

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 ET
ENERGIES RENOUVELABLES**

Thème

**Détermination expérimentale et modélisation des isothermes de sorption
des dattes (*Takarboucht/ Tegazza*) de Touat à différentes températures**

Soutenu le : / 05 / 2018

Présenté par :

AZIZI Fatiha

BAHAMOU Ismahane

President: Mr.

Examineur: Mr.

Encadreur: Mr. MEDIANI Ahmed / URER-MS

Remerciements

Nous remercions **ALLAH** le tout puissant qui nous a
Accordé la volonté et le courage pour réaliser ce travail.

Nous remercions notre encadreur **Mr : MEDIANI Ahmed** pour ses conseils, sa
patience et sa gentillesse aussi pour son expérience dans l'orientation et la direction de ce
travail.

Un grand remerciement à **Mr : TIGANI Chérif, DJEBER A. Elkarim, et Mr. Loumani Akil** pour
l'énorme aide.

Nous remercions aussi le Président **.Mr HARROUZ Abd Elkader.** et L'examineurs **.Mr.**
LARBI Ahmed Amine..et Mr : MEDIANI Ahmed pour d'avoir accepté de juger ce
travail, ainsi que tous les enseignants sans exception,

Enfin, nous adressons un sincère remerciement à tous les enseignants de la faculté des
sciences et de la technologie pour la formation que nous avons revue auprès d'eux sans

oublier mes collègues, les étudiants du département des sciences de la matière

Promotion 2017-2018.

Dédicace

*c'est avec un grand honneur que je dédie ce travail à ceux qui ont su m'élever,
qui m'ont donné le bonheur de la vie et m'ont guidé vers le bon chemin.....*

A mon père qui m'a toujours soutenu à affronter les difficultés.

*A toi ma chère mère, qui a guidée mes pas d'enfance, toi dont l'affection ne
m'a pas fait défaut, car toujours là je crois que l'on est jamais grand pour dire
simplement merci pour toute mère*

A mes chers frères Mohamed, Elbarka, ABD Rahmane, Yacine, Amine, boufldja

A mes sœurs Djamaila, Zineb, Merime, hafsa, wahiba

*A les enfants de ma famille :sihem, kh, ABD K, FZ, AMD, MED, ANAS, wisal,
Inas, fatoma.*

A tous mes amies particulièrement

Fatiha

Dédicace

*c'est avec un grand honneur que je dédie ce travail à ceux qui ont su m'élever,
qui m'ont donné le bonheur de la vie et m'ont guidé vers le bon chemin.....*

A mon père qui m'a toujours soutenu à affronter les difficultés.

*A toi ma chère mère, qui a guidée mes pas d'enfance, toi dont l'affection ne
m'a pas fait défaut, car toujours là je crois que l'on est jamais grand pour dire
simplement merci pour toute mère.*

**A mon mari Azouziabdelkader pour sa patience et son
accompagnement tout au long de mon étude**

A mes chers frères

A mes sœurs

A les enfants de ma famille

A tous mes amies particulièrement imane, salima , aicha , fatiha

Sans oublier mes cher élèves et collègues pour leur gentillesse

ismahane

SOMMAIRE

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
M_e	Masse de l'eau	kg
M_a	Masse du gaz	kg
$H_r = \varphi$	Humidité relative de l'air	%
H_{as}	Humidité absolue de saturation	kg d'eau /kg (as)
H_a	Humidité absolue	kg d'eau /kg (as)
X	Teneur en eau du produit à base sèche	kg d'eau /kg de m.s
X_h	Teneur en eau du produit à base humide	kg d'eau /kg de m.h
X_s	Humidité relative du solide	%
X_a	Humidité absolue du solide	kg d'eau/kg de m.s
P_s	Pression de saturation	Pascal
p_a	Pression partielle de l'air sec	Pascal
p_m	Pression de vapeur à la surface mouillée	Pascal
P_v	Tension de vapeur	Pascal
Ψ	Degré de saturation	%
Q_{st}	Chaleur isostérique	J/mol
R	Constante des gaz parfaits	J /k.mol
K	Conductivité hydraulique du milieu	$W/m^2 \cdot ^\circ C$

SOMMAIRE

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX	I
LISTE DES FIGURES	II
NOMENCLATURE	III
INTRODUCTION GENERALE	
INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre I	Étude bibliographique
I.1. Introduction	0
I.2. Généralité sur le séchage	02
I.2.1. Définition	04
I.2.2. historique	05
I.2.3.L'air humide	06
I.2.4. Caractérisation des solides humides	07
I.2.5. Cinétique du séchage	08
I.2.6. 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 de sorption	
I.5.Conclusion	20
Chapitre II	Mode expérimentale
II.1. Introduction	22
II.2. Description du mode opératoire	
II.2.1. Préparation des solutions saline saturées	22
II.2.2. Préparation des échantillons des dattes Takarboucht/Tegazza	
II.2.3. Préparation du dispositif expérimentale	23
II.3.détermination de la teneur en sucre réducteurs par la méthode furfuralique	26
II.3.1. le principe de la méthode surfuralique	27
II.3.2.mode opératoire	28

SOMMAIRE

II.3.3.détermination de la teneur en matière grasse	28
II.4.Conclusion	29
Chapitre III Résultats expérimentaux et discussion	
III.1. Introduction	30
III.2.La composition physicochimique des dattes Takarboucht/Tegazza	
III.3.Masses sèches des échantillons des dattes Takarboucht/Tegazza	30
III.4. Masses humides et masses d'eau à l'équilibre des échantillons des dattes Takarboucht/Tegazza	32
III.5. Teneurs en eau à l'équilibre des échantillons des dattes Takarboucht/Tegazza	34
III.6. Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza	
III.7.. Modélisation des courbes de sorption	35
III.7.1. Modèles de description des isothermes de sorption	
III.7.2.Résultats de la modélisation	38
III.8.Conclusion	47
CONCLUSION GENERALE	
Conclusion générale	47
Références	49
Annexes	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Modèles de la sorption	19
Tableau II.1	Valeurs standards des humidités relatives données par les différents sels en fonctions de la température	25
Tableau II.2	Solubilités des sels utilisés	30
Tableau II.3	Massas des sels utilisés pour la saturation	31
Tableau III.1	Les masses constituant des dattes Takarboucht/Tegazza	32
Tableau III.2	La composition physicochimie des dattes Takarboucht/Tegazza	33
Tableau III.3	Valeurs des masses sèches de tous les échantillons à T = 40°C ,50°C, 60°C	33
Tableau III.4	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre des dattes Takarboucht/Tegazza à T = 40 °C	34
Tableau III.5	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre des dattes Takarboucht/Tegazza à T = 50 °C	34
Tableau III.6	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre des dattes Takarboucht/Tegazza à T = 60 °C	41
Tableau III.7	Teneurs en eau à l'équilibre obtenues pour neuf humidités relatives et à trois températures de travail	44
Tableau III.8	paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre des données de désorption des dattes Tegazza à T=40°C	
Tableau III.9	paramètres estimés par les modèles de lissage pour les teneurs en humidité d'équilibre des données de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza à T=50°C	47
Tableau III.10	paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre des données de désorption à des dattes Takarboucht/Tegazza T=60°C	

LISTE DES FIGURE

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 salines saturées	24
Figure II.2	Mesure des humidités des solutions salines saturées	26
Figure II.3	Préparation des échantillons des dattes Takarboucht/Tegazza	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 II.6	L'extraction de lipide	
Figure III.1	La composition physicochimique des dattes Takarboucht/Tegazza	32
Figure.III.2	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza : Points expérimentaux à T= 40 °C	35
Figure.III.3	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza : Points expérimentaux à T= 50 °C	35
Figure.III.4	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza : Points expérimentaux à T= 60 °C	36
Figure.III.5	Influence de la température sur les isothermes de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza	37
Figure.III.6	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle GAB à (T = 40°C)	39
Figure.III.7	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle Peleg à (T = 40°C)	39
Figure.III.8	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle smith à (T = 40°C)	40

LISTE DES FIGURE

Figure.III.9	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle Langmuir à (T = 40°C)	40
Figure.III.10	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle GAB à (T = 50°C)	42
Figure.III.11	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle Peleg à (T = 50°C)	42
Figure.III.12	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle à Langmuir à (T = 50°C)	43
Figure.III.13	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle smith à (T = 50°C)	43
Figure.III.14	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle GAB à (T = 60°C)	45
Figure.III.15	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle Peleg à (T = 60°C)	45
Figure.III.16	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle Langmuir à (T = 60°C)	46
Figure.III.17	Isotherme de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza de modèle smith à (T = 60°C)	46

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les isothermes de sorption possèdent une grande importance dans l'industrie agroalimentaire et notamment dans le séchage solaire, le stockage et la conservation des aliments. Leur connaissance nous informe sur l'équilibre hygroscopique ou hydrique du produit considéré. En effet, nous ne pouvons connaître de domaine de stabilité du produit après séchage qu'à partir de ces courbes qui nous renseignent ainsi sur les types d'eau présentes dans le produit. Cet équilibre est caractérisé à partir de ces courbes dont la détermination expérimentale exige un grand nombre de mesures. Elles sont également utiles lors d'un processus de séchage solaire convectif. En effet, c'est à partir des courbes de sorption qu'on détermine la teneur en eau finale d'un 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 ambiant.

L'objectif visé par cette étude est la détermination expérimentale et par simulation des courbes de désorption des dattes (variété *takarboucht* ou *tegazza*) et ce pour trois valeurs de température, à savoir : 40, 50 et 60°C. On détermine ces équilibres par la méthode gravimétrique : soit des solutions salines saturées ou les concentrations d'acide sulfurique.

Notre mémoire a été fait à L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien au sein de l'équipe de Séchage Solaire, sise à Adrar.

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.

Le deuxième chapitre : nous identifions les dattes à sécher et présentons la méthode expérimentale pour la détermination des courbes de désorption des dattes de *takarboucht/tegazza* pour trois températures différentes à savoir 40, 50 et 60 °C.

INTRODUCTION GENERALE

Le troisième chapitre : est consacré aux résultats expérimentaux et à la 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 des dattes de *takarboucht/tegazza* sont tracées pour les trois températures et comparés aux modèles mathématiques les plus connus dans ce domaine (GAB, LANGMUIR, SMITH..).

Une conclusion générale englobant les résultats obtenus et donnant lieu aux perspectives et suggestions, clôturera ce mémoire.

INTRODICTION GENERALE

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 agricole 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'Algérie, 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]

Dans ce travail présent les résultats de la détermination expérimentale des isothermes de désorption des « dattes de takarboucht» par la méthode des solutions salines saturées pour optimiser les conditions de séchage de ce produit « dattes de takarboucht »

1.2. Généralité sur le séchage

1.2.1. Définition

Le séchage est une technique de purification visant à débarrasser un mélange homogène ou hétérogène d'un constituant liquide. Sécher un produit consiste à apporter l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau du produit (chaleur latente de vaporisation), puis à évacuer la vapeur formée. Le but d'une telle opération est, soit de rendre à une substance traitée ses qualités mécaniques ou physico-chimiques initiales, soit de faciliter son stockage et sa conservation.[5]

1.2.2. Historique Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits Agricoles et alimentaires (céréales, graines, viandes, poissons, figes, noix, tabac, plantes Médicinales,... etc.), pour l'élaboration des matériaux (briques, céramique, poterie avant Cuisson, bois...), ou pour les textiles et les peaux. Pour ces applications traditionnelles, en fait Encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel ». Le séchage dit « Artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une Plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait Sec ou café dits « instantané », pates alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [6].

1.2.3. L'air humide

L'air atmosphérique est un mélange, en proportions variables, d'air sec et de vapeur d'eau. L'air sec est lui-même un mélange de gaz, mais dont les proportions sont invariables, du moins pour les principaux constituants (Azote, Oxygène et Argon), qui représentent 99,97 % en volume de sa composition [7] [8].

1.2.3.1. 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

- 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:

$$M_h = m_v + m_a \quad (I.1)$$

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

$$P = p_v + p_a \quad (I.2)$$

1.2.3.2. Humidité relative

La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur si $p_v \leq p_s(T)$, on définit alors l'humidité relative ou degré hygrométrique H_r de l'air par la relation [4] :

$$H_r = \frac{p_v}{p_s} \cdot 100 \quad (I.3)$$

p_v : La pression partielle de la vapeur dans le mélange.

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

1.2.3.3. Humidité absolue

Par définition, l'humidité absolue est le rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume V d'air humide à la masse d'air sec contenue dans ce même volume. L'humidité absolue est encore parfois appelée rapport de mélange, humidité spécifique, teneur en eau cette humidité est donnée par la relation suivante:

$$H_a = \frac{m_v}{m_a} \quad (I.4)$$

Cette relation peut s'écrire sous la forme suivante:

$$H_a = 0.622 \cdot \frac{p_v}{P - p_v} \quad (I.5)$$

1.2.3.4. Degré de saturation

Le degré de saturation est le rapport de l'humidité spécifique de l'air à l'humidité spécifique de l'air saturé à la même température

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (I.6)$$

1.2.3.5. Températures caractéristiques de l'air humide

La chaleur à transférer au milieu à sécher est apportée par un gaz vecteur chaud qui assure aussi le transport des vapeurs hors de l'enceinte de séchage. On distingue classiquement quatre températures remarquables [5].

