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

UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATEIRE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE

Thème

Détermination expérimentale et modélisation des isothermes de sorption de l'absinthe (*Artémisia absinthium*) à différentes températures

Soutenu le : / 05 / 2017

Présenté par :

BOUSSAID Zahia

KHALDIA Faiza

Encadré par : Mr. MEDIANI Ahmed

Président: Mr. BOUSSAID Mohammed

Examinateur: Mr. OMARI Boumediene

Examinateur: Mr. LARBI Ahmed Amine







SOMMAIRE

TITRE	PAGE
LISTE DES TABLEAUX	I
LISTE DES FIGURES	Ii
NOMENCLATURE	Iii
Introduction générale	01
Chapitre I Étude bibliographique	
I.1. Introduction	03
I.2. Généralité sur le séchage	
I.2.1. Définition	04
I.2.2. L'air humide	04
I.2.3. Caractérisation des solides humides	07
I.2.4. Cinétique du séchage	09
I.2.5. Séchage des produits agro- alimentaires	11
I.3 .Activité de l'eau et isotherme sorption	
I.3.1 .Activité de l'eau dans le produit	12
I.3.2. Teneur en eau	13
I.3.3. Isothermes de sorption	13
I.4.chaleur isostérique	20
I.5.Conclusion	20
Chapitre II Mode expérimentale	
II.1. Introduction	22
II.2.Le produit utilise	
II.2.1.L'absinthe (Artémisia absinthium)	22
II.3.Description du mode opératoire	
II.3.1.Préparation des solutions acide sulfurique	23

SOMMAIRE

II.3.2. Préparation des échantillons de l'absinthe	26
II.3.3. Préparation du dispositif expérimentale	27
II.5.Conclusion	29
Chapitre III Résultats expérimentaux et discussion	
III.1. Introduction	30
III.2.La composition physicochimique de l'absinthe	30
III.3.Masses sèches des échantillons de l'absinthe	32
III.4. Masses humides et masses d'eau à l'équilibre des échantillons de l'absinthe	33
III.5. Teneurs en eau à l'équilibre des échantillons de l'absinthe	34
III.6. Isotherme de désorption de l'absinthe à trois températures	35
III.7 Modélisation des courbes de sorption	
III.7.1. Modèles de description des isothermes de sorption	38
III.7.2.Résultats de la modélisation	47
III.8.Conclusion	47
Conclusion générale	49
Références	51
Annexes	I

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Modèles de la sorption	19
Tableau II.1	Valeurs théorique [27] et expérimentale de l'aw de	25
	solution d'acide sulfurique en fonction de la concentration	
	(% volume/volume)	
Tableau III.1	Les masses constituantes de l'absinthe	30
Tableau III.2	La composition physicochimique de l'absinthe	31
Tableau III.3	Valeurs des masses sèches de tous les échantillons à	32
	40°C, 50 °C et à 60°C	
Tableau III.4	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à	33
	l'équilibre de l'absinthe à T = 40 °C	
Tableau III.5	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à	33
	l'équilibre de l'absinthe à T = 50 °C	
Tableau III.6	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à	34
	l'équilibre de l'absinthe à T = 60 °C	
Tableau III.7	Teneurs en eau à l'équilibre obtenues pour dix humidités	34
	relatives et à trois températures de travail	
Tableau III.8	paramètres estimés et les critères pour les modèles de	41
	teneur en humidité d'équilibre des données de désorption	
	d'absinthe à T=40°C	
Tableau III.9	paramètres estimés et les critères pour les modèles de	44
	teneur en humidité d'équilibre des données de désorption	
	d'absinthe à T=50°C	
Tableau III.10	paramètres estimés et les critères pour les modèles de	47
	teneur en humidité d'équilibre des données de désorption	
	d'absinthe à T=60°C	

LISTE DE FIGURES

Figures	Titres	Page
Figure I.1	Isotherme de sorption-désorption	08
Figure I.2	Cinétique de séchage	09
Figure I.3	Activité de l'eau dans le produit	12
Figure I.4	le produit et un air en équilibre	12
Figure I.5	Les isothermes d'adsorption / désorption	14
Figure I.6	Schéma d'expérimentale des isothermes de sorption	15
Figure I.7	Schématisation de la phase de désorption	16
Figure I.8	Schématisation de la phase d'adsorption	17
Figure. II.1	Préparation des solutions d'acide sulfurique	24
Figure II.2	Mesure des humidités des solutions d'acides	26
Figure II.3	Préparation des échantillons de l'absinthe	27
Figure II.4	La disposition des échantillons dans l'étuve	27
Figure II.5	Les échantillons dans l'étuve régulée à 105°C	28
Figure III.1	La composition physicochimique de l'absinthe	32
Figure.III.2	Isotherme de désorption de l'absinthe : Points expérimentaux à T= 40 °C	35
Figure.III.3	Isotherme de désorption de l'absinthe : Points expérimentaux à T= 50 °C	35
Figure.III.4	Isotherme de désorption de l'absinthe : Points expérimentaux à T= 60 °C	36
Figure.III.5	Influence de la température sur les isothermes de désorption du l'absinthe	37
Figure.III.6	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle GAB à (T = 40°C)	39
Figure.III.7	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle Peleg à (T = 40°C)	39
Figure.III.8	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle Langmuir à (T = 40°C)	40
Figure.III.9	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle BET modifie à (T = 40°C)	40
Figure.III.10	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle GAB à (T = 50°C)	42
Figure.III.11	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle Peleg à (T = 50°C)	42
Figure.III.12	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle Langmuir à (T = 50°C)	43
Figure.III.13	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle BET modifie à (T = 50°C)	43
Figure.III.14	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle GAB à (T = 60°C)	45
Figure.III.15	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle Peleg à (T = 60°C)	45
Figure.III.16	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle Langmuir à (T = 60°C)	46
Figure.III.17	Isotherme de désorption de l'absinthe (<i>Artémisia absinthium</i>) de modèle BET modifie à $(T = 60^{\circ}C)$	46

NOMENCLATURE

Symboles	Désignations	Unité
A_{w}	Activité de l'eau	
M	Masse d'eau évaporée	kg
M s	Masse sèche du produit	kg
M_{h}	Masse humide du produit	kg
Me	Masse de l'eau	kg
Ma	Masse du gaz	kg
$H_r = \phi$	Humidité relative de l'air	%
Has	Humidité absolue de saturation	kg d'eau /kg (as)
На	Humidité absolue	kg d'eau /kg (as)
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg d'eau /kg de m.s
Xh	Teneur en eau du produit à base humide	kg d'eau /kg de m.h
Xs	Humidité relative du solide	%
Xa	Humidité absolue du solide	kg d'eau/kg de m.s
Ps	Pression de saturation	Pascal
pa	Pression partielle de l'air sec	Pascal
рт	Pression de vapeur à la surface mouillée	Pascal
P_{v}	Tension de vapeur	Pascal
Ψ	Degré de saturation	%
Q_{st}	Chaleur isostérique	kJ/mol
R	Constante des gaz parfaits	J /k.mol
K	Conductivité hydraulique du milieu	W/m^2 . °C

INTRODUCTIN GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

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.

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. 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, aussi elle nous offre des informations sur la chaleur isostérique et la durée de vie du produit.

L'isotherme de sorption est une courbe qui dépend de la température et qui est le rapport de la teneur en eau d'équilibre 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 et une température donnée.

L'objectif visé par cette étude est la détermination expérimentale et par simulation des courbes de désorption de l'absinthe, et ce pour trois valeurs de température. On détermine ces équilibres par la méthode gravimétrique statique : des solutions acides sulfuriques. Ce mémoire comporte trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique donnant les principales définitions et notions de base concernant le séchage, l'activité de l'eau et les isothermes de sorption des produits humides indispensables pour notre étude.

Dans le deuxième chapitre, nous identifions la plante à sécher et présentons la méthode expérimentale pour la détermination des courbes de désorption de l'absinthe pour trois températures différentes à savoir 40, 50 et 60°C et.

INTRODICTION GENERAL

Le troisième chapitre est consacré aux résultats expérimentaux et discussion .Ces derniers sont présentés sous forme de tableaux, d'une part et sous forme de graphes d'autre part. En effet, les isothermes de désorption de l'absinthe sont tracées pour les trois températures et comparés aux modèles mathématiques les plus connus dans ce domaine. Les résultats obtenus par la simulation sont comparés aux résultats expérimentaux.

En fin, une conclusion générale résume les principaux résultats et les perspectives de ce travail et une annexe nécessaire clôturent ce mémoire.

CHAPETRE I

Étude Bibliographique

I.1. Introduction

De nombreux produits agricoles, consommés en grandes quantités ne sont pas toujours disponibles au cours des saisons. Plusieurs solutions sont proposées pour pallier à ce handicap : culture sous serre, congélation, conservation par séchage. Le recours au séchage s'avère une solution simple, sûre et adéquate pour un grand nombre de produits.

Les régions du sud algérien commencent à connaître un développement agraire plus ou moins rapide. Une grande partie de la production agricole de ces régions (tomate, dattes, henné, menthe...) se prête parfaitement à une conservation par séchage pour assurer une continuité dans leurs disponibilités et permettre leur transport à moindre coût.[1]

Le séchage est une opération importante dans les domaines agricole et industriel. Il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide autre que son eau d'hydratation [2]. L'énergie solaire est une alternative possible pour les pays en voie de développement, tel que: l'Alger, et qui sont dépourvus de richesses énergétiques conventionnelles. Le séchage solaire est donc un procédé de conservation 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. [3.4]

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 nutritive, hygiénique et aromatique du produit à sécher [2]

I.2. Généralité sur le séchage

I.2.1-Définition

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide.

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année). [5]

L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique.

1.2.2- l'air humide:

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

Le mélange air sec et vapeur d'eau constituent l'air humide. Nous définissons ci-après les importantes grandeurs caractérisant l'air humide. [6]

I.2.2.1. Principaux paramètres caractérisant l'air humide

Considérons une masse M_h d'air humide, occupant le volume V à la température T et sous la pression P

lacktriangle La masse M_h d'air humide contenue dans ce volume est la somme d'une masse m_a d'air sec et m_v de vapeur d'eau:

$$\mathbf{M}_{h=} \mathbf{m}_{v+} \mathbf{m}_{a} \tag{I.1}$$

ullet La pression totale p, est la somme des pressions partielles P_a de l'air sec et P_v de la vapeur d'eau :

$$P = Pv + Pa (I.2)$$

I.2.2.2. 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 Ha est donnée par la relation suivante :

$$H_a = \frac{M_a}{M_a} \tag{I.3}$$

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

$$H_a = \frac{18}{29} \left[\frac{P}{P - P_V} \right] = 0.622 \left[\frac{P}{P - P_V} \right]$$
 (I.4)

I.2.2.3. 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.

$$H_r = \frac{P_v}{P_c} \tag{I.5}$$

I.2.2.4. Degré de saturation :

Soit Ha la valeur de l'humidité d'un gaz pour une certaine température et Ha_s 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 :

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} \tag{I.6}$$

Dans le cas ou P_v et P_s sont tous deux petits devant P (cas de l'air humide sous la pression atmosphérique et pour des températures peu élevées), on peut écrire : [7]

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} = \frac{P_V}{P_S} \tag{I.7}$$

I.2.2.5. Températures caractéristiques de l'air humide

I.2.2.5.1. Température sèche «température de bulbe sec »

La température de bulbe sec T_S est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec, ledit thermomètre étant placé dans l'air.

