 0,1	68 ± 0,1	65,5 ± 0,1	63,3 ± 0,1
Sulfate d'ammonium	81,4 ± 0,8	80,6 ± 0,3	79,9 ± 0,5	79,2 ± 0,9	77,2 ± 0,1
Sulfate de Potassium	97,6 ± 0,5	97 ± 0,4	96,4 ± 0,4	95,8 ± 0,5	95,7 ± 0,1

Tableau 2.1 : Valeurs standards des humidités relatives données par différents sels en fonction de la température

Ces solutions sont préparées dans des bocaux hermétiques et sont mai tenues isothermes dans une étuve réglée en température ou bien dans une salle climatisée.

L'échantillon est suspendu dans le bocal, au-dessus des sels, et reste donc dans une ambiance stabilisée en température et hygrométrie.

2.5. Dispositif expérimental de sorption

On effectue régulièrement la pesée de l'échantillon, jusqu'à ce que le poids mesuré ne varie plus : on atteint alors l'équilibre hygroscopique.

On détermine l'extrait sec de l'échantillon : on connaît alors, pour une hygrométrie donnée, la teneur en eau de l'échantillon.

Si l'échantillon placé dans l'enceinte est humide (figure 2.5), on obtient les courbes de désorption : c'est-à-dire que l'échantillon perd de l'eau pour atteindre l'équilibre. Par contre, si l'échantillon est sec initialement, on obtient une courbe de sorption.

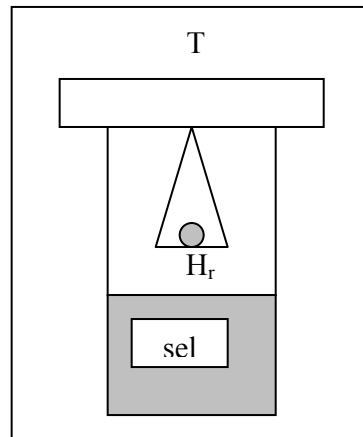


Figure 2.5 : dispositif expérimental

2.6. Périodes du séchage

Si dans une opération de séchage on procède à la mesure de la masse du produit à intervalles réguliers, on obtiendra ce qu'on appelle courbe de vitesse de séchage.

Sur cette courbe figure (2.6), on distingue trois régions :

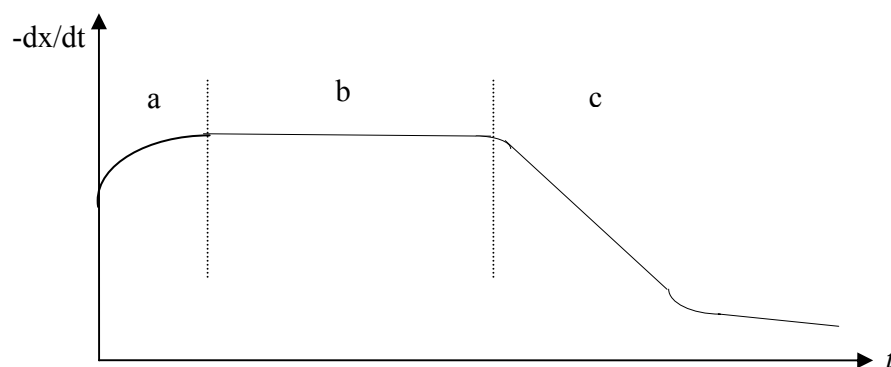


Figure 2.6 : périodes du séchage

2.6.1. 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 ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur, si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement de produit. La période de mise en

température est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grandes tailles, ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante [24].

2.6.2. Période à allure constante (région b)

Cette période n'existe que si l'eau libre s'évapore en surface; L'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide; L'activité de l'eau (A_w) à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit [24,17].

2.6.3. Période de ralentissement (région c)

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage, le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants [24] :

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

- **L'épaisseur du produit** : si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie 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 son disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés soluble qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

2.7. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

2.7.1. Influence de la température de l'air.

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croit avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air élevée. Par conséquent, les conductivités de l'eau dans le produit deviennent importantes [24].

2.7.2. Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible [24]

2.7.3. Influence de l'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits, il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente [24].

CHAPITRE 3

LES SECHOIRS SOLAIRES

INTRODUCTION

Il existe une grande variété de séchoirs et selon le point de vue adopté, différentes façons de les classer, on peut par exemple, retenir comme critère la texture du produit (tableau 2-1) qui détermine son mode de manutention et la manière dont on assure son contact avec l'air asséchant sur la surface chauffant [1].

Produits	Séchoirs
Pompables (liquide, pâtes, fluides, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • A dispersion • A billes • A cylindre chauffants
Pâteux	<ul style="list-style-type: none"> • A cylindres chauffants • A bandes...
Pulvérulents susceptibles d'être émiétés (morceaux de légumes, pulpes, céréales, luzerne, amidon etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • A tapis • A cylindre rotatifs • A descente par gravité • A lit fluidisé • A transfert pneumatique
En morceaux de l'ordre du cm (fruits, légumes, saucissons, fromage, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Discontinue • A claies • A chariots

Tableau 3.1 : Classification des séchoirs

Les séchoirs solaires sont classés généralement selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement [13] en plusieurs catégories :

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

1. Les séchoirs solaires directs

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire. Ils offrent de large possibilités de conception : du séchoir coffre à plateau et adapté au petite production, au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités.

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 chères comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles).

1.2. Avantages

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

1.3. Inconvénients

- dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration [25].
- 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 [26].
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure.

1.4. Type de séchoirs directs

1.4.1. La boîte de séchage ou séchoir coffre

Le séchoir à coffre est un simple séchoir facile à construire par les artisans, en utilisant des matériaux disponibles localement, il est destiné généralement pour la préservation des fruits, légumes, poissons et de la viande [27].

Dans le séchoir coffre, l'air pénètre par les orifices percés par le fond du caisson (figure 3.1), et s'échappe par des trous situés dans la partie haute de chaque côté. Le fond de la boîte ainsi que les parois sont peints en noir pour mieux capter le rayonnement solaire. Une feuille de plastique ou une plaque de verre sert de toit, une porte dans le panneau arrière permet de régler la température.

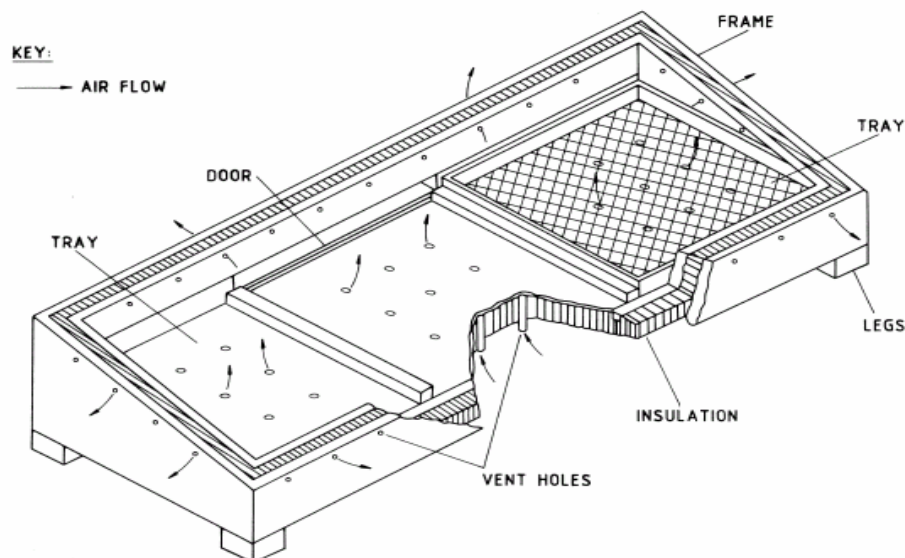


Figure 3.1 : Le séchoir solaire coffre

1.4.2. Le séchoir intégral à convection naturelle

Le séchoir intégral (figure 3.2) est un séchoir direct dont le produit est placé dans une chambre de séchage avec des parois transparentes, le rayonnement solaire empiète directement sur le produit. L'exposition directe au rayonnement solaire augmente la maturation appropriée de couleur des fruits verdâtres, et permettant la décomposition de la chlorophylle dans le tissu [28].

Pour certaines variétés de raisins et de dattes, l'exposition au rayonnement est considérée essentielle pour le développement de couleur requise dans le produit sec [28].

Le séchoir est équipé par une cheminée solaire qui peut être utilisée pour augmenter la force de flottabilité imposée au courant d'air et donc fournir un flux important d'air et une vitesse de séchage plus grande.

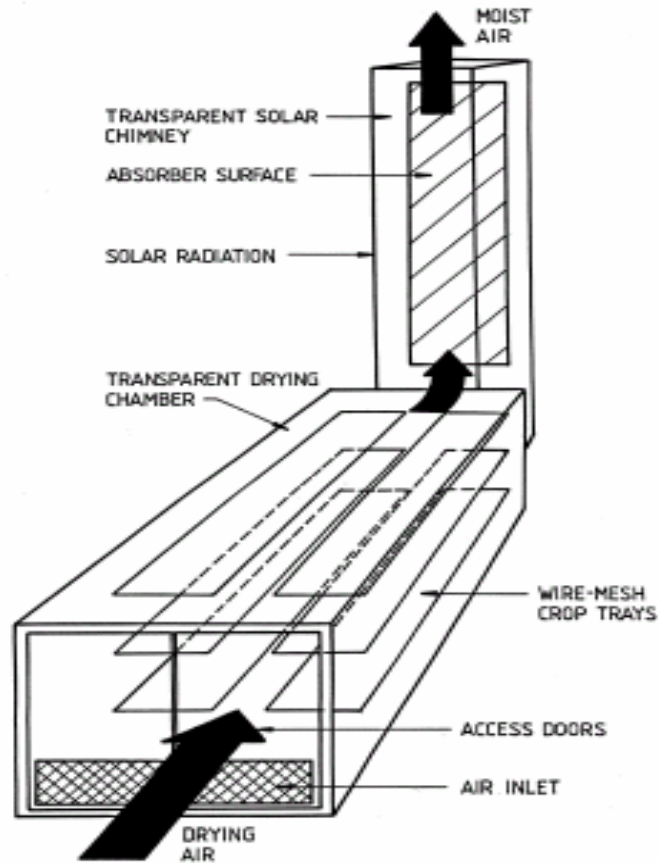


Figure 3.2 : Le séchoir solaire intégral

1.4.3. Le séchoir solaire "coquillage"

Le séchoir coquillage est un séchoir solaire direct à convection naturelle, destinée à l'auto consommation et à la vente locale. Il est essentiellement utilisé par les familles, les coopérations et les groupes de femmes.

Ce type de séchoir est composé de deux cônes métalliques reliés par une charnière, la tôle peinte en noir assure une bonne captation du rayonnement solaire, des trous perforés dans la tôle inférieure et supérieure permettant la circulation de l'air. L'efficacité du séchoir dépend des conditions climatiques.

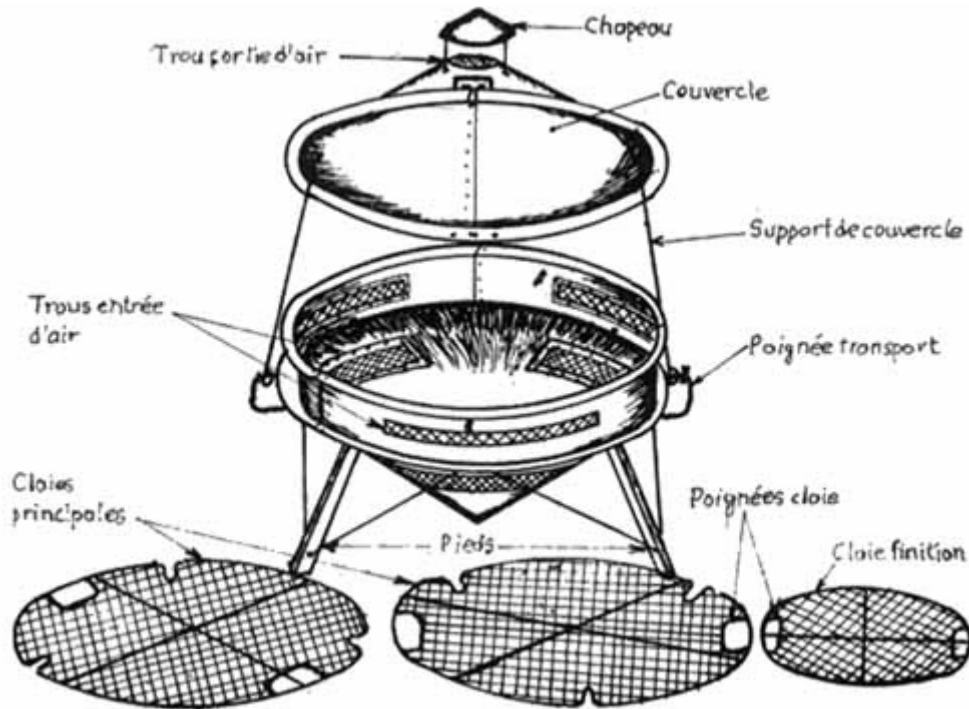


Figure 3.3 : Le séchoir solaire coquillage à trois claies

1.4.4. Le séchoir cabane

Le séchoir cabane est caractérisé par une capacité de 35 kg de produit frais pour une surface de 7m² [29]. Les produits sont placés dans le séchoir sur des claies surélevées du sol. La toile de plastique permet de capter l'énergie solaire, une porte permet d'entrer dans la tente et de garnir les claies, une sortie d'air est aménagée dans la partie supérieure. Ce type de séchoir est caractérisé par une meilleure protection contre les insectes, équipement démontable à la saison des pluies et une simple construction et fonctionnement, parmi les inconvénients de ce séchoir : le coût est assez important, la nécessité d'une grande surface de polyéthylène et la prise au vent qui rend ces modèles fragiles si l'emplacement est mal choisi.

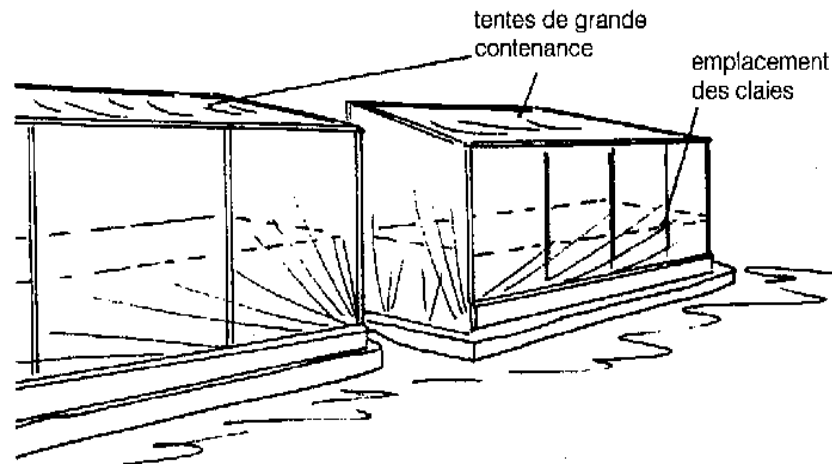


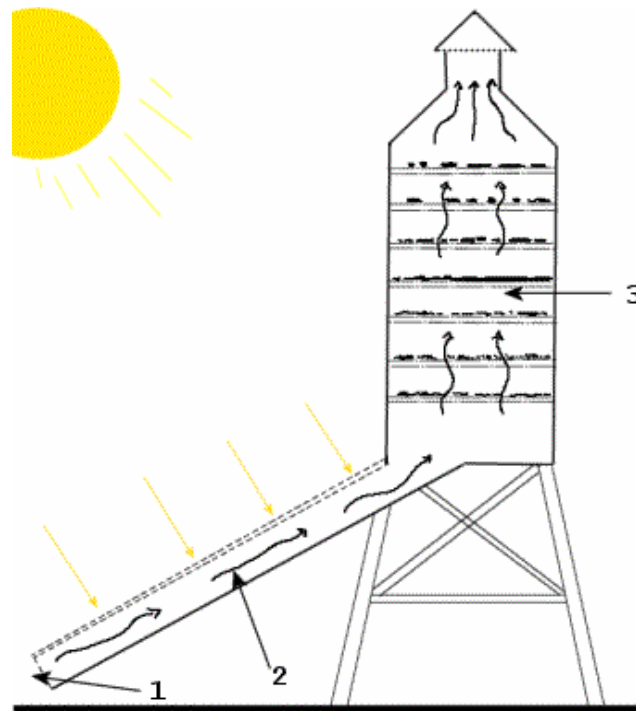
Figure 3.4 : Le séchoir solaire cabane

2. Les séchoirs solaires indirects

Ces systèmes sont plus performants que les séchoirs directs, ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive [29]. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires.

2.1. 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 3.5). 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 [29].



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

Figure 3.5 : Séchoir solaire indirect

2.2. 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 [30].
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles [31].

2.3. Inconvénient

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

2.4. Type du séchoir indirect

2.4.1. Le séchoir armoire

Le collecteur capte l'énergie solaire. L'air chaud s'élève jusqu'à la chambre de séchage où les produits sont disposés sur des claies superposées.

Le séchoir armoire (figure 3.6) est composé d'un collecteur solaire dont l'intérieur a été noirci et d'une chambre de séchage contenant des claies superposées. Le collecteur est recouvert de feuille de plastique translucide et assure la production de l'air chaud. La chambre de séchage protège les produits du soleil préservant aussi leur qualité.

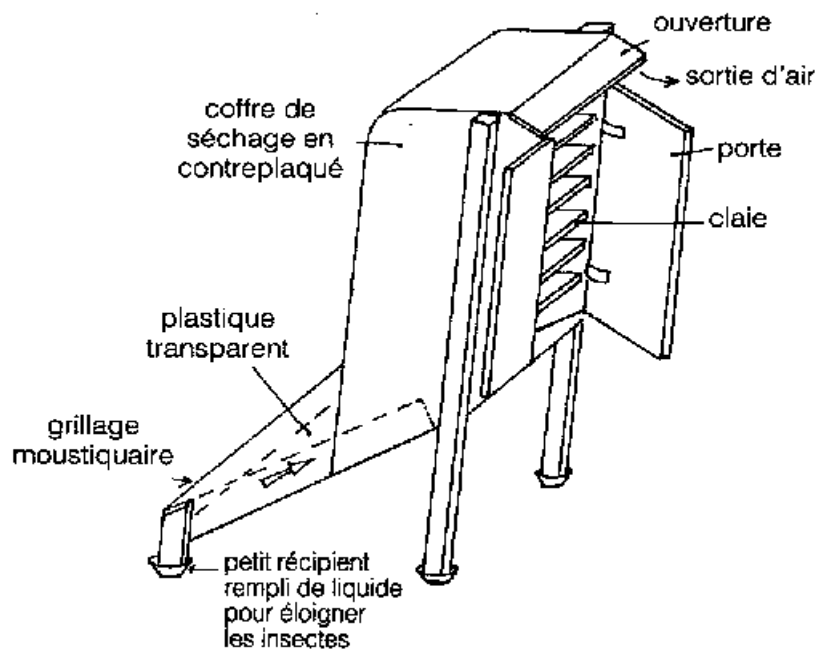


Figure 3.6 : séchoir solaire armoire

3. Les séchoirs hybrides

Les recherches se sont orientées vers les séchoirs hybrides utilisant une énergie d'appoint : fuel, électricité, bois, gaz ... l'apport d'énergie supplémentaire peut se situer à deux endroits différents du séchoir [29] :

- Maintenir la température constante dans le séchoir par un brûleur à gaz, une résistance électrique, un feu du bois. Dans ce cas l'énergie solaire devient secondaire, elle permet simplement de préchauffer l'air.
- Augmentation de la circulation de l'air par des ventilateurs électriques, ici l'énergie solaire reste la source de chaleur mais le séchoir a une capacité d'évaporation plus importante grâce à une meilleure ventilation.

3.1. Avantages

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage [32].
- Forte augmentation de la production par rapport aux autre type des séchoirs solaires, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

3.2. Inconvénients

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

3.3. Types des séchoirs hybrides

3.3.1. Séchoir hybride à convection forcée

- **Principe de fonctionnement** : Le toit du bâtiment sert de capteur, un ventilateur assure une circulation importante de l'air permettant de sécher très rapidement les produits.
- **Description technique** : L'air est aspiré de l'intérieur du bâtiment par un ventilateur et passe dans un capteur solaire dans le toit du bâtiment. L'air réchauffé arrive dans la chambre de séchage où les fruits sont disposés sur des claies superposées.
- **Avantages**
 - Séchoir très performant.
 - Facilement aménageable dans un bâtiment
- **Inconvénients**
 - Nécessité de grandes quantités de fruits régulièrement sur l'année pour être rentable.