1.2.3.5.1. 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.

1.2.3.5.2. 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 n'est prélevée que sur l'air.

La différence $(T - T_h)$ est représentative de l'humidité relative H_r de l'air car :

- Elle est nulle si l'air est saturé en vapeur d'eau soit, si $H_r = 100\%$, pas d'évaporation possible.
- Elle augmente avec la différence $(p_s(T) - p_v)$ qui est le terme moteur du transfert de masse donc elle diminue quand H_r augmente [6]

1.2.3.5.3. Température de rosée

Il s'agit de la température pour laquelle l'air devient saturé pour la pression de vapeur d'eau p_v considérée. Or p_v intervient dans l'expression de l'humidité spécifique, si bien que la température de rosée représente encore la température de saturation à humidité spécifique constante [6].

Donc la température de rosée est la température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation. Cette température T_r est tel que : $P_v = P_s(T_r)$ [9].

1.2.3.5.4 Masse volumique de l'air humide

Considérons une masse $(1 + H_a)$ kg d'air humide contient donc 1 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 :

$$\rho_{ah} = \rho_0 \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P - (1 - \delta)P_v}{P_0} \quad (1.7)$$

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

1.2.3.5.5 Milieux poreux

On appelle milieu poreux un solide de forme compliqué délimitant et englobant des vides appelés pores. Ces vides peuvent communiquer entre eux 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 grains 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].

1.2.2.5.6 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 [10].

- 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.

1.2.4. Caractérisation des solides humides

1.2.4.1. Humidité absolue

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

$$X_a = x = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{I.8})$$

I.2.4.2. 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 .[11]

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_s} \text{(I.9)}$$

I.2.4.3. 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 p_s .

$$H_r = \frac{p_v}{p_s} \text{(I.10)}$$

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 phase 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 I.1.)

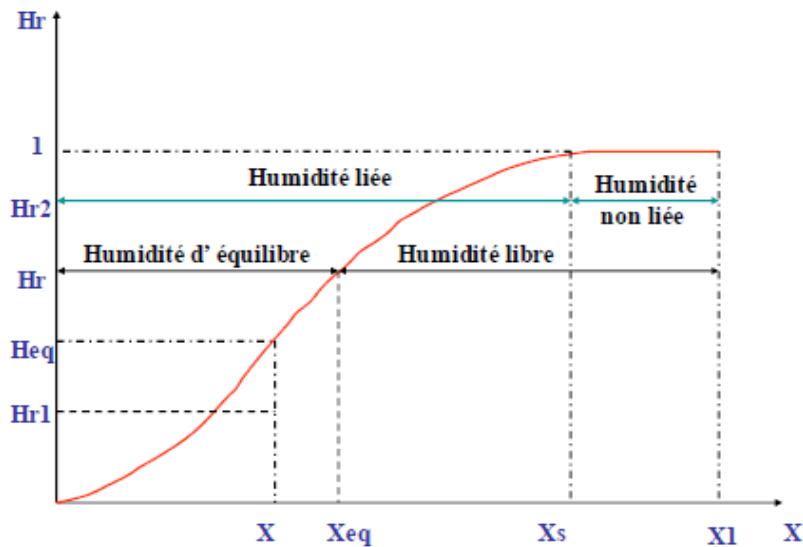


Figure I.1. Isotherme d'équilibre

On voit sur la figure I.1. que l'humidité X d'un solide ne peut être en équilibre qu'avec une atmosphère dont l'humidité relative est X_{eq} . Si l'humidité relative de l'atmosphère est :

1- $H_{r,1} < H_{eq}$ y'a désorption c'est-à-dire séchage du solide.

2- $H_{r,2} > H_{eq}$ 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 ($H_r = 1$).[12].[13].[14]

1.2.5. 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 avons 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, tous 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

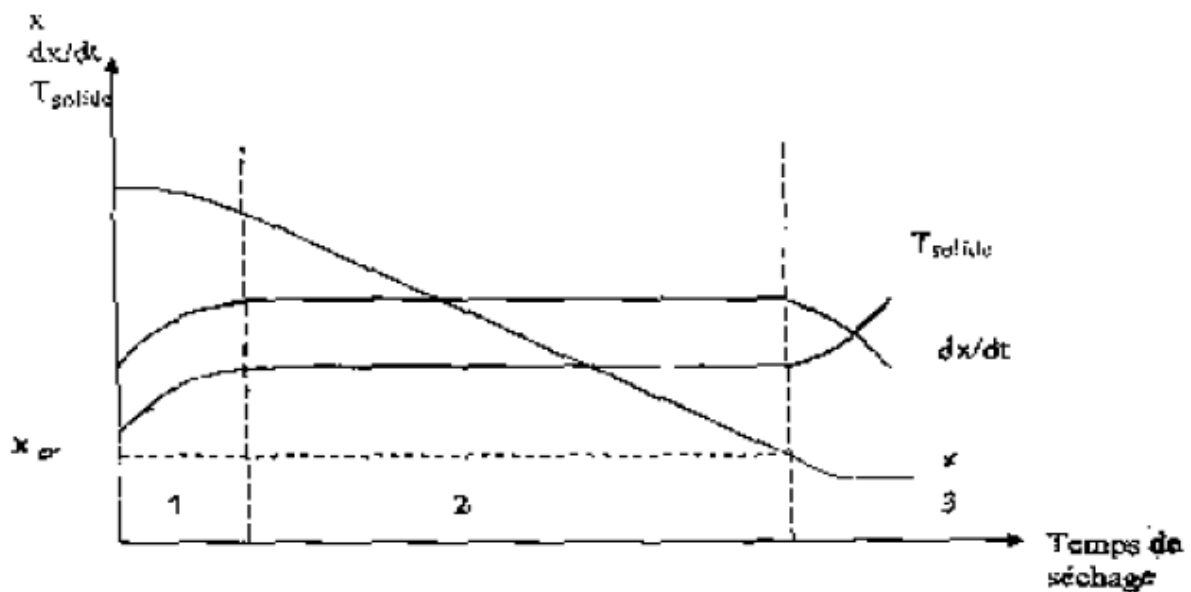


Figure I.2. Cinétique de séchage

Période (1) : période transition.

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

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

Durant cette période la vitesse de séchage reste à près constante pour la plupart des produits.

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

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

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

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

Disparition de l'eau libre en surface de produit :

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

- L'épaisseur du produit:

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

- La diffusivité de l'eau dans le produit:

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

- La résistance mécanique des parois cellulaires intactes:

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

- Le croutage:

Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit [14].

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 où 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 à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par le flux de gaz chaud.

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

L'enceinte où est placée le corps humide à 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 entraînement, 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 a_w

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

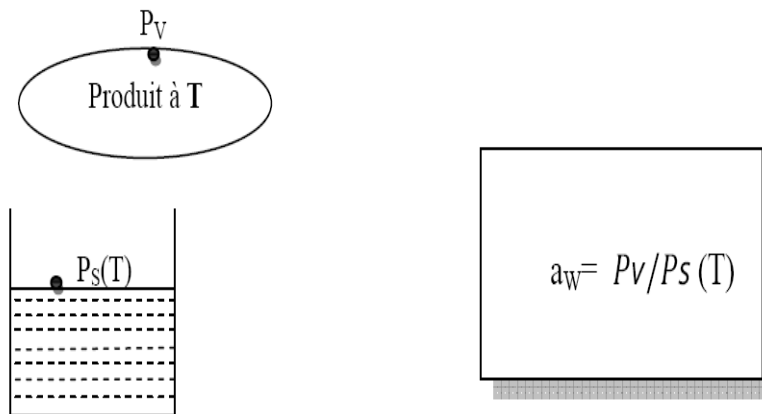


Figure I.3. Activité de l'eau dans le produit

Considérons maintenant un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre P_V , T , P_{V_a} et T_a
 Étant respectivement les pressions de vapeur d'eau et les températures du produit et de l'air :

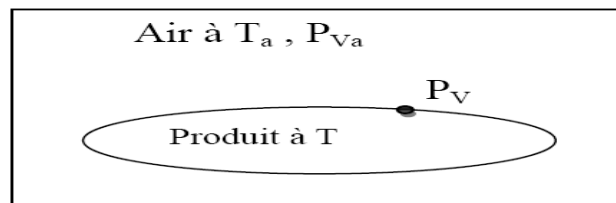


Figure I.4. Le produit et un air en équilibre

L'équilibre imposé $T=T_a$ (pas de transfert de chaleur) et $P_V = P_{V_a}$ (pas de transfert de masse)

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

$$HR_a = P_{V_a} / P_S(T_a) \quad (I-11)$$

D'ou l'on déduit : $HR_a = a_w$.

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 P_V 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 m_e d'eau.
- la masse restante $m_s = m - m_e$ appelée masse sèche

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

$$X = m_e / m_s \quad (\text{I.12})$$

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

$$X_h = m_e / m_h \quad (\text{I.13})$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations :

$$X = X_h / (1 - X_h) \quad \text{et} \quad X_h = X / (1 + X) \quad (\text{I.14})$$

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. [15]

1.3.3 .ISOTHERMES DE SORPTION

I.3.3.1. Définition

L'activité de l'eau a_w dans un produit dépend principalement de la teneur en eau ($X_{\epsilon q}$) et de sa température.

La courbe représentant pour une température donnée la teneur en eau ($X_{\epsilon q}$) 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 :

- Isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec ;
- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau. [16]

La (figure I.3) montre que les deux courbes sont en générale différentes car le séchage d'un produit (passage de a_w) entraîne des modifications de structure et de porosité. Il y a un phénomène d'hystérésis [17].

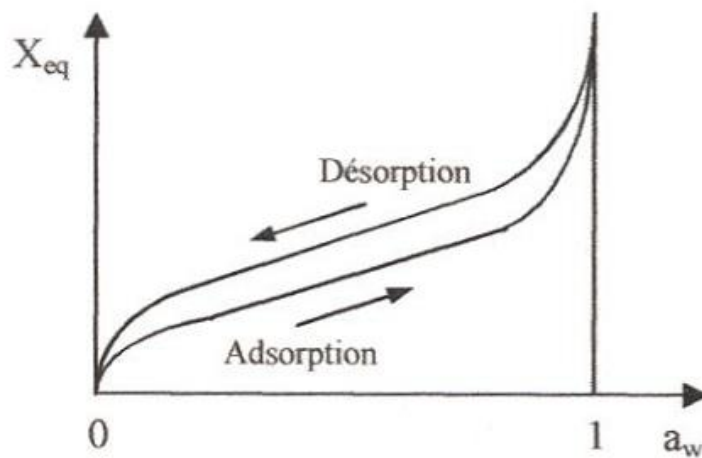


Figure I.5: Les isothermes d'adsorption / désorption [15]

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. [18]

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 [19].

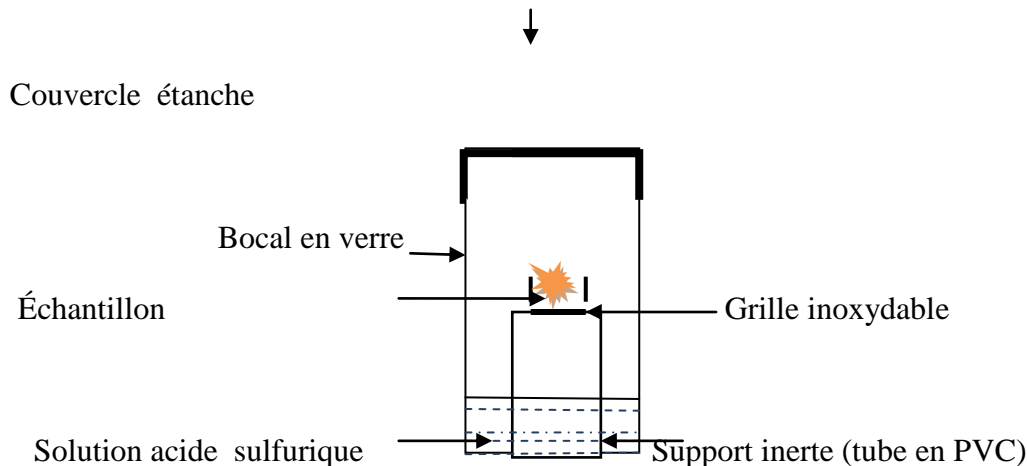


Figure I.6: Schéma d'expérimentale des isothermes de sorption

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 [20].