I.2.2.5.2. Température humide «température de bulbe humide »

C'est La température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air, dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation est prélevée de l'air. De façon pratique c'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un coton hydrophile humidifié, ce thermomètre est placé dans un flux d'air relativement rapide.

I.2.2.5.3. Température de rosé

Y Si l'on refroidit l'air à pression constante, son humidité relative va augmenter jusqu'à atteindre la valeur 100% sur la courbe de saturation. Il se produit un équilibre vapeur liquide et les premières gouttes d'eau condensée vont apparaître, la température de ce point est appelée la température de rosée Tr de l'air.

Donc la température de rosé est la température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation. Cette température T_r est tel que: $P_{V=}P_S(T_r)$ [8].

I.2.2.6. Masse volumique de l'air humide

Considérons une masse $(1+H_a)$ kg d'air humide contient donc un kg d'air et H_a kg de vapeur d'eau à la température T et de pression partielle de vapeur d'eau P_v .

La masse volumique de cet air s'écrit :

$$\rho_{ah} = \rho_0 \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P - (1 - \delta)P_v}{P_0}$$
 (I.8)

 ρ_0 : Masse volumique de l'air sec. $\rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3$

I.2.2.7. Milieux poreux

On appelle milieu poreux un solide de forme compliqué délimitant et englobant des vides appelles pores. Ces vides peuvent communiquer entre aux et contenir une ou plusieurs phases fluides, la partie solide encore appelée matrice se présente sous deux formes:

- non consolidée: la matrice solide est alors formée de graine ou fibres non soudés entre eux (graviers, sable, ...).
- consolidée : dans ce cas, la matrice solide compacte ne peut pas se diviser en grains ou fibres (roche, tissus végétaux et animaux.).

Dans les conditions naturelles, le volume poreux est généralement occupé par une phase gazeuse (mélange air + vapeur d'eau) et de l'eau liquide [1]

I.2.2.7. 1. Répartition de l'eau dans les milieux poreux

L'eau présente dans un matériau peut se présenter sous trois états: 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.
- 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. [9]

I.2.3. Caractéristiques des solides humides

I.2.3.1. Humidité absolue

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

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_S} \tag{I.9}$$

I.2.3.2. Humidité relative

L'humidité relative d'un solide appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.[7]

$$\varphi = \frac{M_h - M_s}{M_h} \tag{I.10}$$

I.2.3.3. 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 déterminées, 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 Ps.

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \tag{I.11}$$

Si la tension de vapeur P_m (pression de vapeur à la surface mouillée) du liquide associé au solide est différente de Pil 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 Pv > Pm ce transfert d'humidité s'effectue de l'atmosphère gazeuse vers le solide est correspond a un phénomène d'adsorption, c'est-à-dire à un mouillage du solide.
- Si Pv < Pm le transfert de matière s'effectue du solide vers la phase gazeuse et correspond à une désorption, c'est-à-dire à un séchage du solide.
- Lorsque Pv = Pm 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 Hr de l'atmosphère correspondant une valeur de l'humidité à l'équilibre Xeq du solide, et on peut construire une isotherme d'équilibre, relative au solide considéré (Figure I.1.)

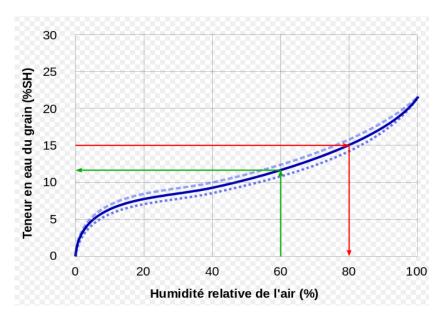


Figure I.1. Isotherme de sorption - désorption

La Figure I.1 représentant pour une température variation de la teneur en eau en fonction de l'activité de l'eau du produit ou de l'humidité relative de milieu à l'équilibre est appelée :

- Isotherme de désorption si en parte d'un produit sature en eau ;
- Isotherme d'adsorption si en part d'un produit sec.

I.2.4. Cinétique du séchage

On étudie la cinétique du séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (température, vitesse de l'air asséchant, hygrométrie...). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps. Dans la figure (I.1) nous avant reporté les variations de l'humidité de solide x, de la vitesse de séchage $(\frac{dX}{dT})$ et de la température de solide (T_{solide}) en fonction du temps d'opération, tout les travaux de séchage montrent les courbes de la vitesse de séchage en fonction du temps se distingue suivant la nature du produit. Mais d'une manière générale, on remarque que le processus de séchage passe par 3 principales périodes :

- > une phase de mise en température du solide
- > une phase de séchage à vitesse constante
- > une phase de séchage à vitesse décroissante

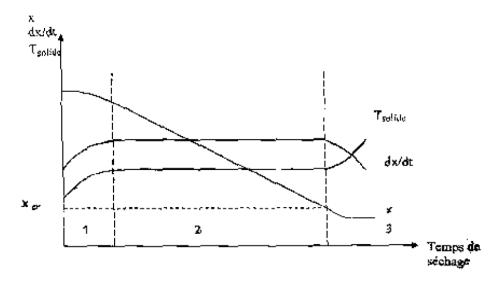


Figure I.2. Cinétique de séchage

- Une phase de mise en température du solide : L'humidité du produit dans cette période varie mais pas sensiblement et la température du produit varie (croit ou décroît) jusqu'à la température humide. [1]
- Une phase de séchage à vitesse constante : L'étude de la phase à vitesse constante montre que cette phase est comparable à ce que serait l'évaporation d'eau si aucun solide n'était présent: on se trouve dans le cas où soit il y a beaucoup d'eau à la surface du solide soit la diffusion de l'eau de l'intérieur du solide vers la surface est suffisamment rapide.

Durant cette phase on considère que le séchage s'effectue de manière adiabatique car il n'y aucun échange de chaleur avec l'extérieur.

La chaleur latente de vaporisation de l'eau est entièrement fournie par le refroidissement de l'air chaud. Le processus s'effectue donc à enthalpie constante.

L'air chaud dans le diagramme de l'air humide va donc évoluer sur une isenthalpique (droite de saturation adiabatique): la chaleur perdue par refroidissement est entièrement compensé par l'apport de l'enthalpie de la vapeur d'eau composée d'un terme du à sa formation par évaporation et d'un terme beaucoup plus faible du à son réchauffement (l'échauffement du solide est négligeable dans cette phase si les températures de l'air ne sont pas trop élevées). Pendant cette période la température du solide reste constante et égale à la température humide de l'air.

<u>Remarque</u>: On montre que dans le cas de l'eau, la température humide est égale à la température de saturation adiabatique de l'air.

Les facteurs qui augmentent la cinétique sont:

- la diminution de l'humidité absolue de l'air de séchage
- ➤ l'élévation de la température de l'air de séchage
- ➤ l'augmentation du coefficient de transfert thermique par une augmentation de la vitesse de circulation de l'air
- l'augmentation de la surface spécifique du solide ce qui entraîne une augmentation de la surface d'échange
- ➤ Pendant cette période la nature du solide et sa structure interne (pores, interstices) n'interviennent pas.

• Une phase de séchage à vitesse décroissante :

En fait l'air n'atteint jamais la température de saturation adiabatique puisque la vitesse commence à décroître à partir d'une humidité Xc (humidité critique) et finit par tendre vers une vitesse nulle. Pendant cette période la tension de vapeur du liquide imprégnant le solide est inférieure à celle existant pour un liquide seul présent L'humidité superficielle n'est plus renouvelée assez rapidement car le séchage progressant, il faut alors éliminer l'eau provenant de l'intérieur du solide: le trajet de la vapeur d'eau vers la surface devient de plus en plus long et les phénomènes de diffusion deviennent cette fois limitant. Cette diffusion devient d'autant plus lente qu'un phénomène de croûtage apparaît parfois en surface. La

vitesse s'annule quand l'humidité du solide devient égale à Xlim ce qui correspond à une valeur d'équilibre pour l'air de séchage utilisé.

Pendant cette phase les conditions opératoires liées à l'air perdent de leur importance. On assiste à un échauffement du solide. [11]

I.2.5. Séchage 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 et celle a demandé dans notre travail.[12]

I.2.5.1. Séchage par convection

Si on place un corps humide dans une enceinte ou règne un flux gazeux chaud et sec, des différences de température et de pression partielle d'eau seront constatées entre le corps et le gaz aboutissant ainsi aux phénomènes suivants :

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

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

Dans la plupart des cas, le gaz utilise est l'air dont les propriétés thermo-physiques lui permettent d'être a la fois un fluide caloporteur et un vecteur d'élimination de l'eau évaporée.

L'enceinte ou est placée le corps humide a sécher et le flux de gaz est appelée séchoir.

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 l'énergie thermique nécessaire à la vaporisation de l'eau. Dans le séchage par entrainement, la convection est le mode de transfert prépondérant. D'autres modes de transfert thermique peuvent cependant s'y ajouter. La conduction par les claies supportant le produit et le rayonnement par les parois du séchoir représentent les autres modes d'apport de cette chaleur latente de vaporisation [1]

I.3 Activité de l'eau et isotherme sorption :

I.3.1 Activité de l'eau dans le produit :

L'activité d'eau dans un produit est le rapport entre la pression de vapeur d'eau PV à la surface du produit et la pression de vapeur d'eau pure PS(T) à la température T du produit.

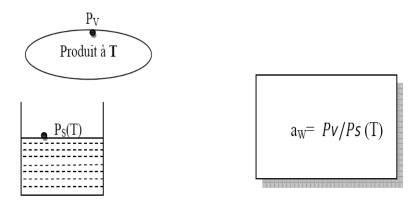


Figure I.3. Activité de l'eau dans le produit

Considérons maintenant un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre PV, T, PVa et Ta Étant respectivement les pressions de vapeur d'eau et les températures du produit et de l'air :

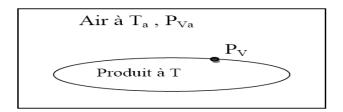


Figure I.4. Le produit et un air en équilibre

L'équilibre imposé T=Ta (pas de transfert de chaleur) et PV = Pva (pas de transfert de masse)

Or l'humidité relative HRa de l'air s'écrit :

$$HR_a = Pva /Ps (T_a)$$
 (I.12)

D' ou l'on déduit : $HRa = a_w$.

