

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE d'ADRAR

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES HYDROCARBURES ET ENERGIES RENOUVELABLES



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER EN GENIE CHIMIQUE**

**Thème**

**Mesure expérimentale des isothermes d'adsorption/désorption de cœur de palmier (jomare) et détermination des propriétés thermodynamiques.**

Soutenu le : octobre 2020

**Présenté par :**

M<sup>elle</sup> IDDER Khadidja

M<sup>elle</sup> MEBARKI Kenza

**Members de jury:**

President: Dr. DAHOU Mohammed Amine	M.C.B	Univ. Adrar
Encadreur : Dr. LARBI Ahmed Amine	M.R.B	UREMS (CDER). Adrar
Co-encadreur: Mme. DJEDID Kheira	M.A.A	Univ. Adrar
Examineur: Dr. MEDIANI Ahmed	M.R.B	UREMS (CDER). Adrar

**Année Universitaire : 2019 / 2020**



*Dédicace*

*Je dédie ce travail à :*

*A ma chère mère.*

*A l'esprit de mon père.*

*A mes frères Elmehdi et Med. Rateb*

*A mes sœurs Meryem, Assia et Fatima zohra*

*A ma grande famille.*

*A tous mes amis surtout : Fatima, Rim, Fatiha*

*A tous mes amis du parcours scolaire et universitaire.*

*A tous mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université.*



*khadija*



*Dédicace*

*Je dédie ce travail à :*

*A ma chère mère.*

*A l'esprit de mon père.*

*A mes frères Ahmed, Mohammed et walide*

*A mes sœurs Zohra et Imane*

*A ma grande famille.*

*A tous mes amis surtout : Rejia et Rim*

*A tous mes amis du parcours scolaire et universitaire.*

*A tous mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université.*

*kenza*





## *Remerciement*

*Notre remerciement va tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous avons donné pour terminer ce modeste travail.*

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute ma gratitude.*

*nous voudrions tout d'abord adresser toute notre reconnaissance à notre encadreur **Dr :LARBI Ahmed Amine** et co-encadreur **M<sup>me</sup> djedid Kheira** , nous les remercions de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

*nous désirons aussi remercier les travailleur de l'unité de ..., **Mr :TIGANI Chérif** , **Dr :MONGAR Houssine**, **DJEBER A.Elkarim** et **Dr :LOUMANI Akil** .*

*qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de notre travail*

*nous tenons à remercier spécialement le président **Dr :DAHOU Mohammed Amine**, et l'examineur **Dr :MEDIANI Ahmed**.*

*nous voudrions exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche..*

*Enfin, je tiens à témoigner toute notre gratitude à les enseignants de département Hydrocarbures et Energies Renouvelables pour la formation que nous avons revue auprès d'eux .*

## ملخص:

يتطلب التحكم في عملية تجفيف قلب النخيل (جومار) معرفة امتصاصه متساوي الحرارة.

هدفت هذه الدراسة إلى التحديد التجريبي لمتساويات الامتزاز والامتصاص لثلاث درجات حرارة (40 و 50 و 60 درجة مئوية) من قلب النخيل ، والتي من خلالها قمنا بتأسيس العلاقة بين نشاط الماء ومحتوى الماء من منتجاتنا. تم إجراء هذا التحديد من خلال طريقة الجاذبية الثابتة لمحاليل الملح المشبعة ويبدو أنها الطريقة الأكثر استخدامًا والموصى بها لتحديد محتوى الماء المتوازن للمنتجات الزراعية والغذائية. تم استخدام أربعة نماذج رياضية LANGMUIR و GAB و BET المعدلة و Halsey لنمذجة السلوك الاسترطابي والتنبؤ به أثناء التجفيف والتخزين. بعد تعميم هذه النماذج وتحسينها على أساس المعالجة الإحصائية للبيانات التي تم الحصول عليها ، تظهر النتائج أن نموذج GAB يتوافق بشكل أفضل مع متساوي الحرارة الامتصاص. يتم حساب درجات الحرارة المتساوية للامتصاص والامتصاص لقلب النخيل باستخدام معادلة كلاوزيوس وكلايرون.

يمكن استخدام نتائج هذه الدراسة لتحديد منحنيات التجفيف المميزة وظروف التخزين المثلى.

كلمات البحث: قلب النخيل - مساواة الامتصاص - نموذج GAB - طريقة غرافيمترك- حرارة الامتصاص متساوية

## Résumé :

Maîtriser le processus de séchage du cœur de palmier (Jomare) nécessite de connaître leur sorption isotherme.

Cette étude, visait à déterminer expérimentalement les isothermes d'adsorption-désorption pour trois températures (40, 50 et 60°C) du cœur de palmier., desquelles nous avons établi la relation entre l'activité de l'eau et la teneur en eau de notre produit. Cette détermination a été effectuée par la méthode gravimétrique statique des solutions de sels saturées semble être la méthode la plus largement utilisée et recommandée pour déterminer la teneur en eau d'équilibre des produits agricoles et alimentaires. Quatre modèles mathématiques ont été utilisés (LANGMUIR, GAB, BET modifié et Halsey) pour modéliser et prédire le comportement hygroscopique pendant le séchage et le stockage. Après lissage et optimisation de ces modèles sur la base du traitement statistique des données obtenues, les résultats montrent que le modèle GAB correspond la meilleur aux isothermes de sorption. Les chaleurs isostérique de désorption et adsorption pour le cœur de palmier sont calculées à l'aide de l'équation de Clausius-Clapeyron.

Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour déterminer les courbes de séchage caractéristiques et avoir conditions de stockage optimales.

**Mots clés :** cœur de palmier - Isothermes de sorption - modèle de GAB - Méthode gravimétrique – chaleur isostérique de sorption.

**Abstract :**

Mastering the process of drying the palm heart (Jomare) requires knowing their isothermal sorption.

This study aimed to experimentally determine the adsorption-desorption isotherms for three temperatures (40, 50 and 60 ° C) of the palm heart., From which we had established the relationship between the activity of water and the content of water from our product. This determination was carried out by the static gravimetric method of saturated salt solutions seems to be the most widely used and recommended method for determining the equilibrium water content of agricultural and food products. Four mathematical models were used (LANGMUIR, GAB, modified BET and Halsey) to model and predict the hygroscopic behavior during drying and storage. After smoothing and optimization of these models on the basis of the statistical processing of the data obtained, the results show that the GAB model corresponds best to the sorption isotherms. The isosteric heats of desorption and adsorption for palm heart are calculated using the Clausius-Clapeyron equation.

The results of this study can be used to determine characteristic drying curves and to have optimal storage conditions.