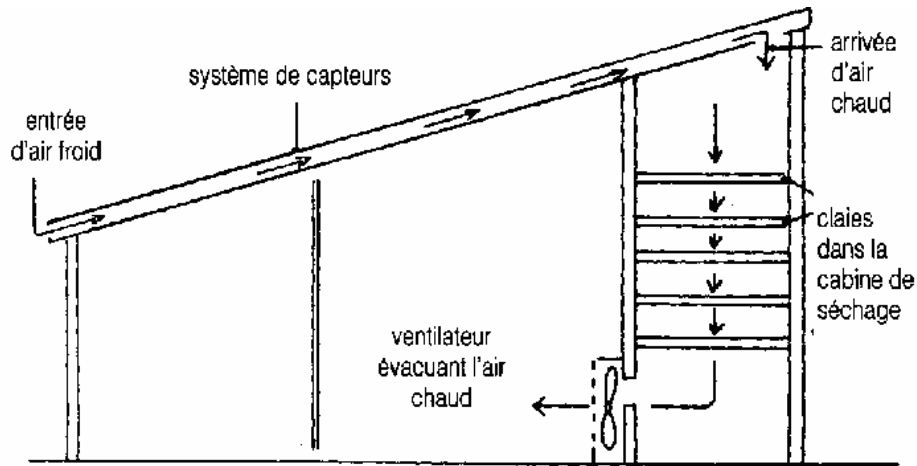


Figure 3.7 : séchoir solaire hybride à convection forcée

3.3.2. Le séchoir hybride solaire - gaz

- **Principe de fonctionnement :** Le collecteur solaire permet de préchauffer l'air. Si la température est insuffisante, un brûleur à gaz se déclenche pour obtenir la température désirée. Les produits peuvent donc sécher quelque soient les conditions climatiques.
- **Description technique :** La circulation de l'air se fait par convection naturelle du collecteur solaire à l'armoire. Le brûleur à gaz permet d'obtenir la température nécessaire pour sécher correctement les produits quelque soient les conditions climatiques.
- **Avantages**
 - Séchage rapide et d'excellente qualité.
 - Contrôle de température.
 - Très grande productivité.
- **Inconvénient**
 - Coût très élevé de l'investissement
 - Nécessité d'avoir un marché important pour pouvoir écouler les produits.

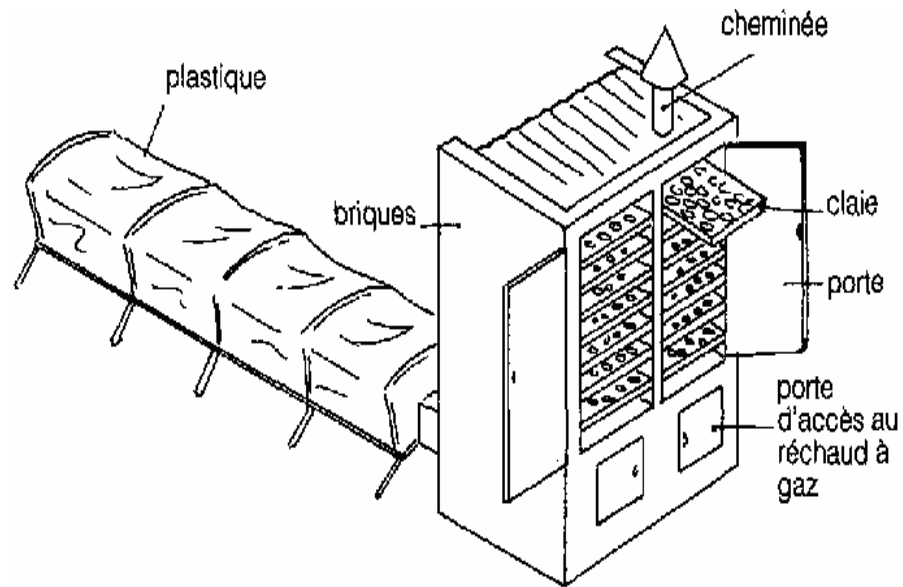


Figure 3.8 : Séchoir solaire hybride solaire-gaz

4. Les séchoirs mixtes

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

Un séchoir mixte à circulation naturelle (figure 3.9) aurait les mêmes dispositifs structurant qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage, et une cheminée) mais les parois sont équipées par des plaques de verre de sorte que le rayonnement solaire empiète directement sur le produit comme le séchoir intégral [28].

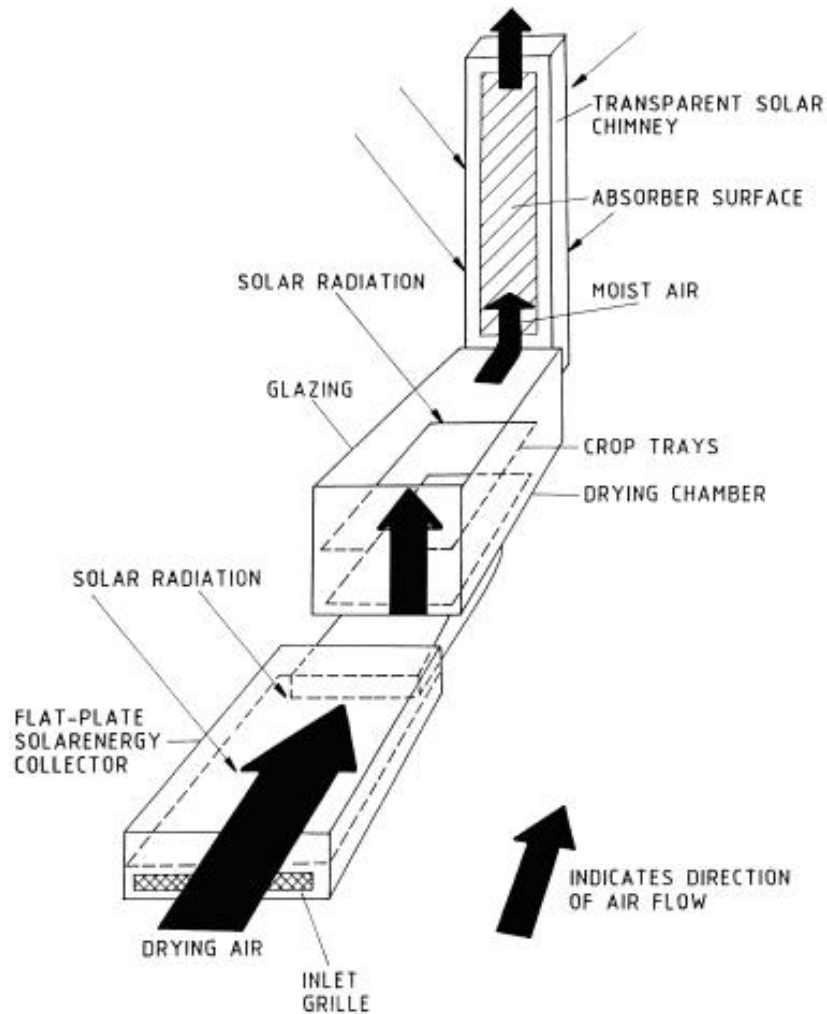


Figure 3.9 : Séchoir solaire à circulation naturelle-type 1

Une autre conception (figure 3.10) se compose d'un capteur à air avec une pile de granit (sert le rôle d'un absorbeur et stockage d'énergie) recouvert d'une plaque de verre. La chambre de séchage contenant trois claies superposées, les parois sont des contre-plaquéés, la surface supérieure recouverte de verre. La cheminée solaire prend une forme cylindrique, fabriquée avec des feuilles galvanisées équipées d'un chapeau en métal pour conserver hors de la pluie [28].

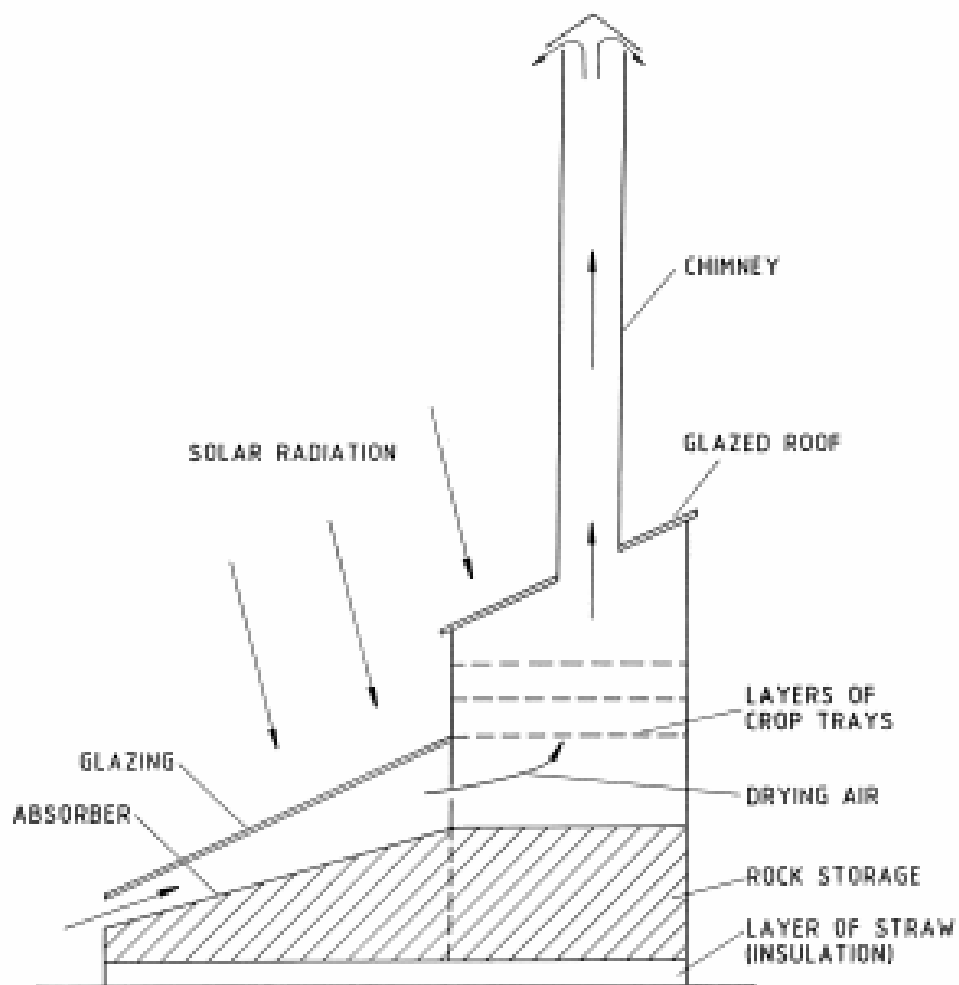


Figure 3.10 : Séchoir solaire à circulation naturelle-type 2-

5. Les capteurs solaires

5.1. Captation par effet de serre

Le fonctionnement de tout capteur à basse température par effet de serre, s'explique par le fait que le verre est un matériau quasiment transparent au rayonnement solaire alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge, un flux solaire traversant une vitre et venant chauffer un corps derrière cette vitre se trouvant donc piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser la vitre [12].

Le corps qui sert à capter le rayonnement, appelé absorbeur, est généralement noirci afin d'augmenter son facteur d'absorption. L'absorbeur chauffé cède sa chaleur à un fluide circulant en bon contact thermique avec lui.

5.2. Constitution d'un capteur plan

C'est une boîte constituée de trois parties :

- La partie avant ou capteur proprement dit, qui est exposé au rayonnement;
- L'absorbeur où s'effectue la conversion thermique;
- La partie arrière.

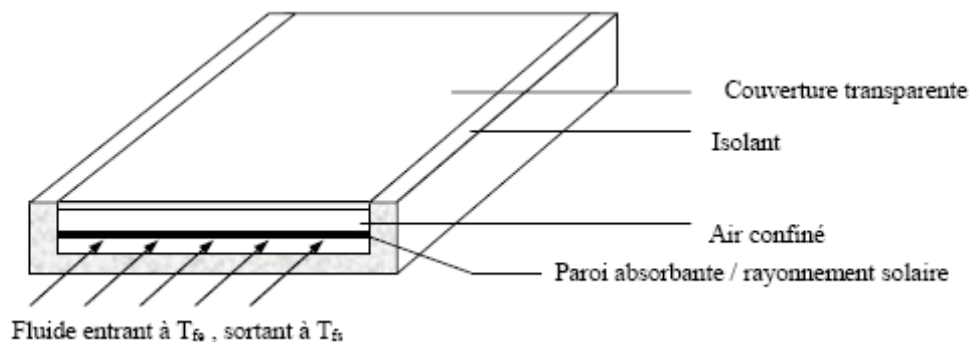


Figure 3.11 : Capteur solaire plan

5.3. Bilan thermique du capteur

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur s'écrit :

$$\varphi_a = \varphi_u + \varphi_p + \varphi_s \quad (3.1)$$

Où : φ_a Le flux solaire absorber à la surface de l'absorbeur,
 φ_u La puissance utile récupérée par le fluide caloporteur,
 φ_p La puissance perdue par convection et conduction vers l'arrière du capteur
 et par convection, conduction et rayonnement vers la face avant du capteur,
 φ_s La puissance stockée sous forme de chaleur dans les différents éléments du
 capteur lorsque le régime thermique est variable.

5.4. Rendement instantané d'un capteur

Le rendement instantané d'un capteur est défini par :

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par m}^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}}$$

$$\eta = \frac{\varphi_u}{\varphi_a} \quad (3.2)$$

Pour un capteur à inertie thermique négligeable (faible masse des composants, faible chaleur spécifique), ou dans le cas de régime thermique permanente, $\varphi_s=0$ et le rendement devient :

$$\eta = 1 - \frac{\varphi_p}{\varphi_a} \quad (3.3)$$

Cette simple relation montre que dans la conception d'un capteur, on aura toujours intérêt à :

- Diminuer la puissance perdue φ_p
- Augmenter la puissance absorbée φ_a

5.5. Rendement optique d'un capteur [12]

Le rendement optique est défini par :

$$\eta_0 = \frac{\varphi_a}{\varphi_g} \quad (3.4)$$

Pour un flux direct φ_i incident sur la surface du capteur (figure 3:12), $\tau_t \varphi_i$ sera transmis et arrivera de l'absorbeur, où $\alpha_a \tau_t \varphi_i$ sera absorbé et $\tau_r \rho_a \varphi_i$ sera réfléchi, le flux réfléchi sera à son tour partiellement réfléchi par le vitrage (la portion réfléchie est $\tau_t \rho_r \rho_d \varphi_i$).

ρ_d : est la réflectivité hémisphérique moyenne du vitrage, c'est-à-dire :

$$\rho_d = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho(i) di \quad (3.5)$$

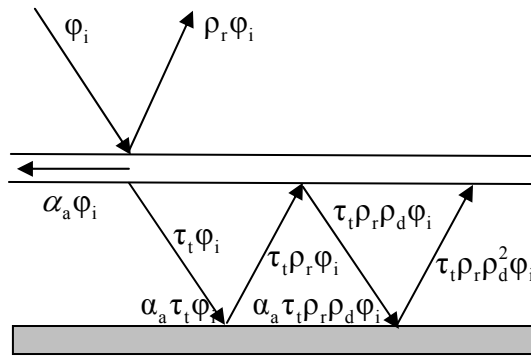


Figure 3.12 : L'effet de serre dans un capteur à air

Le flux solaire à un instant donné, étant la somme d'un flux direct et d'un flux diffus :

$$\varphi_a = \varphi_i \frac{\tau_t \alpha_a}{1 - \rho_d (1 - \alpha_a)} + \varphi_d \frac{\tau_d \alpha_a}{1 - \rho_d (1 - \alpha_a)} \quad (3.6)$$

Le rendement optique peut s'écrire :

$$\eta_0 = \frac{\varphi_a}{\varphi_g} = \frac{\alpha_a}{1 - \rho_d (1 - \alpha_a)} \left(\frac{\varphi_i \tau_t}{\varphi_g} + \frac{\varphi_d \tau_d}{\varphi_g} \right) \quad (3.7)$$

Où φ_i, φ_d et φ_g sont respectivement les flux direct, diffus et global sur le plan du capteur.

CHAPITRE 4

PARTIE

EXPERIMENTALE

1. SECHAGE DE LA MENTHE VERTE

1.1. Description du séchoir solaire

Le séchoir solaire étudié (figure 4.1) est un séchoir solaire indirect à convection naturelle, dont les éléments constitutifs sont :

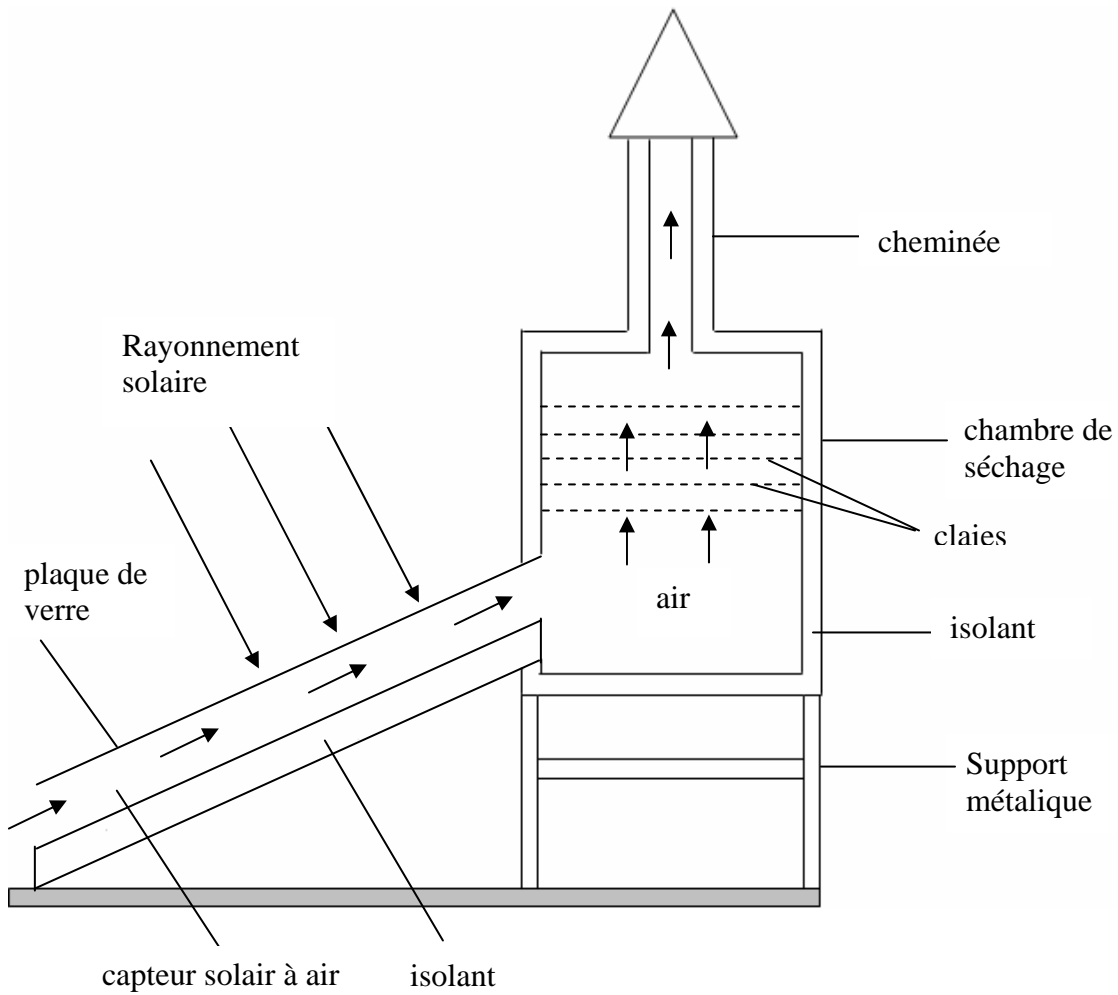


Figure 4.1: schéma descriptif du séchoir solaire

1.1.1. Le capteur solaire

Le capteur solaire est un capteur à air plan de longueur de 2 m, une largeur à 1 m, et la hauteur est de 0,13m, le capteur est recouvert d'une plaque de verre d'épaisseur de 0.004 m, au dessous de cette plaque et à une distance de 0,06 m est déposée une plaque d'aluminium peinte en noire mate qui sert d'absorbeur, les cotés latéraux, et la partie inférieure sont isolés thermiquement avec le polystyrène. Le capteur est incliné d'un angle de 16° par rapport au plan horizontal et orienté plein sud.