L'activité de l'eau dans un produit est donc aussi l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit .l'intérêt de cette grandeur est qu'elle varie faiblement avec la température alors que la pression de vapeur d'eau PV varie fortement.

I.3.2. Teneur en eau

Tout produit qu'il soit d'origine végétale, animale contient de l'eau, on peut donc distinguer dans tout produit de masse totale m :

- une masse me d'eau.
- la masse restante ms = m me appelée masse sèche

Comme pour l'air humide, on définit l'humidité ou teneur en eau du produit (en base sèche) par

$$X = me / m_s (I.13)$$

L'humidité d'un produit peut aussi être définie par la teneur en eau (en base humide) :

$$Xh = me / m_h (I.14)$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations :

$$X = Xh / 1-Xh \text{ et } Xh = X / 1+X$$
 (I.15)

On utilise plus souvent la teneur en eau base sèche, lorsque l'on parlera de teneur en eau dans autre précision il s'agira donc de cette dernière. [13]

I.3.3. Isothermes de sorption

I.3.3.1. Définition

L'activité de l'eau a_w dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau (Xéq) et de sa température(T).

La courbe représentant pour une température donnée la teneur en eau (Xéq) d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau (a_w) ou de l'humidité relative de l'air en équilibre (HRE) est appelée:

- isothermes d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec,
- isothermes de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.[14]

La (Figure I.3) montre que les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un produit (passage de a_w =1 à a_w < 0.6 entraı̂ne des modifications de structure et de porosité irréversibles. il y a un phénomène d'hystérésis

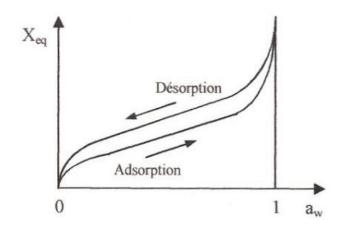


Figure I.5: Les isothermes d'adsorption / désorption [15]

Les isothermes d'adsorption désorption présentent en général trois zones, chaque zone correspondant à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit.

- Zone 1 : Constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit Elle est caractéristique de l'action des forces de Van der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe et les pores du produit. L'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.
- Zone 2 : Adsorption des molécules sur la monocouche initiale.
 L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.
- Zone 3 : Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau.

 L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro capillaire constitue une phase continue. [12]

I.3.3.2. Détermination expérimentale des isothermes de sorption

I.3.3.2.1. Méthodologie:

1-Méthode gravimétrique :

Le principe d'obtention d'un point de l'isotherme est le suivant : on place un échantillon du produit dans une enceinte maintenue à température T et à humidité relative H_r de l'air constante. L'échantillon est pesé à intervalle régulier jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, il est alors en équilibre avec l'air à (T, H_r) . Connaissant sa masse humide, il suffit alors de déterminer sa masse sèche pour en déduire sa teneur en eau X, le couple (H_r, X) fournit un point de l'isotherme de sorption ou de désorption.

Le produit est suspendu dans un récipient étanche à l'intérieur duquel une solution maintient une humidité relative constante. Cette solution peut être une solution saline saturée en sel ou une solution d'acide sulfurique de concentration fixée. La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatée. On utilise autant de sels ou de concentrations différentes que l'on veut obtenir de points sur l'isotherme [16].

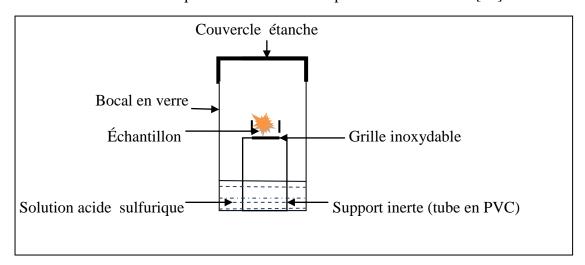


Figure I.6: Schéma d'expérimentale des isothermes de sorption

2-Méthode dynamique :

L'appareil est principalement constitué d'un cylindre calibré dans lequel évolue un piston et d'une éprouvette dans laquelle on place l'échantillon dont on veut mesurer la courbe de sorption. On peut déterminer deux types d'isothermes :

- Adsorption : on place dans l'éprouvette un échantillon sec de masse connue, on injecte un volume connu de vapeur d'eau à une température et à une pression contrôlée et connue, on attend l'équilibre avant de relever la pression P_e dans l'éprouvette.

- Désorption : l'échantillon étant saturé, on prélève un volume connu de vapeur d'eau dans l'éprouvette et on attend l'équilibre avant de relever la pression P_e dans l'éprouvette.

Dans les deux cas, la connaissance des valeurs des pressions, des volumes et des températures permet de calculer :

- la variation totale de masse d'eau dans le système entre deux injections ou retraits de volumes,
- la variation de masse de vapeur d'eau dans l'éprouvette, et d'en déduire la variation de la masse d'eau contenue dans l'échantillon et de remonter ainsi à la variation de sa teneur en eau. Les schémas ci-dessous illustrent le principe de la méthode [13].

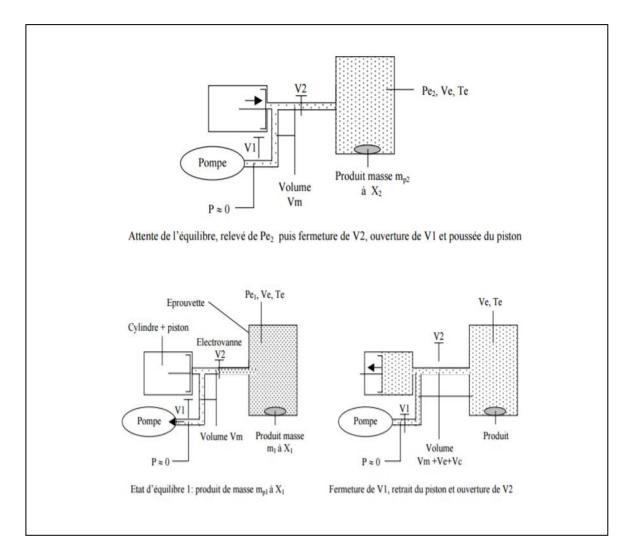


Figure I.7 : Schématisation de la phase de désorption

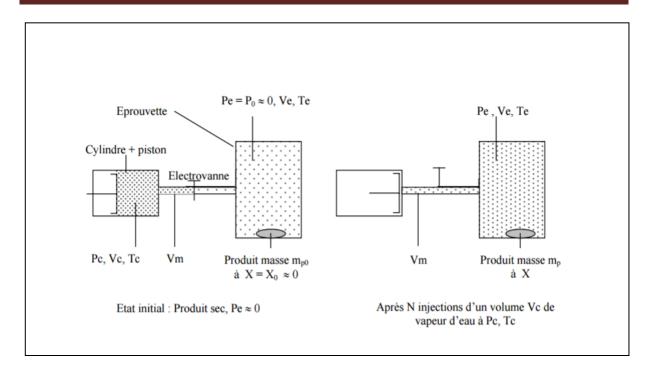


Figure I.8 : Schématisation de la phase d'adsorption

I.3.3.3 Les isothermes les plus connues

Sont celles de LANGMUIR. De FREUNDLICH et de BRUNAUER-EMMETT TELLER (BET) Henderson.

> Isotherme d'adsorption de LANGMUIR

L'isotherme de LANGMUIR, proposée en 1918, repose sur les hypothèses ci-dessous :

- a) Il existe plusieurs sites d'adsorption à la surface du charbon activé.
- b) Chacun de ces sites peut adsorber une seule couche de molécules peu être adsorbée par le charbon activé.
- c) Chacun de sites a la même affinité pour les impuretés en solution.
- d) L'activité à un site un donné n'affecte pas l'activité aux sites adjacents.

L'équation de l'isotherme de LANGMUIR est la suivante :

$$X/m = a. b. C/ (1+ a. C)$$
 (I.16)

a et b sont des constantes.

Si on inverse l'équation, on obtient :

$$1/(X/m) = (1/(a.b.C/(1+a.C)))$$
 (I.17)

➤ Isotherme d'adsorption de FREUNDLICH :

L'isotherme d'adsorption de FREUNDLICH, présentée en 1926, repose sur l'équation empirique suivante :

$$X/m = KC1/n (I.18)$$

K et n sont des constantes qu'il faut évaluer pour chaque solution et pour chaque température.

L'équation de FREUNDLICH est cependant plus utile sous forme logarithmique, soit :

$$Log(X/m) = log(K) + (1/n) log C$$
 (I.19)

> Isotherme d'adsorption de BRUNAUER-EMMET-TEIIER (BET) :

L'isotherme de BRUNAUER-EMMET-TELLER (BET) .proposée en 1938, repose sur les hypothèses suivantes :

- 1) Plusieurs couches successives de molécules peuvent être fixées sur l'adsorbant.
- 2) Les sites d'adsorption sont distribués uniformément à la surface de l'adsorbant.
- 3) Chaque site est indépendant des sites voisins.
- 4) L'énergie d'adsorption retient la première couche de molécules, alors que l'énergie de condensation d'adsorption retient les couches successives suivantes :

L'équation de l'isotherme d'adsorption de BET est la suivante :

$$X/m = ACX_0/(C_S - C) [1 + (A - 1)C/C_S]$$
 (I.20)

 X_0 : Masse d'impuretés adsorbées par la première couche, par unité de masse de charbon activé. C_S : Concentration de saturation. A : Constante déterminée empiriquement.