**Key words:** palm heart - Sorption isotherms - GAB model - Gravimetric method - isosteric heat of sorption.



# **SOMMAIRE**

# Sommaire

Introduction générale	1
<b>Chapitre I Etude bibliographique</b>	
I.1. Généralité sur le séchage	3
I.1.1. Définition	3
I.1.2. But de séchage	4
I.2. Historique	4
I.3. Le principe de séchage	4
I.4. Les modes de séchage	4
I.4.1. Par conduction	4
I.4.2. Par convection	4
I.4.3. Par les rayonnements	5
I.4.4. Par perte diélectrique	5
I.4.5. Par lyophilisation	5
I.5. Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage	5
I.5.1. Humidité absolue	5
I.5.4.1. Température du bulbe sec TS	6
I.5.4.3. La température de rosée Tr	7
I.5.4.4. Température de saturation adiabatique TGs	7
I.6. Caractéristiques des solides humides	7
I.6.1. Porosité volumique d'un produit	7
I.6.2. Description du solide humide	8
I.6.3. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche)	9
I.6.4. Humidité relative (teneur en eau à base humide)	9
I.6.5. Hygroscopicité	10
I.7. les procédés de séchage	10
I.8. Choix du procédé de séchage	10
I.9. La cinétique de séchage	10
I.9.1. la vitesse de séchage	12
I.9.2. Les paramètres influents sur la cinétique de séchage	12
I.9.3. modélisation mathématique de la cinétique du séchage	12



I.10. Classification des systèmes de séchage solaire	13
I.10.1. Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire	16
I.11.1. Séchage par convection (entraînement)	17
I.13. Teneur en eau	18
I.14.1. Méthodes d'obtention des isothermes de sorption	20
I.14.1.1. Les méthodes manométriques (dites méthodes dynamiques)	20
I.14.1.2. Les méthodes hygrométriques	20
I.14.1.3. Les méthodes gravimétriques (dites méthodes statiques)	20
I.14.2. Les isothermes les plus connues	22
I.15. Chaleur isostérique de sorption	24
I.16. Estimation de la durée de vie :	25

## **Chapitre II      Approche expérimental**

II.1. Introduction	28
II.2. Définition du produit à sécher	28
II.3. Variétés	29
II.3. Composition	29
II.4. La production du cœur	30
II.5. Le profil nutritionnel du cœur de palmier	30
II.5. La consommation du cœur de palmier	31
II.6. Matériel et mode opératoire	31
II.6.1. Préparation des solutions salines saturées	31

## **Chapitre III      Résultats expérimentaux et modélisation**

III. Résultats expérimentaux et modélisation	36
III.1. Composition physicochimique du cœur de palmier	36
III.2. Masse sèches des échantillons du cœur de palmier	38
III.3. Masses humides et masses d'eau à l'équilibre des échantillons de cœur de palmier	38
III.4. Résultats de l'expérimentation	39
III.4.1. Résultats de l'expérimentation de désorption	40
III.4.2. Résultats de l'expérimentation d'adsorption	42
III.5. Modélisation des courbes de sorption	44
III.5.1. Aperçu sur les modèles théoriques	44

III.5.2. Résultats de la modélisation	45
III.6. Détermination de la chaleur isostérique de sorption	53
Conclusion générale	57
Référence Bibliographique	58

# Liste des tableaux

## Liste des tableaux

Tableaux	Titre	Pages
Tableau I.1	Modèles mathématiques de la cinétique du séchage	13
Tableau I.2	Les Avantages et les inconvénients pour les différents types de séchoirs solaires	16
Tableau I.3	Modèles de la sorption	24
Tableau II.1	la composition du cœur de palmier pour 100g	30
Tableau II.2	Les solutions salines saturées utilisées	31
Tableau II.3	Valeurs standards des humidités relatives données par différents sels en fonction de la température	32
Tableau II.4	Solubilités des sels utilisés	33
Tableau II.5	Masses des sels utilisées pour la saturation	34
Tableau III.1	.Les masses d'échantillon du cœur de palmier dans l'étuve à 105°C	36
Tableau III.2	Les compositions de l'échantillon du cœur de palmier	37
Tableau III.3	Valeurs des masses sèches de tous les échantillons du cœur de palmier sont reportées, pour 40°C, 50°C et 60°C	38
Tableau III.4	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre du cœur de palmier à T = 40°C	38
Tableau III.5	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre du cœur de palmier à T = 50°C	39
Tableau III.6	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre du cœur de palmier à T = 60°C	39
Tableau III.7	La teneur en eau d'équilibre de désorption du cœur de palmier	40
Tableau III.8	La teneur en eau d'équilibre d'adsorption du cœur de palmier	42
Tableau III.9	Modèles de la sorption	44
Tableau III.10	paramètres estimés et les critères pour les modelés de teneur en humidité d'équilibre de données de désorption du cœur de palmier à T=40, 50 et 60°C	49
Tableau III.11	paramètres estimés et les critères pour les modelés de teneur en humidité d'équilibre de données d'adsorption du cœur de palmier à T=40, 50 et 60°C	53



# Liste des figures

## Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Volume de contrôle microscopique	07
Figure I.2	Volume de contrôle macroscopique	08
Figure I.3	Description du solide humide	09
Figure I.4	Variation de teneur en eau du produit (X) en fonction du temps	10
Figure I.5	Représentation typique des séchoirs solaires	15
Figure I.6	Isothermes de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis	19
Figure I.7	Forme générale des isothermes	20
Figure II.1	Un échantillon du cœur de palmier	29
Figure II.2	les sels utilisés dans l'expérience	32
Figure II.3	Pesée des sels	33
Figure II.4	les bocaux aux fermetures étanches	34
Figure II.5	La disposition des bocaux dans l'étuve	34
Figure II.6	préparation des échantillons secs	35
Figure III.1	Les compositions physicochimiques de l'échantillon du cœur de palmier	37
Figure III.2	Isothermes de désorption du cœur de palmier à températures 40,50 et 60°C	41
Figure III.3	Influence de la température sur les isothermes de désorption du cœur de palmier	42
Figure III.4	Isothermes d'adsorption du cœur de palmier à températures 40,50 et 60°C.	43
Figure III.5	Influence de la température sur les isothermes de d'adsorption du cœur de palmier	44
Figure III.6	Isothermes de désorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuir) à (T = 40°C)	46
Figure III.7	Isothermes de désorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuir) à (T = 50°C)	47

Figure III.8	Isothermes de désorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuir) à (T = 60°C)	48
Figure III.9	Isothermes de d'adsorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuir) à (T = 40°C)	50
Figure III.10	Isothermes de d'adsorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuire) à (T = 50°C)	51
Figure III.11	Isothermes de d'adsorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuir) à (T = 60°C)	52
Figure III.12	Isostères de désorption pour le cœur de palmier	54
Figure III.13	Isostères de l'adsorption pour le cœur de palmier	54
Figure III.14	Chaleur isostérique de désorption du cœur de palmier	55
Figure III.15	Chaleur isostérique d'adsorption du cœur de palmier	56