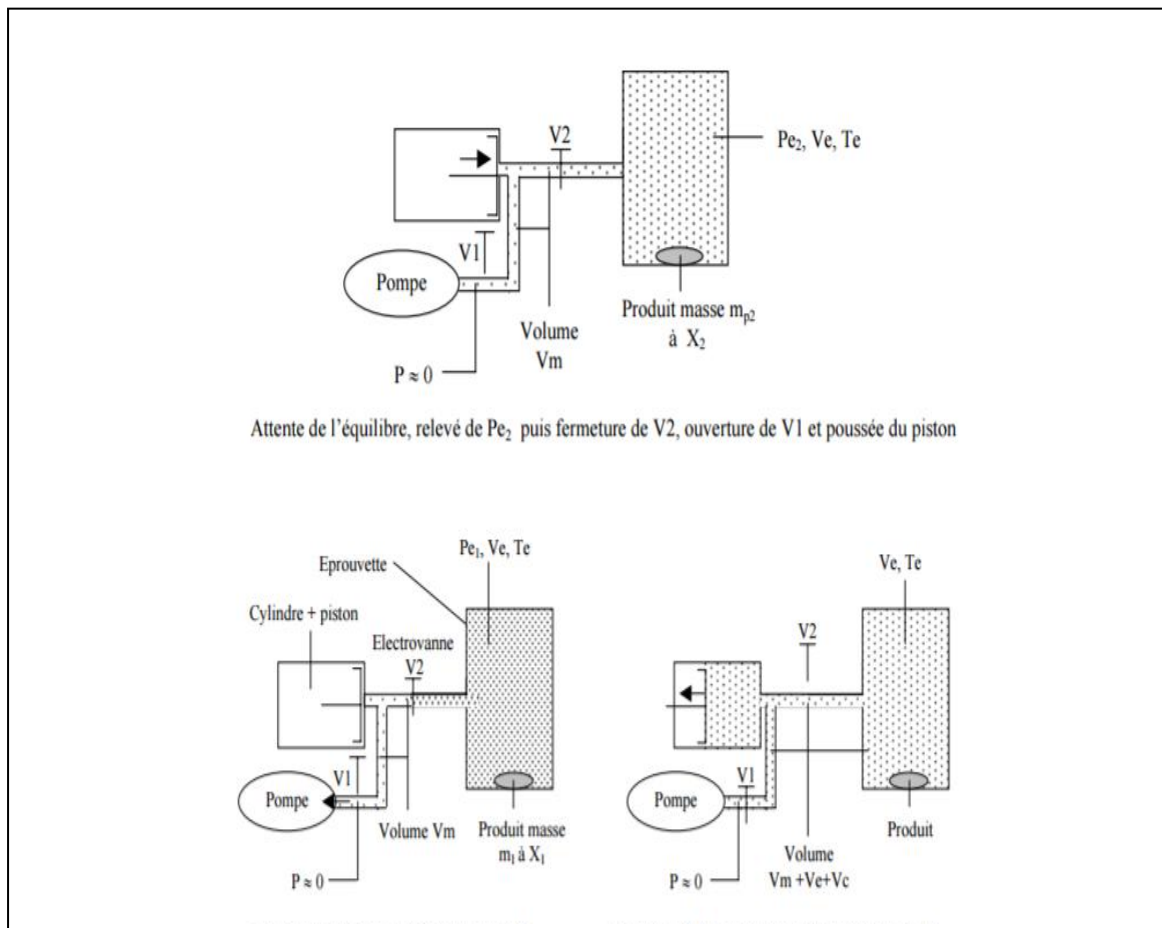


Figure I.7 : Schématisation de la phase de désorption

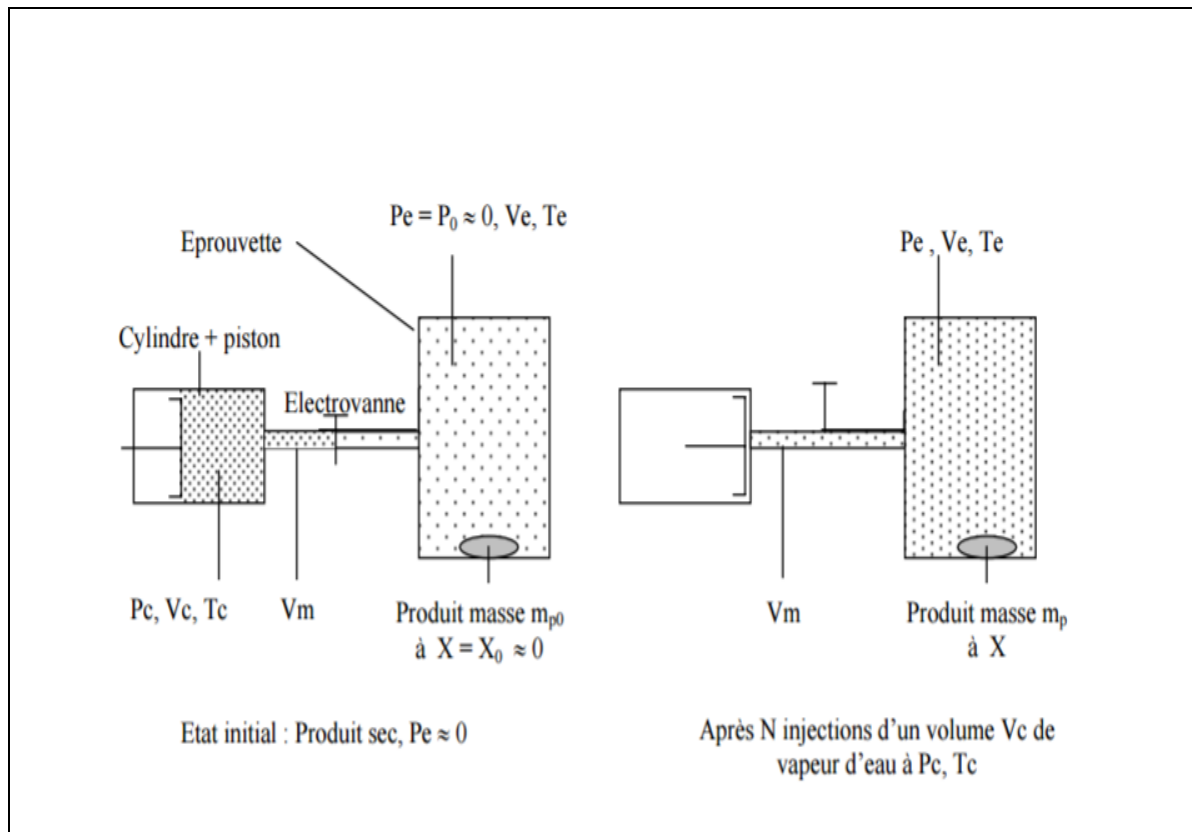


Figure I.8: Schématisation de la phase d'adsorption

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 :

- Il existe plusieurs sites d'adsorption à la surface du charbon activé.
- Chacun de ces sites peut adsorber une seule couche de molécules qui peut être adsorbée par le charbon activé.
- Chacun de sites a la même affinité pour les impuretés en solution.
- 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 :

$$X/m = a. b. C / (1+ a. C) \quad (I.15)$$

a et b sont des constantes.

Si on inverse l'équation, on obtient :

$$1/(X/m) = (1/(a \cdot b \cdot C / (1+a \cdot C))) \quad (\text{I.16})$$

➤ **Isotherme d'adsorption de FREUNDLICH :**

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

$$X/m = KC1/n \quad (\text{I.17})$$

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 :

$$\text{Log}(X/m) = \text{log}(K) + (1/n) \text{log } C \quad (\text{I.18})$$

➤ **Isotherme d'adsorption de BRUNAUER-EMMET-TELLER (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 :

$$X/m = ACX_0 / (C_S - C) [1 + (A - 1)C/C_S] \quad (\text{I.19})$$

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 :

$$C / (C_s - C) X/m = (1/AX_0) + ((A - 1) / AX_0) (C/C_s) \text{ (I.20)}$$

➤ **Le model d'Henderson**

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

$$X_{eq} (T, H_r) = \left[\frac{-\log(1-H_r)}{K(1.8T+492)} \right]^{1/n} \text{ (I.21)}$$

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]

$$n \log(X_{eq}) + \log(k) = \log(-\log(1-H_r)) - \log(1.8T + 492) \text{ (I.22)}$$

Tableau I.1 : Modèles de la sorption

Auteurs	Equation du model	Références	Domaine de Validité de courbe
Henderson modifié	$1-a_w = \exp[-k \cdot (T+n) \cdot X_{eq}^C]$	Thompson&al 1986[17]	Complète
Chung-pfost modifié	$a_w = \exp\left[\frac{-A}{T+B} \exp(-C \cdot X_{eq})\right]$	Pfost& al 1976[18]	Complète
Oswin modifié	$X_{eq} = (A+BT) \left[\frac{a_w}{1-a_w}\right]^C$	Oswin, 1946[19]	Complète
Halsey modifié	$a_w = \exp\left[\frac{-\exp(A+BT)}{X_{eq}^C}\right]$	Iglesias&Chirifie, 1976b [20]	Complète
GAB	$X_{eq} = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot a_w}{[1-B \cdot a_w][1-B \cdot a_w + B \cdot C \cdot a_w]}$	Van den Berg 1984, [21]	Complète
Peleg	$X_{eq} = A \cdot a_w^{k1} + B \cdot a_w^{k2}$	Peleg, 1993[22]	Complète
Langmuir	$X_{eq} = \frac{1}{[A+B \cdot a_w^{C-1}]}$	Langmuir I., 1916, [23]	Complète
BET modifié	$X_{eq} = \frac{(A+BT)C \cdot a_w}{[1-a_w][1-a_w+C \cdot a_w]}$	Iglesias&Chirifie, 1976[4]; Iglesias,&Chirifie, 1982, [24]	Zone I

I.4. Chaleur isostérique de sorption

Le principe de Vanthoff 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 de calculer la chaleur isostérique Q_{st} 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. Q_{st} peut être calculée en utilisant les courbes de sorption obtenues à différentes températures et l'équation de Clausius-Clapeyron [1].

$$\frac{\partial \ln(A_w)}{\partial(T)} = \frac{Q_{st}}{RT^2} \quad (I.23)$$

En intégrant l'équation (I.23) on obtient :

$$\ln(A_w) = -\left(\frac{Q_{st}}{R}\right) * \frac{1}{T} + K \quad (I.24)$$

R : Constante des gaz parfaits ($R=8.31 \text{ J k}^{-1}\text{mol}^{-1}$)

K : Conductivité hydraulique du milieu [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}.$].

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 choix des modèles mathématiques 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.

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 [16]

Cette courbe, dite aussi courbe d'équilibre hygroscopique, exprime en ordonnée : la teneur en eau d'équilibre du produit X_{eq} , exprimée en kg d'eau par kg de matière sèche et en abscisse : l'activité de l'eau dans le produit (a_w) qui est égale à l'humidité de l'air ϕ ; en effet les équilibres thermique et hydrique entre le produit (dattes Takarboucht/Tegazza) et l'atmosphère qui l'entoure (Air) est défini par les deux égalités suivantes : [1]

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{air} = T_{produit} \\ \phi/100 = a_w \end{array} \right. \quad (II.1)$$

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

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

$$X_{eq} = f(a_w) \text{ pour } T = \text{constante} \quad (II.2)$$

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. Description du mode opératoire

II.2.1. Préparation des solutions salines saturées

Les solutions salines saturées utilisées sont : KOH, KF, MgCl₂, K₂CO₃, NaCl, KCl, BaCl₂, K₂CO₄. Ces solutions permettent d'obtenir des humidités relatives variant de 5.5 à 95.8%. (Tableau II.1.)



Figure. II.1. Préparation des solutions salines saturées

Tableau II.1. Valeurs standards des humidités relatives données par les différents sels en fonction de la température[22]

Les sels	T1 = 40 °C	T2 = 55 °C
	HR (%)	HR (%)
KOH	5.7	5.5
KF	20.8	20.8
MgCL2	30.5	30.5
K2CO3	45.6	45
NaCL	74.4	74.5
KCL	81.2	81.2
BaCL2	88.2	88.2
K2SO4	95.8	95.8

Mais, avant d’entamer la préparation des huit solutions salines, on a consulté les différentes valeurs des solubilités des sels utilisés et cela pour avoir une idée préalable sur leurs masses. (Tableau II.2.)

Tableau II.2. Solubilités des sels utilisés [16]

Solution	KOH	KF	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	NaCl	KCl	BaCl ₂	K ₂ SO ₄
Solubilités (g /l)	1100	449	542	1120	359	340	360	120

Chaque solution saturée est obtenue en dissolvant, dans une bouteille contenant 120 ml d'eau distillée, une masse mi pesée dans une balance à affichage numérique de précision 0.001g ; pendant la préparation, l'agitation des solutions était nécessaire.

Les masses des sels ajoutées pour obtenir ces solutions salines saturées sont données dans le tableau II.3.

Tableau II.3. Masses des sels utilisées pour la saturation

Solutions	KOH	KF	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	NaCl	KCl	BaCl ₂	K ₂ SO ₄
Masses mi (g)	132	35.92	43.36	134.4	28.72	27.2	28.8	9.6

II.2.2. Préparation des échantillons des dattes Takarboucht/Tegazza :

Nous avons apporté les échantillons des dattes *Takarboucht/Tegazza* de la zone d'Adrar (Bouda), au laboratoire de l'URER/MS, en état frais et sain pour l'objet de l'étude.

Les échantillons frais, destinés au processus de désorption des dattes *Takarboucht/Tegazza*, 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.