On peut récrire l'équation précédente de la façon suivante :

$$C / (C_S - C) X/m = (1/AX_0) + ((A - 1) / AX_0) (C/C_S)$$
 (I.21)

> Le model d'Henderson

Le modèle d'Henderson, décrit l'ensemble des isothermes de sorption pour différentes la corrélation exprimant ce modèle s'écrit

Xeq (T, Hr)=
$$\left[\frac{-\log(1-H_r)}{K(1.8T+492)}\right] 1/n$$
 (I.22)

Cette écriture permet de calculer l'isotherme désorption 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 sous la forme : [12]

$$n \log(Xeq) + \log(k) = \log(-\log(1-H_r)) - \log(1.8T + 492)$$
 (I.23)

Tableau I.1: Modèles de la sorption

Auteurs	Equation du model	Références	Domaine de Validité de courbe
Henderson modifié	1- a_{w} = exp [-k. (T+n). X_{eq}^{C}]	Thompson&al 1986[17]	Complète
Chung-pfost modifié	$a_{w}=\exp\left[\frac{-A}{T+B}\exp(-C.X_{eq})\right]$	Pfost & al 1976[18]	Complète
Oswin modifié	$X_{\text{eq}} = (A + BT) \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]^C$	Oswin, 1946[19]	Complète
Halsey modifié	$a_{w} = \exp\left[\frac{-\exp\left[(A+BT)\right]}{X_{eq}^{C}}\right]$	Iglesias & Chirifie, 1976b [20]	Complète
GAB	$X_{eq} = \frac{A.B.C.a_w}{[1-B.a_w][1-B.a_w+B.C a_w]}$	Van den Berg1984,[21]	Complète
Peleg	$X_{eq}=A.a_w^{k1}+B.a_w^{k2}$	Peleg, 1993[22]	Complète
Langmuir	$X_{eq} = \frac{1}{[A+B.a_w^{C-1}]}$	Langmuir I., 1916,[23]	Complète
BET modifié	$X_{eq} = \frac{(A+BT)C.a_w}{[1-a_w][1-a_w+C.a_w]}$	Iglesias&Chirifie, 1976[4];Iglesias,& Chirifie, 1982,[24]	Zone1

I.4. Chaleur isostérique de sorption

Le principe de Vant Hoff Le Chatelier prédit qu'à teneur en eau constante, la pression de vapeur saturante diminue avec l'augmentation de la température. Il est donc possible decalculer la chaleur isostérique Qst qui représente l'énergie de fixation de l'eau au substrat et

donc la chaleur supplémentaire à la chaleur de vaporisation de l'eau pure nécessaire pour déshydrater le produit. Qst peut être calculée en utilisant les courbes de sorption obtenues à différentes températures et l'équation de Clausius-Clapeyron [1].

$$\frac{\partial \ln \left(A_W \right)}{\partial \left(T \right)} = \frac{Q_{st}}{RT^2} \tag{I.24}$$

En intégrant l'équation (I.25) on obtient :

$$ln(A_w) = -(\frac{Q_{st}}{R}) * \frac{1}{T} + K$$
 (I.25)

R : Constante des gaz parfaits (R=8.31 J k⁻¹mol⁻¹)

K: Conductivité hydraulique du milieu [W/m 2 °C.].

La valeur de Q_{st} (kJ/mol) augmente généralement à mesure que le degré de déshydratation augmente.

I.5.Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons donné les différentes notions de base et définition du séchage solaire et ces outils complémentaires, aussi une vision explicative et déterminative des isothermes et de la méthode gravimétrique est faite.

Le chois des modèles mathématique et les informations qui peuvent être extraites des courbes font la dernière partie dans ce chapitre.

Le produit faisant l'objet de cette étude et ses caractéristiques ainsi le mode opératoire font l'objet du chapitre suivant.

CHAPETRE II Mode Expérimentale

II.1. INTRODUCTION

L'isotherme de sorption lie la teneur en eau d'équilibre, pour une température donnée, et l'humidité relative de l'environnement entourant le produit. Elle est caractéristique des nombreuses interactions entre le squelette solide et les molécules d'eau qui ont lieu à l'échelle microscopique [25]

Cette courbe, dite aussi courbe d'équilibre hygroscopique, exprime en ordonnée : la teneur en eau d'équilibre du produit Xeq, exprimée en kg d'eau par kg de matière sèche et en abscisse : l'activité de l'eau dans le produit (aw) qui est égale à l'humidité de l'air φ ; en effet les équilibres thermique et hydrique entre le produit (l'absinthe) et l'atmosphère qui l'entoure (Air) est défini par les deux égalités suivantes [26]:

Donc : Parler de φ ou de a_w veut dire la même chose.

Ceci peut se traduire, également, concernant la courbe d'équilibre hygroscopique par l'expression :

$$X_{eq} = f (aw)$$
 pour $T = constante$ (II.2)

Il faut noter que toute modification de la qualité ou de la composition du matériau entraîne une modification de ses isothermes de sorption. De par la complexité des phénomènes de sorption, les isothermes de sorption ne peuvent pas être prédites par la théorie mais doivent être établies expérimentalement pour chaque produit. La connaissance de ces courbes est indispensable pour étudier le séchage des produits (Voir Chapitre I.).

II.2 Produit utilisé:

II.2.1. Absinthe: (Artémisia absinthium)

II.2.1.1.Noms communs:

Grande Absinthe, Aluine, Alvine, Herbe sainte, Armoise amère, Absinthe suisse, Herbe aux vers

II.2.1.2Parties utilisées : Les feuilles et les sommités fleuries

II.2.1.3Description: Il s'agit d'une espèce d'armoise, herbe vivace et commune des régions arides de l'Europe méridionale et du nord de l'Afrique, qui pousse dans le midi de la France, au bord des chemins, dans les rues des villages ou dans les ruines, dans les lieux incultes et pierreux; elle fleurit de juillet à septembre. C'est une plante vivace dont la tige rameuse, qui peut atteindre un mètre de hauteur, est couverte d'un duvet blanchâtre, lui donnant un aspect gris cendré. Elle possède une forte odeur (essence d'Absinthe) et une saveur amère due à l'absinthine. Les feuilles, opposées à la base, puis alternes pour le reste de la plante, sont découpées en trois lobes dentés; elles sont vert grisâtre au dessus et vert argenté au dessous. Les feuilles de la partie inférieure sont découpées en lanières étroites, blanchâtres et cotonneuses, surtout en dessous. Les rameaux portent à leurs extrémités des petits capitules globuleux. L'essence s'accumule dans les glandes sécrétrices de la feuille. Les fleurs, divisibles de juillet à août, jaune verdâtre, sont petites, mais très nombreuses. Elles se regroupent en petits capitules globuleux, pendants, réunis en grappes à l'extrémité des rameaux. La plante est odoriférante.[28]

II.2.1.4Les vertus thérapeutiques et indications de l'absinthe:

Depuis longtemps, nombreux sont ceux qui ont pris pour habitude de consommer de l'absinthe afin de traiter les troubles gastriques, digestifs, intestinaux. C'est donc un remède efficace qui soulage maux d'estomac, ballonnements et flatulences, mais qui traite aussi les coliques des intestins. L'absinthe est une solution idéale en cas de difficulté pour s'alimenter et en cas d'anorexie, car on le connait également en tant que stimulant de l'appétit. Par ailleurs, elle a pour effet de diminuer la fièvre, c'est donc un fébrifuge naturel efficace. Grâce à ses vertus anthelminthiques, la plante est tout indiquée pour se débarrasser des vers et des helminthes.[29]

II.3. Description du mode opératoire :

II.3.1. Préparation des solutions d'acide sulfurique:

L'acide utilisée est l'acide sulfurique, et la préparation des concentrations d'acide: 20%, 25%, 28%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, se fait en complétant chaque volume choisi par de l'eau distillée jusqu'à 100 ml dans une bouteille.



Figure. II.1: Préparation des solutions d'acide sulfurique

Les données théoriques, revenant aux travaux précédents de Mr. J.L. Multon, (1980), ne sont pas vérifiées au laboratoire expérimentalement, pour cela nous avons mené des expériences de mesure de l'humidité correspondante à chaque concentration de solution d'acide préparée.

Chaque concentration a été préparée pour avoir une humidité bien déterminée, variant de 0.01 à 95.62%, la lecture a été faite après environ 24h et les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

 $Tableau\ II.1: Valeurs\ th\'eorique\ [27]\ et\ exp\'erimentale\ de\ l'a_w\ de\ solution\ d'acide$ $sulfurique\ en\ fonction\ de\ la\ concentration\ (\%\ volume/volume)$

Concentration%(volume/volume)	Température de la solution et de l'air (°C)	
	25°C	25°C
10	94.29	-
20	87.56	99
25	81.66	84
28	-	68
30	74.93	63,8
35	66.51	46
40	56.83	33
45	45.88	25
50	35.57	16,1
55	25.89	13
60	16.71	7,7
65	9.43	-
70	4.34	-
75	1.72	-
80	0.52	-
85	0.16	-
90	0.03	

La lecture de l'humidité relative pour les dix solutions d'acide sulfurique, se fait à l'aide de l'appareil enregistreur: hygromètre type : Testo 176H1 à deux sondes: température et humidité. L'enregistrement des lectures ne se fait qu'après les 24 h (l'équilibre hygro-statique entre la solution et l'environ). Ensuite on place les solutions dans des bocaux hermétiques.



Figure .II.2 : mesure des humidités des solutions d'acides

II.3.2 Préparation des échantillons de l'absinthe :

Des branches et des feuilles d'un arbre d'absinthe de la zone d'Adrar (Bouda) ont été récoltées et coupées soigneusement, et ramenées au laboratoire de l'URER/MS, L.S.S en état frais et sain pour l'objet de l'étude.

Les échantillons frais, destinés au processus de désorption de l'absinthe, sont des petits morceaux environ de mêmes masses (1 g) pesés à l'aide d'une balance numérique de précision de 10⁻³g. Chaque échantillon est, ensuite, placé dans le bocal (sur une grille perforée en acier inoxydable préparée à l'avance), au dessus de la solution acide, et reste donc dans une ambiance stabilisée en température et hygrométrie.







Figure II.3 : Préparation des échantillons de l'absinthe

II.3.3. Préparation du dispositif expérimental

L'étuve VACUCELL (VU) est une chambre sous vide, chauffée électriquement, dans laquelle il est possible de chauffer les objets y placés après l'évacuation. Les objets évacués .sont placés sur les étagères dans la chambre. L'appareil fonctionne jusqu'à la température de $200 \pm 1^{\circ}$ C.

Les expériences de désorption menées ont été réalisées à trois températures différentes: 40 °C, 50 °C et 60 °C et à dix valeurs d'humidité relative. Le protocole expérimental a été répété pour chaque température de travail (40 °C, 50 °C et 60 °C). Donc, pour chaque opération on a utilisé dix bocaux hermétiques (Figure II.4)



Figure II.4 : La disposition des échantillons dans l'étuve

-Avant de mettre le produit à étudier dans les bocaux, ces derniers sont introduits dans l'étuve régulée à une température de consigne fixe.

On laisse les bocaux dans le four pendant 24 h pour que les solutions d'acide sulfurique puissent s'adapter à la température de travail.

Puis les échantillons sont introduits dans les bocaux et à l'aide d'une balance électronique à affichage numérique de précision 0.001g. Ils sont pesés tous les deux jours jusqu'à ce que la variation de masse entre deux mesures successives devienne inférieure à 2%. L'équilibre thermodynamique est atteint après quelques jours.

-Dés que les masses humides d'équilibre sont déterminées, les échantillons sont introduits dans l'étuve régulée à 105 °C pendant 24 heures afin de déterminer leurs masses sèches.



Figure II.5: Les échantillons dans l'étuve régulée à 105°C

Après avoir obtenu les masse humides et sèches de toutes les prises d'essais. Les teneurs en eau d'équilibre sont calculées à l'aide de la relation :

$$X_{eq} = \frac{Mh - Ms}{Ms}$$
 (II.3)

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

On obtient une courbe de désorption : c'est-à-dire que l'échantillon perd de l'eau pour atteindre l'équilibre car l'échantillon placé dans l'enceinte était humide.