# **Nomenclature**



## Nomenclatureur

Symboles	Désignations	Unités
$A_w$	Activité de l'eau	%
$M_{ev}$	Masse de l'eau évaporée	Kg
$M_s$	Masse sèche du produit	Kg
$M_h$	Masse humide du produit	Kg
$M_e$	Masse du l'eau	Kg
$M_a$	Masse de l'air sèche	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
$X_r$	Teneur en eau du produit à base humide	Kg d'eau /kg de m.h %
$X_{eq}$	Teneur en eau d'équilibre	Kg d'eau /kg de m.s
$\Psi$	Degré de saturation	%
$Q_{st}$	Chaleur isostérique de sorption	kJ/mol
$R$	Constante de gaz parfait	J/mol.°K
$P_v$	La pression partielle de la vapeur dans le mélange	Atm
$P_s (T)$	La pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.	Atm
EST	l'erreur standard	Sans
EMR	l'erreur moyenne relative	Sans
$R^2$	le coefficient de détermination	Sans
$E$	La porosité volumique	Sans
$T$	Température	°C
$t$	Temps	S

# **Introduction**

## **générale**

## Introduction générale

La conservation des produits agroalimentaires est essentielle pour prolonger leur durée de vie et la disponibilité au marché, Plusieurs procédés ont été utilisés pour effectuée cette opération on cite a titre d'exemple [1] :

- la mise en conserve ;
- la congélation ;
- la déshydratation ;
- le séchage.

On vue de l'intensité immense du rayonnement solaire dans les régions arides, le séchage solaire ou hybride peut fournir une solution économique pour sécher quelques produits agroalimentaires (la viande, la tomate, l'absinthe, le cœur de palmier,...).et particulièrement les légumes et les herbes médicinales étant des produits qui ne durent pas longtemps.

En Afrique ou plus précisément en Algérie, le cœur de palmier est une espèce très répandue dans le sud de l'Algérie. Il est situé dans la partie centrale du tronc des palmiers, de couleur blanchâtre. Plusieurs espèces se distinguent du mode d'exploitation (sauvage ou cultivé). [2]

Considère le cœur de palmier comme une source alternative pour l'alimentation humaine et les analyses chimiques ldu cœur de palmier de Phoenix sylvestris montrent l'existence d'importants minéraux et vitamines en particulier les glucides, les protéines brutes, les lipides bruts, les fibres brutes, le complexe de vitamines B, la vitamine C, vitamine K, énergie et minéraux par rapport aux autres couramment consommés. Sylvester et coll. [3]

Lors de l'opération de séchage, c'est l'élimination de l'eau qui est importante et, par conséquent La première étape dans la compréhension scientifique de l'état de l'eau dans les aliments, est la détermination des isothermes de sorption. [4]

En effet, elles permettent entre autres, de prévoir les changements de la teneur en eau d'un produit durant le procédé de séchage. Elles permettent aussi de déterminer la température et la teneur en eau finale à atteindre à la fin d'une opération de séchage de manière à assurer sa stabilité physique, chimique et biologique pendant le stockage.

## Introduction générale

---

Aussi dans le même contexte, 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 caractérise des nombreuses interactions solide liquide à l'échelle microscopique. Elle offre donc des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique du produit. [5]

Le présent travail vise comme objectifs spécifiques à déterminer la teneur en eau d'équilibre du produit, les isothermes d'adsorption-désorption du cœur de palmier ainsi que la chaleur isostérique de sorption. La détermination des isothermes d'adsorption-désorption de notre cœur de palmier (jomare) a été effectuée par la méthode gravimétrique statique. Nous avons ainsi utilisé des solutions de sels saturées.

Hormis l'introduction et la conclusion, le présent travail est subdivisé en trois chapitres : le premier, est une étude bibliographique sur le séchage ainsi que celui des isothermes de sorptions et la chaleur isostérique.

Dans le second, nous identifions la plante à sécher (cœur de palmier), matériel et méthodes, aborde tous les éléments entrant en ligne de compte pour l'établissement du sujet.

Le dernier chapitre, on a fait une présentation des résultats expérimentales et leurs discussions, une interprétation sous formes de tableaux, d'une part, et sous formes de graphes d'autre part. En effet, les isothermes de sorption du cœur de palmier seront modélisées par les modèles les plus connus dans ce domaine.

En fin, nous avons terminé ce modeste travail par une conclusion englobant les résultats obtenus et les perspectives de ce travail.

# **Chapitre I**

## **Etude bibliographique**

## **I.1. Généralité sur le séchage**

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. [6]

Le séchage est une opération importante dans le domaine agro-alimentaire et industriel, il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide. [7] Le séchage direct au soleil est la méthode la plus utilisée, dans la plupart des pays en voie de développement, pour préserver les produits agro-alimentaires. [8]

En agro-alimentaire d'une façon générale, l'optimisation de l'opération de séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation restreinte de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité aromatique du produit à sécher. [9]

### **I.1.1. Définition**

Le séchage est un processus de séparation physique, a comme objectif de retirer une phase liquide d'une phase solide, par utilisation de l'énergie thermique. Le liquide est généralement de l'eau est libérée par le processus de vaporisation. (Schweitzer et al., 1979). [10]

C'est une opération consistant à abaisser l'activité d'un liquide d'un produit, jusqu'au seuil en deçà duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des micro-organismes (Gauthier, 1990). [11]

Généralement, le terme déshydratation est utilisé pour définir le séchage. Il est par conséquent intéressant de faire la différence entre les deux processus. Le terme déshydratation a donc un sens plus restrictif, il ne concerne que l'élimination de l'eau dans un solide ou dans un liquide (Charpentier, 1996). [12]

### **I.1.2. But de séchage**

Le but de séchage consiste à diminuer la teneur en eau des produits agroalimentaires jusqu'à une valeur résiduelle inhibant le développement de tous les micro-organismes. Cette valeur permet de stocker les produits dans les conditions ambiantes. [13]

### **I.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 », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.). [14]

### **I.3. Le principe de séchage**

Le séchage implique deux types de transferts: le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. La vitesse du séchage est directement liée à ces deux modes de transfert. [15]

### **I.4. Les modes de séchage**

Ils sont classés selon le mode d'apport de chaleur :

#### **I.4.1. Par conduction**

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...). La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du composé à sécher : le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition s'il atteint sa température d'ébullition. [16]

#### **I.4.2. Par convection**

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à un contact direct entre le solide humide et le gaz caloporteur. [16]

### I.4.3. Par les rayonnements

Les techniques d'énergies radiantes (Ultraviolet, Infra rouge, Haute fréquence, Microonde) permettent d'assurer, lorsque le produit le permet, un séchage de très bonne qualité et de réduire considérablement les dépenses liées au poste énergie. [16]

### I.4.4. Par perte diélectrique

Le séchage par perte diélectrique est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectriques). Lorsqu'un matériau isolant est placé dans un champ électrique, ces molécules se polarisent. Lorsque la polarité des électrodes est inversée. [17]

### I.4.5. Par lyophilisation

La lyophilisation est une opération de déshydratation à basse température qui consiste à éliminer par sublimation, la majeure partie de l'eau contenue dans un produit. Elle autorise une conservation à long terme grâce à l'abaissement de l'eau du produit. [18]

## I.5. Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage

### I.5.1. Humidité absolue

On appelle humidité absolue ou spécifique, ou teneur en humidité, ou plus simplement humidité d'un gaz, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec, cette humidité que nous désignerons par  $H_a$  est donnée par la relation suivante [19] :

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \quad (I-1)$$

$M_e$  : Masse de l'eau

$M_a$  : Masse de l'air sèche

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

$$H_a = 0.622 \left[ \frac{P}{P - P_v} \right] \quad (I-2)$$

### I.5.2. 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 [15] :

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (\text{I-3})$$

$P_v$  : 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.