1.1.2. La chambre de séchage

La chambre de séchage est une boîte galvanisée de forme cubique, de hauteur 1 m, de profondeur de 0,8 m; les parois latérales, et les parties inférieure et supérieure sont isolées thermiquement par du polystyrène. La chambre de séchage est munie d'une cheminée cubique fabriquée avec des feuilles galvanisées de hauteur 1 m, les cotés de 0,020 m, les parties latérales sont isolées thermiquement par du polystyrène.

La chambre de séchage est posée sur un support métallique, les produits sont déposés à l'intérieur de la boîte sur cinq (5) claies de forme rectangulaire composée chacune d'un cadre en bois sur lequel est fixé un grillage pour permettre le passage de l'air, les claies sont distantes les unes des autres de 10 cm.

1.2. Fonctionnement du séchoir solaire

L'air frais capté de l'extérieur circule dans le capteur solaire par convection naturelle, il est chauffé avant d'arriver à l'entrée de la chambre de séchage, puis il continue son chemin à travers les claies superposées. Enfin l'air asséchant est évacué vers l'extérieur à travers la cheminée solaire.

1.3. Préparation du produit

Les feuilles de menthe sont soigneusement préparées et étalées sur les claies de la chambre de séchage, la masse du produit à sécher est de 100 g par claie pour toutes les expériences.

1.4. Appareillages de mesures

1.4.1. Mesure du rayonnement solaire

Le rayonnement global reçu sur le plan du capteur est mesuré en kW/m^2 à l'aide d'un solarimètre et ceci durant la journée de l'expérience. Les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique.

1.4.2. Mesures des températures

La mesure des températures s'effectue à l'aide des thermocouples de type K dans plusieurs endroits du capteur solaire :

- Entrée et sortie du capteur solaire.
- Entrée et sortie de la chambre de séchage.
- Au niveau des claies portant le produit à sécher.

L'ensemble des thermocouples est relié à une boîte de 16 voies, et les résultats sont affichés par un appareil testo 445 connecté à la boîte du thermocouples.

1.4.3. Mesure de l'humidité et de la vitesse de l'air

L'humidité et la vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de séchage sont mesurées respectivement à l'aide d'une sonde à affichage numérique et d'un manomètre connecté à un appareil de marque testo 645. Les résultats obtenus sont affichés par un ordinateur muni d'un logiciel 'testo' durant toutes les expériences.

1.4.4. Détermination de la masse sèche du produit

Après la préparation d'un échantillon de feuilles de menthe on l'introduit dans l'analyseur d'humidité. Cet appareil est réglé à une température de 110°C, elle s'arrête (après 13 minutes) automatiquement dès que la masse devient constante. L'analyseur est équipé d'une balance à affichage numérique de précision 0,001g qui mesure la masse du produit durant le fonctionnement de l'appareil.

1.5. Résultats expérimentaux

1.5.1. Variation de la teneur en eau avec le temps

La figure 4.2 montre la variation de la teneur en eau en fonction du temps de séchage au niveau de la claie n°3 du séchoir solaire pour :

- $T_{\text{ecm}} = 61 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $M_h = 100\text{g}$
- $V_{\text{ecm}} = 0,73 \text{ m/s}$
- $H_r = 3,45\%$

Cette courbe présente une variation exponentielle de la forme $X = A \exp (-t/B)$, tel que :

- $A = 4$
- $B = 50,72$

La durée de séchage pour avoir une teneur en eau finale $X_f = 0,14\%$ qui est caractérisé pour la menthe verte [23] est de 135 minutes, pendant cette période de séchage, le produit garde ses qualités nutritionnelles [19].

L'opération de séchage pour les soixante minutes présente une diminution importante de la teneur en eau (de 4 kg eau / kg M.S à 1,26 kg eau / kg M.S), ce qui explique l'évaporation d'une grande quantité d'eau à partir des feuilles de la menthe, les soixante quinze minutes restantes présentent une diminution moins importante qui tend vers la valeur finale de la teneur en eau.

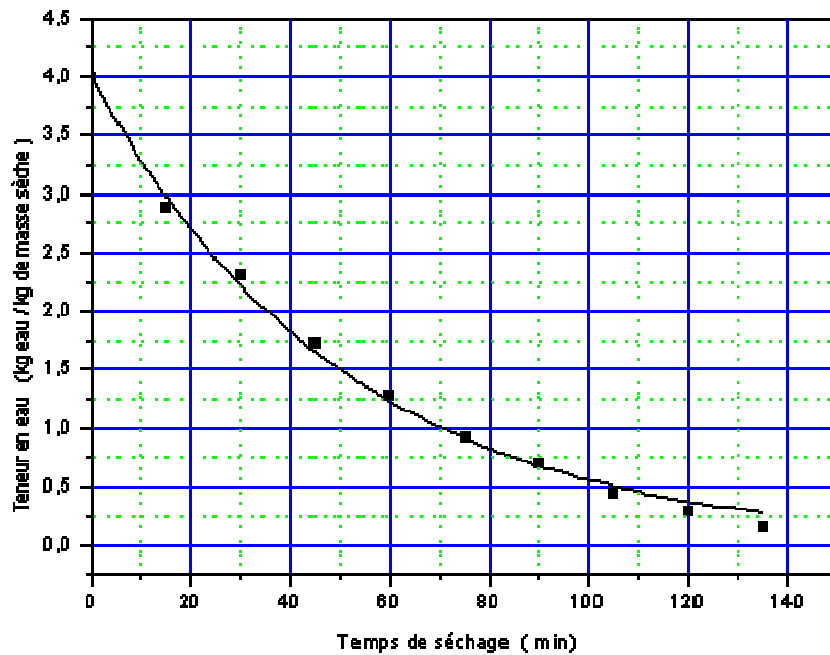


Figure 4.2 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps d'une plante médicinale : MENTHE VERTE) au niveau de la claie n°3
 $T_{\text{scch}}=61^{\circ}\text{C} - M_{\text{in}}=100\text{g} - M_{\text{e}}=20\text{g} - V_{\text{scch}}=0.73\text{m/s} - H_{\text{r}}=3.45\%$

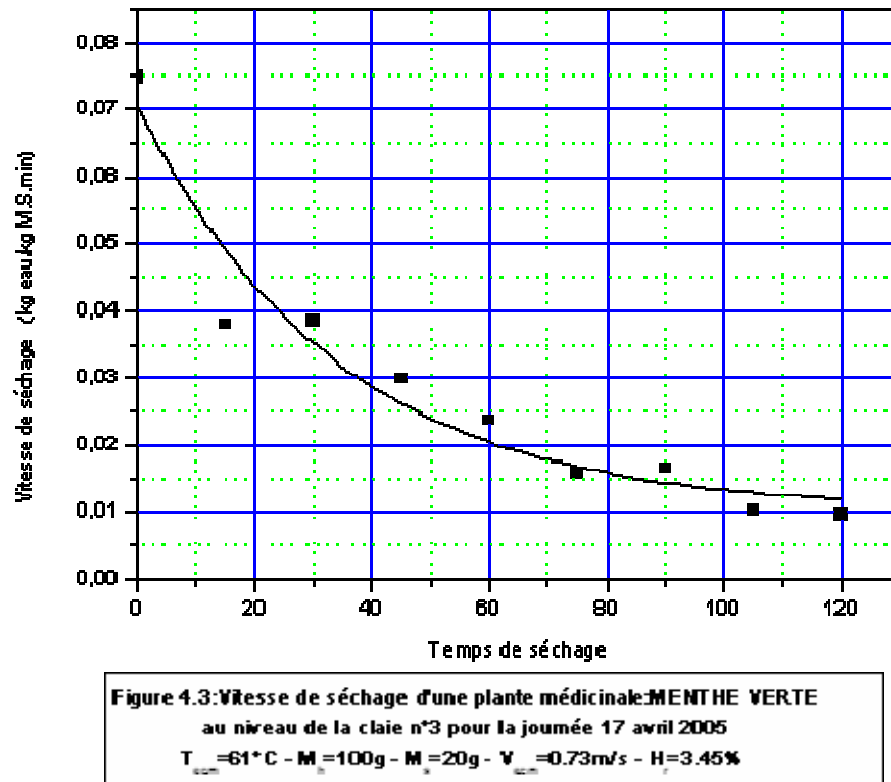
1.5.2. Vitesse de séchage

La figure 4.3 représente la cinétique de séchage du produit c'est-à-dire la variation de la vitesse de séchage en fonction du temps, pour les conditions climatiques précédentes, cette variation est aussi de la forme exponentielle tel que : $V = A + B \exp(-t/C)$

Avec :

- $A = 0,01$
- $B = 0,06$
- $C = 33,82$

On remarque dans cette courbe la présence unique de la phase 3 qui est la phase de séchage à allure décroissante, ou bien la phase de ralentissement, et l'absence des phases 1 et 2 qui sont respectivement, la période de mise en température, et la période à allure constante, cela signifie que la vitesse de séchage est contrôlé par la diffusion de l'eau à partir de l'intérieur du produit vers sa surface. Ce résultat est conforme à plusieurs travaux expérimentaux : E. Akpinard, et al. 2003, pour le séchage de la pomme de terre [33], I. T. Togrul, D. Pehlivan, 2003, pour le séchage d'abricots [34], M. Kouhila et al. 2001, pour le séchage de la menthe verte [6], et I. Doymaz, 2005, pour le séchage du figues [35].



1.5.3. Evolution de l'humidité relative de la plante

La figure 4.4 montre l'évolution de l'humidité relative de la plante au cours du temps, la courbe présente une variation selon un polynôme de degrés 4 de la forme :

$$AX^4 + BX^3 + CX^2 + DX + E$$

Avec :

- $A = 3,96$
- $B = 0,08$
- $C = 8,29.10^{-4}$
- $D = 5,44.10^{-6}$
- $E = 1,5.10^{-8}$

L'humidité relative de feuilles de menthe diminue au fur et à mesure avec l'augmentation du temps de séchage, et tend vers une humidité finale de 12%.

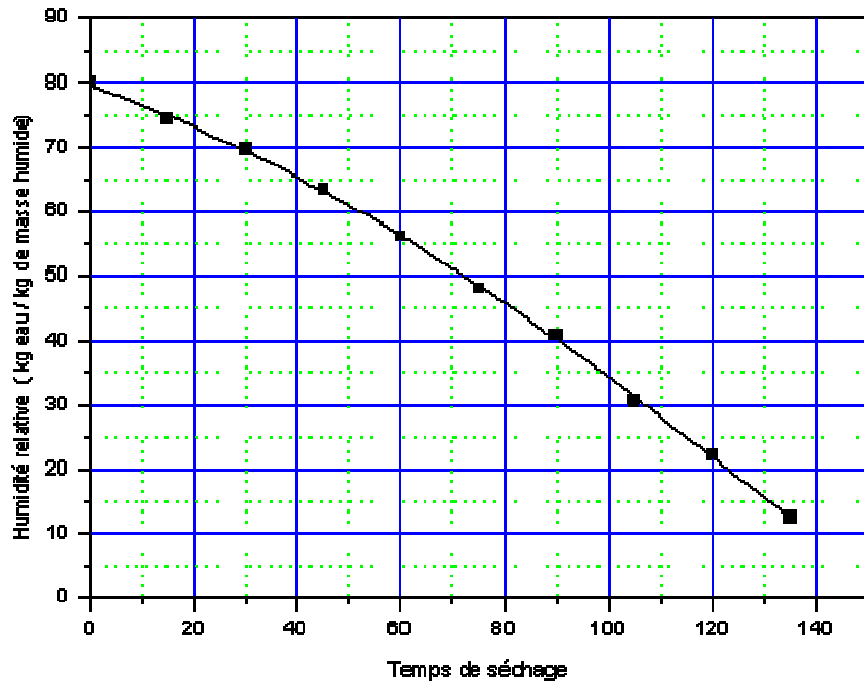


Figure 4.4: Evolution de l'humidité relative d'une plante médicinale
MENTHE VERTE au niveau de la claie n°3

$T_{\text{air}} = 61^{\circ}\text{C}$ - $M_{\text{h}} = 100\text{g}$ - $M_{\text{s}} = 20\text{g}$ - $V_{\text{air}} = 0.74\text{m/s}$ - $H = 3.45\%$

1.5.4. Variation du rayonnement global

La figure 4.5 permet d'étudier la variation du rayonnement global en fonction du temps pour la journée du 17 avril 2005, elle présente une forme gaussienne dont la valeur maximale du rayonnement est d'environ 940W/m^2 à 13h.

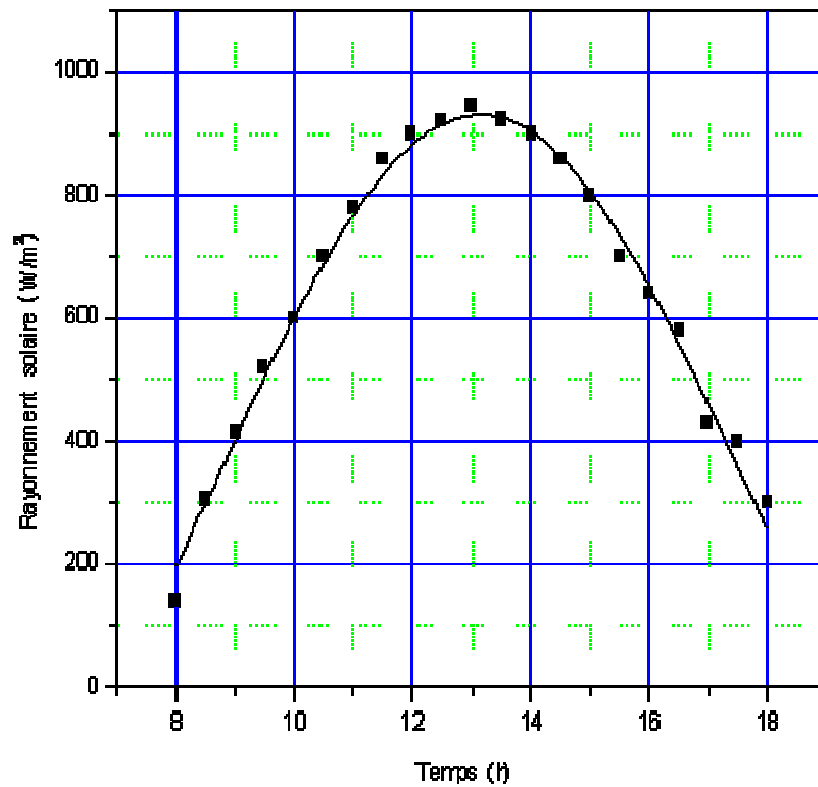


Figure 4.5: Variation du rayonnement global en fonction du temps pour la journée du 17 avril 2006

1.5.5. Variation de la vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de séchage

Sur la figure 4.6 nous constatons que la vitesse de l'air à l'entrée de la chambre de séchage présente des fluctuations entre 0 et 2,2 m/s, car cette vitesse dépend des conditions climatiques qui sont instables en fonction du temps.

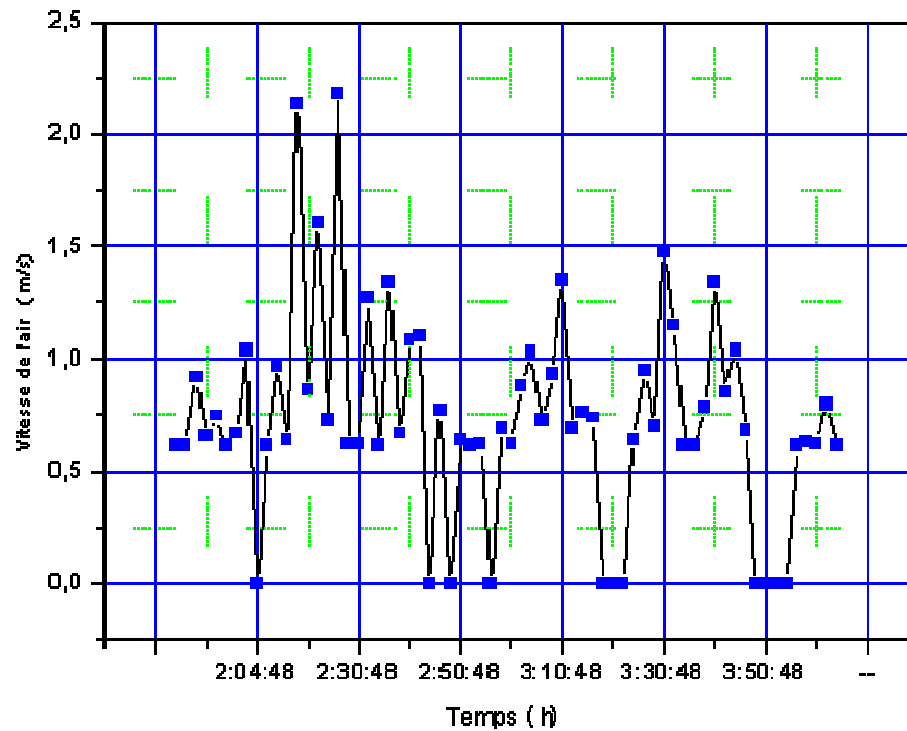


Figure 4.6 : Variation de la vitesse de l'air en fonction du temps à l'entrée du séchoir pour la journée du 17 avril 2005

1.5.6. Variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage

Les valeurs de l'humidité relative de la figure 4.7 présentent aussi des fluctuations entre 2% et 6,5%. On remarque que la variation de H_r n'est pas importante à l'entrée de la chambre de séchage.

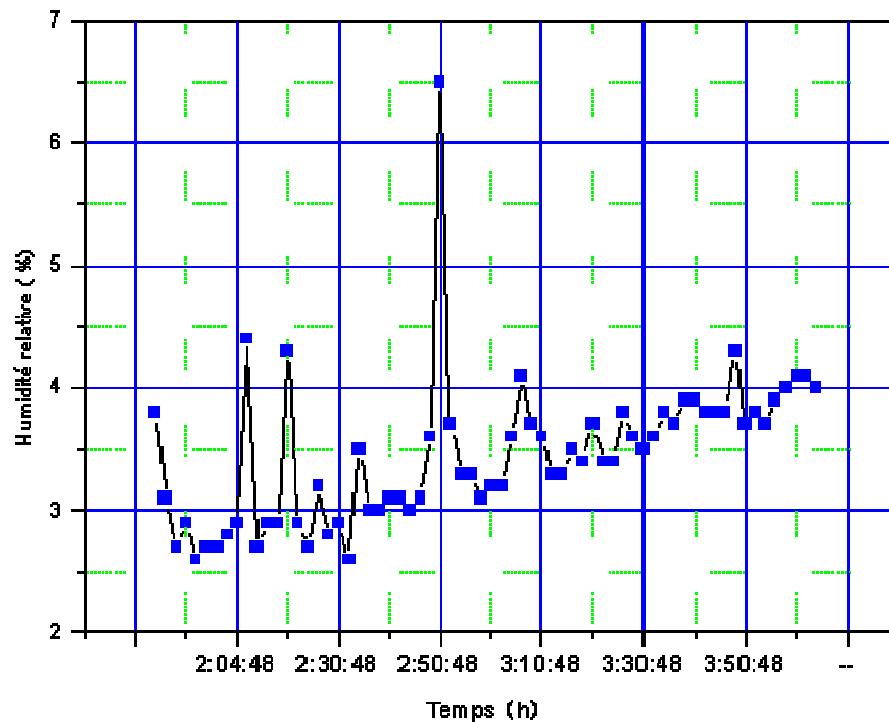


Figure 4.7 : Variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée du séchoir solaire en fonction de temps

1.5.7. L'évolution de la température dans le séchoir solaire

Nous avons relevé sur la figure 4.8 l'évolution de la température dans le séchoir solaire au niveau des positions suivantes :

- entrée de capteur,
- sortie du capteur,
- claie n°3.

On remarque sur la courbe l'écart important de la température entre l'entrée et la sortie du capteur solaire. L'écart est dû à l'influence du rayonnement solaire sur l'absorbeur qui joue un rôle important dans l'échauffement de l'air circulant à l'intérieur du capteur solaire. L'écart est important au début de l'opération de séchage, il est de l'ordre de 40°C, il diminue pendant le séchage des feuilles de menthe puisque le rayonnement global diminue et atteint sa valeur minimale (580 W/m²) à 16h et 15 minutes à la fin de l'opération de séchage (figure 4.5).