II.4 Conclusion:

Dans cette partie, nous avons vu la méthode utilisée, l'appareillage et les produits nécessaires pour créer les points d'humidité fixe, le produit étudié et le mode opératoire aussi sont présentés dans ce chapitre.

Par la suite nous allons donner les résultats expérimentaux sous forme de tableaux ou de courbes.

CHAPETRE III

Résultats Expérimentaux Et Discussion

III .1.Introduction:

La connaissance des courbes de désorption est indispensable pour étudier le séchage des produits. L'objectif de ce chapitre est la détermination expérimentale des isothermes de sorption de l'absinthe (*Artémisia absinthium*) pour les températures 40,50 et 60°C. Les courbes de sorption expérimentales obtenues sont comparées à quatre modèles différents en vue de dégager l'équation la plus adéquate.[1]

III.2.La composition physicochimique de l'absinthe :

L'absinthe traitée dans ce travail est caractéristiques dans le tableau suivant :

Tableau III.1: les masses constituant l'absinthe

Les masses Capsule	M	M ₁	M_2
Capsule 1	1.012	0.207	0.04
Capsule 2	1.011	0.18	0.026

M: la masse humide

M₁: la masse des échantillons (105°C)

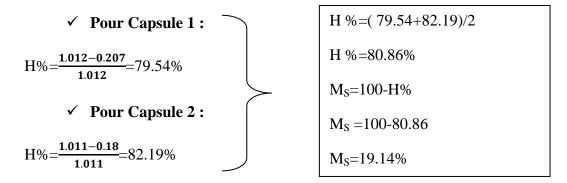
M₂: La masse de l'incinération (550°C)

1-Pour calculer la masse d'eau (H%) et la masse sèche on applique les relations suivantes :

$$H\% = \frac{M - M_1}{M}$$
 (III.1)

$$M_S=100-H\%$$
 (III.2)

AN:



2- Pour calculer la masse minérale et organique, on applique les relations suivantes :

$$M_{S}=(M_{h}-M_{s}\%) / 100$$
 (III.3)
 $M_{m}=(M_{S}-M_{o}) / M_{S}$ (III.4)

AN:

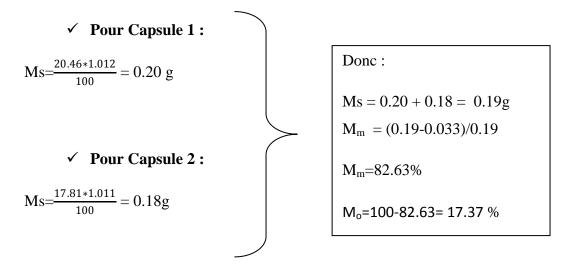


Tableau III.2: La composition physicochimique de l'absinthe

Constituant	Eau H%	Matiére sèche M _S	Matiére organique M _O	Matiére minérale M _m
%	80.86	19.14	17.37	82.63

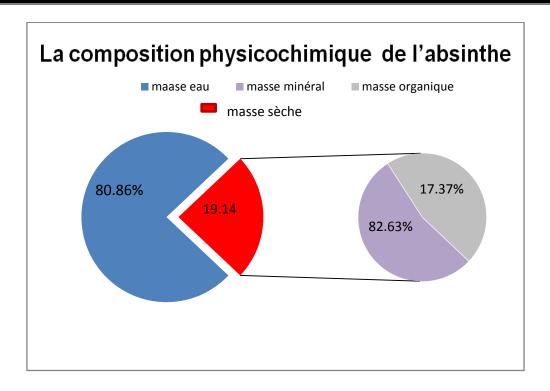


Figure III.1.La composition physicochimique de l'absinthe

III.3. Masses sèches des échantillons de l'absinthe:

Dés que les masses humides d'équilibre sont déterminées, les échantillons ont été introduits dans l'étuves régulée à 105 °C pendant 24 heures afin de vérifier leurs masses sèches. (Chapitre II.)

Les valeurs des masses sèches de tous les échantillons de l'absinthe sont reportées, pour 40°C ,50°C et 60 °C, dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Valeurs des masses sèches de tous les échantillons à 40°C , 50°C et à 60°C

	Concentration	20	25	28	30	35	40	45	50	55	60
	d'acide (%)										
	a _{w=} φ/100	99	84	68	63.8	46	33	25	16.1	13	7.7
T=40°C	$M_{S}(g)$	0.266	0.183	0.185	0.182	0.163	0.171	0.153	0.166	0.166	0.153
T=50°C	$M_{S}(g)$	0.136	0.129	0.129	0.138	0.142	0.144	0.146	0.147	0.14	0.16
T=60°C	$M_{S}(g)$	0.144	0.165	0.163	0.143	0.138	0.136	0.151	0.144	0.129	0.142

III.4. Masses humides et masses d'eau à l'équilibre des échantillons d'absinthe: Les masses humides M_h et les masses d'eau à l'équilibre M_e de l'absinthe obtenue pour les trois températures de travail (40°C ,50°C et 60°C) sont reportées dans les tableaux III.4, III.5 et III.6 respectivement.

Les masses humides M_h sont les valeurs des dernières pesées des échantillons et les masses d'eau M_e sont calculées, après détermination des masses sèches M_s , à l'aide de la formule :

$$\mathbf{M}_{e} = \mathbf{M}_{h} \cdot \mathbf{M}_{s} \tag{III-5}$$

Tableau III.4 : Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre de l'absinthe à $T=40\ ^{\circ}C$

Concentration	20	25	28	30	35	40	45	50	55	60
d'acide (%)										
a _{w=} φ/100	99	84	68	63.8	46	33	25	16.1	13	7.7
Mh(g)	0.266	0.183	0.185	0.182	0.163	0.171	0.158	0.166	0.1666	0.153
Me(g)	0.118	0.037	0.021	0.018	0.016	0.039	0.062	0.012	0.012	0.002

Tableau III.5 : Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre de l'absinthe à $T = 50 \, ^{\circ}\text{C}$

Concentration	20	25	28	30	35	40	45	50	55	60
d'acide (%)										
$a_{w=} \phi / 100$	99	84	68	63.8	46	33	25	16.1	13	7.7
Mh(g)	0.195	0.172	0.149	0.158	0.159	0.153	0.151	0.151	0.148	0.165
Me(g)	0.059	0.043	0.02	0.02	0.017	0.009	0.005	0.004	0.008	0.005

Concentration 20 25 28 30 35 40 45 50 55 60 d'acide (%) $a_{w=} \phi / 100$ 99 84 68 63.8 46 33 25 16.1 13 7.7 0.214 0.212 0.19 0.167 0.152 0.143 0.159 0.148 0.131 0.143 Mh(g) Me(g)0.07 0.047 0.027 0.024 0.014 0.007 0.008 0.004 0.002 0.001

Tableau III.6 : Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre de l'absinthe à $T=60\,{}^{\circ}\mathrm{C}$

III.5. Teneurs en eau à l'équilibre des échantillons d'absinthe:

Après avoir obtenu les masses humides et sèches de toutes les prises d'essais, les teneurs en eau d'équilibre sont calculées à l'aide de la relation :

$$X_{eq} = \frac{Mh - Ms}{Ms}$$
 (III.6)

Les valeurs Teneurs d'eau à l'équilibre de tous les échantillons de l'absinthe sont reportées, pour 40°C, 50 °C et 60 °C, dans le tableau III.7.

Tableau III.7 : Teneurs en eau à l'équilibre obtenues pour dix humidités relatives et à trois températures de travail

		T=40°C	T=50°C	T=60°C
	$a_{w=} \phi / 100$	Xeq	Xeq	Xeq
concentration		(g d'eau / g de m.s)	(g d'eau / g de m.s)	(g d'eau / g de m.s)
20%	99	0,7973	0,4338	0,4861
25%	84	0,2534	0,3333	0,2848
28%	68	0,1280	0,1550	0,1656
30%	63,8	0,1098	0,1449	0,1678
35%	46	0,1088	0,1197	0,1014
40%	33	0,2955	0,0625	0,0515
45%	25	0,6458	0,0342	0,0530
50%	16,1	0,0779	0,0272	0,0278
55%	13	0,0779	0,0571	0,0155
60%	7,7	0,0132	0,0313	0,0070

III.6. Isothermes de désorption de l'absinthe à trois températures:

Les figures (III.2, III.3 et Figure III.4) montrent respectivement les résultats expérimentaux obtenus pour la désorption du l'absinthe pour les températures 40, 50 et 60°C.

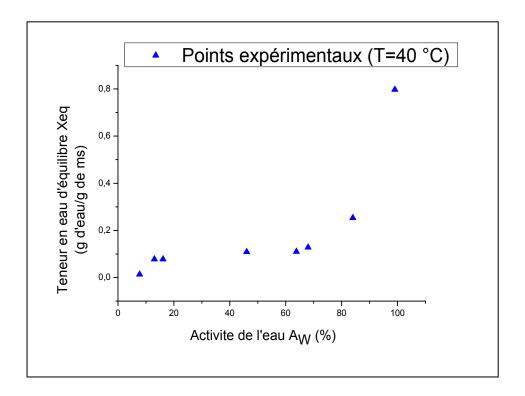


Figure III. 2 : Isotherme de désorption de l'absinthe à T= 40°C

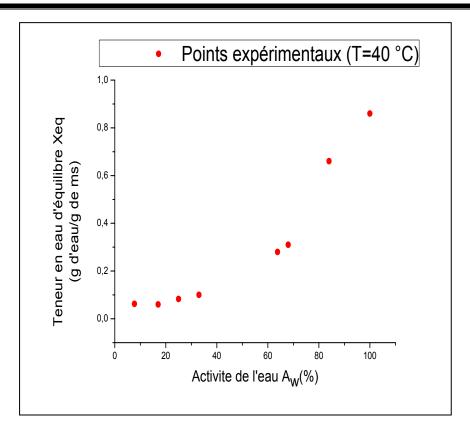


Figure III.3: Isotherme de désorption de l'absinthe à T=50 °C

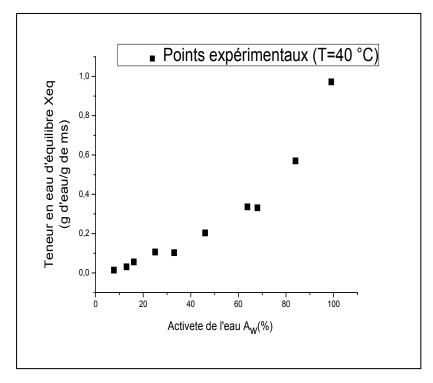


Figure III.4: Isotherme de désorption de l'absinthe à T= 60 °C

La figure (III.5) représente la variation de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} en fonction de l'activité de l'eau du milieu pour les trois températures étudiées 40, 50 et 60°C. Cette figure montre que pour une activité de l'eau A_w du milieu constante la teneur en eau d'équilibre X_{eq} augmente inversement avec la température [30], [31].