### I.5.3. 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 [16] :

$$\Psi = \frac{K_a}{K_{ac}} \quad (\text{I-4})$$

Dans le cas où  $P_v$  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 [16] :

$$\Psi = \frac{K_a}{K_{ac}} = \frac{P_v}{P_s} \quad (\text{I.5})$$

### I.5.4. Température caractéristique 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. [18]

#### I.5.4.1. Température du bulbe sec $T_s$ [18]

La température du bulbe sec  $T_s$  ou plus exactement température « sèche », est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec.

#### I.5.4.2. La température humide $T_h$

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. [18]

#### I.5.4.3. La température de rosée $T_r$

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. [18]

#### I.5.4.4. Température de saturation adiabatique $T_G$

La température de saturation adiabatique correspond à la température atteinte par le gaz vecteur sortant, saturé en vapeur du liquide, d'une enceinte adiabatique contenant le liquide à la température  $T_s$ . [18]

### I.6. Caractéristiques des solides humides

#### I.6.1. Porosité volumique d'un produit

La porosité volumique  $\varepsilon$  (figure I.1) est définie par :

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume des pores}}{\text{Volume apparent du produit}} \quad (\text{I.6})$$

$$0 < \varepsilon < 1$$

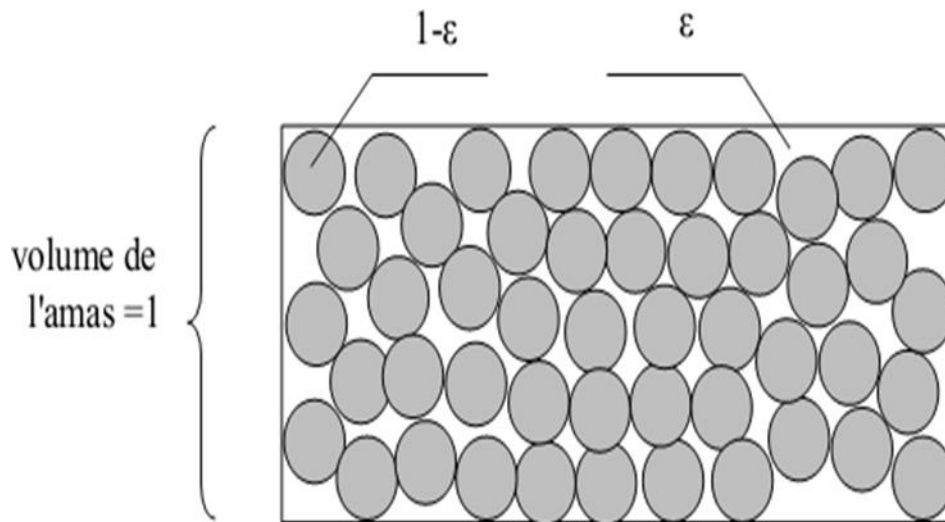
Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc  $1 - \varepsilon$



Figure I.1. Volume de contrôle microscopique.

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure I.2). La définition est équivalente.

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen de luamas} - \text{Volumen du produit}}{\text{Volumen de luamas}} \quad (\text{I.7})$$



**Figure I.2.** Volume de contrôle macroscopique.

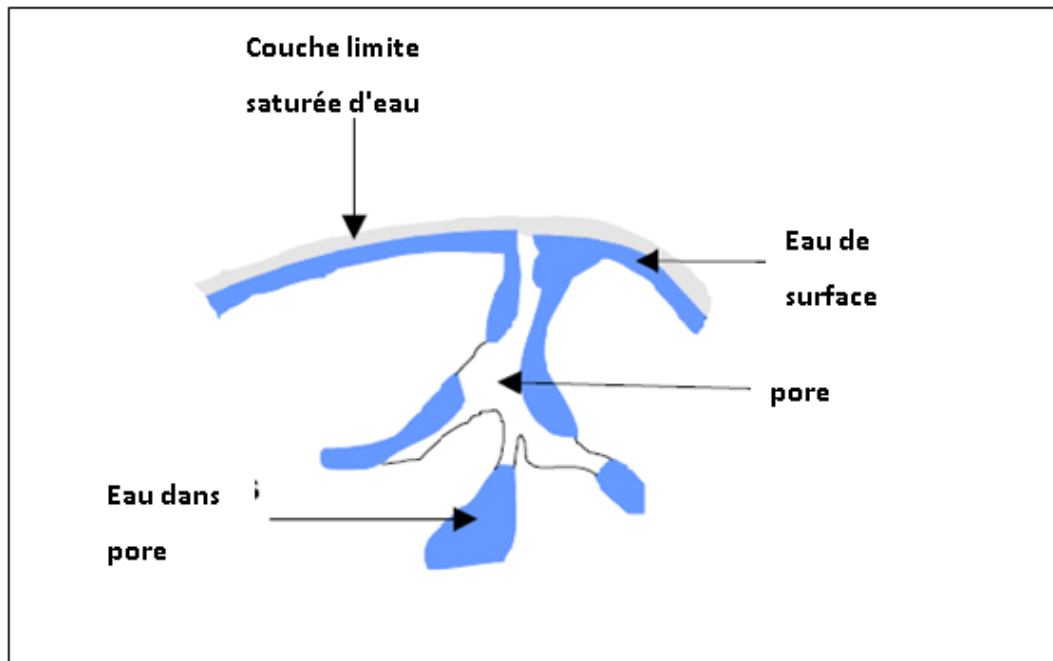
### I.6.2. Description du solide humide

Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles.

Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau c'est-à-dire de l'air contenant de la vapeur d'eau à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température. [19]

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores : les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses.

Un solide humide peut se présenter schématiquement comme sur la figure I.3.



**Figure I.3.** Description du solide humide.

### I.6.3. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche)

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, se définit comme la masse d'eau contenue dans le produit par rapport à la masse sèche de ce produit.