Pour la courbe de l'évolution de la température de l'air au niveau de la claie, elle prend une position intermédiaire entre l'entrée et la sortie du capteur, ce qui explique la consommation d'une quantité de chaleur pendant l'évaporation de l'eau à partir du produit.

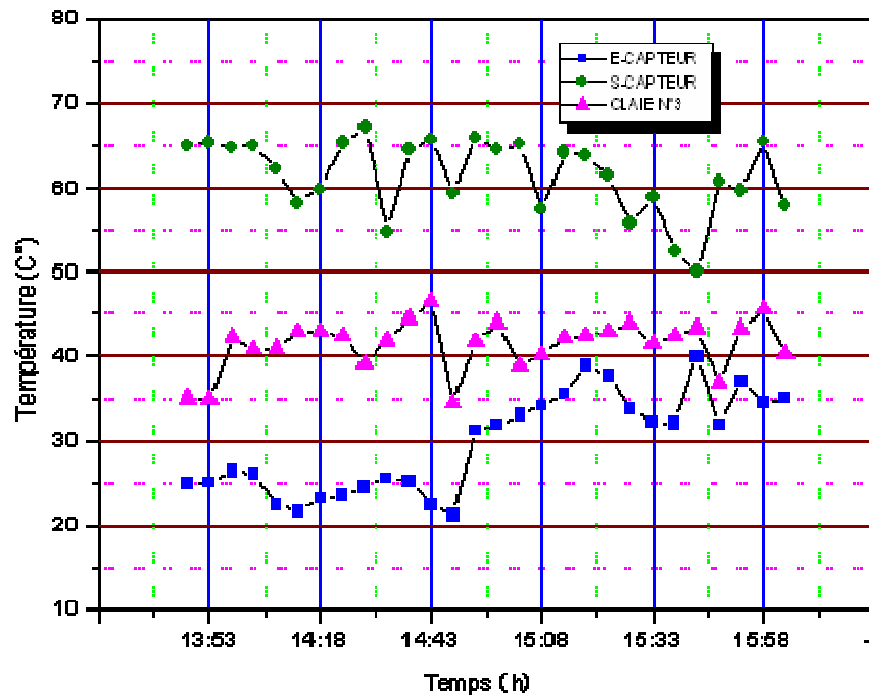


Figure 4.8 : L'évolution de la température dans le séchoir solaire pour la journée du 17 avril 2005

1.5.8. Influence des paramètres aérothermiques sur la durée de séchage

a. Influence de la température de séchage

Pour $V_{ecm} = 0,74$ m/s, $M_h = 100$ g, $X_r = 78\%$, la figure 4.9 illustre la variation de la teneur en eau pour les températures $T_{ecm} = 48^\circ\text{C}$ et $T_{ecm} = 35^\circ\text{C}$, les courbes gardent toujours la forme exponentielle, on remarque qu'une augmentation de 12°C dans la température de séchage entraîne une diminution de 95 minutes dans la durée de séchage du produit, ceci montre que la température de séchage est un paramètre important pour les transferts internes de l'eau pour la menthe. Ce résultat est confirmé par plusieurs chercheurs : H. Togrul, 2005, pour le séchage du pommes [36], S. Lahsasni et al. 2004, pour le séchage du "prickly pear" [37], I. Doymaz, 2005 pour le séchage du "okra" [38] et L. Bennamoun , A.Belhamri. 2003, pour le séchage de l'oignon [39].

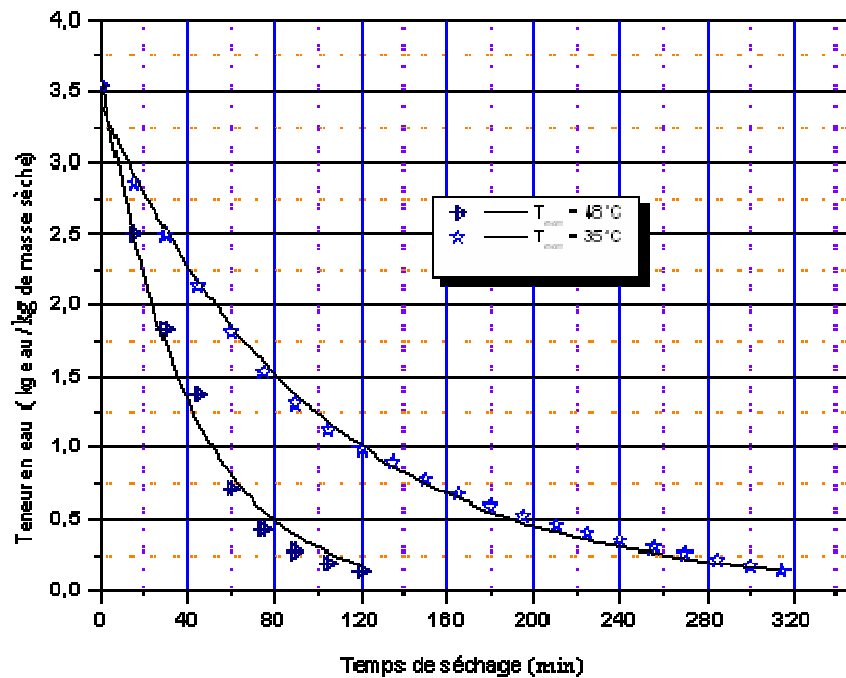


Figure 4.9 : Effet de la température de séchage à l'entrée de la chambre de séchage sur la variation de la teneur en eau au cours du temps pour la claie N°3 ($V_{air} = 0,74 \text{ m/s}$ - $M_h = 100\text{g}$ - $M_s = 25\text{g}$)

b. Influence de la vitesse de l'air

Pour $T_{ccm} = 48^\circ\text{C}$, $M_h = 100\text{g}$, $X_r = 78\%$, nous avons étudié l'influence de la vitesse de l'air asséchant sur la durée de séchage des feuilles de menthe (figure 4.10), nous observons sur la figure q'une élévation de $0,36 \text{ m/s}$ de la vitesse d'écoulement de l'air fait décroître la durée de séchage de produit pour 150 minutes, ce qui explique que l'augmentation de la vitesse de séchage favorise les échanges convectifs tout en accélérant le processus de séchage (40,41).

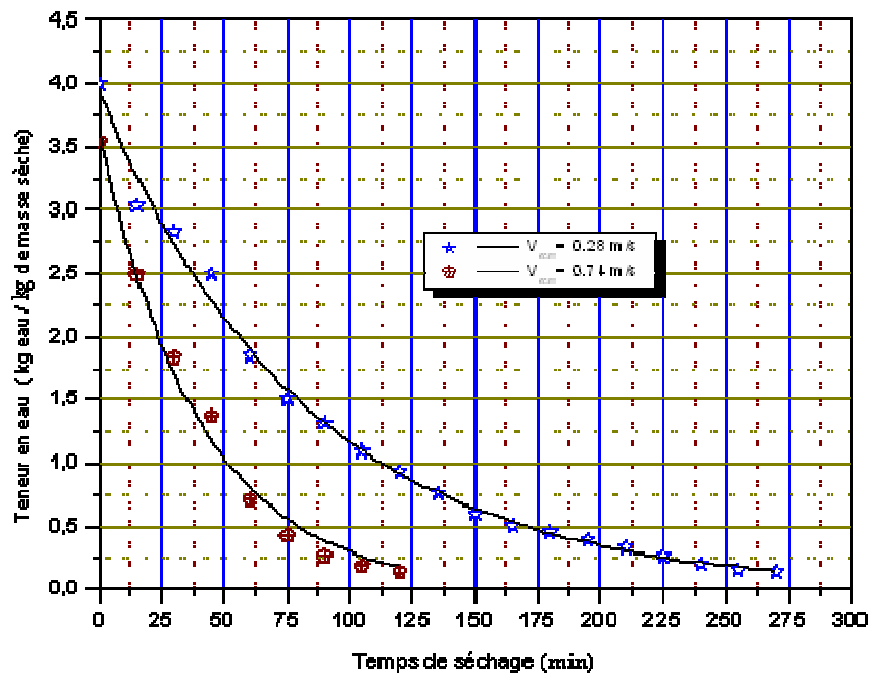


Figure 4.10 : Influence de la vitesse de l'air asséchant sur la variation de la teneur en eau au cours du temps pour la claie N°3
($T_{air} = 48^{\circ}\text{C}$ - $M_{th} = 100\text{g}$)

c. Influence de la masse totale dans la chambre de séchage

La figure 4.11 présente la variation de la teneur en eau pour différentes masses de feuilles de menthe dans la chambre de séchage, les courbes montrent que le temps de séchage augmente avec l'augmentation de la masse du produit dans la chambre, c-à-dire que le temps nécessaire pour évaporer l'eau d'une masse de 500g est supérieure à celle de 300g. En comparant ce résultat avec la figure 4.9 on constate que l'influence de la masse est plus faible que celle de la température.

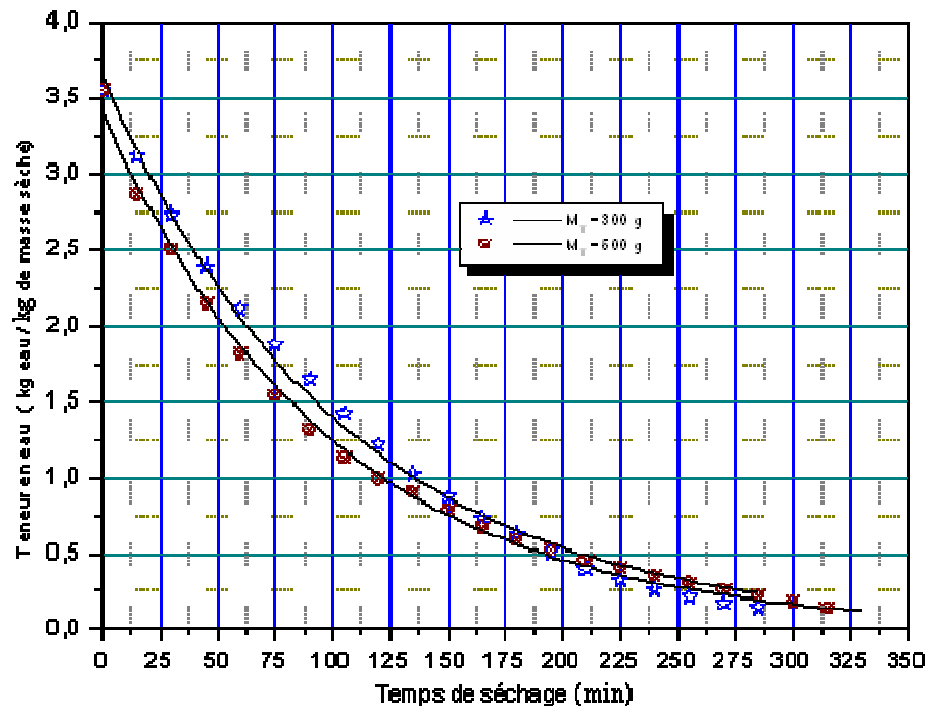


Figure 4.11 : Influence de la masse totale du produit sur la variation de la teneur en eau au cours du temps pour la claie N°3 ($T_{\text{éch.}} = 35$ - $V_{\text{éch.}} = 0.74\text{m/s}$)

d. Effets de la position des claies

La figure 4.12 représente la variation de la teneur en eau en fonction du temps pour les claies 1,3 et 5. On remarque qu'il n'y a pas une grande différence entre les teneurs en eau du produit d'une claie à l'autre, ce qui signifie que le séchage se fait d'une façon presque uniforme.

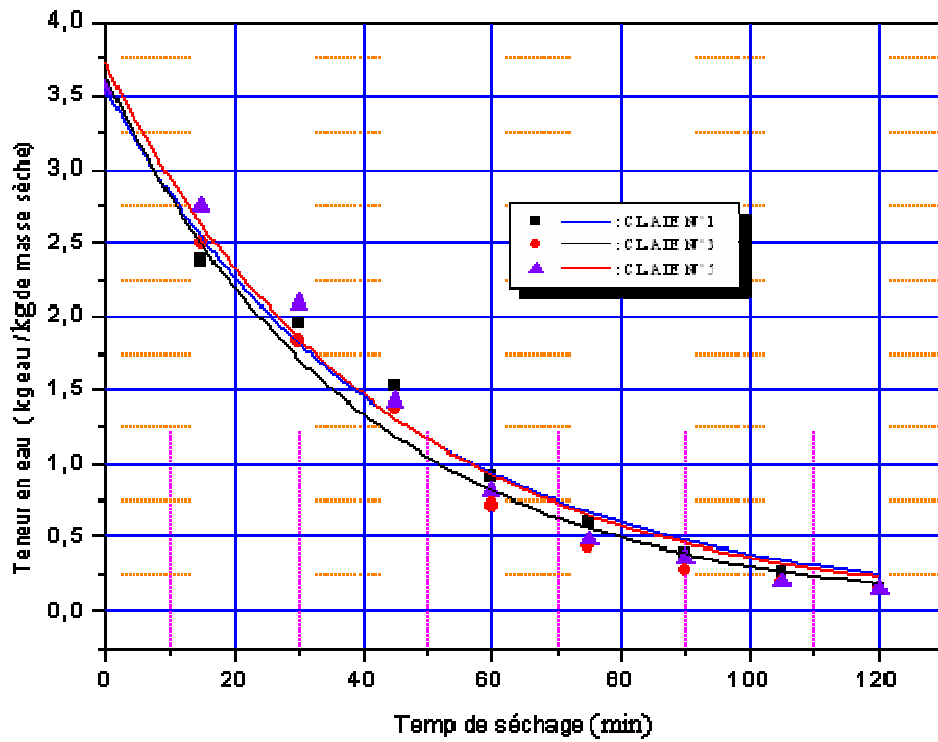


Figure 4.12 : Variation de la teneur en eau en fonction du temp d'une plante médicinale : MENTHE VERTE au niveau des claies 1,2 et 3
 $T_{\text{ess}} = 50^{\circ}\text{C} - M_{\text{th}} = 100\text{g} - M_{\text{s}} = 22\text{g} - V_{\text{ess}} = 0,74\text{m/s} - \text{Hr} = 5,9\%$

2. SECHAGE DE LA TOMATE

2.1. Préparation du produit

Les étapes nécessaires pour la préparation du produit sont :

- a. Le lavage du produit pour éliminer les impuretés, la boue, les résidus d'insecticides, et autres contaminations.
- b. Découpage de produit en rondelles de 1 cm d'épaisseur.
- c. Dépôt des rondelles sur les claies, la masse initiale du produit à sécher est de 2,980 kg par claie.

2.2. Protocole expérimental.

Pour suivre la perte de masse du produit au cours du séchage, nous avons effectués les mesures du poids chaque 30 minutes, et 60 minutes à la fin de la procédure à l'aide d'une balance de précision 0.1g. La durée de séchage est le temps nécessaire pour sécher un produit jusqu'à atteindre la teneur en eau finale souhaitée à une température de séchage inférieure ou égale à la température maximale tolérée par le produit, cette teneur finale pour la tomate est de 0,13 [42]

Les mesures de température, du rayonnement, et de la vitesse de l'air sont effectuées chaque 30 minutes.

Le protocole expérimental consiste à réaliser quotidiennement le séchage de produit entre 10h et 17h. A la fin de chaque journée le produit est stocké dans un endroit sec pour prévenir toute réhydratation. La manipulation est arrêtée lorsque la teneur en eau souhaitée est atteinte.

2.3. Appareillage de mesures

2.3.1. Mesure du rayonnement solaire

Le capteur solaire à air est incliné pour un angle de 31°, et orienté en plein sud, le rayonnement solaire global reçu sur ce plan horizontal est mesuré en kW/m² à l'aide d'un solarimètre.

2.3.2. Mesure de la vitesse et de la température de l'air dans le séchoir

La vitesse et la température de l'air sont mesurées dans plusieurs endroits du séchoir solaire :

- Entrée du capteur solaire : la mesure de la vitesse de l'air s'effectue à l'aide d'un anémomètre connecté à un appareil testo 435, et la mesure de la température à l'aide d'un thermomètre.
- Sortie du capteur solaire : Les mesures sont effectuées à l'aide d'un appareil testo 445 muni d'un anémomètre pour la mesure de la vitesse de l'air, et d'une sonde pour la mesure de la température. Les résultats obtenus sont enregistrés sur un ordinateur.
- Centre de la chambre : les mesures sont effectuées à l'aide d'un appareil testo 425 muni d'une sonde pour la mesure de la température et de la vitesse de l'air.
- Sortie du séchoir solaire : les mesures de la vitesse et de la température de l'air sont effectués à l'aide d'un anémomètre fixé à la sortie du séchoir solaire.

2.3.3. Mesure de la température du produit

Pour suivre l'évolution de la température à l'intérieur du produit, nous avons utilisé un appareil testo 945 muni d'un thermocouple piqué dans le produit, les résultats de mesures sont sauvegardés sur un P.C.

2.3.4. Les mesures externes

Les mesures externes sont effectuées à l'aide d'un appareil KIMO type LV 110 pour la mesure de la température et la vitesse de l'air, et d'un thermomètre pour la mesure de la température ambiante.

2.3.5. Mesure de l'humidité de l'air

Pour la mesure de l'humidité de l'air dans la chambre de séchage et à l'extérieur du séchoir solaire nous avons utilisé un hygromètre.

2.3.6. Détermination de la masse sèche du produit

La détermination de la masse sèche du produit s'effectue à l'aide d'un analyseur (type MA 45) d'humidité selon les étapes suivantes :

- Réglage de la température de l'analyseur d'humidité à 70° [42].
- Introduction d'une masse initiale de la tomate dans la chambre de l'analyseur.
- Démarrage de l'analyseur d'humidité en choisissant le programme convenable de chauffage.
- Arrêt automatique de l'appareil après que la masse de l'échantillon reste constante (pour notre expérience, le temps de cette opération est de 8h, 30 minutes).

2.4. Résultats expérimentaux

2.4.1. Variation de la teneur en eau dans le séchoir solaire

La figure 4.13 montre la variation de la teneur en eau en fonction du temps pour le séchage de la tomate, cette variation présente une courbe d'un polynôme de degré quatre dont les coefficients sont donnés par :

$$X = 12,65 - 1,155 t + 0,039 t^2 - 0,003 t^3 + 1,21 \cdot 10^{-4} t^4$$

$$R^2 = 0,999$$

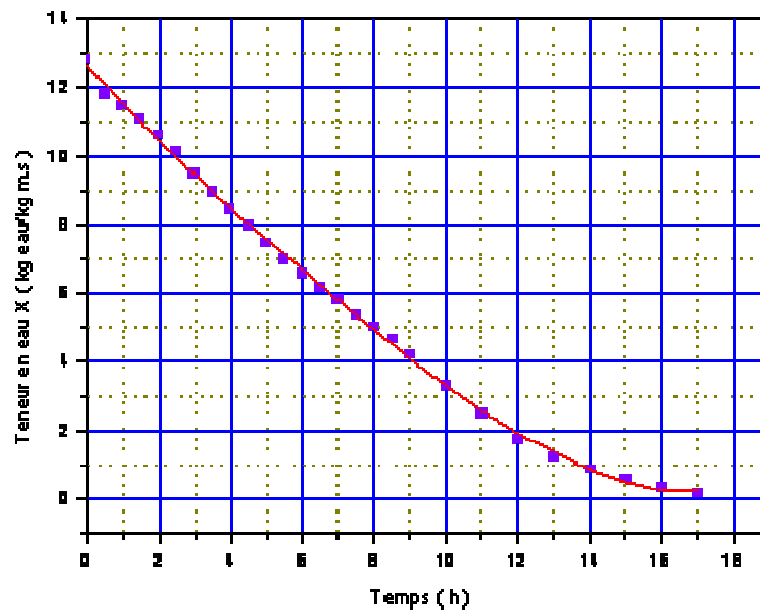


Figure 4.13: Variation de la teneur en eau pour la tomate en fonction du temps

La durée de séchage pour avoir une teneur finale $X_f = 0,13$ est de trois jours (17h). Pour le premier jour, on remarque sur la figure 4.14 une diminution de 12,8 à 5,8 kg eau / kg m.s qui correspond à 45% de l'humidité initiale, ce qui explique l'évaporation d'une quantité d'eau importante représentant une masse de 1510g (figure 4.15). Pour le deuxième jour la diminution de X est moins importante, elle varie de 5,79 à 0,89 kg eau / kg m.s , et la quantité d'eau évaporée est de 1058,6 g, et en fin pour le 3^{ème} jour, la courbe de la teneur en eau est assez uniforme et tend vers la teneur finale de séchage à 13^h, la quantité d'eau évaporée pendant cette période est faible (161,23 g).