Remarque:

Dans les figure III.2 et III.3 approbateurs pour la température de 40°C et 50°C, respectivement. On supprime les points expérimentaux (33.0, 2955), (25. 0,6458.) à 40 ° C et (46. 0,1197.) et (13. 0,0571) à 50 °C à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit

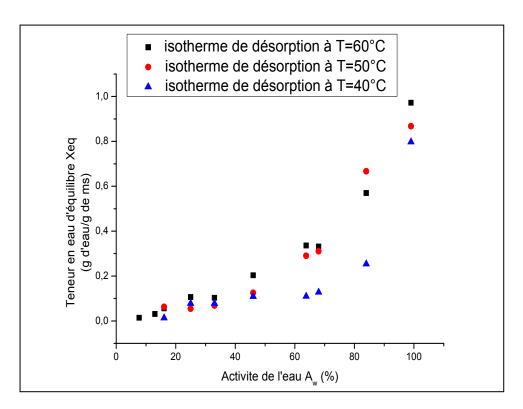


Figure III.5 : Influence de la température sur les isothermes de désorption du l'absinthe

Les courbes d'isothermes de sorption présentent une forme sigmoïdale. Ces résultats obtenus sont similaires à d'autres résultats rapportés dans la littérature [32_41].

Pour des températures élevées l'état d'excitation des molécules est plus élevé, entraînant une diminution des forces d'attraction des molécules d'eau entre elles. Pour des températures constantes, l'activité de l'eau A_w augmente avec la teneur en eau d'équilibre X_{eq} .

III.7. Modélisation des courbes de sorption :

III.7.1-Modèles de description des isothermes de sorption :

Plusieurs modèles mathématiques, relations empiriques reposant sur des bases plus ou moins physiques, décrivent la relation entre la teneur en eau d'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la température. Nous avons étudié quatre modèles différents trouvés dans la littérature : GAB, Peleg, Langmuir et BET modifié. Le but est de déterminer le ou les modèles les plus adéquats pour la description des isothermes de sorption de notre produit

En se basant pour la comparaison des modèles sur le coefficient de corrélation (r) donné par le logiciel OriginPro 8, l'erreur moyenne relative (EMR), l'erreur standard de la teneur en eau du produit (EST) et le résidu de sorption e_i.

Le meilleur modèle sera celui présente la plus grande valeur de (r), les plus petites valeurs de (EMR), de (EST) et d'e_i. Ces valeurs sont calculées comme suit :

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| \frac{X_{eq_{i,exp}} - X_{eq_{i,pre}}}{X_{eq_{i,exp}}} \right|$$
 (III.7)

EST=
$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_{eq_{i,exp}}-X_{eq_{i,pre}})^{2}}{d_{f}}}$$
 (III.8)

$$e_i = X_{i,exp} - X_{i,pre}$$
 (III.9)

Avec:

 $X_{eq_{i,exp}}$: La i^{eme} teneur en eau d'équilibre expérimentale

 $X_{eq_{i,pre}}:$ La i $^{\grave{e}me}$ teneur en eau d'équilibre prédite

N : le nombre de points expérimentaux

d_f: le degré de liberté de la régression du modèle.

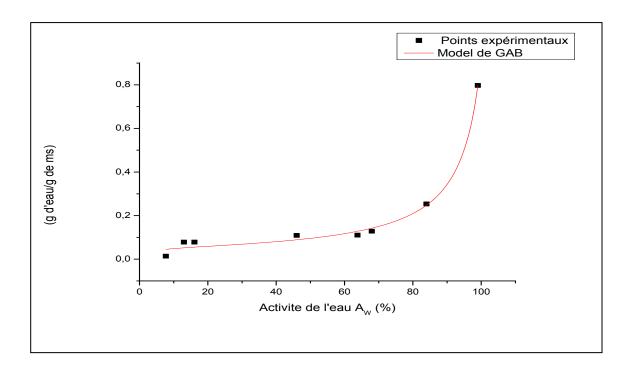


Figure III.6 : Isotherme de désorption de l'absinthe ($Art\acute{e}misia~absinthium$) de model GAB à (T = 40° C)

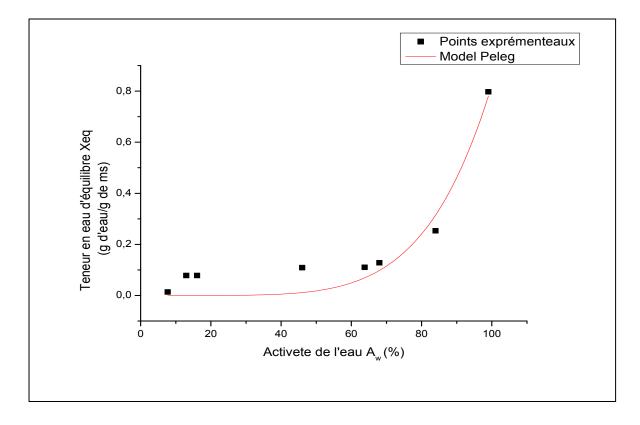


Figure III.7: Isotherme de désorption de l'absinthe (Artémisia~absinthium) de model PELEG à ($T=40^{\circ}C$)

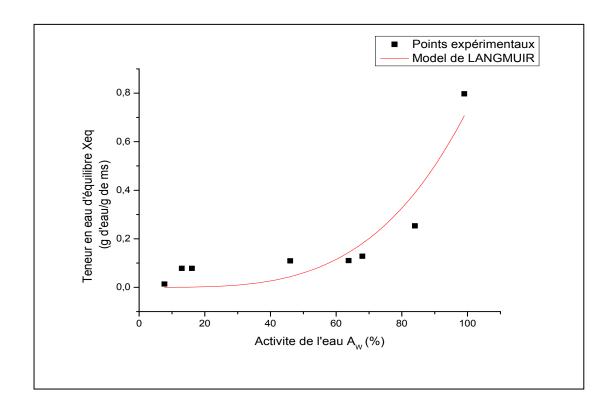


Figure III.8 : Isotherme de désorption de l'absinthe (Artémisia~absinthium) de model LANGMUIR à ($T=40^{\circ}C$)

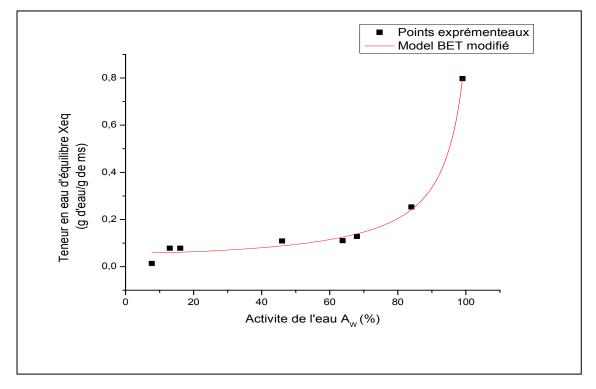


Figure III.9 : Isotherme de désorption de l'absinthe ($Art\acute{e}misia$ absinthium) de model BET modifie à ($T=40^{\circ}C$)

Tableau III.8: paramètres estimés et les critères pour les modelés de teneur en humidité d'équilibre des données de désorption d'absinthe à $T=40^{\circ}C$

Coefficient	GAB	Peleg	Langmuir	BET modifié
A	0,05133	3,66481E-12	7,80867E-16	-0,04915
В	0,00945	3,66453E-12	2,44956E7	-
С	56,13251	-	-2,62736	0,99052
R^2	0.99288	0.93616	0.89465	0.99163
Adj R ²	0,99003	0.88828	0,85251	0,99024
EMR (%)	0.428	0.577	0.585	0.521
EST	0.054	0.166	0.219	0.055
RMSE	0.0252	0.08435	0.09692	0.02493

D'après le tableau III.8 le modèle de GAB et BET modifié sont les meilleur modelés pour décrire l'ensemble des isothermes de désorption de l'absinthe (*Artémisia absinthium*) avec des valeurs de r de 0.99288 et 0.99163, un EMR de 0.428 et 0.521, et un EST de 0.054 et 0.055 pour la désorption respectivement pour des humidités relatives comprises entre 7.7 et 99%

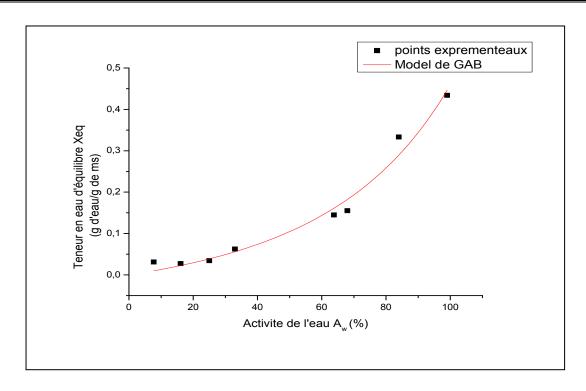


Figure III.10: Isotherme de désorption de l'absinthe (Artémisia~absinthium) de model GAB à ($T=50^{\circ}C$)

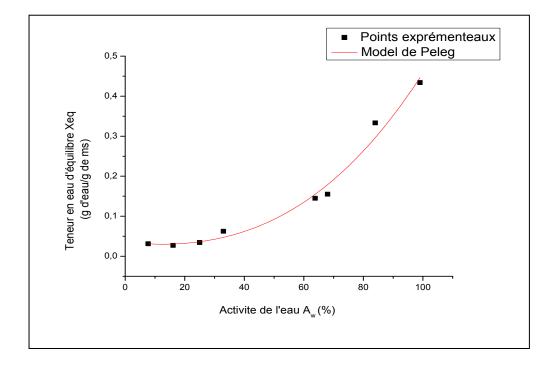


Figure III.11: Isotherme de désorption de l'absinthe ($Artémisia\ absinthium$) model PELEG à ($T=50^{\circ}C$)

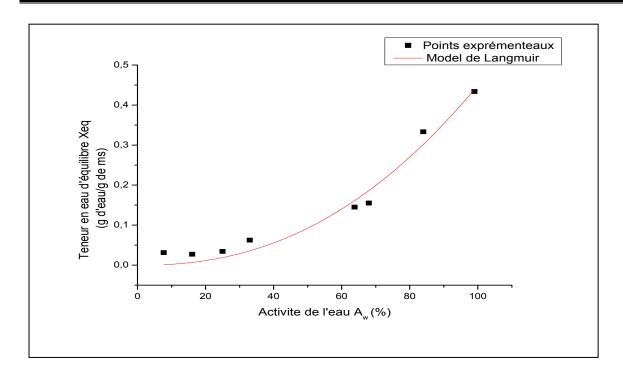


Figure III.12: Isotherme de désorption de l'absinthe (Artémisia~absinthium) de model à Langmuir ($T=50^{\circ}C$)