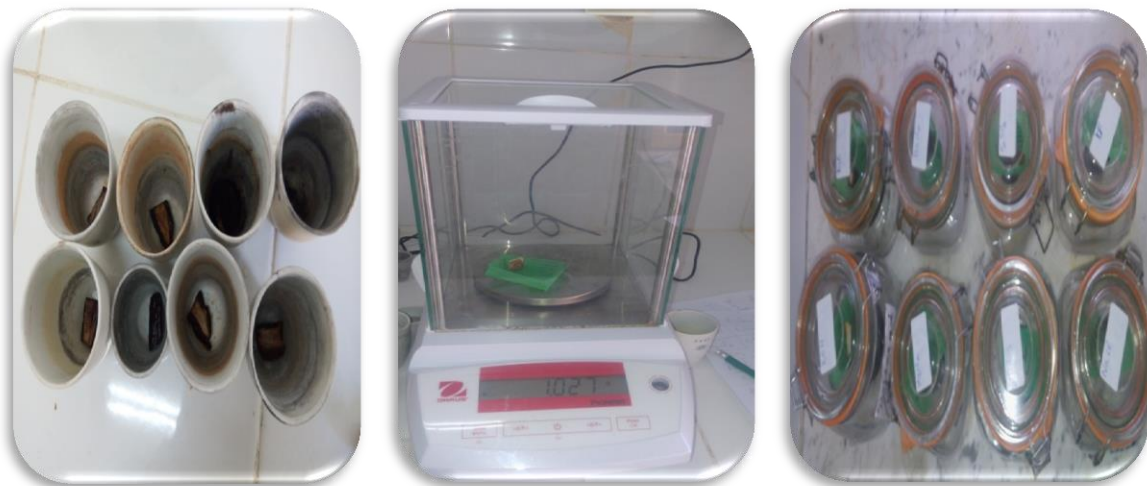


Figure.II.2 : Préparation des échantillons des dattes *Takarboucht/Tegazza*

II.2.3. 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 $200 \pm 1^\circ\text{C}$.

Les expériences de désorption menées ont été réalisées à deux températures différentes : 40°C , 55°C et à huit valeurs d'humidité relative. Pour chaque température de travail, on a utilisé une étuve.

Donc, dans chaque étuve, il y'en a huit bocal hermétiques (figure II.2.)



Figure II.3. 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 salines 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.

-Dès 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.4 : Les échantillons dans l'étuve régulée à 105°C**

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 :

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

On détermine l'extrait sec de l'échantillon : on connaît 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.3. Détermination de la teneur en sucre réducteurs par la méthode furfuralique (méthode de Dubois ; 1956) :

II-3-1.Principe :

La méthode de dosage des sucres réducteurs par le réactif au phénol sulfurique introduite par Dubois et Cool ; permet de déterminer la concentration en sucres :

$OSE \frac{H_2SO_4}{Milieuacide}$ dérivés furfuralique $\frac{milieuacide}{phenol}$ compose colores

II-3-2.Mode opératoire :

a-préparation d'échantillon :

On prépare 1g(p) +300ml (eau distille +3g de $CaCO_3$) puis chauffage pendant 30min jusqu'à ébullition avec le maintien d'agitation

Après le refroidissement du mélange on lui ajoute l'eau distillée jusqu'à un litre de solution, de notre produit d'une quantité d'acétate de plomb



Figure. II.5. Préparation de l'échantillon

b-1^{ère} filtration :

La première filtration a pour but d'éliminer les protéines par l'acétate du plomb, après cette opération, on a ajouté une petite quantité d'oxalate de potassium.

Saccharose = (sucre totaux - sucre réducteur) * 0.95 (Audigie, 1984)

c- 2^{ème} filtration :

Le but de la 2^{ème} filtration, est d'éliminer le plomb précipité par l'oxalate de potassium.

d- le dosage:

Après la 2^{ème} filtration, on a eu un extrait filtré duquel on a pris 1 ml qu'on le mélange avec 1 ml de phénol (5%) et 5 ml de H_2SO_4 concentré avec le maintien d'agitation, puis on a lu la D.O du témoin et de l'échantillon.

Pour pouvoir calculer la concentration en sucres réducteur de l'échantillon utiliser on a préparé différentes concentrations du glucose (hexose) et d'arabinose (pentose) dont leur D.O est respectivement lues à 490 nm et 485 nm.

Les concentrations pour les deux sucres sont les suivantes : 0.01% , 0.02% , 0.1% , 0.2% , 0.5% , 1%.

Par un simple calcul, on a pu avoir la concentration en hexose et pentose de notre échantillon.

Remarque

Le témoin est composé de 1 ml d'eau distillée, 1 ml de phénol (5%) et 5 ml de H_2SO_4 concentré.

II-3-3. Détermination de la teneur en matière grasse (NF EN ISO 734-1, 2000)

II-3-3-1 .Principe

Le principe consiste à effectuer une extraction par un solvant organique à l'aide d'un dispositif Soxhlet d'une capacité de 250 ml. La farine est épuisée en matière grasse par le passage des solvants. On estime qu'une extraction est totale au bout de 6 heures.

Une fois l'extraction terminée les solvants sont éliminés à l'aide d'un Rota vapor.

Cette extraction repose sur le principe suivant: les composés apolaires comme les corps gras sont insolubles dans les composés polaires comme l'eau, mais solubles dans les solvants polaires tels que l'hexane. Le point d'évaporation de l'hexane étant inférieur à celui des matières grasses à extraire, il est donc très facile de les séparer par chauffage.

II-3-3-2. Mode opératoire:

- ✓ Poser 10g de farine de datte.
- ✓ Introduire l'échantillon dans une cartouche en cellulose qui est perméable au solvant et la couvrir avec du coton.
- ✓ Mettre la cartouche dans l'appareil extracteur de "Soxhlet". Ce dernier est muni d'un réfrigérant par le haut, d'un ballon et d'un chauffe-ballon par le bas.
- ✓ Verser la quantité nécessaire de solvant (150ml d'hexane).
- ✓ Conduire le chauffage dans des conditions telles que le débit de reflux soit au moins de 3 gouttes à la seconde.
- ✓ Le solvant va s'évaporer puis se réfrigérer, et le liquide tombe sur la substance à épuiser d'une façon que la cartouche soit immergée. Lorsque la partie intermédiaire est suffisamment remplie de solvant, le siphon s'amorce et le solvant contenant la substance à extraire retourne dans le ballon chargé en lipides.
- ✓ Après la durée nécessaire (pendant 6 heures), on récupère la cartouche, d'une part, et le solvant et l'extrait, d'autre part.
- ✓ La solution obtenue est passée dans le Rotavapor pour chasser par distillation la majeure partie du solvant, ce qui permet de récupérer les lipides seuls (la température d'ébullition des lipides est plus élevée que celle de l'hexane qui s'évapore le premier).
- ✓ Éliminer les dernières traces de solvant en chauffant le ballon pendant 20 mn à 103°C.
- ✓ Poser le ballon



Figure II.6. L'extraction de lipide

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 decourbes

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 des dattes Takarboucht/Tegazza 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- Matérielset méthodes

III.1.Le choix des dattes *Takarboucht/Tegazza* :



Figure (III.1) : échantillon des dattes tegazza



Figure (III.2) : échantillon des dattes takarboucht

Nous avons choisi la variété des dattes *Takarboucht/Tegazza* à la base des critères suivants:

- Ladisponibilitéde lavariété desdattesTakarboucht/Tegazza ;
- rentre dans la production de la farine (soupe) de bébé (usine de Ghardaïa) ;
- rentre dans la production de Vinaigre ;

III.1.2Le lieu de prélèvement des dattes Takarboucht/Tegazza :

Lesdattes de Takarboucht/Tegazza sontrécoltéesaumoisd'Aout/Octobre-Novembre, périodedematurationdesdattes,danslesitedeBouda, situé 30km Ouestd'ADRAR.

La datte est une baie, de forme généralement allongée dans la plupart du temps, mais le fruit peut avoir différentes formes et couleurs, leurs dimensions sont très variables de 1,5 à 8 cm de longueur et d'un poids de 2 à 18 g. Sur le plan botanique, la datte est une baie ayant une seule graine communément appelé noyau.

La variété dattes Takarboucht/Tegazza est un type de dattes Grossier, moyenne sucré et énergétique, le poids atteint 8g, la longueur moyenne de 2à 7cm, et de diamètre moyen de 1.8 cm, contenant un « noyau » allongé et marqué d'un sillon longitudinal. Originare de la région de Bouda dans la région de Touat dans Adrar en Algérie.

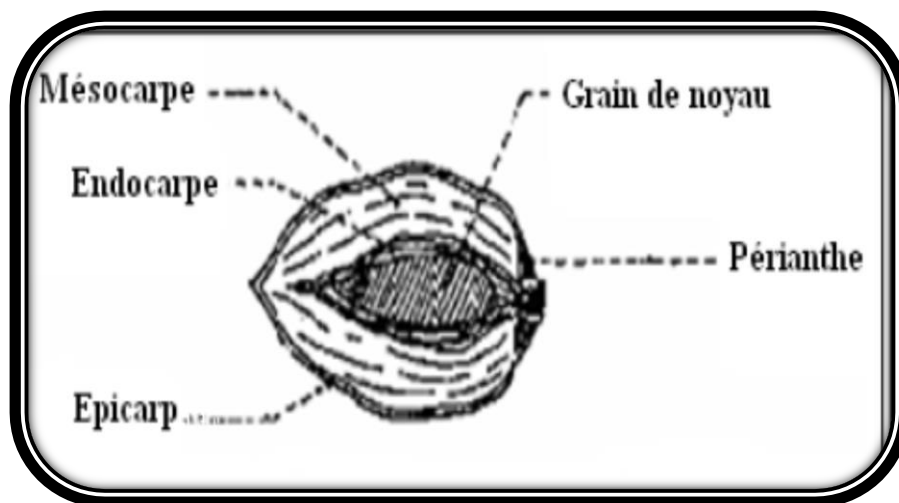


Figure (III-3):Coupe longitudinale de la datte [1].

III.2.La composition physicochimique des dattes Takarboucht

Les dattes Takarbouchttraitée dans ce travail est caractéristiques dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : les masses constituant des dattes Takarboucht

Les masses Capsule	M	M ₁	M ₂
Capsule 1	22.169	22.172	19.184
Capsule 2	22.302	22.306	19.349

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 :

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

$$M_s = 100 - H\% \quad (\text{III.2})$$

AN:

✓ Pour Capsule 1 :

$$H\% = \frac{22.169 - 21.500}{3.055} * 100 = 21.89\%$$

✓ Pour Capsule 2 :

$$H\% = \frac{22.302 - 21.618}{3.023} * 100 = 22.62\%$$

$$H\% = (21.89 + 22.62) / 2$$

$$H\% = 22.25\%$$

$$M_s = 100 - H\%$$

$$M_s = 100 - 22$$

$$M_s = 77.75\%$$

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

$$M_s = (M_h - M_s\%) / 100$$

AN:

$$M_m = (M_s - M_o) / M_s$$

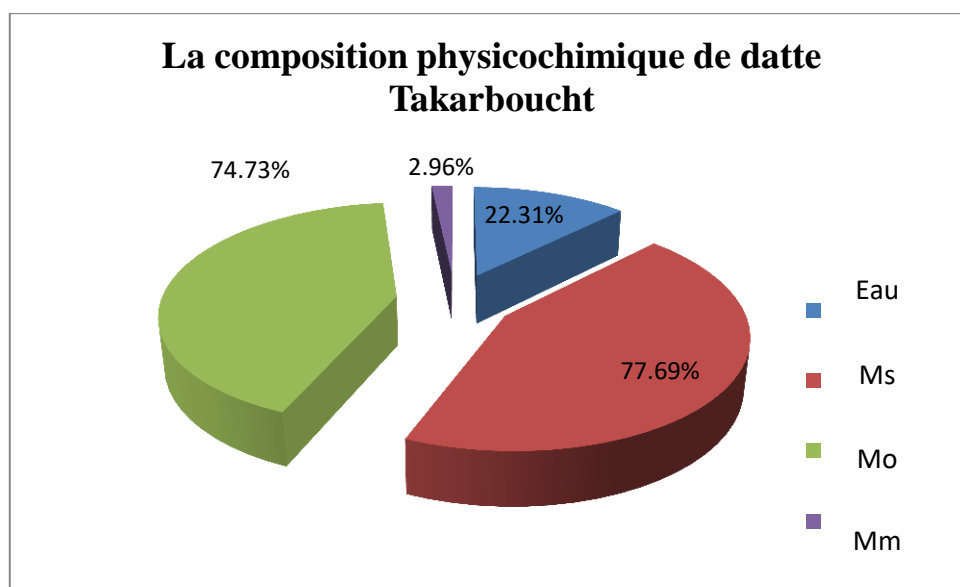
$$M_s = 77.75 \text{ g}$$

$$M_m = 2.96 \text{ g}$$

$$M_o = 74.79$$

Tableau III.2 : La composition physicochimique des dattes Takarboucht

Constituant	Eau H%	Matière sèche	Matière M _O	M _m	Sucre	Lipide
%	22.25	77.75	74.79	2.96	74.14	0.65