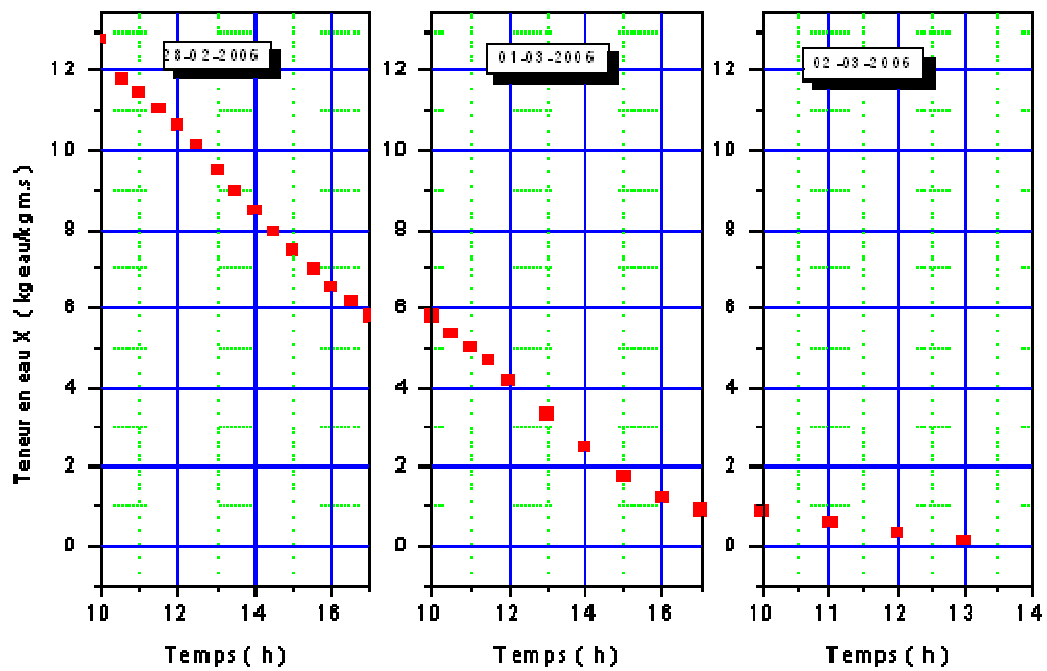


Figure 4.14 : Variation de la teneur en eau pour les trois jours de séchage

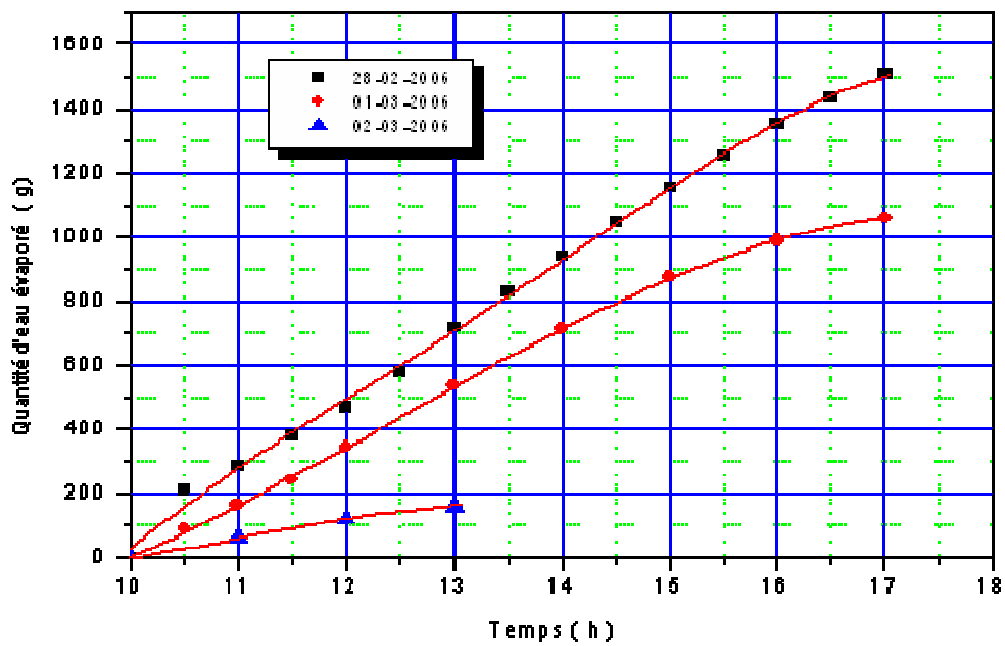


Figure 4.15 : La quantité d'eau évaporée pendant le séchage de la tomate

2.4.2. L'effet du rayonnement sur la température

La figure 4.16 montre la variation du rayonnement solaire global sur une surface horizontale en fonction du temps pour trois jours successifs (28 février, 1 et 2 mars 2006). Cette variation prend une forme gaussienne et atteint un maximum de 871 W/m^2 à $12^{\text{h}} 30$

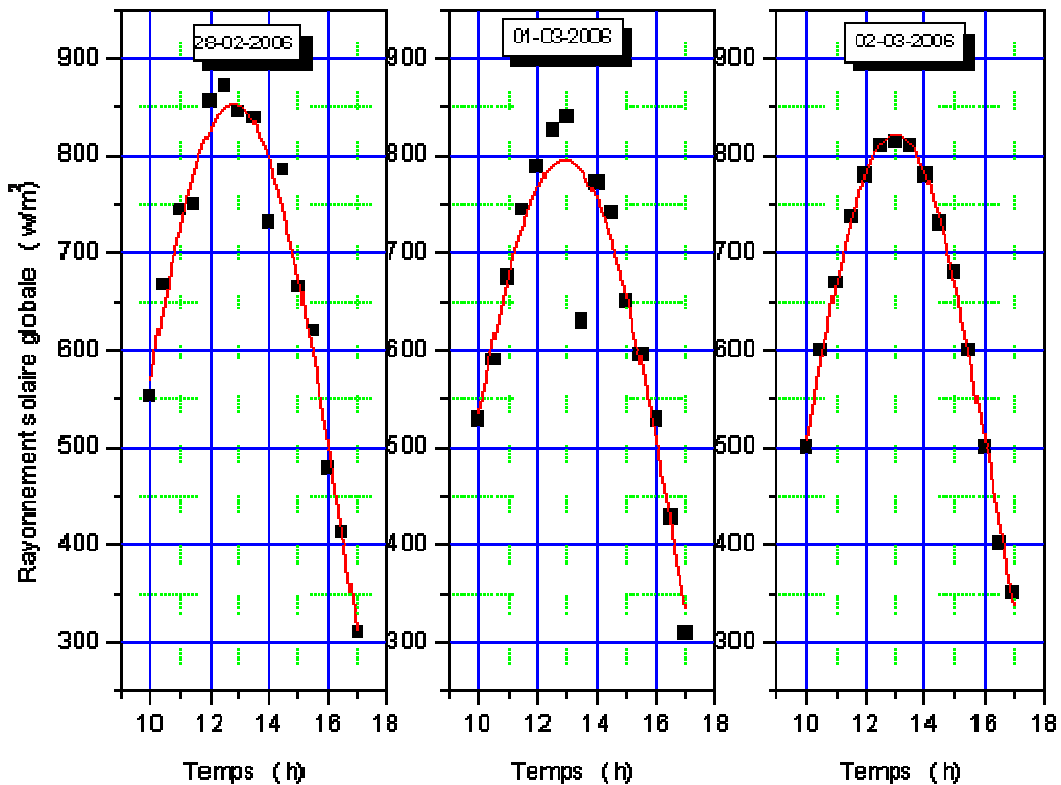


Figure 4.16 : Variation du rayonnement global en fonction du temps

T_{E-CHA} , T_{CNTR} , T_{S-CHE} et T_{amb} présentent dans la figure 4.17 le même comportement que celui du rayonnement solaire, leurs valeurs maximales sont respectivement $62,8$; $39,5$; 37 et 20°C dans l'intervalle de temps compris entre $12^{\text{h}} 30\text{min}$ et 14^{h} , les mêmes remarques sont observées durant le 2^{ème} et le 3^{ème} jour.

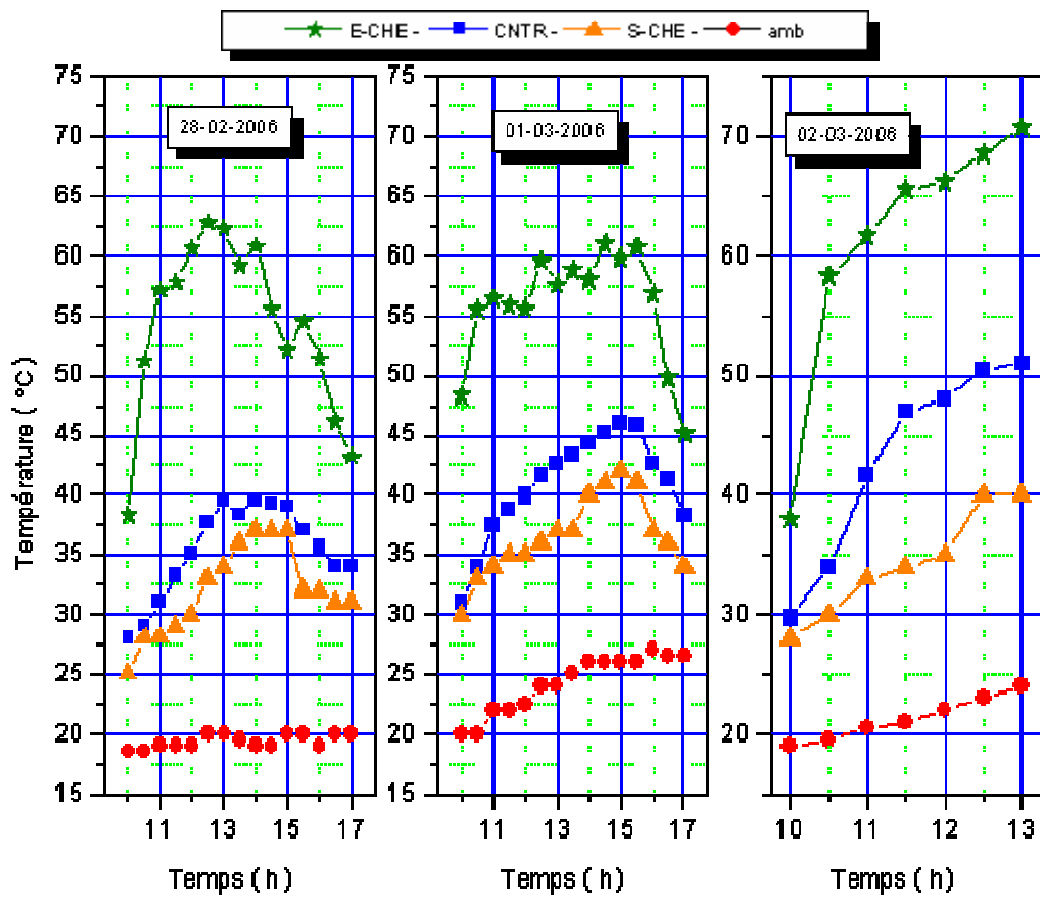


Figure 4.17 : Variation de la température en fonction du temps

2.4.3. Evolution de l'humidité relative du produit dans le séchoir solaire

La figure 4.18 montre l'évolution de l'humidité relative du produit (Teneur en eau à base humide) en fonction du temps pour les trois jours de séchage, la courbe présente une variation selon un polynôme de degré quatre de la forme :

$$X_r = 0,932 - 0,018 t + 0,004 t^2 - 4,262 \cdot 10^{-4} t^3 + 6,075 t^4$$

$$R^2 = 0,999$$

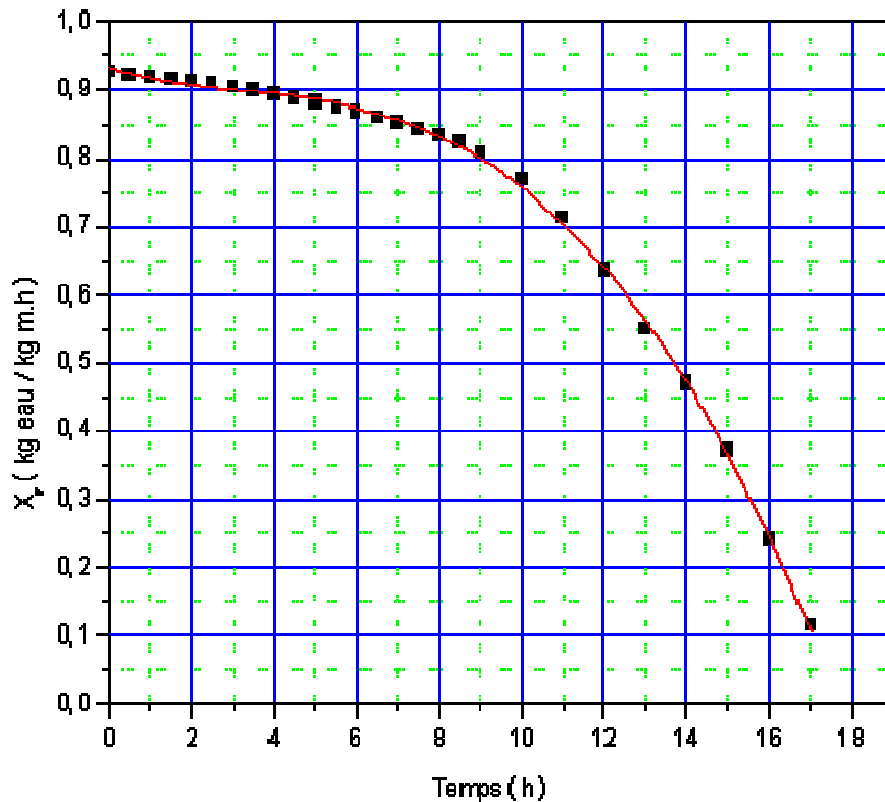


Figure 4.18: Evolution de l'humidité relative de produit dans le séchoir solaire en fonction du temps

La figure 4.19 illustre l'évolution de X_r pour chaque jours de séchage, on constate pour le 1^{ère} jour une faible diminution de $X_r = 8\%$ (de 92,75 à 85,31%), ce qui confirme l'évaporation importante de l'eau à partir du produit (X_r est inversement proportionnel à la quantité d'eau évaporée), le 2^{ème} jour présente une diminution de 41% par rapport à l'humidité initiale, et en fin pour le 3^{ème} jour, X_r est réduit de 37,96% et atteint sa valeur finale ($X_{rf} = 11,5\%$) à 13h.

On peut noter d'après les trois courbes, que le produit garde presque le même X_r durant leur stockage pendant la nuit.

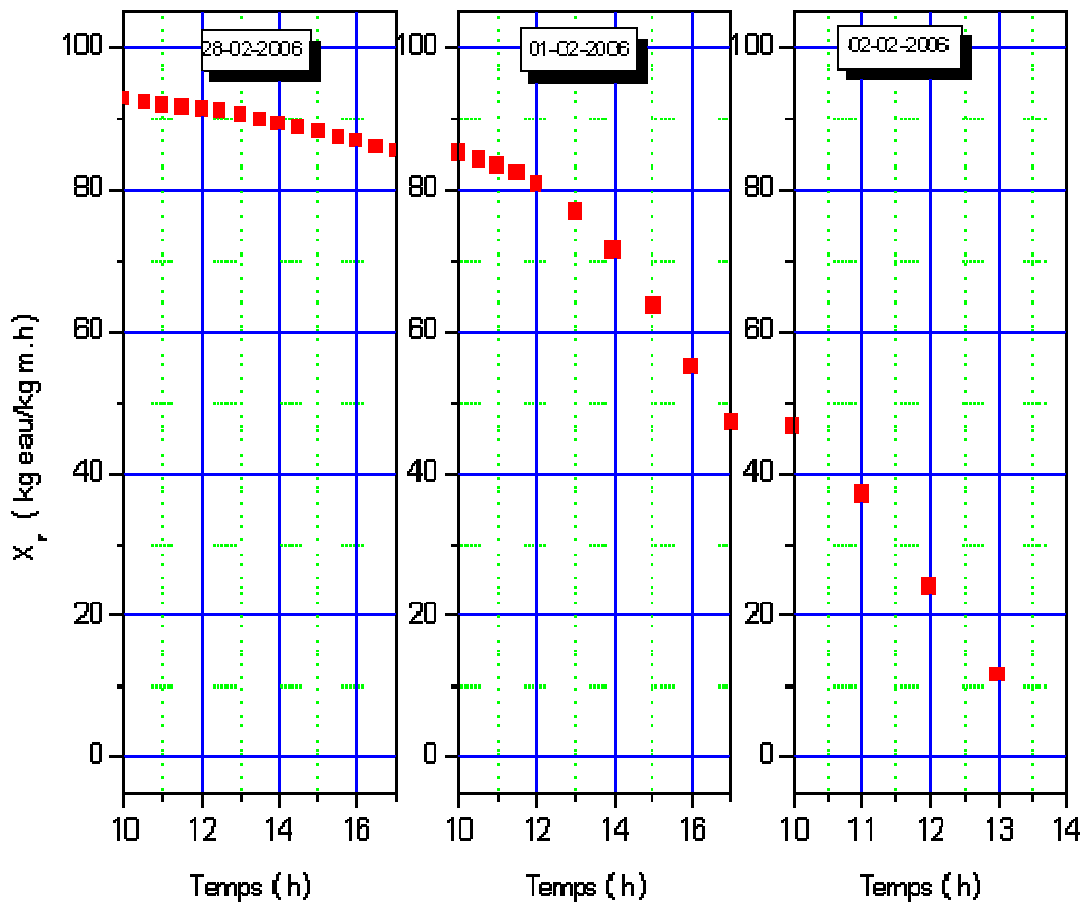


Figure 4.19 : Evolution de l'humidité relative du produit pour les trois jours de séchage

2.4.4. Evolution de l'humidité relative de l'air dans la chambre de séchage

La figure 4.20 présente la variation de l'humidité relative de l'air asséchant dans la chambre de séchage avec le temps pour les trois jours 28 février, 01 et 02 mars 2006; à partir de cette figure on constate que Hr diminue en fonction du temps jusqu'à une valeur minimale de $12^{\text{h}} 30 \text{ min}$ pour le premier jour où le rayonnement solaire et la $T_{E\text{-}CHA}$ présentent des valeurs maximales à ce moment.