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

### I.6.4. Humidité relative (teneur en eau à base humide)

L'humidité relative d'un solide, appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide se définit comme la masse d'eau contenue dans le produit par rapport la masse humide de ce produit

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

Les deux grandeurs sont liées par les relations [20] :

$$X = \frac{X_r}{1 - X_r} \quad (\text{I.10})$$

$$X_r = \frac{X}{1 + X} \quad (\text{I.11})$$

### I.6.5. Hygroscopicité

Un produit est dit hygroscopique lorsqu'il absorbe et retient facilement l'humidité de l'air et non hygroscopique lorsqu'il ne fixe pas naturellement les molécules d'eau présentes sous forme de vapeur dans l'air. [21]

### I.7. les procédés de séchage

On peut distinguer divers procédés de séchage [22]:

- Les procédés mécaniques (décantation et filtration, centrifugation, compression).
- Les procédés thermiques, par élévation de température et diminution de la pression de vapeur et de la phase gazeuse.
- Les procédés chimiques, par l'utilisation des produits déshydratants (acide sulfurique  $H_2SO_4$ , acide phosphorique  $H_3PO_4$ ).

### I.8. Choix du procédé de séchage

Les types des séchoirs utilisés pour sécher un produit donné sont basés sur le choix de l'appareil adéquat qui se fait alors en fonction de certain facteur. [20] :

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale.
- Débit de produit exigé.
- Sensibilité de produit vis-à-vis de la chaleur.
- Sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité,...).

### I.9. La cinétique de séchage [17]

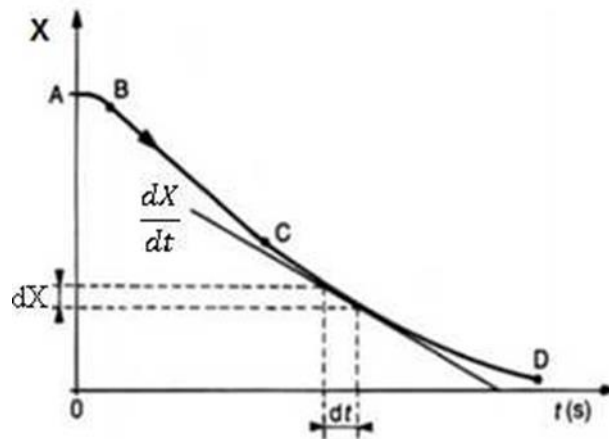
On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (température, hygrométrie, vitesse de l'air asséchant). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

La courbe de vitesse de séchage peut être décomposée en trois périodes :

On distingue :

- La période de mise en température (AB) ;
- La période à vitesse de séchage constante (à allure constante) (BC) ;

- La période à vitesse de séchage décroissante (de ralentissement) (CD) ;
- C: est le point critique du séchage.



**Figure I.4.** Variation de teneur en eau du produit (X) en fonction du temps. [17]

On note la présence unique de la phase à allure décroissante. Celle-ci est caractéristique de la majorité des produits alimentaires.

C'est la période de ralentissement, à partir de laquelle, la vitesse de séchage met à décroître.

La teneur en eau correspondant à la transition entre période BC et CD, est appelé « Teneur en eau critique » ou point critique du séchage. [17]

Il se crée dans les produits poreux un front d'évaporation se dirigeant progressivement vers l'intérieur de la matière à sécher.

La vapeur d'eau ayant un chemin, plus en plus important à parcourir, et pression à la surface du produit diminué, le potentiel d'échange va décroître comme, et par conséquent, la diminution de la vitesse de séchage.

Le flux de chaleur échangé avec l'air n'est plus totalement compensé par la chaleur latente, servant à la vaporisation et on assiste donc à une augmentation de la température du produit. [17]

**I.9.1. la vitesse de séchage [23]**

La vitesse de séchage est la masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau. Elle est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- La nature de la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse du gaz sécheur.

On peut déterminer la vitesse de séchage de deux façons différentes :

- Soit on utilise les vitesses de séchage expérimentales d'une fine couche de produit en recherchant une corrélation qui donne directement l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps et des caractéristiques de l'air asséchant
- Soit on se donne un modèle logique de transfert d'humidité entre le produit et l'air, les résultats expérimentaux servant à recalculer le modèle.

**I.9.2. Les paramètres influents sur la cinétique de séchage [13]**

- Température de l'air de séchage ( $T_a$ )
- Humidité relative de l'air de séchage ( $H_r$ )
- La vitesse de l'air de séchage ( $V_a$ )
- Le taux de recyclage de l'air de séchage
- Le calibre du produit à sécher
- L'épaisseur du produit à sécher ( $E_p$ )

**I.9.3. modélisation mathématique de la cinétique du séchage**

L'approche empirique de courbe de séchage en couche mince est très utilisable grâce à la facilité de mise en œuvre d'une part, et à la fiabilité de décrire le séchage en couche mince des produits agricoles et des plantes aromatiques et médicinales, d'autre part. [23] ce qui suit quelques modèles mathématiques semi-empiriques et empiriques été utilisés pour décrire la cinétique de séchage.

**Tableau I.1.** Modèles mathématiques de la cinétique du séchage. [25]

Modèle	Equation
Newton	$X_r = \exp(-kt)$
Page	$X_r = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$X_r = a. \exp(-kt)$
Logarithmic	$X_r = a. \exp(-kt) + c$
Wang and Singh	$X_r = 1 + at + bt^2$
Two-Term Exponential	$X_r = a. \exp(-kt) + (1 - a). \exp(-kat)$
Page modifié	$X_r = \exp(-(kt)^n)$
Approche Diffusionnelle	$X_r = a. \exp(-kt) + (1 - a). \exp(-kbt)$

Dans ces équations,  $X_r$  représente la teneur en eau réduite calculée suivant la relation :

$$X_r = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (\text{I.12})$$

Où

$X$  : est la teneur en eau au temps  $t$  ( $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$ )

$X_0$ : la teneur initiale en eau ( $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$ )

$X_e$  : la teneur en eau à l'équilibre ( $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{ms}}$ )

### I.10. Classification des systèmes de séchage solaire [6]

D'une manière générale les systèmes de séchage solaire sont classés d'après leurs modes de chauffage et la manière dans laquelle l'énergie solaire est utilisée. D'une manière générale, ils peuvent être classés dans deux groupes majeurs, à savoir :

- Les systèmes de séchage d'énergie solaire actifs (souvent appelés les séchoirs solaires hybrides).
- les systèmes de séchage d'énergie solaire passifs (conventionnellement appelés les séchoirs solaires à circulation naturelle de l'air de séchage).



Trois sous classes distinctes peuvent être identifiées pour ces deux systèmes de séchage actifs et passifs (selon le type du séchoir et le mode d'utilisation de l'énergie solaire), à savoir :

- Les séchoirs solaires de type direct,
- Les séchoirs solaires de type indirect,
- Les séchoirs solaires de mode mixte.