**Figure III.4. La composition physicochimique des dattes de Takarboucht****III.3. Masses sèches des échantillons des dattes Tegazza:**

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

Les valeurs des masses sèches de tous les échantillons de dattes *Tegazza* 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 des dattes Tegazza à 40°C, 50 °C et à 60°C

	Concentration d'acide (%)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	$A_w = \varphi/100$	83	75.3	68	48.8	33.1	24	15.5	9	6.8
T=40°C	$M_S(g)$	1,026	0,951	0,836	0,781	0,73	0,733	0,783	0,756	0,778
T=50°C	$M_S(g)$	1,099	0,978	0,863	0,794	0,828	0,768	0,74	0,791	0,808
T=60°C	$M_S(g)$	0,988	0,919	0,797	0,813	0,766	0,69	0,911	0,69	0,694

III.4. Masses humides et masses d'eau à l'équilibre des échantillons dattes Tegazza :

Les masses humides M_h et les masses d'eau à l'équilibre M_e des dattes Takarboucht/tegazza 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 :

$$M_e = M_h - M_s$$

Tableau III.4 : Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre des dattes Tegazza T=40°C

Concentration d'acide (%)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$a_w = \varphi/100$	83	75.3	68	48.8	33.1	24	15.5	9	6.8
$M_h(g)$	1.026	0.951	0.836	0.781	0.73	0.733	0.783	0.756	0.778
$M_e(g)$	0.355	0.262	0.164	0.121	0.095	0.101	0.122	0.092	0.122

Tableau III.5 : Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre des dattes Tegazza T=50°C

Concentration d'acide (%)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$a_w = \varphi/100$	83	75.3	68	48.8	33.1	24	15.5	9	6.8
Mh(g)	1.099	0.978	0.863	0.794	0.828	0.768	0.74	0.791	0.808
Me(g)	0.382	0.262	0.16	0.12	0.109	0.101	0.086	0.101	0.108

Tableau III.6 : Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre des dattes Tegazza T=60°C

Concentration d'acide (%)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$a_w = \varphi/100$	83	75.3	68	48.8	33.1	24	15.5	9	6.8
Mh(g)	0.988	0.919	0.797	0.813	0.766	0.69	0.911	0.69	0.694
Me(g)	0.351	0.261	0.136	0.139	0.095	0.066	0.254	0.058	0.089

III.5. Teneurs en eau à l'équilibre des échantillons des dattes *Tegazza*:

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:

$$X_{eq} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad \text{(III. 3)}$$

Les valeurs Teneurs d'eau à l'équilibre de tous les échantillons des dattes Takarboucht/Tegazza 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 neuf humidités relatives et à trois températures de travail

		T=40°C	T=50°C	T=60°C
Concentration	$a_w = \varphi / 100$	X _{eq} (g d'eau / g de m.s)	X _{eq} (g d'eau / g de m.s)	X _{eq} (g d'eau / g de m.s)
20%	83	0,5290611	0,53277545	0,55102041
25%	75.3	0,38026125	0,36592179	0,39665653
30%	68	0,24404762	0,22759602	0,20574887
35%	48.8	0,18333333	0,17804154	0,20623145
40%	33.1	0,1496063	0,15159944	0,14157973
45%	24	0,15981013	0,15142429	0,10576923
50%	15.5	0,18456884	0,13149847	0,38660578
55%	9	0,13855422	0,14637681	0,09177215
60%	6.8	0,18597561	0,15428571	0,14710744

III.6. Isothermes de désorption de datte tegazza à trois températures:

Les figures(III.5,III.6et la Figure III.7) montrent respectivement les résultats expérimentauxobtenus pour la désorption des dattes Tegazza pour les températures 40, 50 et 60°C.

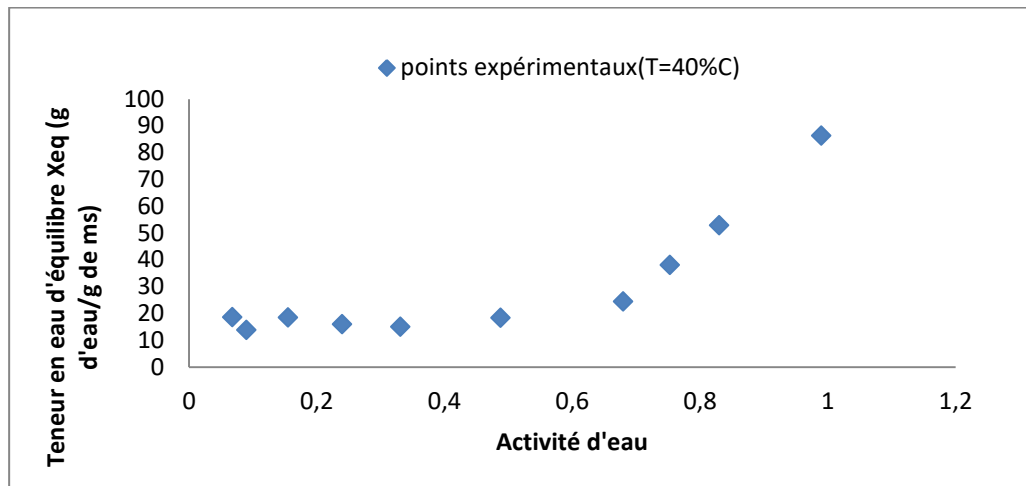


Figure III. 5 : Isotherme de désorption des dattes *Takarboucht/Tegazza* à T= 40°C

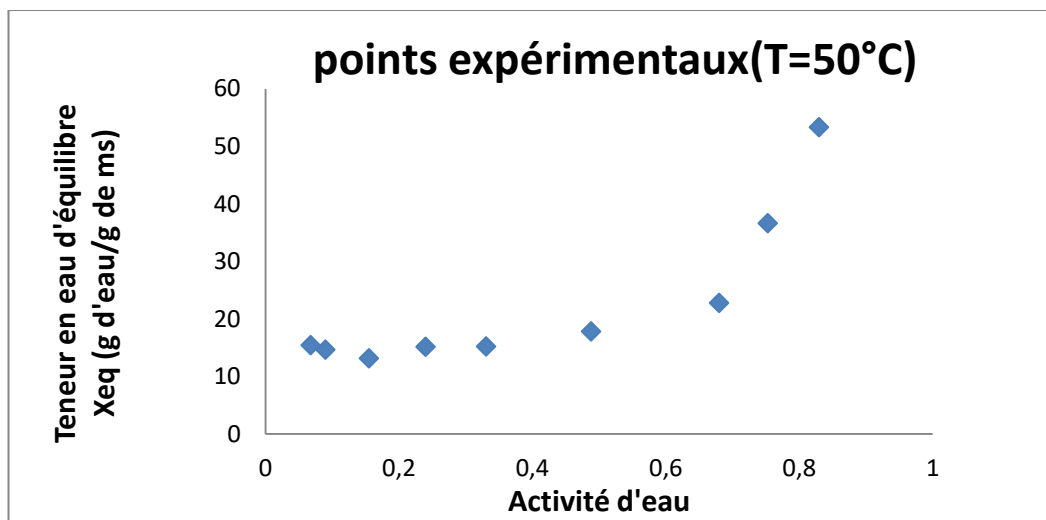


Figure III. 6 : Isotherme de désorption des dattes *Takarboucht/Tegazza* T= 50°C

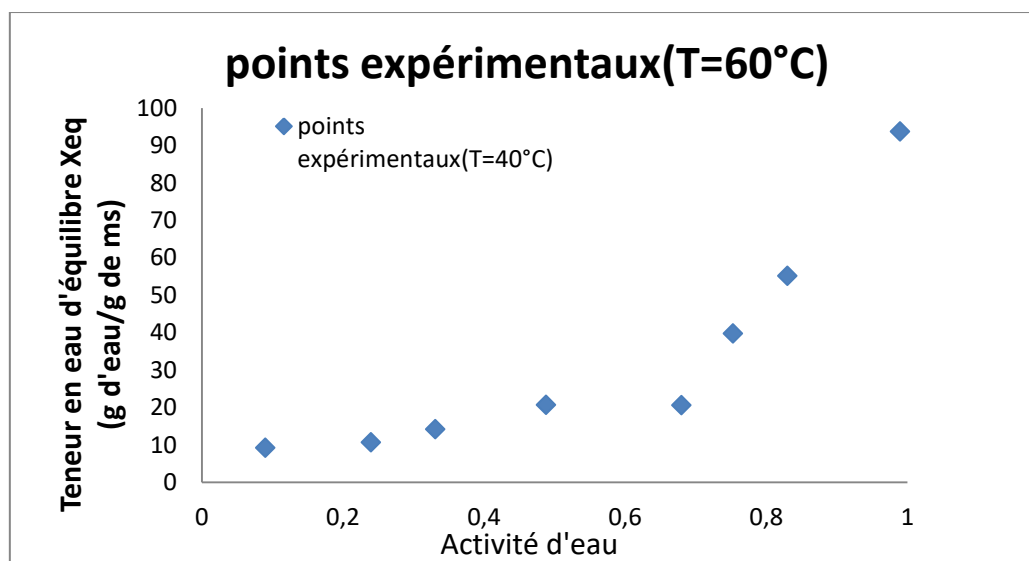


Figure III. 7 : Isotherme de désorption des dattes *Takarboucht/Tegazza* à T= 60°C

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

Remarque :

Dans la figure (III.4) approuvateur pour la température de 60°C, respectivement. On supprime les points expérimentaux (15.5, 0.3866), à 60°C à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit

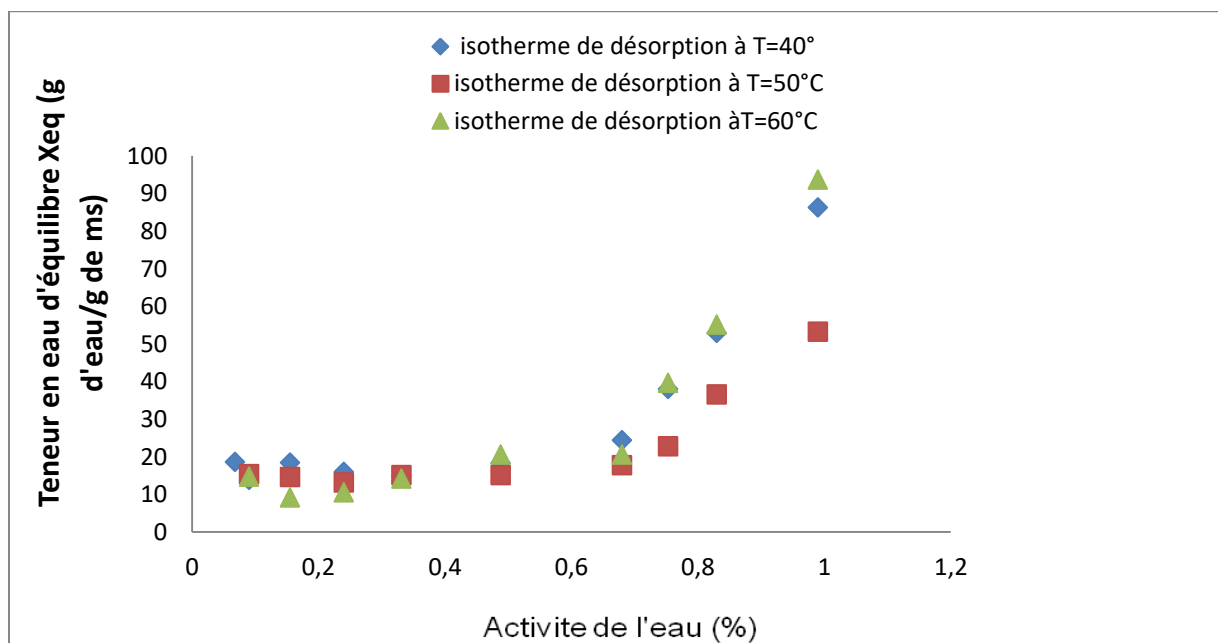


Figure III.8 : Influence de la température sur les isothermes de désorption des dattes *Tegazza*

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

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 l'alittérature : GAB, Peleg, Langmuir et Smith 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)

$$R^2 = \frac{(X_{eq-exp} - X_{eq-pré})^2}{\Sigma(X_{eq-exp} - X_{eq-pré})^2 + (X_{eq-exp} - X_{eq-pré})^2}$$

Donné par le logiciel Curve Expert Professional,

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 qui présente la plus grande valeur de (r), les plus petites valeurs de (EMR), de (EST) et de e_i . Ces valeurs sont calculées comme suit :

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{eqi,exp} - X_{eqi,pre}}{X_{eqi,exp}} \right| \quad (III.4)$$

$$EST = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{eqi,exp} - X_{eqi,pre})^2}{d_f}} \quad (III.5)$$

$$e_i = X_{i,exp} - X_{i,pre} \quad (III.6)$$

Avec :