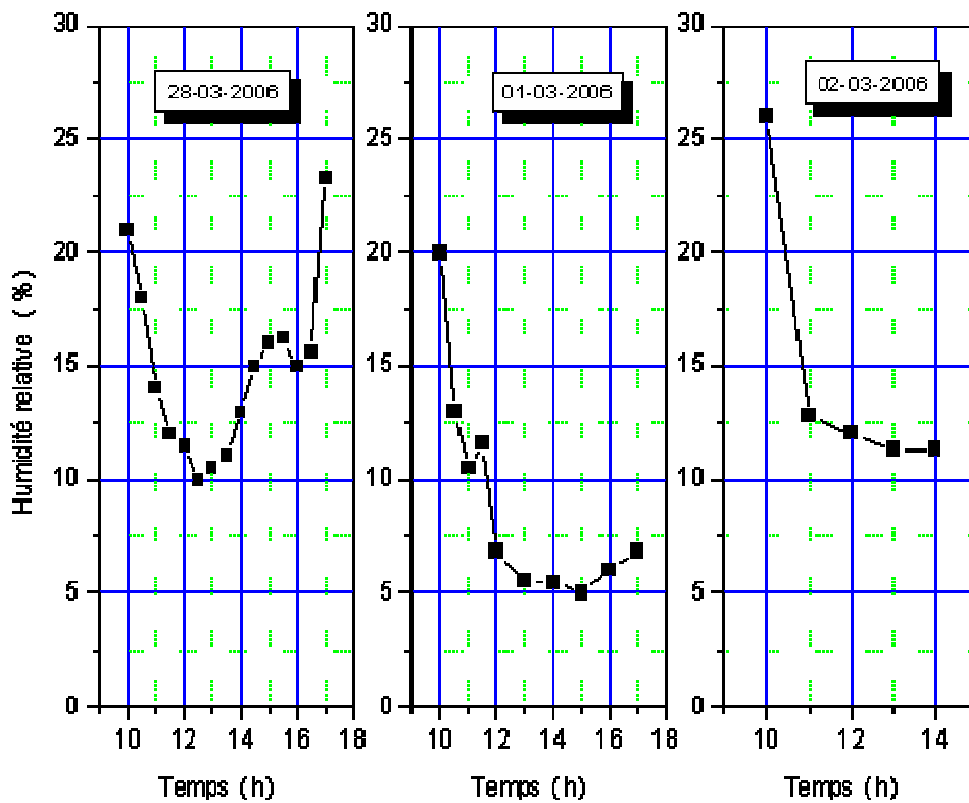


Figure 4.20 : Evolution de l'humidité relative de l'air dans la chambre de séchage

2.4.5. Evolution de la température dans le séchoir solaire

La figure 4.21 présente la distribution de la température dans le séchoir solaire pour les trois jours de séchage où la température de l'air asséchant est mesurée dans quatre positions, l'entrée du capteur solaire, l'entrée et le centre de la chambre; et la sortie de la cheminée solaire. Cette figure montre que T_{E-CAP} et T_{E-CHA} varie respectivement de 18 à 27°C et de 38 à 62°C, on constate un écart important entre l'entrée du capteur et l'entrée de la chambre. Ce-ci est dû à l'effet de l'absorbeur sur l'air circulant dans le capteur solaire. Cet écart atteint un degré maximal de 40°C à 12^h 30 min. Une diminution est observée pour la température de l'air au centre de la chambre puisque une quantité de chaleur est consommée par l'évaporation de l'eau à partir du produit. On peut noter aussi sur cette figure qu'une légère diminution de la température est apparaît à la sortie du séchoir, cela est justifié par l'augmentation de la vitesse de l'air dans le cheminé solaire par rapport à la chambre de séchage (figure 4.22). Le même comportement est observé pour le 2^{ème} et le 3^{ème} jour de séchage.

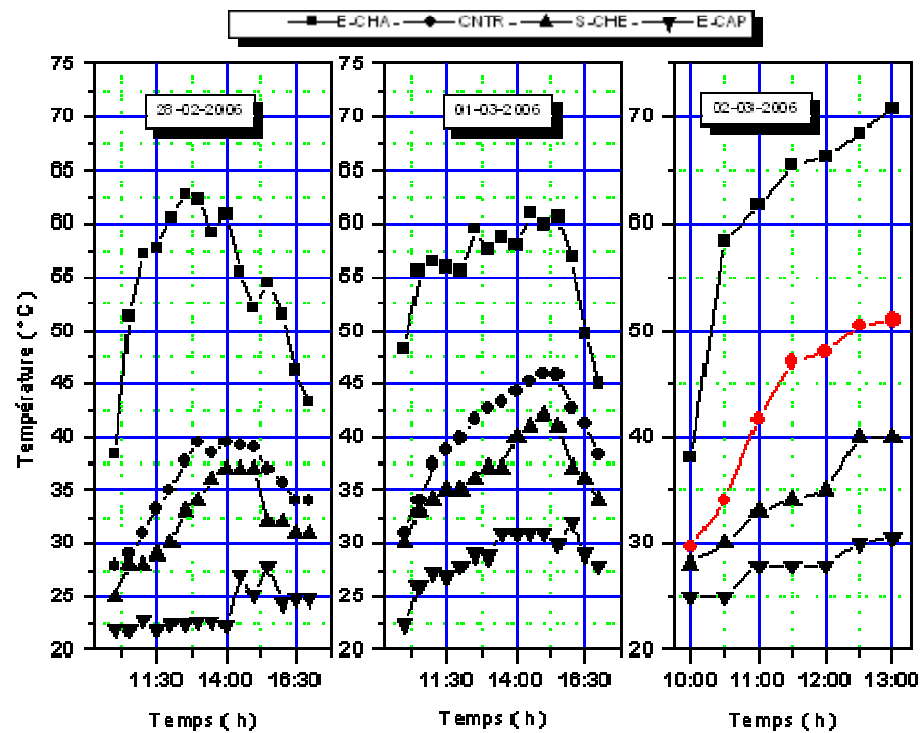


Figure 4.21 : Evolution de la température dans le séchoir solaire

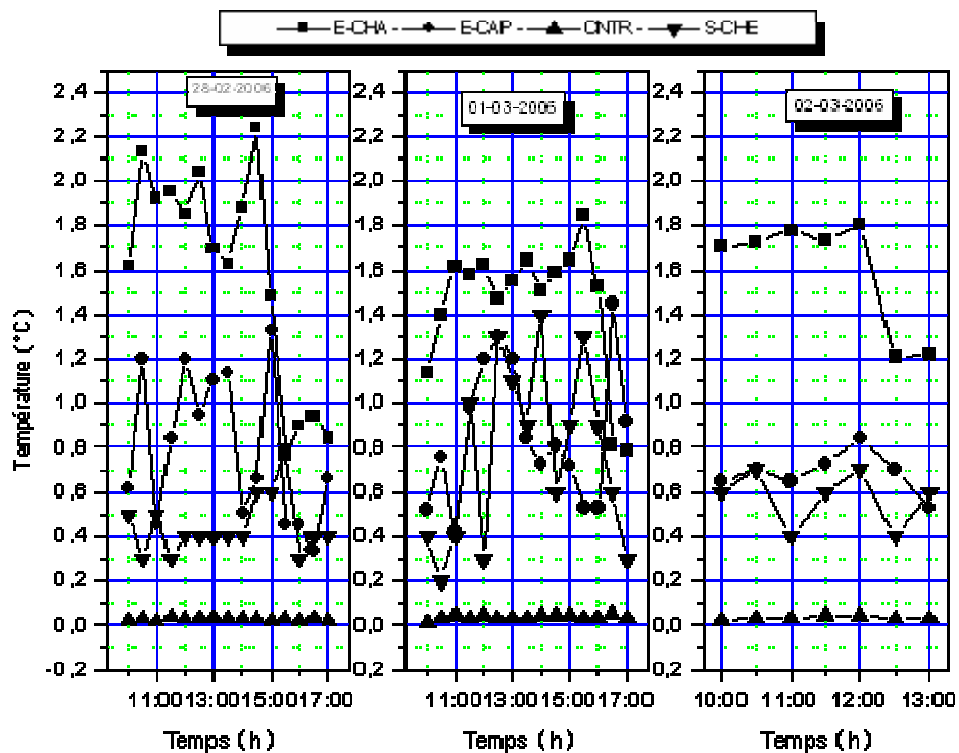


Figure 4.22 : Evolution de la vitesse de l'air dans le séchoir solaire

2.4.6. Variation de la température du produit au cours du séchage

La figure 4.23 illustre la variation de la température du produit à sécher pour les trois jours de séchage, les valeurs maximales de températures sont respectivement 33, 37 et 46°C. On remarque que les températures les plus élevées sont obtenues pour le 3^{ème} jour quand la teneur en eau est minimale. Ce résultat est prévu quand la teneur en eau diminue à fin que sa température augmente.

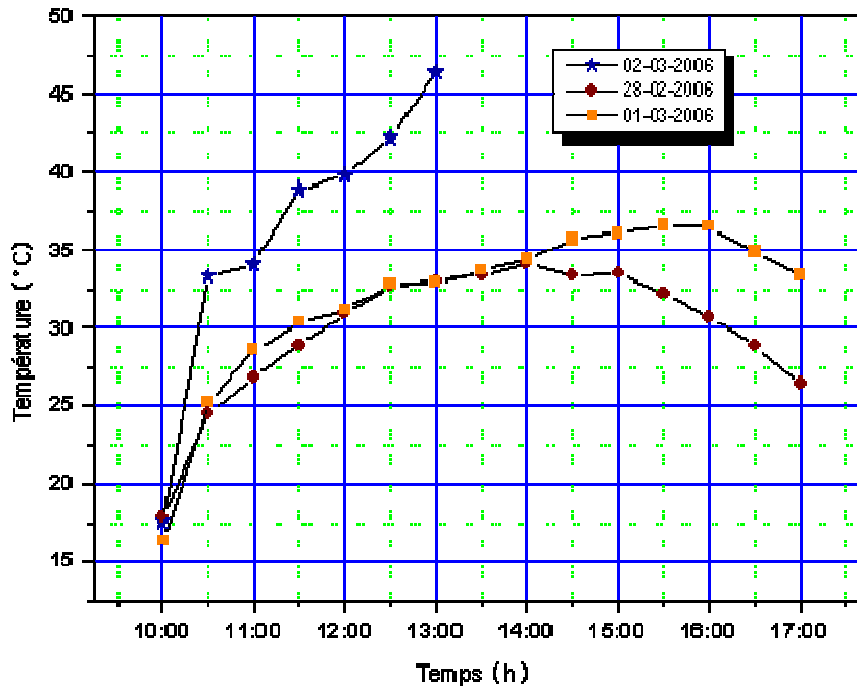


Figure 4.23 : Variation de la température du produit au cours du séchage de la tomate

2.4.7. Etude de la cinétique de séchage

La figure 4.24 présente la cinétique de séchage (vitesse de séchage) du produit pour les trois jours de séchage, on remarque sur cette figure l'absence de la période de mise en température, et la période à allure constante.

La courbe de cinétique de séchage montre, pour le premier jour une augmentation de la vitesse de séchage de 0.012 à 0.02 kg eau / kg eau.M.S.min entre 10^h 30 min et 12^h 30 min, ceci est expliqué par une perturbation dans la phase de ralentissement dû à une augmentation rapide de la température (de 51°C à 63°C). Pour le deuxième jour on remarque aussi une autre perturbation moins importante pendant une demi heure (de 11^h à 11^h 30 min).

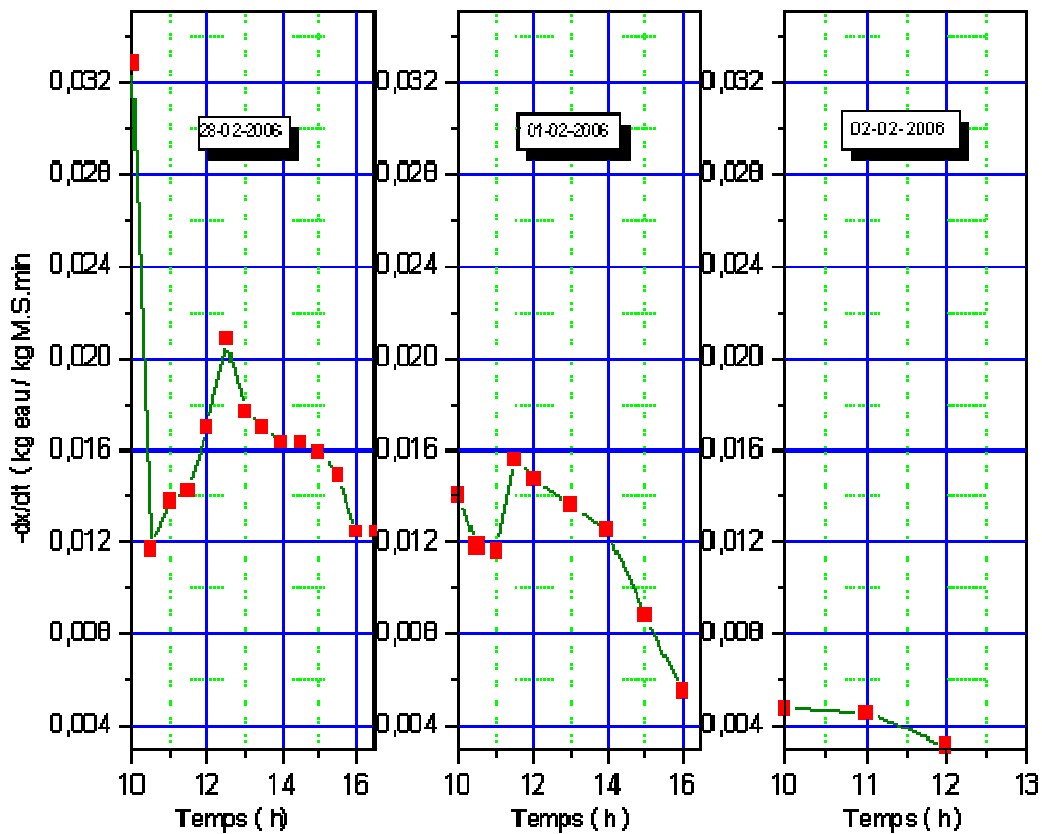


Figure 4.24 : Vitesse de séchage de la tomate pour les trois jours de séchage

2.4.8. Etude comparative du séchage direct au soleil, et du séchage indirect dans le séchoir solaire

La figure 4.25 illustre la variation de la teneur en eau (X) en fonction du temps pour les produits interne et externe.

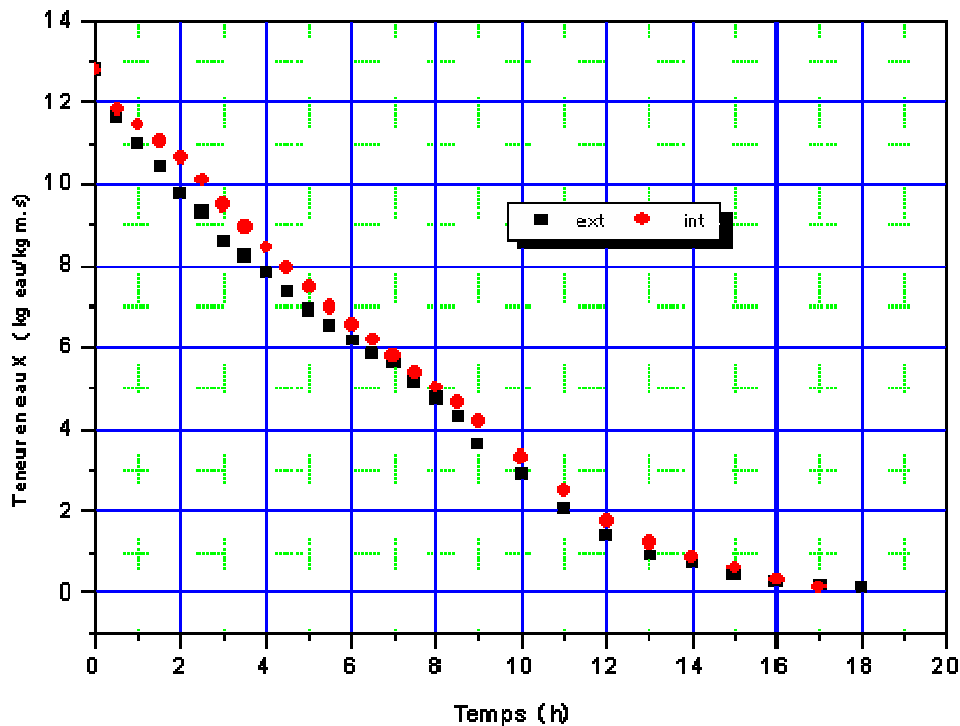


Figure 4.25 : variation de la teneur en eau en fonction du temps

Les temps de séchage pour avoir une teneur en eau finale $X_f = 13\%$ par les deux procédures, sont respectivement 17^{h} et 18^{h} : Ceci montre que le séchage indirect abaisse le temps de séchage de la tomate par rapport au séchage direct au soleil. On peut expliquer cette différence par les valeurs de température élevée et de l'humidité faible obtenues durant les expériences figures (4.26, 4.27). Ce résultat est en accord avec plusieurs travaux expérimentaux : Sacili et al. 2006, pour le séchage de la tomate [42] et Bala et al (2003) pour le séchage de l'ananas [31].

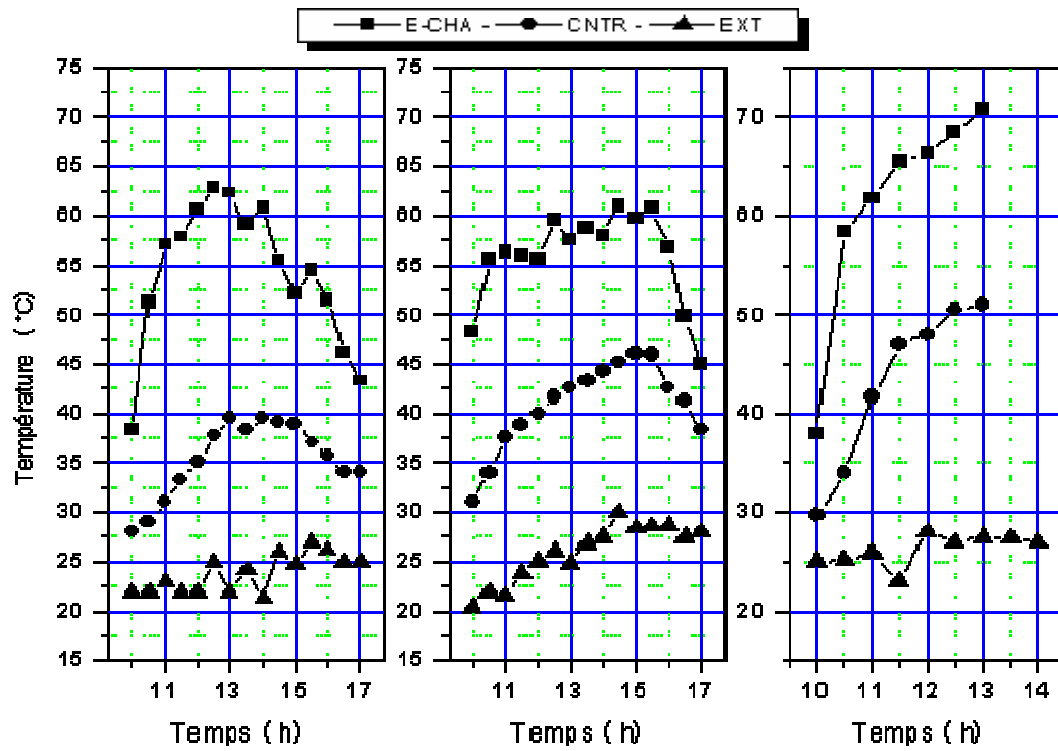


Figure 4:26 Evolution de la température

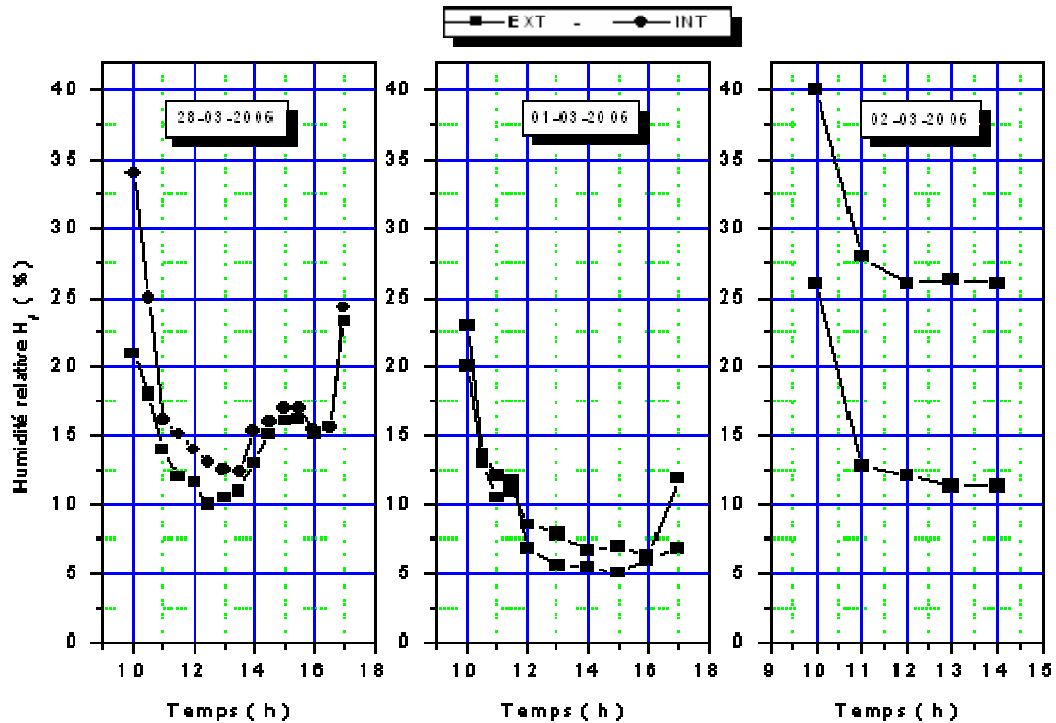


Figure 4.27 : Evolution de l'humidité relative de l'air à l'intérieur et l'extérieur de la chambre de la chambre de séchage

Nous constatons, d'après ces résultats de séchage de la tomate, une faible efficacité du séchoir solaire de l'ordre de 6%, ce-ci peut être expliqué par :

- la vitesse de l'air dans la chambre (environ 0,02 m/s) est très faible par rapport à la vitesse de l'air externe qui varie entre 0,26 m/s et 3,75 m/s (figure 4.26), et donc cette vitesse importante favorise les échanges convectifs dans le séchage externe, ce qui conduit à une accélération du processus de séchage.