Les principaux types de séchoirs à énergie solaire sont illustres dans la figure (I.6) :

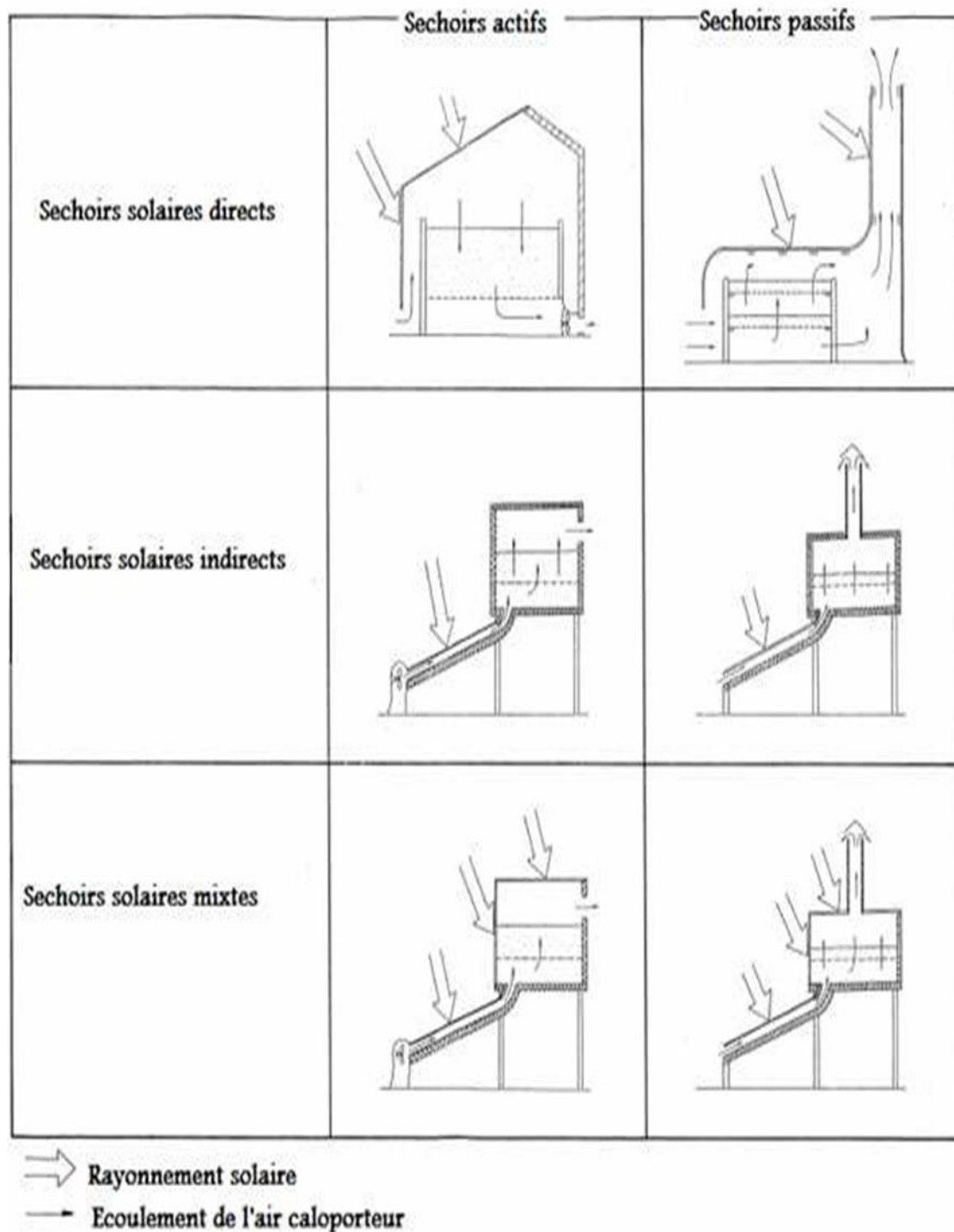


Figure I.5. Représentation typique des séchoirs solaires. [6]

**I.10.1. Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire**

**Tableau I.2.** Les Avantages et les inconvénients pour les différents types de séchoirs solaires.

Type de séchoir solaire	Les avantages	Les inconvénients
Séchoir direct	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel. [26]</li> <li>• Pas besoin de main-d'œuvre qualifié. [26]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Température élevée en fin de séchage.</li> <li>• Oxydation des vitamines A et C par les rayons UV du soleil. [26]</li> <li>• Jaunissement des légumes verts. [26]</li> <li>• Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure. [26]</li> </ul>
Séchoir indirect	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le produit n'est pas exposé directement au soleil. [26]</li> <li>• Le produit conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C)</li> <li>• Température limitée (55°C). [26]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût important. [27]</li> <li>• Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir. [27]</li> </ul>
Séchoir hybride	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Affranchissement par rapport aux conditions climatiques. [16]</li> <li>• Meilleur contrôle du séchage. [16]</li> <li>• Forte augmentation de la productivité par rapport au séchoir solaire car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin. [16]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de production et d'investissement élevé. [16]</li> <li>• Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz. [16]</li> <li>Personnel qualifié pour la maintenance. [16]</li> </ul>

**I.11. Séchage des produits agricoles**

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

**I.11.1. Séchage par convection (entraînement)**

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 isenthalpique 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 thermophysiques 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.

**1.12. Activité de l'eau dans le produit**

L'activité de l'eau dans le produit ( $A_w$ ) est une grandeur liée à l'humidité du produit. (G. Lewis & M. Randall, 1923). [6], (G. Scott, 1957). [28], (M. Loncin, 1961) [29], ont défini l'activité de l'eau  $a_w$  dans le produit par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit ( $P_{vp}$ ) à la pression de vapeur de l'air saturé ( $P_{vs}$ ).

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (I.13)$$

Avec :

$P_{vp}$  : Pression de vapeur d'eau à la surface du produit,

$P_{vs}$  : Pression de vapeur d'eau dans l'air saturé.

Ces deux pressions sont fortement dépendantes de la température, tandis que leur rapport l'est beaucoup moins. Dans le même ordre d'idées, ils justifient que l'humidité relative (Hr) d'une atmosphère (un nombre sans dimension compris entre 0 et 100) est donnée par l'expression :

$$Hr(\%) = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \times 100 \quad (I.14)$$

L'activité de l'eau dans le produit est donc directement liée à l'humidité relative d'équilibre au-dessus d'un produit par la relation :

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{Hr(\%)}{100} \quad (I.15)$$

### I.13. Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau hygroscopique où l'humidité absolue est définie par la masse quantité d'eau contenue dans un produit, exprimée en pourcentage de la masse sèche de ce produit. Cette valeur est importante pour tous les produits vendus au poids.

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (I.16)$$

Avec :

$X_{eq}$  : teneur en eau d'équilibre (%  $M_s$ )

$M_s$  : masse sèche (kg)

$M_h$  : masse humide (kg).

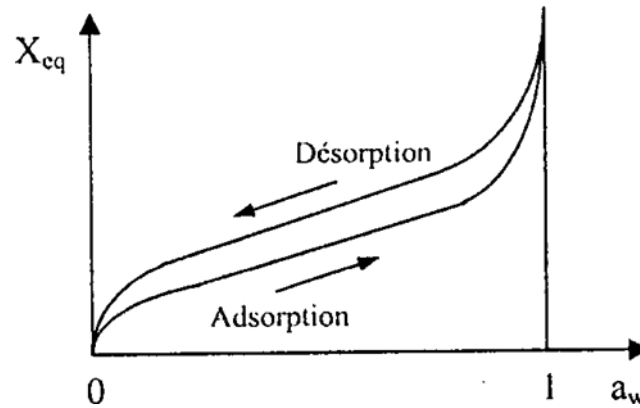
L'activité de l'eau  $a_w$  dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau et  $X_{eq}$  de sa température.