$X_{eqi,exp}$: La $i^{\text{ème}}$ teneur en eau d'équilibre expérimentale

$X_{eqi,pre}$: La $i^{\text{ème}}$ teneur en eau d'équilibre prédite

N : le nombre de points expérimentaux

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

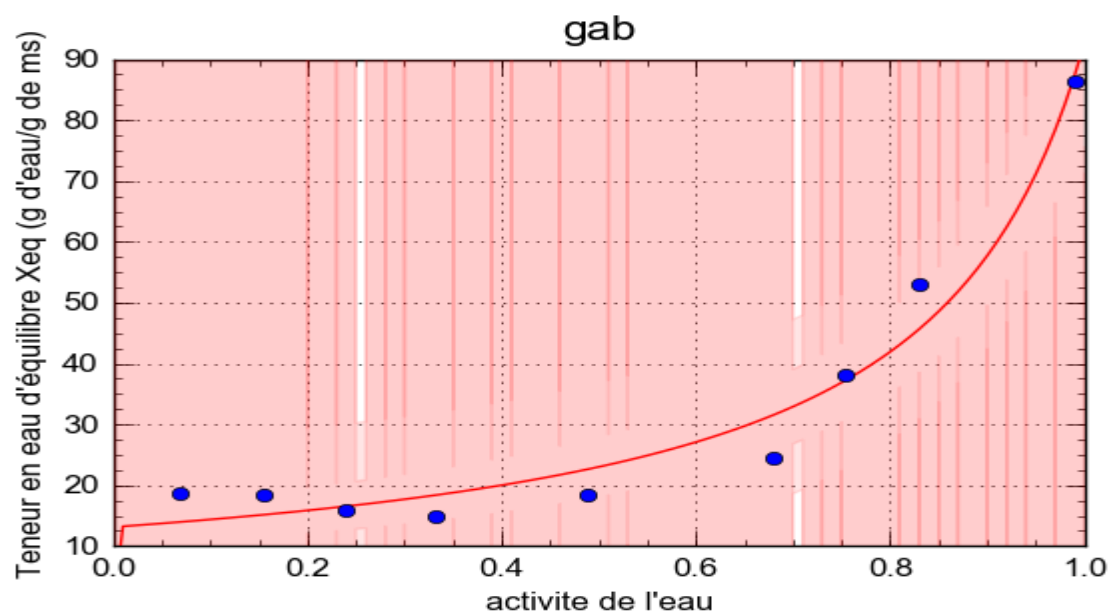


Figure III.09: Isotherme de désorption des dattes *Tegazza* lissé par le model de GAB à (T = 40°C)

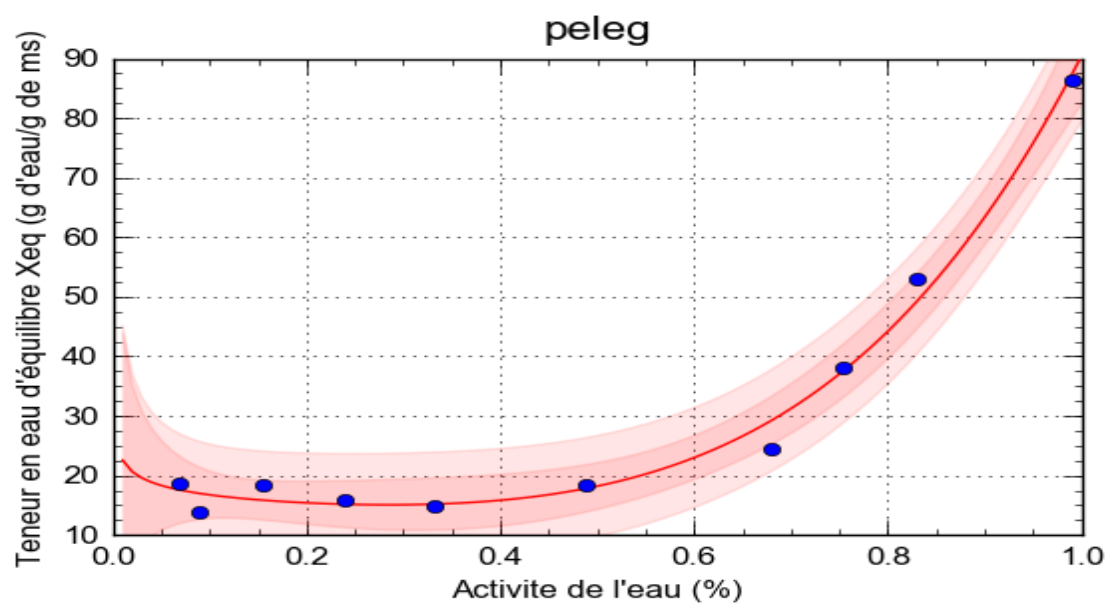


Figure III.10: Isotherme de désorption des dattes *Tegazza* lissé par le model peleg à (T = 40°C)

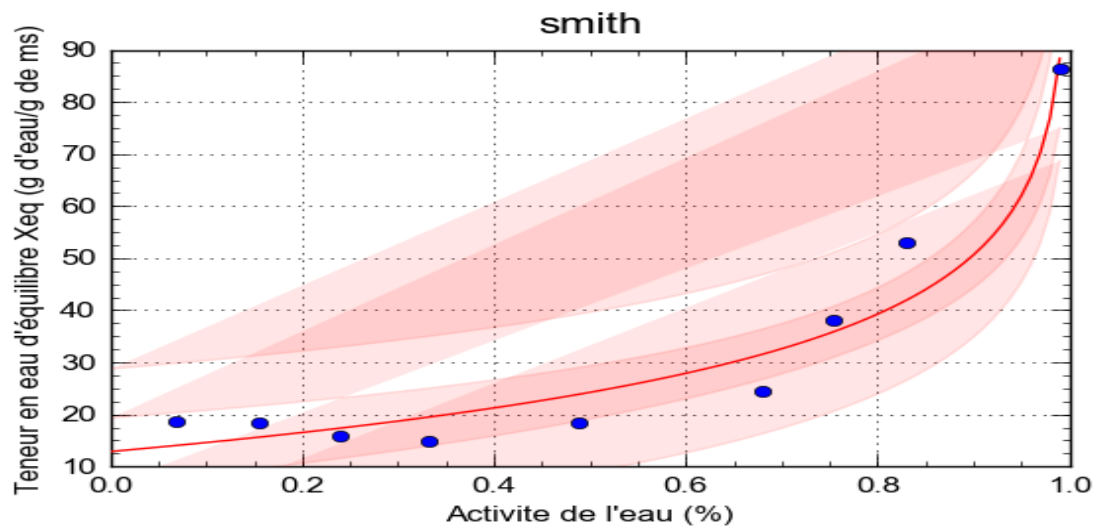


Figure III.11: Isothermede désorption de *datte tegazza* lissé par le model de Smith à (T = 40°C)

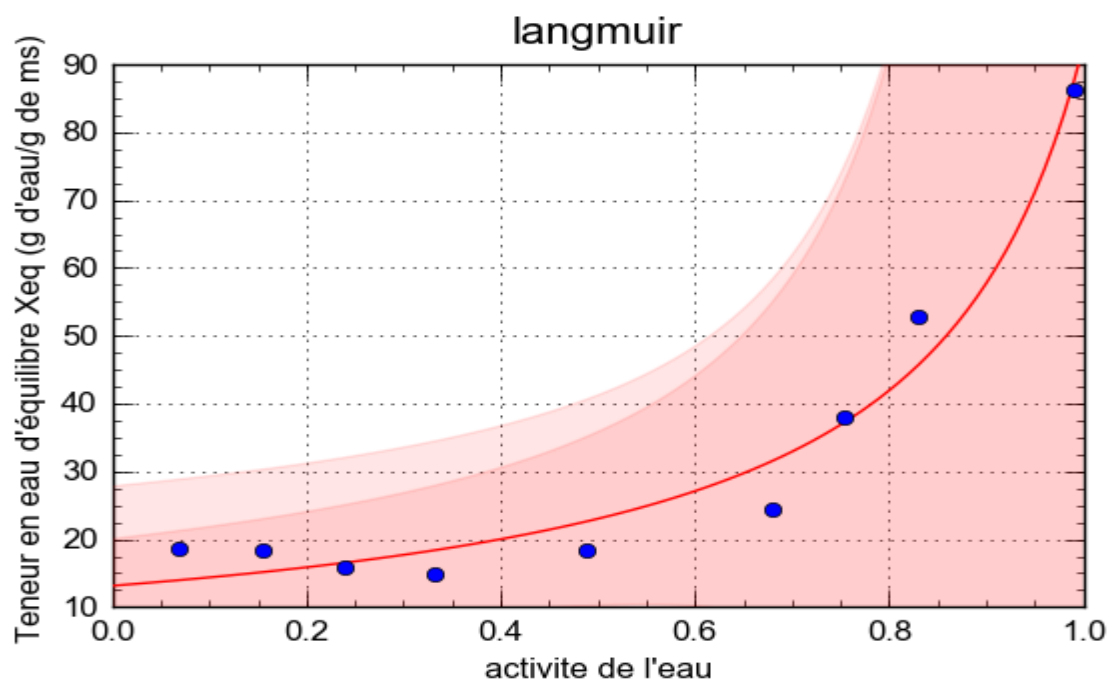
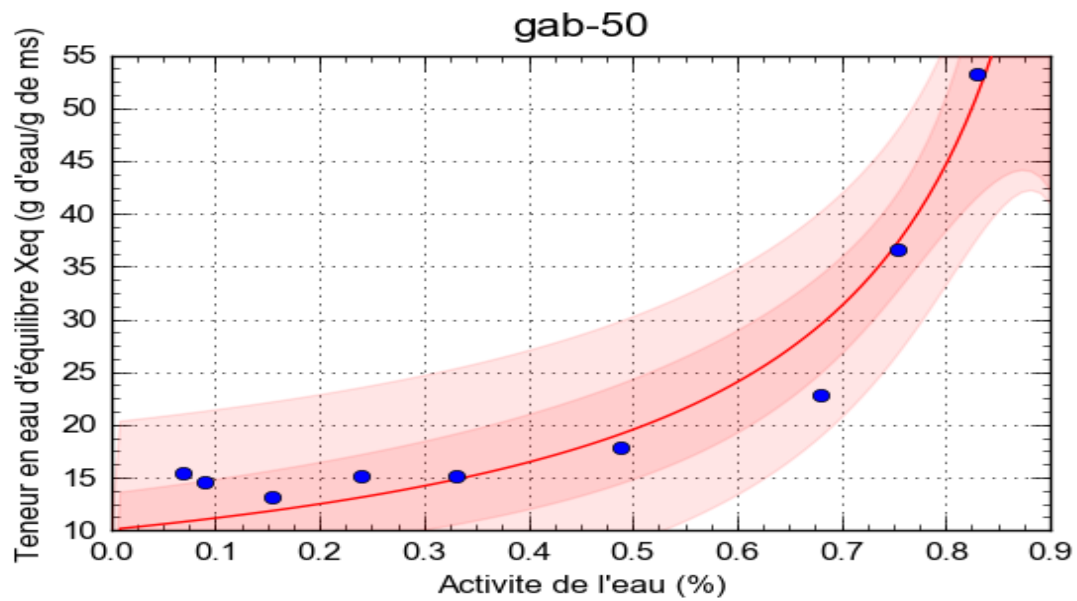


Figure III.12: Isothermede désorption de *datte tegazza* lissé par le model de Langmuir à (T = 40°C)

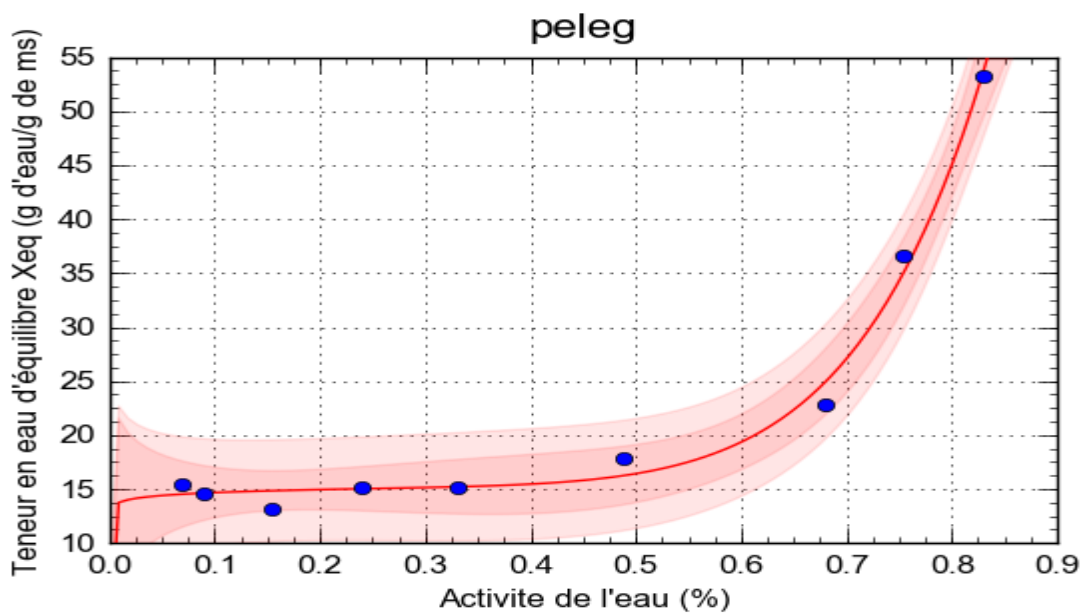
Tableau III.8: paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre des données de désorption Des dattes tegazza à T=40°C

Coefficient	GAB	Peleg	Langmuir	Smith
A	1.31429 ^{E+01}	1.15956 ^{E+01}	1.07156 ^{E+00}	-
B	8.580086 ^{E-01}	7.87991 ^{E+01}	-6.07962 ^{E-02}	-
C	2.53918 ^{E+08}	4.024159 ^{E+00}	1.10873 ^{E+00}	-
R ²	9.63321 ^{E-01}	9.90773 ^{E-01}	9.63618 ^{E-01}	9.42678 ^{E-01}
EMR	15.27	7.8	0.111	48.05
EST	5.2902 ^{E+00}	2.9065 ^{E+00}	5.2689 ^{E+00}	6.12283 ^{E+00}
K		-1.94595 ^{E-01}	-	1.28796 ^{E+01}
N		-	-	1.63875 ^{E+01}

D'après le tableau III.9 le modèle de GAB et Peleg sont les meilleurs modèles pour décrire l'ensemble des isothermes de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza avec un R² de (0.96) et (0.99), un EMR de (15.27) et (7.8) et un EST (5.2902) et (2.9) pour la désorption respectivement pour des humidités relatives comprises entre 5.5 et 99 %.