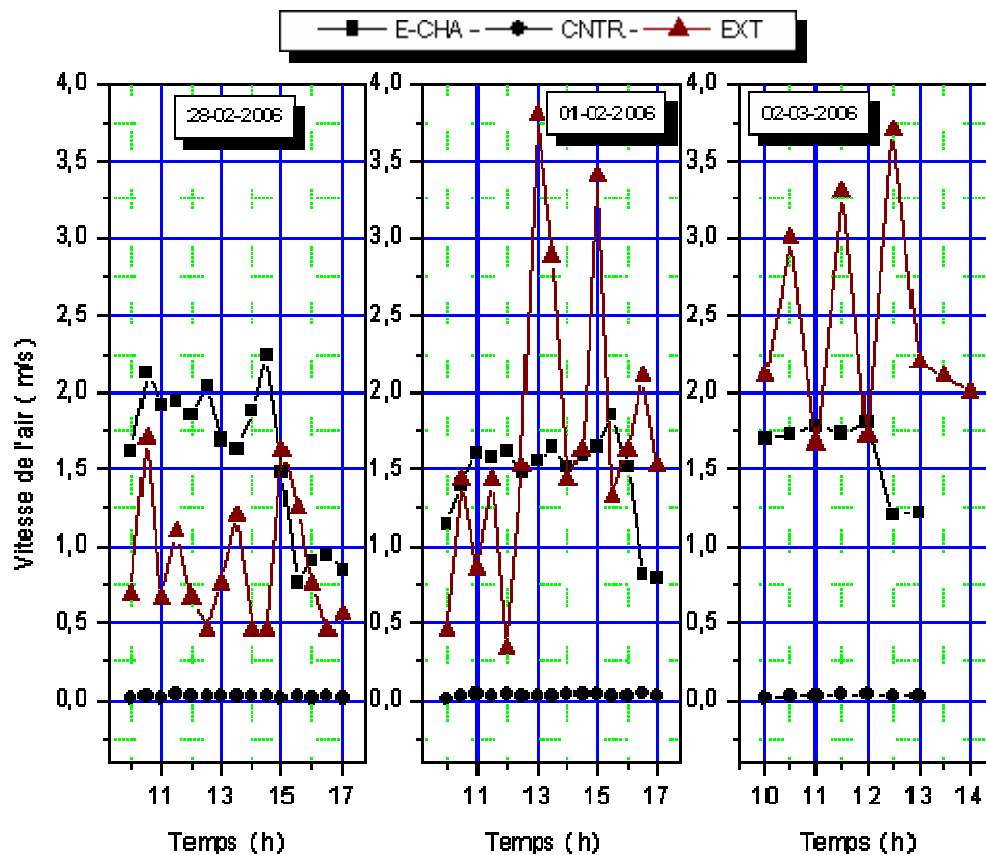


Figure 4.28 : Distribution de la vitesse de séchage à l'intérieur et l'extérieur du séchoir solaire

- L'écart d'humidité relative de l'air est faible pour le premier et le deuxième jour (figure 4.27)

CONCLUSION

CONCLUSIONS

Le séchage solaire est un moyen rentable pour la valorisation des produits agroalimentaires et les plantes médicinales, il permet de sauvegarder les éléments nutritionnels du produit. Les séchoirs solaires indirects à convection naturelle sont bien adaptés à ce type de séchage notamment dans les régions arides et semi-arides qui disposent d'un gisement solaire important.

Dans notre travail, et durant l'opération de séchage nous avons respectés la teneur finale des produits (14% pour la menthe verte et 13% pour la tomate). Cette dernière est la valeur optimale pour laquelle le produit ne se détériore pas et garde ses qualités nutritionnelles (la couleur, le goût, l'odeur, les huiles essentielles, etc.).

Les résultats expérimentaux nous amènent aux conclusions suivantes :

- L'étude cinétique de séchage solaire de la menthe verte et de la tomate montrent la présence unique de la phase de ralentissement, et l'absence de la phase de mise en température du produit et la phase à allure constante.
- La durée de séchage dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels on peut citer : la masse du produit, la vitesse de l'air asséchant, ainsi que sa température.

A l'issue de cette étude expérimentale nous avons également comparé la durée de séchage de la tomate par deux procédés différents (direct et indirect). Nous avons constaté que celle-ci est assez grande dans le cas de séchage solaire que dans le cas de l'utilisation du séchoir.

Par ailleurs, malgré la détermination des paramètres influencent sur la durée de séchage et pour améliorer les performances du séchoir solaire, il serait indispensable d'attribuer des modifications sur notre dispositif.

Afin d'augmenter la vitesse de l'air asséchant à travers le produit à sécher, il est nécessaire de réduire la surface de la chambre de séchage et d'augmenter sa hauteur pour maintenir la capacité du séchoir solaire.

Nous suggérons aussi, de prévoir un appareillage bien dimensionné en fonction d'un ensemble de produits à sécher, notamment les produits en surproduction qui demandant ce type de traitement.

L'orientation moderne de la consommation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales se dirige vers les produits quasi-biologiques dont notre pays a commencé à développer ce domaine.

En vue de conserver leurs cycle naturel de production et vu leurs impact économique et médicinales, nous suggérons une industrialisation des procédures de séchage solaire qui va permettre un développement de l'exportation, ainsi que l'économie national.

REFERENCES

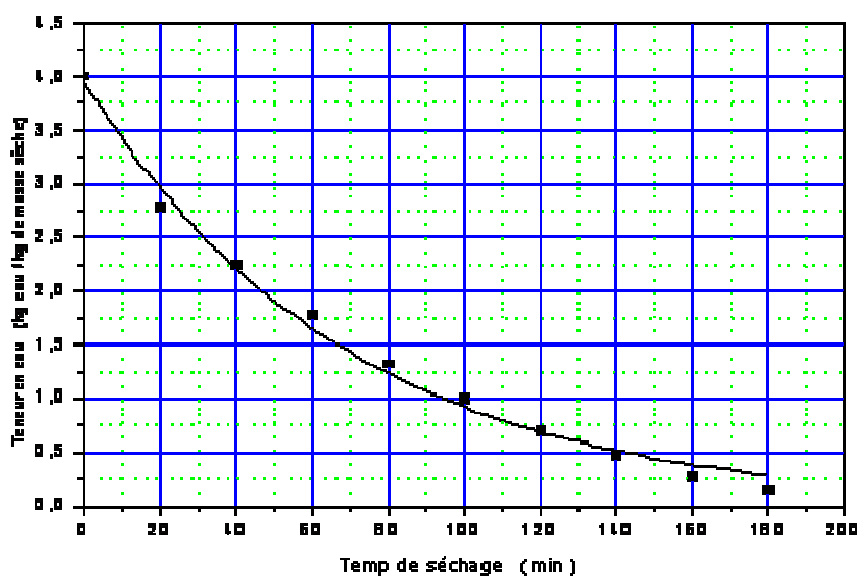
- [1] M. Daguene, "Les séchoirs solaires : théorie et pratique ", Publication de l'UNESCO, Paris, France (1985).
- [2] D. R. P. Angavhance, R. L. Ssawhucy, P. N. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer ", Energy 27 (579-590) – (2002).
- [3] A. A. El-Sebau, S. A. Enein, M. R. I. RamadabnH. G. El-Ohary, "Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer", Energy conversion and management 43 (2251-,2266) - (2002).
- [4] A. Madhlopa, S.A.Jones, J.D.K. Saka, "A solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration", Renewable energy 27 (27,37) (2002).
- [5] I. T. Togrul, D. Pehlivan, "Mathematical modeling of solar drying of apricots in the layers", Journal of food engineering 55 (209-216) (2002).
- [6] M. Kouhila, A. Belghit, M.Kaoua et M.Daguene, "Etude expérimentale du séchage convective de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire", Rev.energ.ren : Physique énergétique (1998).
- [7] M. Kouhila, A. Belghit, et M.Daguene, "Determination expéremmentale et théorique des courbes de sorption et de la cinétique de séchage de la menthe verte", Entropie, 233 (20-31) - (2001).
- [8] B. Eyglunent, "Manuel de thermique : théorie et pratique", Hermes science publication, Paris, France, (1997).
- [9] W. Maake, H. J. Echert, et J. L. Cauchepin, "Manuel technique du froid", Tome I, PYC Edition, Alamand (2001).
- [10] J. L. Bal, B. Chabot, "Les énergie renouvelables", Sciences de la terre et des plantes, 333 (872-834) - (2001).
- [11] B. Multon, "L'énergie sur la terre : Analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique", Revue 3EL (1998).
- [12] A. A. Sfeir, G. Guarracino, "Ingénierie des systèmes solaire, application à l'habitat", Technique et Documentation, Paris, France, (1981).
- [13] P. H. Communay "Héliothermique, le gisement solaire, méthode et calculs" Groupe de Recherche et D'édition, France (2002).
- [14] A. Labouret, M. Viloz, "Energie solaire photovoltaïque", Dunod, Paris, France (2003).
- [15] G. Arditti, "Technologie chimique industrielle, tome III", Edition Eyrolles, Paris, France, (1972).

- [16] W. L. McCabe, J. C. Smith, et P. Harriott, "Unit operation of chemical engineering ", Hill Book Company (1985).
- [17] J. P. Nadeau, J. R. Puiggali, "Séchage des processus physiques aux procédés industriels", Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, France, (1995).
- [18] A. Ferradji, A. Malek, " Isothermes d'adsorption des abricots sec à 25°C et 45°C ", Rev. Eng. Ren. 8 (39 - 48) - (2005).
- [19] M. Kouhila, A. Belghit, M. Daguene and B. C. Boutaleb, "Experimental determination of the sorption isotherms of mint, sage, and verbena", Journal of food engineering. 47 (281- 287) - (2001).
- [20] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz and M. Filyou, "Moisture adsorption - desorption isotherms of prickly pear cladode (opuntia ficus indica) at different temperature ", Energy Conversion and Management. 44 (923 - 936) - (2001).
- [21] S. Azzouz, A. Guizani, W. Jomaa and A. Belghith, "Moisture diffusivity and drying of grapes", Journal of Food Engineering. 55 (323 - 330) - (2002).
- [22] L. A. Mohamed, M. Kouhila, AJamali, S. Lahsasni and M. Mahrouz, "Moisture sorption isotherms and heat of sorption ", Journal of Food Engineering. 67(491-498)-(2005).
- [23] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz and N. Kechaou, "Experimental study and modeling of adsorption and desorption isotherms of prickly pear peel ", Energy Conversion and Management. 55 (201 - 207) - (2002).
- [24] B. Touati, "Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe", Thèse de Magistère, Centre Universitaire, Bechar, Algérie (2001).
- [25] A. Madhlope, S. A. Jones, and J. D. Kalenga Saka "A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration ", Renewable Energy, 27 (27 - 37) - (2001).
- [26] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz, A. Idlimam and A. Jamali, "Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel ", Energy 29 (211 - 244) - (2004).
- [27] D. R. Pangavhane, R. L. Sawhney, "Review of research and development work on solar dryers for grape drying ", Energy Conversion and Management, 43(45 - 61) - (2002).
- [28] O. V. Ekechukwn, B. Norton, "Review of solar energy systems II : an overview of solar drying technology", Energy Conversion and Management, 40 (615 - 655) - (1999).
- [29] P. Dudez, "Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés", Edition du Gret, France (1999).
- [30] 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).

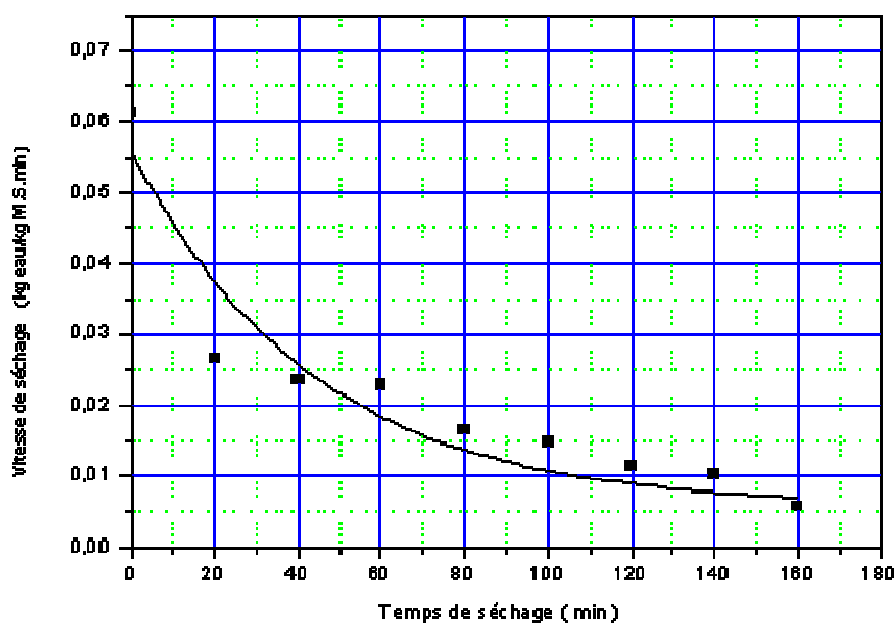
- [31] I. N. Simatc "Optimization of mixed mode and indirect mode natural convection solar dryers ", Renewable Energy, 28 (435 - 453) - (2003).
- [32] D. R. Pangavhanc, R. L. Sawhcy and P. N. Sarsavadia, "Design, development and performance testing of new natural convection", Energy 27(579-590) (2002).
- [33] E. Akpinar, A. Midilli and Y. Bicer, "Single layer drying behaviour of potato slices in a convective dryer and mathematical modeling", Energy Conversion and Management, 44 (1687 - 1705) - (2003).
- [34] T. T. Togrul, D. Rehlivan, "Modeling of drying kinetics of single apricot", Journal of Food Engineering. 58(23 - 32) - (2003).
- [35] I. Doymaz, "Sun drying of figs : an experimental study", Journal of Food Engineering. 71(403 - 407)-(2005).
- [36] H. Togrul, "Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices", Journal of Food Engineering. 71(311 - 323)-(2005).
- [37] S. Lahsasni, M. Kouhila, M. Mahrouz and J. T. Jaouhqri, "Drying kinetics of prickly pear fruit", Journal of Food Engineering. 61(173 - 179)-(2004).
- [38] I. Doymaz, "Drying characteristics and kinetics of okra", Journal of Food Engineering. 69(275 - 279)-(2005).
- [39] I. Bennamoun, A. Belhamri "Design and simulation of a solar dryer of agriculture products, Journal of Food Engineering. 59(259 - 266)-(2003).
- [40] S. Timoumi, D. Mihoubi, and F. zagrouba "Simulation model for a solar drying processus", Desalination. 168(111 - 115)-(2004).
- [41] A. Belghit, M. Belahamid, A. Bennis, and B. BoutalebDoymaz and S. Benet "Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée", Ren.Gen.Ther. 36(837 - 850)-(1997).
- [42] K. Sacilik, R. Keskin and A. K. ElicinBennis "Mathematical modeling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato", Journal of Food Engineering. 73(231 - 238)-(2003).

ANNEXE A

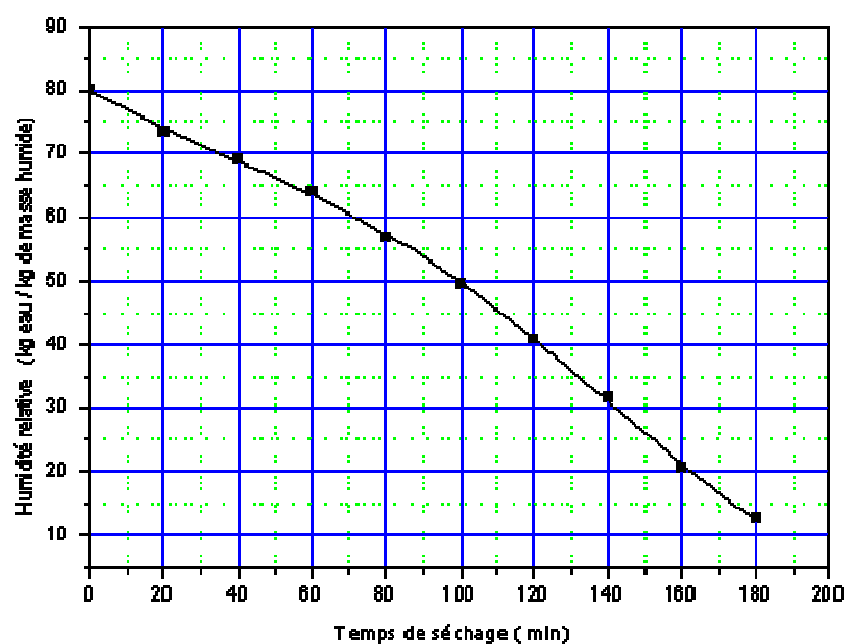
Résultats expérimentaux du séchage de la menthe verte



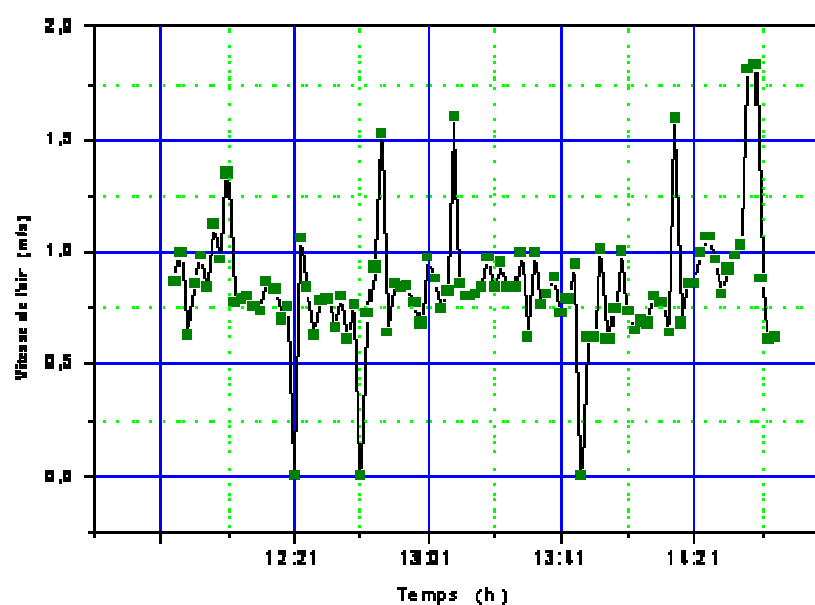
Variation de la teneur en eau en fonction du temps
d'une plante médicinale : MENTHE VERTE
au niveau de la claie n°3
pour la journée du 14 avril 2005
 $T_{\text{air}} = 46^{\circ}\text{C}$ - $M_{\text{h}} = 150\text{g}$ - $M_{\text{s}} = 30\text{g}$ - $V_{\text{air}} = 0.84\text{m/s}$ - $H = 4.5\%$