### I.14. Isothermes de sorption

L'isotherme de sorption est la courbe représentant pour une température donnée la teneur en eau  $X_{eq}$  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.

La figure I.6 montre que les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un produit (passage de  $a_w = 1$  à  $a_w = 0,6$ ) entraîne des modifications de structure et de porosité. Il y a un phénomène d'hystérésis.



**Figure I.6.** Isothermes de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis.

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones (figure I.7).

Chaque zone correspond 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 surfaces des 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 microcapillaire constitue une phase continue.

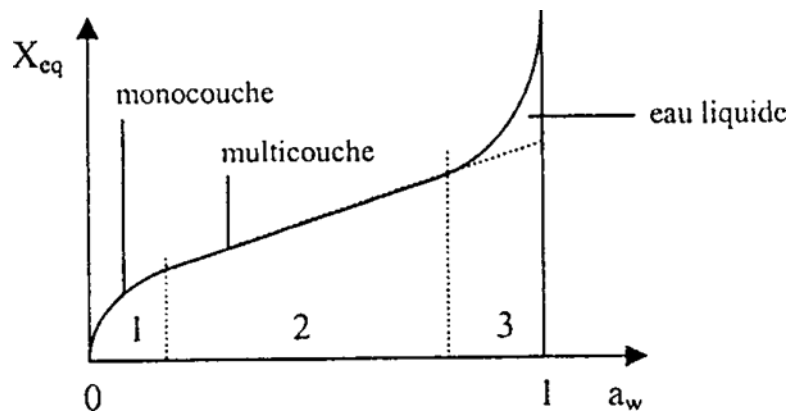


Figure I.7. Forme générale des isothermes.

### I.14.1. Méthodes d'obtention des isothermes de sorption

Dans la littérature (Multon et al., 1971).[30], plusieurs méthodes ont été proposées pour déterminer expérimentalement les isothermes de sorption. Ces méthodes peuvent être classées en trois grandes catégories :

#### I.14.1.1. Les méthodes manométriques (dites méthodes dynamiques)

Elles consistent à mesurer directement la pression de vapeur d'eau, grâce à un dispositif manométrique approprié, après avoir éliminé tous les gaz autres que la vapeur d'eau et atteindre l'équilibre thermique et hygroscopique à température constante. Ainsi, un flux gazeux conditionné est envoyé sur des échantillons, ce qui permet de connaître les différents états d'équilibre. Ces méthodes se caractérisent par une bonne homogénéisation et un temps plus court pour atteindre l'équilibre.

#### I.14.1.2. Les méthodes hygrométriques

Qui exploitent les relations qui peuvent exister entre l'humidité relative d'un produit et l'une des grandeurs physiques faciles à mesurer comme la conductivité (hygromètres électriques) ou la longueur (hygromètres mécaniques).

#### I.14.1.3. Les méthodes gravimétriques (dites méthodes statiques) :

Pour lesquelles les transferts entre le produit et le milieu ambiant sont assurés par la diffusion naturelle de la vapeur d'eau.

L'atmosphère a une humidité relative connue à la température d'utilisation qui est imposée par la solution aqueuse utilisée et dont les solutions saturées font partie. Ces méthodes consistent à mettre l'échantillon dans une atmosphère à température et

humidité relative constantes et grâce à sa variation de masse, on aura sa teneur en eau à l'équilibre.

D'après la littérature (Young, 1967). [31], ( al., 1993) [32]et (Belghit et al., 2000). [32], la méthode des solutions de sels saturés est la plus utilisée. En effet, même si les solutions salines saturées exigent une longue durée pour que l'équilibre thermodynamique se réalise, elles ont l'avantage de présenter un domaine plus restreint de variation de l'humidité relative.

Dans ce travail, nous avons opté pour une méthode statique à mesure discontinue de masse. En effet, les solutions salines saturées présentent les avantages suivants (Young 1967). [31] :

- coût faible pour mettre au point le dispositif expérimental et facilité de la manipulation ;
- effet tampon très important (importante variation possible de la quantité d'eau contenue dans la solution sans variation de l'activité de l'eau  $a_w$ ), qui se maintient tant que la solution est saturée, c'est à dire tant qu'elle est en équilibre avec les cristaux ;
- l'activité de l'eau  $a_w$  dépend peu de la température ;
- très faible pression du soluté lui-même, limitant de ce fait les risques d'interactions chimiques ;
- elles donnent des résultats précis si la température et l'humidité relative sont maintenues constantes.

Cependant l'inconvénient majeur de la méthode des solutions de sels saturés est la toxicité de certains produits chimiques et le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre qui est relativement long ; la vitesse de diffusion de la vapeur d'eau est un facteur limitant. La méthode des solutions saturées est caractérisée par une discontinuité de la gamme des activités de l'eau, d'où la nécessité de disposer, pour une température donnée, de nombreux sels afin de parcourir les humidités relatives de 0 à 100 %.



**I.14.2. Les isothermes les plus connues**

Sont celles de GAB, LANGMUIR, Henderson, FREUNDLICH et de BRUNAUER-EMMETT -TELLER(BET)

➤ **Isotherme d'adsorption de GAB**

Plusieurs modèles mathématiques ont été utilisés pour corrélérer la teneur en eau des produits alimentaires en équilibre avec l'humidité relative environnante. De ces modèles, nous citons l'équation de BET de (Brunauer et al. (1938)). [33], et sa version modifiée (GAB) cité par (Labuza et al. (1985)). [34], L'équation de GAB (de Guggenheim - Anderson - de Boer), le modèle le plus largement utilisé par les chercheurs, est applicable pour les activités de l'eau comprises entre 0.05 et 0.95. Ce modèle permet non seulement de calculer la teneur en eau de la couche mono-moléculaire mais permet aussi de déterminer la chaleur de sorption de la couche mono-moléculaire et de la multicouche.

L'équation de GAB peut être écrite selon la forme suivante :

$$X_{eq} = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot a_w}{[1 - B \cdot a_w][1 - B \cdot a_w + B \cdot C \cdot a_w]} \quad (I.17)$$

➤ **Isotherme d'adsorption de LANGMUIR**

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

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

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

$$X/m = a b C / (1 + a C) \quad (I.18)$$

a et b sont des constantes.