**Figure III.13: Isotherme de désorption *des dattes tegazzalissé* par le modèle de GAB à
($T = 50^{\circ}\text{C}$)**



**Figure III.14: Isotherme de désorption *des dattes tegazzalissé* par le model dePELEG à
($T = 50^{\circ}\text{C}$)**

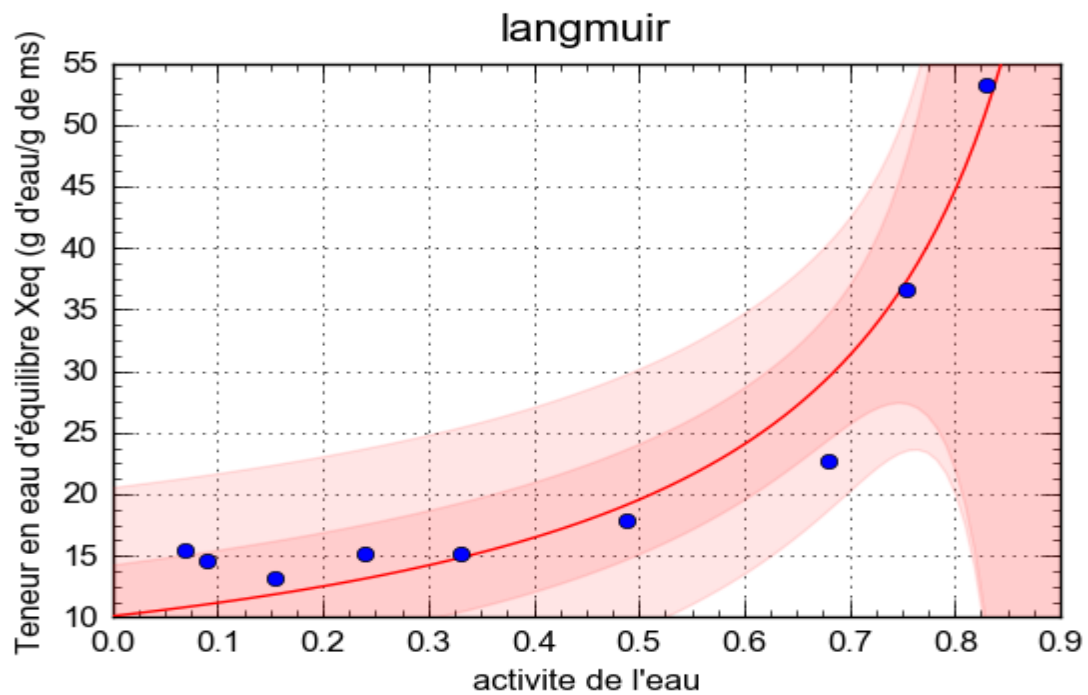


Figure III.15: Isotherme de désorption *des dattes tegazza* lissé par le modèle de Langmuir ($T = 50^{\circ}\text{C}$)

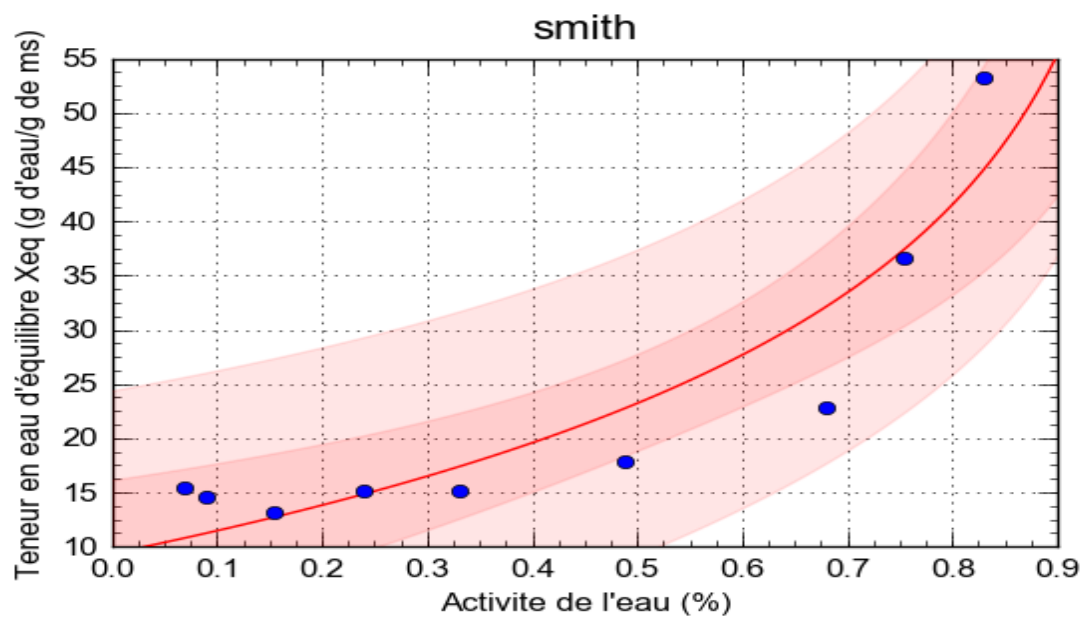


Figure III.16: Isotherme de désorption *des dattes tegazza* lissé par le modèle smith à ($T = 50^{\circ}\text{C}$)

Le tableau suivant regroupe les coefficients des modèles et les paramètres statistiques :

Tableau III.9 : paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre des données de désorption *Des dattes tegazza* à T=50°C

Coefficient	GAB	Peleg	Langmuir	Smith
A	1.00876 ^{E+01}	1.40128 ^{E+02}	1.07018 ^{E+00}	-
B	9.67340 ^{E-01}	1.56140 ^{E+01}	-8.18749 ^{E-02}	-
C	7.64576 ^{E+08}	2.67943 ^{E-02}	2.47996 ^{E+00}	-
R ²	9.37876 ^{E-01}	9.90395 ^{E-01}	9.85602 ^{E-01}	8.48458 ^{E-01}
EMR	27.27	46.27	106.9	51.11
EST	3.9079 ^{E+00}	1.6832 ^{E+00}	1.881 ^{E+00}	5.6508 ^{E+00}
K	-	6.98408 ^{E+00}	-	9.36817 ^{E+00}
N	-	-	-	1.99771 ^{E+01}

D'après le tableau III.9 le modèle de Langmuir et Peleg sont les meilleurs modèles pour décrire l'ensemble des isothermes de désorption des dattes Tegazza avec un R² de (0.98) et (0.99) un EST (1.881) et (1.6832) pour la désorption respectivement pour des humidités relatives comprises entre 5.5 et 99 %

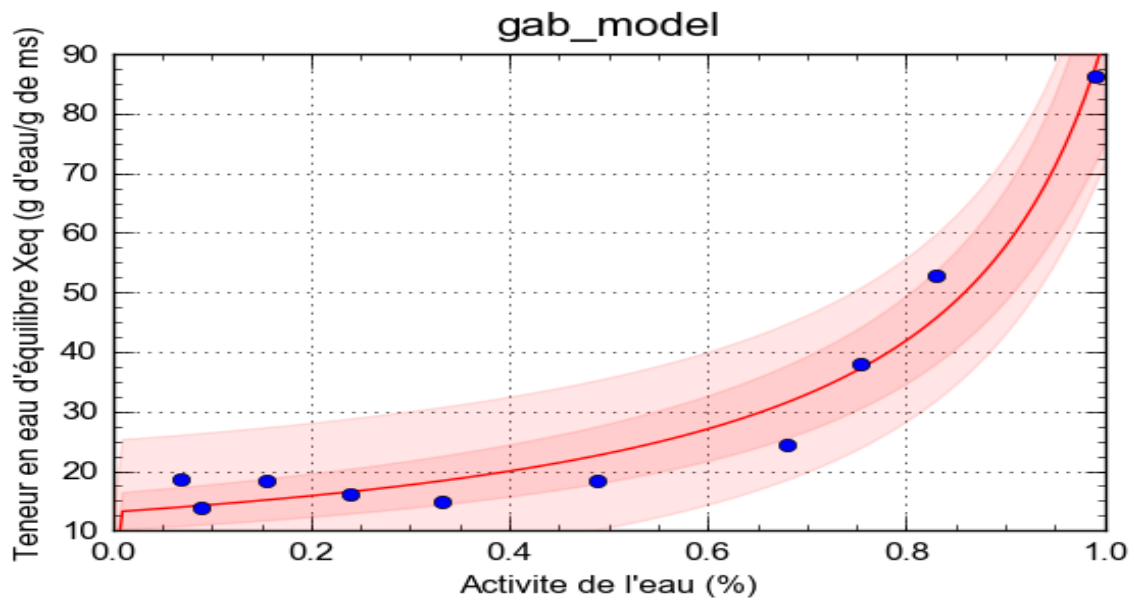


Figure III.17: Isotherme de désorption des dattes Tegazzalissé par le model de GAB à ($T = 60^{\circ}\text{C}$)

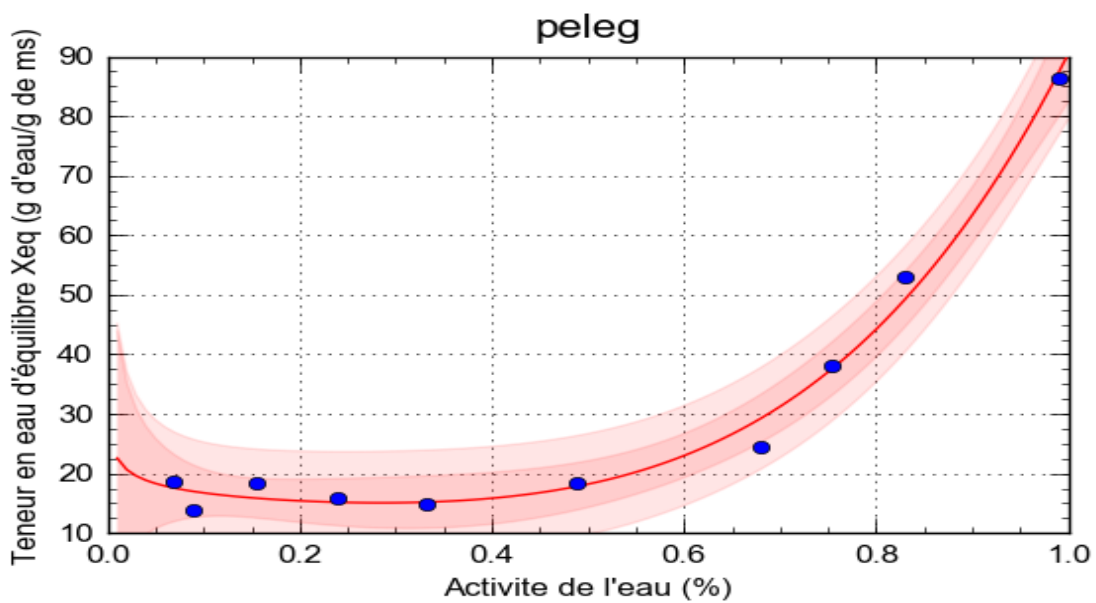


Figure III.18: Isotherme de désorption des dattes Tegazzalissé par le model de PELEG à ($T = 60^{\circ}\text{C}$)