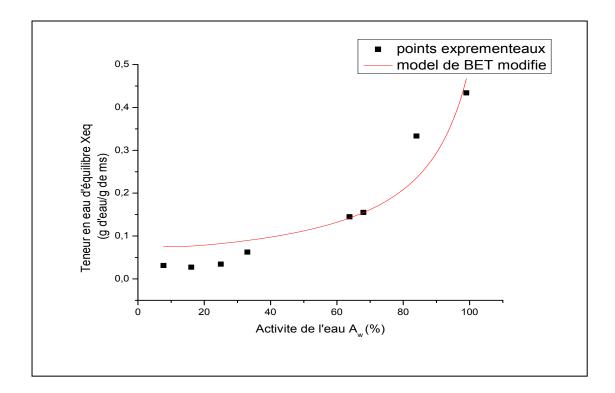


Figure III.13: Isotherme de désorption de l'absinthe (Artémisia~absinthium) de model BET modifie à ($T=50^{\circ}C$)

Tableau III.9: paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre des données de désorption d'absinthe à $T=50^{\circ}C$

Coefficient	GAB	Peleg	Langmuir	BET modifié
A	37,12815	1,2276E-5	3,1816E-15	-0,12459
В	0,00494	1,2276E-5	40477,36063	-
С	0,01299	-	-1,28046	0,99125
R ²	0.97803	0.97252	0.97252	088998
Adj R ²	0,96924	0,95191	0,96153	0,87164
EMR (%)	0.171	0.102	0.354	0.639
EST	0.039	0.03	0.056	0.089
RMSE	0.05375	0.06721	0.06011	0.10981

D'après le tableau III.9 le modèle de GAB et Peleg sont les meilleur modèles pour décrire l'ensemble des isothermes de désorption de l'absinthe (*Artémisia absinthium*) avec des valeurs de r de 0.97803 et 0.97252, un EMR de 0.171 et 0.102et un EST de 0.039 et 0.03 pour la désorption respectivement pour des humidités relatives comprises entre 7.7 et 99%

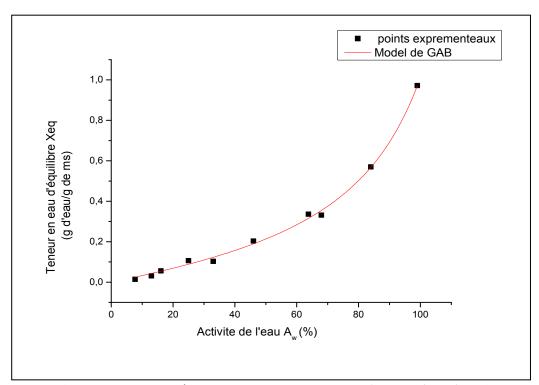


Figure III.14: Isotherme de désorption de l'absinthe (Artémisia~absinthium) de \mbox{model} $\mbox{GAB à }(T=60^{\circ}\mbox{C})$

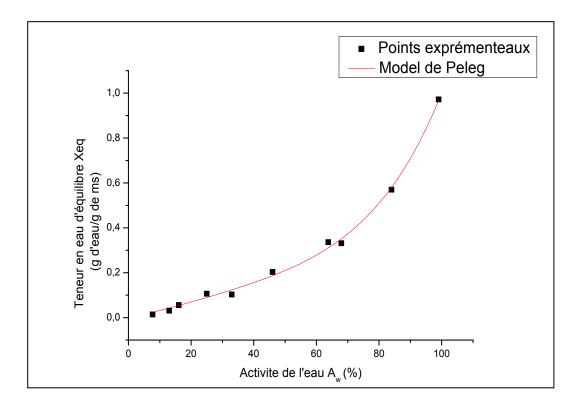


Figure III.15: Isotherme de désorption de l'absinthe (Artémisia~absinthium) de model PELEG à ($T=60^{\circ}C$)

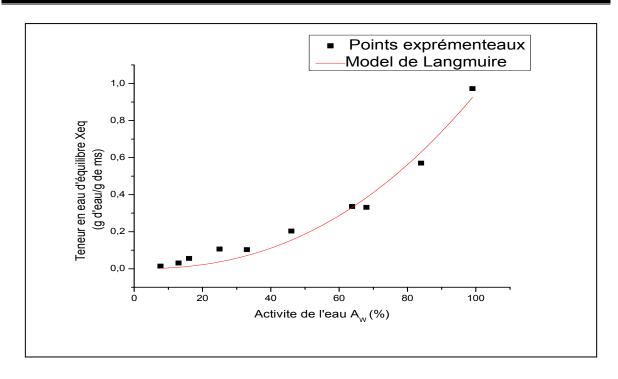


Figure III.16: Isotherme de désorption de l'absinthe (Artémisia~absinthium) de model LANGMUIR à ($T=60^{\circ}C$)

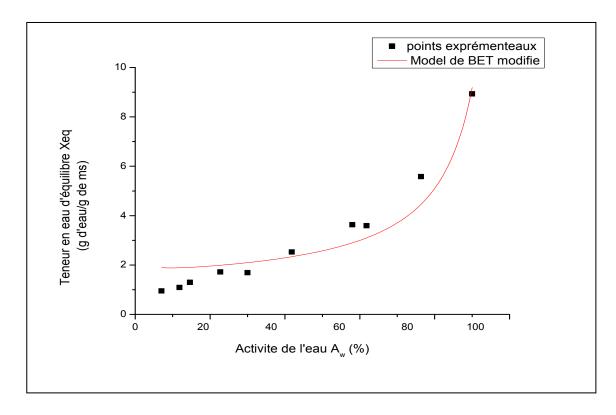


Figure III.17: Isotherme de désorption de l'absinthe (Artémisia~absinthium) de model BET modifie à ($T=60^{\circ}C$)

Tableau III.10: paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre des données de désorption d'absinthe à $T=60^{\circ}C$

Coefficient	GAB	Peleg	Langmuir	BET modifié
A	0,26091	1,17718E-11	1,26774E-14	-0,10395
В	0,00782	0,00122	50249,59876	-
С	1,54312	-	-1,33875	0,99095
\mathbb{R}^2	0.99741	0.9971	0.97426	0.92493
Adj R ²	0,99667	0,99565	0,96568	0,91555
EMR	0.168	0.202	0.301	1.321
EST	0.041	0.047	0.127	0.174
RMSE	0.017	0.00995	0.05653	0.08766

D'après le tableau III.10 le modèle de GAB et Peleg sont les meilleur modèles pour décrire l'ensemble des isothermes de désorption de l'absinthe (*Artémisia absinthium*) avec des valeurs de r de 0.99741 et 0.9971, un EMR de 0.168 et 0.202 et un EST de 0.041 et 0.047 pour la désorption respectivement pour des humidités relatives comprises entre 7.7 et 99%

III.7.2.Résultats de la modélisation

Donc pour chaque température, deux modèles représentent le meilleur lissage possible, mais le modèle de GAB est le meilleur modèle décrivant le phénomène de désorption de l'absinthe (*Artémisia absinthium*) pour les trois températures.

III.8. Conclusion:

Les courbes d'isotherme sont déterminées à 40, 50 et à 60°C et sont représentées, elles ont une forme sigmoïdale comme tout les produits agroalimentaires ou plus particulièrement les plantes médicinales.

Le lissage par des modèles mathématiques permet de déterminer le modèle le plus adéquat avec ces courbes qui est le modèle de GAB.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre travail a consisté en l'étude théorique et expérimentale d'isotherme de sorption de l'absinthe (*Artémisia absinthium*) à différentes températures.

Sur le plan expérimental, nous avons établi les isothermes de désorption de l'absinthe par la méthode gravimétrique statique pour trois températures (40, 50 et 60°C).

Les résultats expérimentaux montrent que les isothermes de désorption de l'absinthe ont une allure sigmoïdale qui caractérise tous les produits végétaux (Multon, 1980). Ces courbes de sorption sont ajustées par quatre modèles statistiques. L'analyse des paramètres statistiques r, EMR, EST et leurs résidus e_i montre que le model de GAB est le meilleur modèle qui décrive l'ensemble des isothermes de désorption de l'absinthe.

En perspective, nous souhaitons prolonger nos travaux sur :

- une étude dynamique des isothermes de sorption afin de trouver une teneur en eau d'équilibre du produit très réaliste,
- Faire une cinétique de séchage solaire et déterminer les CCS solaire

Enfin, il serait intéressant aussi de faire une autre approche expérimentale concernant les courbes d'adsorption.

REFERENCES

REFERENCE:

- [1] -Touati. (2008) « Etude Théorique Et Expérimentale Du Séchage Solaire Des Feuilles De La Menthe Verte (Mentha Viridis) » Thèse De Doctorat. Département De Physique. Tlemcen
- [2]- M. Kouhila. (1998) Etude Expérimentale Du Séchage Convectif De La Menthe Dans. Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique Un Séchoir Modulaire Polyvalent A Chauffage Partiellement Solaire
- [3] -J.A. Randriamorasota, (1985) 'Recherche D'un Produit Industriel Nouveau : Séchoir Solaire Indirect Modulaire Polyvalent', Thèse De Docteur Ingénieur, Université De Madagascar,
- [4]- A. Ladipo, (1989) 'Conception Et Mise Au Point D'un Séchoir Solaire Polyvalent Modulaire A Vocation Industrielle Adapté Au Bénin', Thèse De Doctorat National, Université De Perpignan, France.
- [5]- Boussalia Amar. (2010). Contribution A L'étude De Séchage Solaire De Produits Agricoles Locaux. Memoire De Magister. Département De Génie Climatique. Constantine
- [6] Slimane Boughali. (2010). Etude Et Optimisation Du Séchage Solaire Des Produits Agro-Alimentaires Dans Les Zones Arides Et Désertiques. Thèse. Département De Mécanique Faculté Des Sciences De L'ingénieur. Batna
- [7]- Houhou Hatem. Etude Théorique Et Expérimentale Du Séchage Solaire De Certains Produits Agro-Alimentaires Mémoire De Magister En Génie Mécanique; Option Système Thermique Et Maîtrise De L'énergie; Université De Biskra;
- [8] Rezazga Ahmed. 2015 « Etude Experimental De Sechage Solaire Direct Et Indirect De La Feve Contribition Technico-Economique » Mémoire De Master Academique Ouargla
- [9]- J. P. Nadeau, J. R. Puiggali. (1995). Séchage Des Processus Physiques Aux Procédés Industriels. Technique Et Documentation. Lavoisier. Paris. France.
- [10] -Djamel Mennouche. (2006) « Et Des Plantes Medicinales Par Les Procedes De Sechage Solaire » Mémoire Magister Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [11] -Http://Educscol.Education.Fr