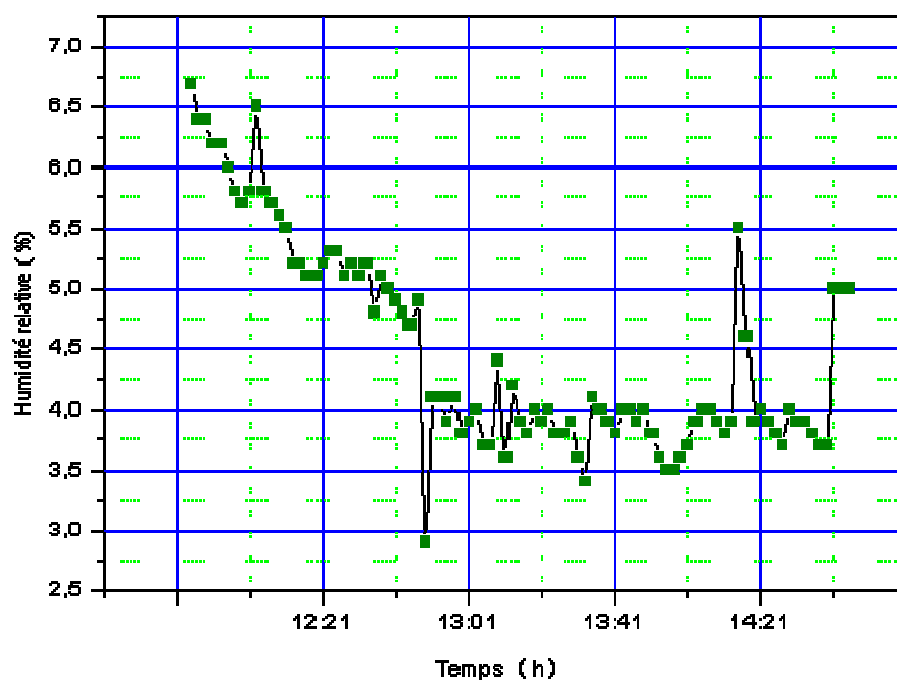
Variation de la vitesse de séchage d'une plante médicinale: MENTHE VERTE
au niveau de la claie n°3 pour la journée du 14 avril 2005
 $T_{\text{air}} = 46^{\circ}\text{C}$ - $M_{\text{h}} = 150\text{g}$ - $M_{\text{s}} = 30\text{g}$ - $V_{\text{air}} = 0.84\text{m/s}$ - $H = 4.5\%$



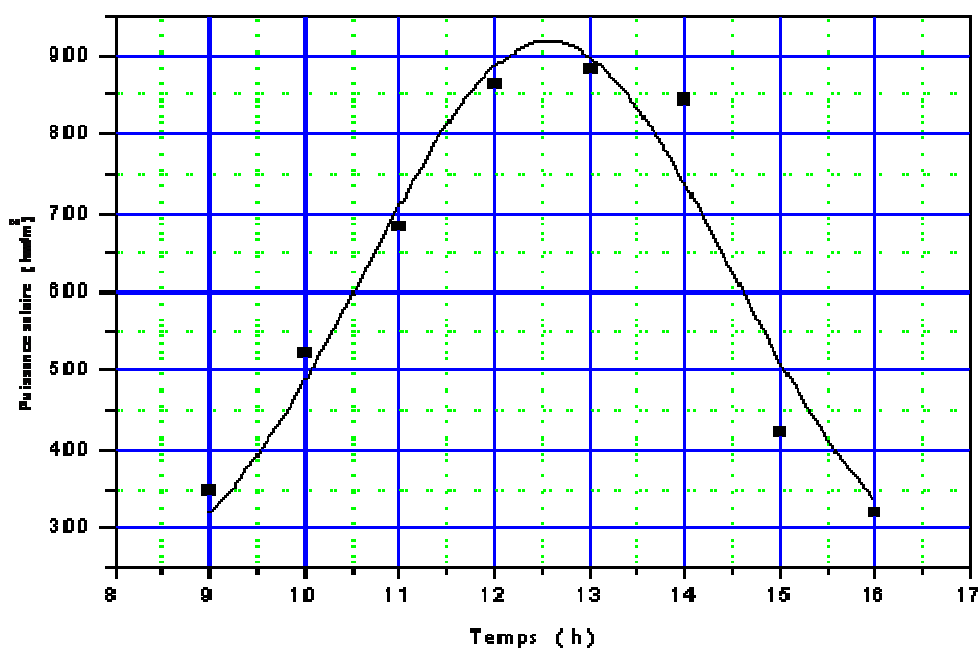
Evolution de l'humidité relative d'une plante médicinale
MENTHE VERTE au niveau de la claie n°3
 pour la journée du 14 avril 2005
 $T_{\text{est}} = 46^{\circ}\text{C}$ - $M_{\text{th}} = 150\text{g}$ - $M_{\text{s}} = 30\text{g}$ - $V_{\text{est}} = 0.84\text{m/s}$ - $H = 4.5\%$



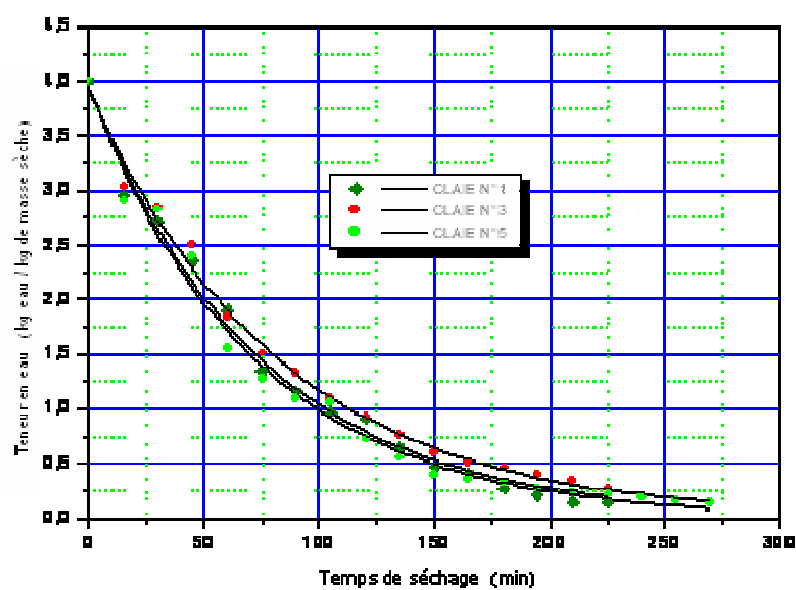
Variation de vitesse de l'air en fonction
 du temps à l'entrée de la chambre de séchage
 pour la journée du 14 avril 2005



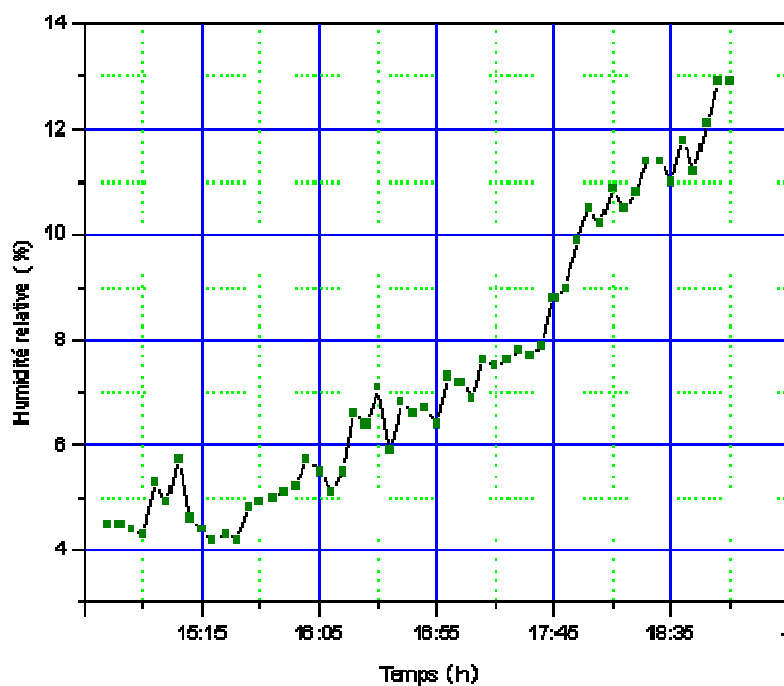
Variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage en fonction de temps pour la journée du 14 avril 2005



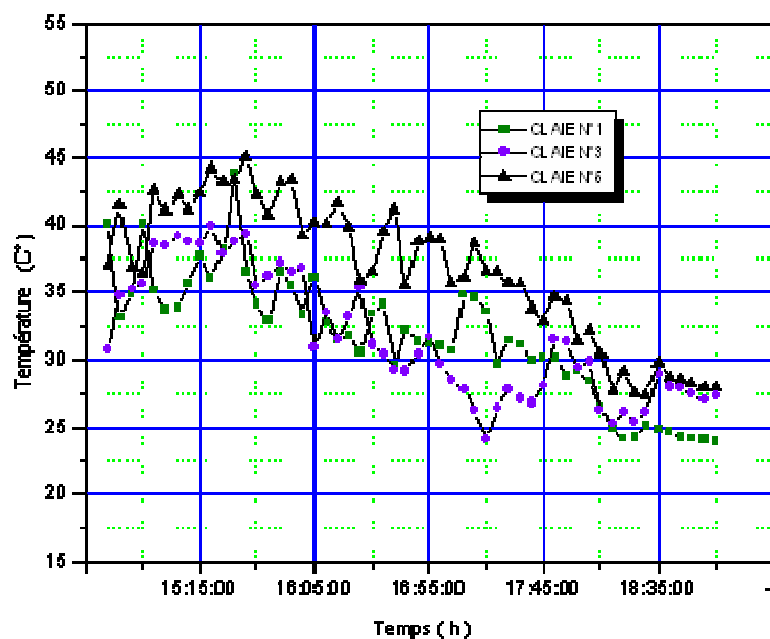
Variation du rayonnement global en fonction du temps pour la journée du 14 avril 2005



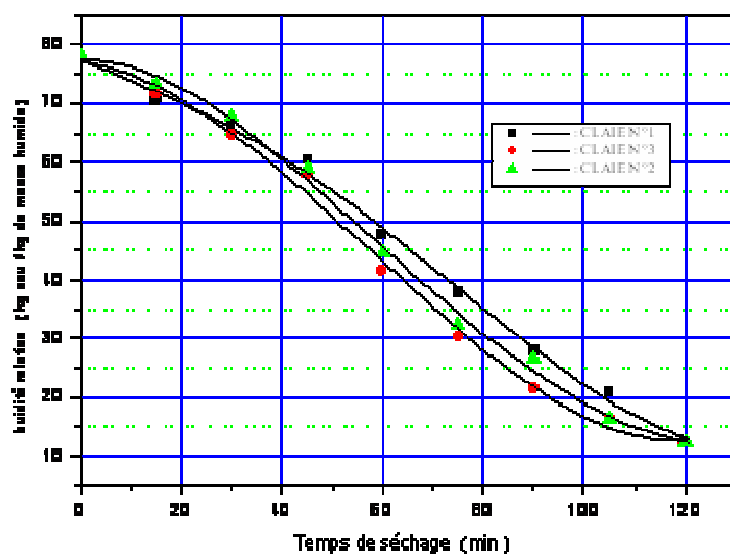
Variation de la teneur en eau en fonction du d'une plante
médicinale MENTHE VERTE au niveau des claies 1,2 et 3
pour la journée du 20 avril 2005
T_{esm}=48, M_{ih}=100g, M_s=20g, V_{esm}=0.28m/s, H_r=7.36%



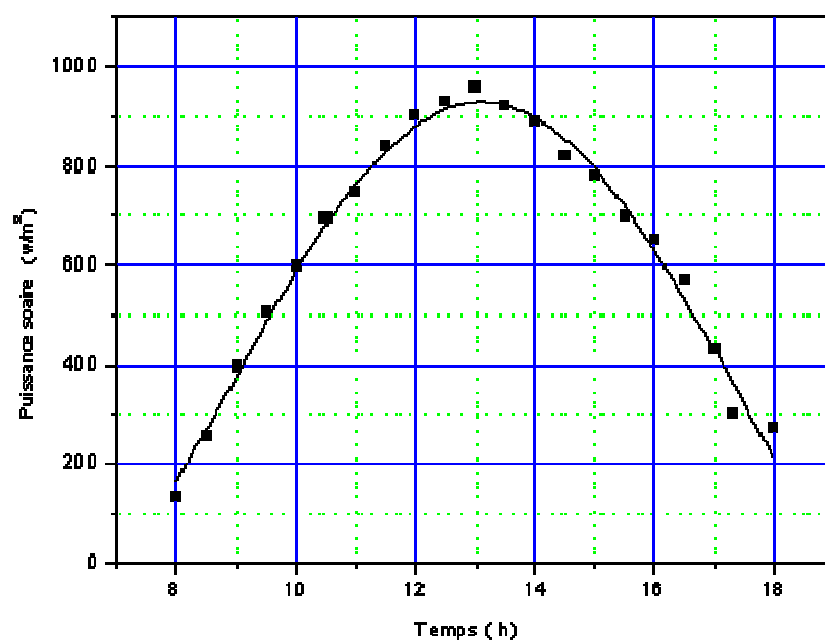
Variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée
de la chambre de séchage fonction du temps
pour la journée du 20 avril 2005



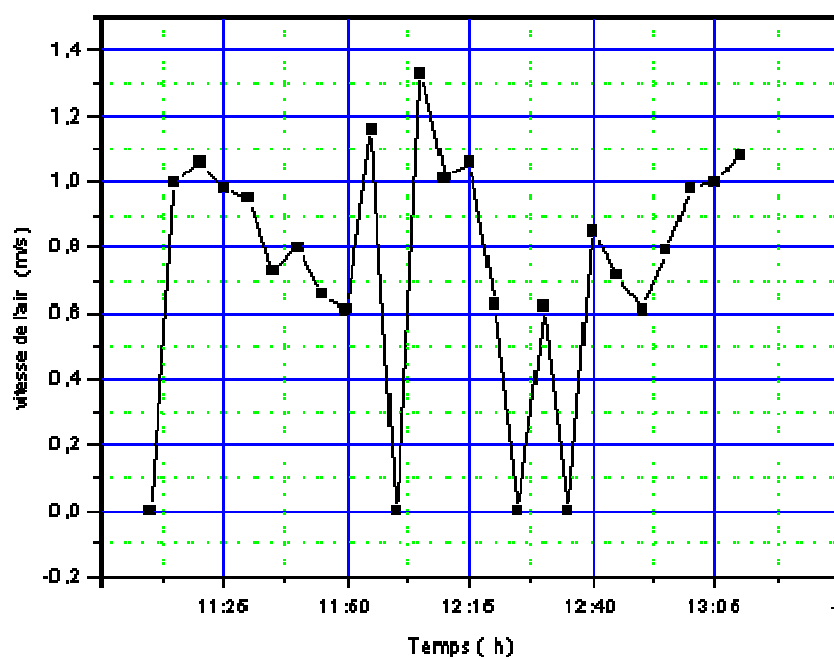
L'évolution de la température dans la chambre de séchage pour la journée du 20 avril 2006



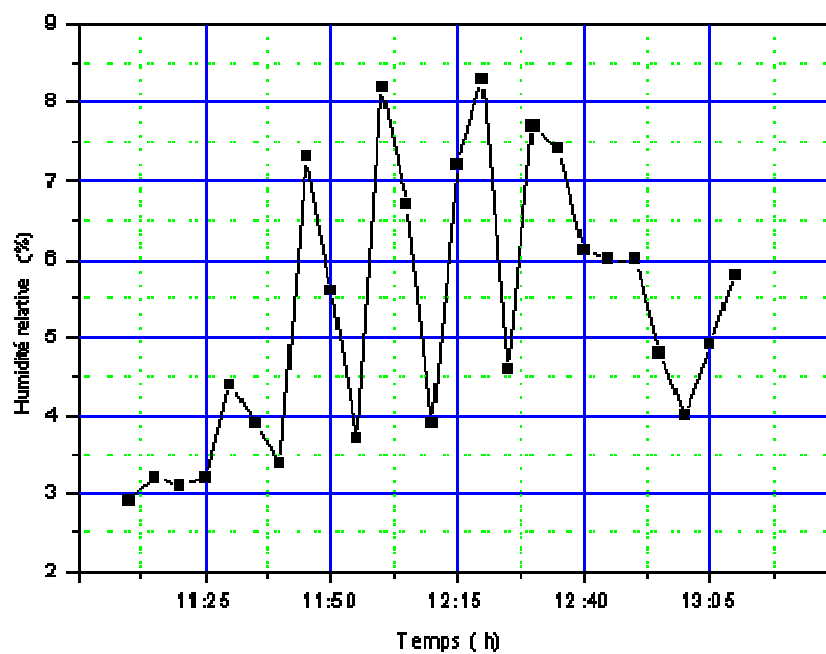
Evolution de l'humidité relative d'une plante médicinale MENTHE VERTE au niveau des claies 1,2 et 3 pour le 25 avril 2005
 $T_{\text{amb}}=50\text{C}^{\circ}$ - $M_{\text{a}}=100\text{g}$ - $M_{\text{b}}=22\text{g}$ - $V_{\text{amb}}=0.74\text{m}^3/\text{s}$ - $H_{\text{a}}=5.3\%$



Variation du rayonnement global en fonction du temps
pour la journée du 25 avril 2005



Variation de vitesse de l'air en fonction
du temps à l'entrée du séchoir
pour la journée du 25 avril 2005



Variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée de la chambre de séchage en fonction du temps pour la journée du 25 avril 2005

ANNEXE B

1. Le dispositif expérimental



Le séchoir solaire



Le capteur solaire



La chambre de séchage



Les clais de la chambre de séchage

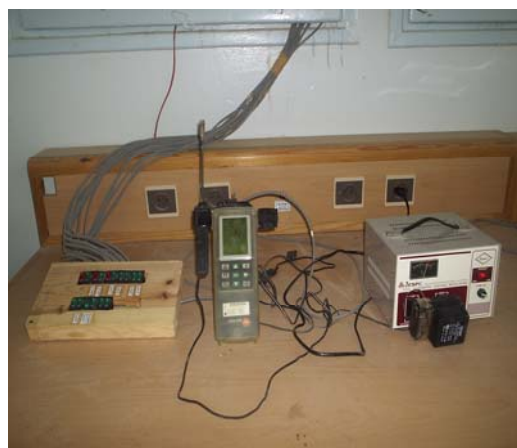
2. Les instruments de mesures



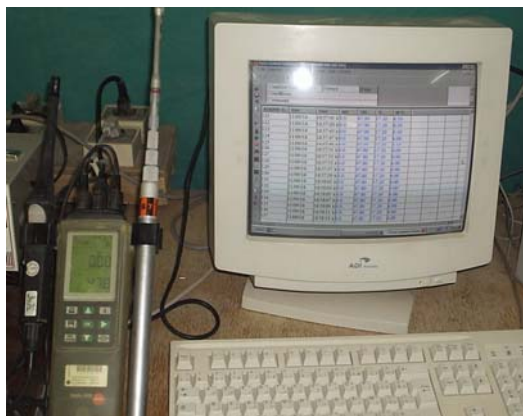
Appareil d'affichage



Solarimètre



Appareil testo 445



Appareil testo 645



Analyseur d'humidité



Appareil testo 435



Anémomètre manuel



Appareil testo 445



Appareil testo 425



Appareil testo 945



Appareil KIMO de type LV 110

Résumé

Ce travail représente une étude expérimentale du procédé de séchage en vue de la valorisation des plantes médicinales (menthe verte) et les produits agro-alimentaires (tomates), dans un séchoir solaire indirect à convection naturelle, le principe objectif étant d'une part l'étude de la cinétique de séchage de ces deux produits et d'autre part l'influence des paramètres opératoires sur la durée de séchage de la menthe verte.

Les variations de la teneur en eau du produit et celle du rayonnement solaire ainsi les évolutions de la température, de la vitesse et de l'humidité relative de l'air asséchant, en fonction du temps pour chaque produit sont présentés et commentés .

L'efficacité du séchoir solaire, est déterminée par une étude comparative entre le temps de séchage direct de la tomate au soleil et le temps de séchage mesuré dans le séchoir solaire.

Les résultats expérimentaux montre que :

- Le cinétique du séchage, présente uniquement l'existence de la troisième phase (ralentissement) pour les deux produits.
- Les facteurs influant sur la durée de séchage sont : la masse de produit, la vitesse de l'air asséchant et sa température.

Mots clés : séchage, menthe, tomate, plantes médicinales, séchoir solaire

Abstract

This work presents the results of an experimental study for valorization of medicinal plants (mint) and processed foodstuffs products (tomatoes) by an indirect solar dryer in natural convection, the main objective is to study the drying kinetics of these products, and to determine the impact of different parameters on the time of drying of mint.

The variations of the water content in the product, the solar radiance and the evolutions of the temperature, the velocity and the relative humidity of air drying air, according to the time for every product are presented and commented.

The effectiveness of solar drying is determined by a comparative study in the time between the open sun drying of tomatoes and the drying inside the solar dryer.

The experimental results show that:

- The drying process took place in the falling rate period.
- Les parameters influencing on the time of drying are the mass of product, the velocity and the temperature of drying air.

Keywords: Drying, mint, medicinal plants, tomatoes, solar dryer.

ملخص

()

() -

-
-

- - - - :