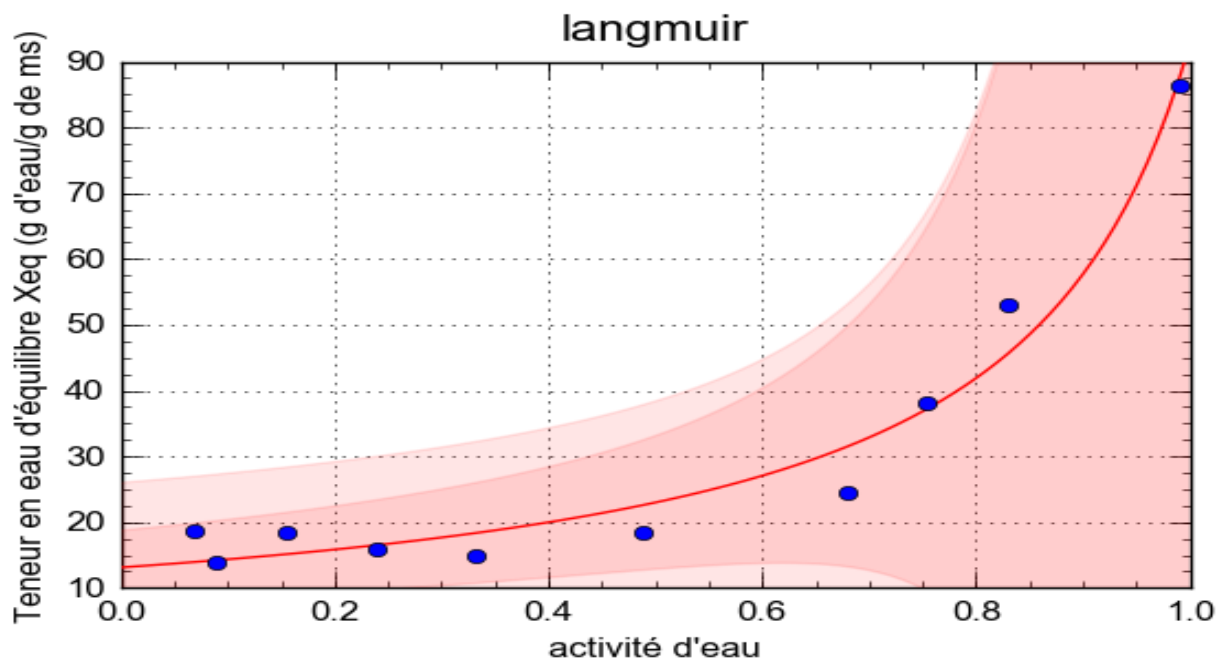


Figure III.19: Isotherme de désorption *des dattes Tegazzalissé* par le model de Langmuir (T = 60°C)

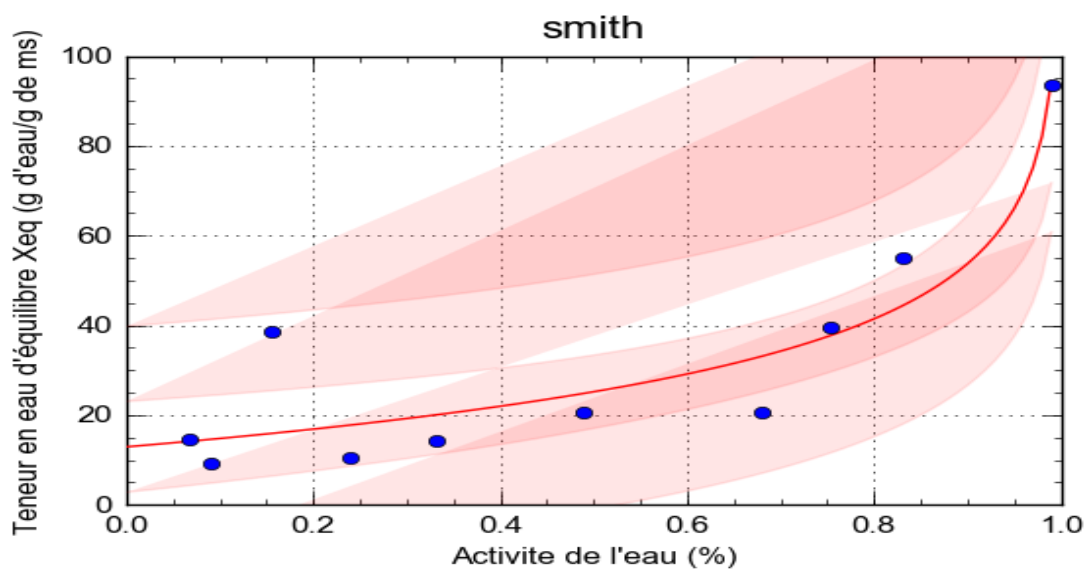


Figure III.20: Isotherme de désorption *des dattes Tegazza* lissé par le model de Smith (T = 60°C)

Le tableau suivant regroupe les coefficients des modèles et les paramètres statistiques:

Tableau III.10: Les paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre des données de désorption Des dattes tegazza à T=60°C

Coefficient	GAB	Peleg	Langmuir	smith
A	1.33071 ^{E+01}	8.27015 ^{E+01}	1.06638 ^{E+00}	-
B	8.67658 ^{E-01}	1.61166 ^{E+01}	-5.65223 ^{E-02}	-
C	7.10432 ^{E+07}	-2.96688 ^{E-02}	1.24373 ^{E+00}	-
R ²	8.67229 ^{E-01}	8.88782 ^{E-01}	8.68603 ^{E-01}	8.52351 ^{E-01}
EMR	74.428	15.82	118.64	38.97
EST	1.0926 ^{E+01}	1.0801 ^{E+01}	1.0926 ^{E+01}	1.0778 ^{E+01}
K	-	4.78315 ^{E+00}	-	1.29286 ^{E+01}
N	-	-	-	1.77100 ^{E+01}

D'après le tableau III.10 le modèle de GAB et Peleg sont les meilleurs modèles pour décrire l'ensemble des isothermes de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza avec des valeurs de R² de (0.867229) et (0.888782) un EMR de (74.428) et (15.82) et un EST (1.0926) et (1.0801) pour la désorption respectivement pour des humidités relatives comprises entre 5.5 et 99 %

III.7.2. Résultats de la modélisation

Donc pour chaque température, deux modèles représentent le meilleur lissage possible, mais le modèle de Peleg est le meilleur modèle décrivant le phénomène de désorption des dattes Takarboucht/Tegazza pour les trois températures.

Conclusion :

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

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

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Notre travail a consisté en l'étude théorique et expérimentale des isothermes de sorption des dattes de Takarboucht/tegazza à différentes températures.

Sur le plan expérimental, nous avons établi des analyses physico-chimique ainsi que les isothermes de désorption des dattes de Takarboucht/ Tegazza par la méthode gravimétrique statique pour trois températures (40C°, 50C°,60C°.).

Les résultats d'analyses physico-chimiques des variétés de datte de takarboucht montrent qu'elle est composée de 22% d'eau, 0.65% lipide et le plus dominant le sucre 74%

Par ailleurs Les résultats expérimentaux montrent que les isothermes de désorption des dattes de tegazza ont une allure sigmoïdale qui caractérise les produits agroalimentaires. Ces courbes de sorption sont ajustées par quatre modèles mathématiques. L'analyse des paramètres statistiques, EMR, EST et leurs résidus e_i montre que le model de GAB $T= 40^{\circ}\text{C}$ $R(0.963 \text{ à } 0.907)$, $\text{EMR}(0.11 \text{ à } 48.05)$. $\text{EST}(0.290 \text{ à } 0.612)$, $T=50^{\circ}\text{C}$ $R(0.937 \text{ à } 0.903)$, $\text{EST}(1.88 \text{ à } 5.65)$, $\text{EMR}(27.27 \text{ à } 106.9)$, $T=60^{\circ}\text{C}$ $R(0.852 \text{ à } 0.888)$, est le meilleur modèle qui décrive l'ensemble des isothermes de désorption des dattes Tegazza.

En perspective, nous souhaitons prolonger et terminer 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
- La détermination de la chaleur isostérique

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

Tableau II.1 : Valeurs théorique [27] et expérimentale 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	-

Annexes

90	0.03	
----	------	--



L'extraction des échantillons de l'incinération puis préparé pour l'extraire les sucre et lipides

RÉFÉRENCES

- [1] -Touati. (2008) « Etude Théorique Et Expérimentale Du Séchage Solaire Des Feuilles De La Menthe Verte (MenthaViridis) » Thèse De Doctorat. Département De Physique. Université Abou-bekrBelkaid .Tlemcen
- [2]- M. Kouhila. (1998) Etude Expérimentale Du Séchage Convectif De La Menthe DansUn Séchoir Modulaire Polyvalent A Chauffage Partiellement Solaire.Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique
- [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] A.BENSEDDIK.(2011). Modélisation et simulation du séchage de la figue par desséchoirs solaires indirectes fonctionnant en convection forcée. Mémoire de Magistère : Université Abou-bekrBelkaid .Tlemcen.
- [6] JS.ElMokretar et al(2004). Etude du Bilan d’Energie et de Massed’un Séchoir de Type Serre-Applications au Séchage desProduits Agro-alimentaires Rev. Energ. Ren. Vol. 7
- [7] M. Duminil (1993). Air humide. Technique de l’ingénieur. B 2 230.
- [8] R. KHAMA(2008), Cours de Séchage : Principes et Définitions, Collection FeuillesUniversitaires – Edition Amouadj. Algérie.
- [9]--Rezazga Ahmed. (2015) « Etude Expérimentale De Séchage Solaire Direct Et Indirect De La Fève, Contribution Technico-Economique » Mémoire De Master Académique Ouargla.
- [10]-J. P. Nadeau, J. R. Puiggali. (1995). Séchage : Des Processus Physiques Aux Procédés Industriels. Technique Et Documentation. Lavoisier. Paris. France.
- [11]-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 ;
- [12]G. Arditti,(1972) "Technologie chimique industrielle, Tome III", Edition Eyrolles, Paris, France.

RÉFÉRENCES

- [13] -W. L. McCabe, J. C. Smith, et P. Harriott, ((1985) "Unit operation of chemical engineering ",Hill Book Company.
- [14]-M, L, Mc,Cabe,J,C,Smith,et,P,Harriott,(1985)."Unit operation of chemical engineering",Hill Book Company.
- [15]-D. Mennouche. (2006). Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantesmédicinales par les procédés de séchage solaire. Mémoire de Magister, département de génieDes procédés – Université de Ouargla. p (16 -1-25).
- [16]-- Y. Jannot, (2003), Isothermes De Sorption : Modèles Et Détermination, Lept-Ensam.
- [17]-KalengiMbwalala .(2014) « Détermination Des Isothermes De Sorption (Adsorption-Desorption) » Mémoire D'ingénieur Agronome. Université De Kinshasa.
- [18]-BenseddikAbdelouahab (2011) « Modélisation Et Simulation Du Séchage De La Figue Par DesSéchoirs Solaires Indirects Fonctionnant En Convection Forcée » Mémoire De Magistère Université Abou-BekrBelkaid-Tlemcen
- [19]-HassibaBenzita (2011) « Détermination Expérimentale Et Simulation Des Courbes De Sorption D'un Produit Agroalimentaire En Vue D'un Séchage Solaire Convectif» Mémoire De Master. UniversitéKasdiMerbah, Ouargla
- [20] -Nadia Nadir « Recherche Des Conditions Optimales De Fonctionnement D'un Séchoir Solaire » Mémoire De Magister.UniversitéKasdiMerbah, Ouargla
- [21]- A. Benhamou Et Al « Modélisation Des Isothermes De Sorption Des Feuilles De Marjolaine » Rev. Energ. Ren Vol. 13 N°2 (2010) 233 – 247
- [22] S. Akkad et Al. (2008), Evaluation des isothermes de désorption et de la chaleur isostérique dedeuxplantes aromatiques et médicinales par la méthode gravimétrique statique en vue de leurséchage. Revue des Energies Renouvelables SMSTS'08 Alger 1 – 6

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. تسمح هذه المنحنيات بتحديد كمية الماء النهائية التي سيتم التوصل إليها 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 التحديد التركيبي الفيزيوكيميائية لتمر تقربوشت من جهة والى تحديد منحنيات إيزوترم (تقربوشت/تقازا) (أقليم توات). وذلك باستخدام محاليل مختلفة تراكيز حمض الكبريت. وقد أجريت التجربة من أجل ثلاث قيم: درجة حرارة 40 درجة مئوية, 50 درجة مئوية و 60 درجة مئوية. وتهدف أيضا لدراسة تأثير درجة الحرارة على منحنيات التوازن في المنتج وأخيرا إلى وصف إيزوتارم (تقربوشت/تقازا) من أجل كل درجة من درجات الحرارة وذلك باستخدام النماذج المعروفة .Smith,LangmuirOswinGAB

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, cette étude expérimentale vise la détermination de la composition physico-chimique et la détermination des courbes d'isothermes de désorption des dattes de(Takarouch/Tegazza)(région Touat), à l'aide de la méthode des solutions salines saturées. (L'expérience est réalisée pour trois valeurs de 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 des dattes (Takarouch/Tegazza) pour chacune des trois températures à l'aide des modèles les plus connus : GAB, Smith, Langmuir et Oswin

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 informations on the hygroscopic equilibrium. Thus, this experimental study aims at the physico-chemical composition of the product and the determination of isotherm curves, of the date (Takarouch /Tegazza) (Touat medium), by 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 date (Takarouch /Tegazza) for each of the three temperatures with the help of the known models : GAB, Smith, Oswin and Langmuir models.

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