RÉFÉRENCES

- [12] -Hassiba Benzita (2011) « Détermination Expérimentale Et Simulation Des Courbes De Sorption D'un Produit Agroalimentaire En Vue D'un Séchage Solaire Convectif» Memoire De Master. Universite Kasdi Marbah Ouargla
- [13] Y. Jannot, Isothermes De Sorption: Modèles Et Détermination, Lept-Ensam, 2003
- [14]- Kalengi Mbwalala .2014 « Détermination Des Isothermes De Sorption (Adsorption-Désorption) » Mémoire D'ingénieur Agronome. Université De Kinshasa
- [15] -Benseddik Abdellouahab (2011) « Modélisation Et Simulation Du Séchage De La Figue Par Des Séchoirs Solaires Indirects Fonctionnant En Convection Forcée » Mémoire De Magistère Université Abou- Bekr Belkaid-Tlemcen
- [16] -Nadia Nadir « Recherche Des Conditions Optimales De Fonctionnement D'un Séchoir Solaire » Mémoire De Magister. Université Kasdi Merbah Ouargla
- [17]-T. L. Thompson, & Al.,1986, Mathematical Simulation Of Corn Drying A New Model,

Transactions Of The American Society Of Agricultural Engineers, Vol. 11, Pp. 582-586

- [18] -Pfost & Al., 1976, Summarizing And Reporting Equilibrium Moisture Data For Grains, American Society Of Agricultural Engineers, Paper N° 76-3520, St. Josef, Mi.
- [19] -C. R. Oswin, 1946, The Kinetics Of Package Life. Iii. Isotherm, Journal Of Society Of Chemical Industry, Vol. 65, Pp. 419-421.
- [20] -H. A. Iglesias, & J. Chirife, 1976b, On The Local Isotherm Concept And Modes Of Moisture Binding In Food Products, Journal Of Agricultural And Food Chemistry, Vol. 24, Pp. 24-77.
- [21] -C. Van Den Berg, 1984, Description Of Water Activity Of Food Engine Erring Purposes By Means Of The Gab Model Of Sorption, In: Mckenna, B.M. (Ed), Engineering And Foods, New York: Elsevier, P. 119.
- [22] -Peleg, 1993, Assessment Of Semi-Empirical Four Parameter General Model For Sigmoidsorption Isotherms, Journal Of Food Processing Engineering, Vol. 16(1) Pp. 21-37.
- [23] -I. Langmuir, 1916, Journal Of American Chemical Society, Vol. 46, Pp. 1361-1362.
- [24]-H. A. Iglesias & J. Chirife, 1982, Water Sorption Parameters For Food And Food

- [25]- A. Benhamou Et Al « Modélisation Des Isothermes De Sorption Des Feuilles De Marjolaine » Rev. Energ. Ren Vol. 13 N°2 (2010) 233 247
- [26]- C. Bonazzi Et J-J. Bimbenet, Séchage Des Produits Alimentaires. Techniques De L'ingénieur, Traité Agroalimentaire, Article F 3000.
- [27]- J.L. Multon, (1980) 'Etat De Liaison De L'eau Dans Les Aliments, Problèmes Fondamentaux De Séchage', Atp-Pirdes, 1980.

[28]- Http://Effeuillage.Cahors.Free.Fr

- [29]- Www.Govome4.Inspartner.Com
- [30]-T. P. Labuza, & Al.,(1985), Effect Of Temperature On The Moisture Sorption Isotherms And Water Activity Shift Of Two Dehydrates Food, Journal Of Food Sciences, Vol. 50, Pp. 385-391.
- [31]- Z. Irzyniec & J. Klimczak, (2003), Effect Of Temperature On Sorption Isotherms Of Brussels Sprout. Nahrung/Food, Vol. 47, N°1, Pp. 24-27.
- [32]- N. D. Menkov, & Al.,(1999), Applying The Linear Equation Of Correlation Of Brunaueremmet-Teller (Bet)-Monolayer Moisture Content With Temperature, Nahrung, Vol. 43, Pp.118-121.
- [33] -J. Stencl, (1999), Water Activity Of Skimmed Milk Powder In The Temperature Range Of 20-45°C, Acta Veterinaria Bruno, Vol. 68, Pp. 209-215.
- [34] M. Kouhila & Al., (2001), Experimental Determination Of The Sorption Isotherms Of Mint (Mentha Viridis), Sage (Salvia Officinalis) And Verbena (Lippia Citriodora), Journal Of Food Engineering, Vol. 47, Pp. 281-287.
- [35] -M. Kouhila& Al., (2002), Experimental Study Of Sorption Isotherms And Drying Kinetics Of Moroccan Eucalyptus Globulus, Drying Technology, Vol. 20, Pp. 2027-2039.
- [36] -S. Lahsasni & Al., (2002), Experimental Study And Modelling Of Adsorption And Desorption Isotherms Of Prickly Pear Peel (Opuntia Ficus Indica), Journal Of Food Engineering, Vol. 55, Pp. 201-207.

RÉFÉRENCES

- [37] -K. J. Park, & Al., (2002), Evaluation Of Drying Parameters And Desorption Isotherms Of Garden Mint Leaves (Mentha Crispa L.), Journal Of Food Engineering, Vol. 51 Pp. 193-199.
- [38] -S. Lahsasni & Al., (2003), Moisture Adsorption-Desorption Isotherms Of Prickly Pear Cladode (Opuntia Ficus Indica) At Different Temperatures, Energy Conversion & Management, Vol. 44 Pp. 923-936.
- [39] -L. Ait Mohammed, & Al., (2005), Equilibrium Moisture Content And Heat Of Sorption Gelidium Sesquipedale, Journal Of Stored Products Reearch, Vol. 41, Pp. 199-209. 2005b, Moisture Sorption Isotherms And Heat Of Sorption Of Bitter Orange Leaves (Citrus Aurantium). Journal Of Food Engineering, Vol. 67, Pp. 491-498.
- [40]-A. Jamali, & Al., (2006), Moisture Adsorption-Desorption Isotherms Of Citrus Reticulate Leaves At Three Temperatures, Journal Of Food Engineering, Vol., 77, Pp. 71-78.

ANNEXES

Tableau II.1 : Valeurs de l'aw de solution d'acide sulfurique en fonction de la concentration (% volume/volume) et de la température [19].

Concentration	Température de la solution et de l'air (°C)						
%	25	30	40				
(volume/volume)							
10	94.29	94.27	95.62				
20	87.56	87.36	87.85				
25	81.66	81.70	83.42				
30	74.93	74.79	75.37				
35	66.51	66.62	67.42				
40	56.83	56.56	57.48				
45	45.88	46.19	47.00				
50	35.57	35.51	36.69				
55	25.89	26.05	26.75				
60	16.71	17.00	17.80				
65	9.43	9.71	10.23				
70	4.34	4.52	4.97				
75	1.72	1.82	2.06				
80	0.52	0.58	0.69				
85	0.16	0.18	0.23				
90	0.03	0.04	0.05				
95	-	-	0.01				

ملخص:

إن تحديد كمية الماء في وضع التوازن لأي منتج معد للتجفيف هو ضروري أثناء عملية التخزين و التجفيف الشمسي بالحمل الحراري المدعم وغالبا ما يتم أخذ هذه القيم من منحنيات يطلق عليها اسم: إيزوتارم التحرير.

يعد تحديد منحنيات الإيزوتارم خطوة ضرورية لتحديد توزيع وكثافة روابط الماء في المنتجات محل التجربة بتسمح هذه المنحنيات بتحديد كمية الماء النهائية التي سيتم التوصل اليها من أجل تحسين ظروف تجفيف هذه المنتجات وتوفير معلومات قيمة عن التوازن الاسترطابي ونظرا لتعقيد ظواهر التحرير فإنه لا يمكن التنبؤ بإيزوتارم التحرير من منطلقات نظرية ولكن يجب إجراؤه تجريبيا لكل منتج

وهكذا فإن هذه الدراسة التجريبية تهدف إلى تحديد منحنيات إيزوتارم التحرير لمنتج طبي عطري محلي (اقليم توات) هو شيح ابن سينا (الشبية), وذلك باستخدام محاليل حمضية كبريتية وقد أجريت التجربة من أجل ثلاث قيم: درجة حرارة 40 درجة مئوية, 50 درجة مئوية و 60 درجة مئوية. وتهدف ايضا لدراسة تأثير درجة الحرارة على منحنيات التوازن في المنتج وأخيرا إلى وصف إيزوتارم التحرير الشيح ابن سينا (الشبية) من أجل كل درجة من درجات الحرارة وذلك باستخدام النموذج GAB.

كلمات البحث : إيزوتارم التحرير -- النموذج GAB -- طريقة غرافيميتريك -- محلول حمضي كبريتي - التجفيف الشمسي

Résumé:

Les teneurs en eau d'équilibre d'un produit à sécher sont indispensables lors d'une opération de stockage et de séchage solaire par convection forcée. Ces valeurs sont souvent relevées à partir des courbes dites isothermes de sorption.

La détermination de ces isothermes est une étape indispensable pour connaître la répartition et l'intensité des liaisons de l'eau dans les produits en vigueur. Elles permettent de déterminer la teneur en eau finale à atteindre pour optimiser les conditions de séchage de ces produits et donnent des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique.

Ainsi, le présent travail se propose de déterminer expérimentalement les isothermes de désorption d'un produit médicale aromatique local (région Touat), l'absinthe (Artémisia absinthium), à l'aide de la méthode des solutions d'acide sulfurique. (L'expérience est réalisée pour trois valeurs de la température 40°C ,50 °C et 60 °C), d'étudier l'influence de la température sur les courbes d'équilibre du produit et enfin de décrire l'isotherme de désorption de la l'absinthe (Artémisia absinthium) pour chacune des trois températures à l'aide le model de GAB

Mots clés: Isothermes de désorption - Model de GAB - Méthode gravimétrique - Solutions d'acide sulfurique - Séchage solaire

Abstract:

The quantities of water of balance of a product to dry are indispensable in operation of storage and solar drying by forced convection. These values are often taken from the curves isotherm of sorption.

The determination of these isotherms is an indispensable stage to know the distribution and the intensity of the water links in the products to be tested. The isotherms permit to determine the final quantity of water to be reached to optimize the conditions of the drying of these products and give precious information on the hygroscopic equilibrium. Thus, the present work intends to determine, experimentally, the isotherms of desorption of a local medical product (Touat medium), the absinthe (Artémisia absinthium), using the method of the sulfuric acid solution, (The experience is achieved for three values of temperature 40°C, 50 °C and 60 °C), to study the influence of the temperature on the curves of equilibrium of the product and finally to describe the isotherm of desorption of the absinthe (Artémisia absinthium) for each of the three temperatures with the help of a GAB model

Keywords: Isotherm of desorption- GAB model - Gravimetric method- sulfuric acid solution-, Solar drying.