Si on inverse l'équation, on obtient :

$$1 / (X / m) = (1 / (a b C / (1 + a C))) \quad (I.19)$$

➤ **Isotherme d'adsorption de FREUNDLICH**

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

$$X/m = (K \cdot C)^{1/n} \quad (I.20)$$

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:

$$\text{Log}(X/m) = \text{log}(K) + (1/n) \text{log} C \quad (I.21)$$

➤ **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 :

$$X/m = ACX_0 / (C_S - C) [1 + (A - 1)C/C_S] \quad (I.22)$$

$X_0$  : 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 suivant :

$$C / (C_S - C) X/m = (1/AX_0) + ((A - 1) / AX_0) (C/C_S) \quad (I.23)$$

➤ **Le modèle d'Henderson**

Le modèle d'Henderson [35], décrit l'ensemble des isothermes de sorption pour différentes. La corrélation exprimant ce modèle s'écrit :

$$X_{eq}(T, H_r) = \left[ \frac{-\log(1-H_r)}{K(1.8T+492)} \right]^{1/n} \quad (I.24)$$

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

$$n \log(X_{eq}) + \log(k) = \log(-\log(1-H_r)) - \log(1.8T+492) \quad (I.25)$$

**Tableau I.3 :** Modèles de la sorption. [20]

Auteurs	Equation du modèle	Domaine de validité de courbe
Langmuir	$X_{eq} = \exp[-k \cdot (T + n) \cdot X_{eq}^c]$	Complète
Peleg	$X_{eq} = A \cdot a_w^{k1} + B \cdot a_w^{k2}$	Complète
GAB	$X_{eq} = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot a_w}{[1 - B \cdot a_w][1 - B \cdot a_w + B \cdot C \cdot a_w]}$	Complète
Oswin modifié	$X_{eq} = (A + BT) \left[ \frac{a_w}{1 - a_w} \right]^c$	Complète
Chung- pfof modifié	$a_w = \exp \left[ \frac{-A}{T+B} \exp(-C \cdot X_{eq}) \right]$	Complète
Henderson modifié	$1 - a_w = \exp[-K \cdot (T + n) \cdot X_{eq}^c]$	Complète
Halsey modifié	$a_w = \exp \left[ \frac{-\exp(A+BT)}{X_{eq}^c} \right]$	Complète
BET Modifié	$X_{eq} = \frac{(A+BT) C \cdot a_w}{[1 - a_w][1 - a_w + C \cdot a_w]}$	Zone1

### I.15. Chaleur isostérique de sorption

La chaleur isostérique représente l'énergie de fixation de l'eau au substrat, c'est-à-dire la chaleur supplémentaire à la chaleur de vaporisation de l'eau pure qu'il faudrait fournir au produit pour le déshydrater.

La chaleur isostérique de sorption peut être calculée à partir d'une relation dérivée de l'équation de Clausius-Clapeyron, (H. A. Iglesias et al., 1976b). [36], (Kapsalis, 1987). [37]

$$\text{Ln}(a_w) = -\left(\frac{Q_{st}}{R}\right) \cdot \frac{1}{T} + K \quad (\text{I.26})$$

Cette relation nécessite à déterminer les isothermes à différentes températures afin de calculer la variation logarithmique de l'humidité relative  $\ln(a_w)$  en fonction de l'inverse de la température ( $1/T^\circ\text{k}$ ), pour une teneur en eau d'équilibre fixée.

Les isothermes de sorption sont tracés en  $\ln(a_w)$  par rapport à ( $1/T^\circ\text{k}$ ) pour des valeurs fixes de contenu d'équilibre d'humidité (les courbes isostères). Les chaleurs isostériques nettes de sorption peuvent être calculées à chaque valeur de la teneur en humidité d'équilibre à partir de la pente des courbes de isostères qui est égal à  $(- (Q_{st} / R))$ .

Avec:

$Q_{st}$  : La chaleur isostérique de sorption (kJ/mol);

$a_w$  : Activité d'eau;

$T^\circ\text{k}$  : Température absolu ( $^\circ\text{K}$ );

$R$  : Constante de gaz parfait (kJ/mol K);

$K$  : Constante.

#### **I.16. Estimation de la durée de vie :**

L'établissement de l'isotherme de sorption d'un aliment emballé peut aider à estimer sa durée de conservation dans des conditions de stockage données. Le modèle de Heiss et Eichner. [38], peut être utilisé pour estimer le temps de stockage potentiel sur la base d'un  $a_w$  critique pour un système particulier dans des conditions de stockage données. Ce modèle était basé sur l'hypothèse que la vapeur de sorption d'eau est le facteur déterminant, entre autres comme la présence de bactéries de détérioration, d'oxygène et de lumière qui pourraient limiter la durée de conservation. L'équation est donnée comme:

$$t_s = \frac{\ln\left(\frac{(X_s - X_i)}{(X_s - X_c)}\right)}{\left(KS \cdot \frac{A \cdot P_0}{M_S \cdot S}\right)} \quad (\text{I.27})$$

$KS$  : est la perméabilité du paquet de vapeur d'eau,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{jour}^{-1}$ .

$t_s$  : est la durée de conservation potentielle du produit (temps en jours pour que le produit emballé se gâte par détérioration microbienne et biochimique avec perte de qualité sensorielle).  $A$  : est la superficie du paquet,  $\text{m}^2$ .

MS : est le poids du produit (matière sèche), en kg .

P0 : est la pression de vapeur à la température de stockage, en Pa.

S : est la pente de l'isotherme des produits, supposée linéaire sur la gamme X<sub>e</sub> et X<sub>c</sub>.

X<sub>e</sub> : est la teneur en humidité à l'équilibre.

X<sub>c</sub> : est la teneur en humidité de stockage en toute sécurité.

X<sub>i</sub> : est la teneur en humidité initiale du matériau lorsqu'il est emballé, kg / kg de base sèche.

La détermination de la durée de vie est dépende de la modèle choisi , ils diffèrent d'un modèle à l'autre, par exemple la formule de l'équation est :

- BET et GAB :

$$t_s = \frac{\ln\left(\frac{(h_a - a w_c)}{(h_a - a w_0)}\right)}{\left(\frac{A \cdot g_v \cdot e_s}{M \cdot P \alpha \cdot a}\right)} \quad (I.28)$$

$\alpha$  : est la pente de l'isotherme (g / g),

$P_\alpha$  : est la pression atmosphérique (kPa),

M : est la masse totale du produit à l'intérieur du colis (g),

$e_s$  : est la pression de vapeur d'eau saturante à la température du colis (kPa), A : est la surface de l'emballage (m<sup>2</sup>)

$g_v$  : est la conductance de l'emballage (g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>).

- Hernandez :

$$t_s = \frac{\ln\left(\frac{(Y_0 - Y_{i,t=0})}{(Y_0 - Y_{i,t})}\right)}{\left(\frac{P \cdot A \cdot b \cdot P_{sat}}{M_s \cdot L}\right)} \quad (I.29)$$

MS : masse séchée (g).

P : perméabilité à la vapeur d'eau du film plastique (g-µm m- 2 d- 1 kPa-1).

A : surface effective de l'emballage (m<sup>2</sup>) pour l'échange de gaz.

P<sub>sat</sub> : pression de vapeur à saturation pour une température donnée (kPa).

Y<sub>0</sub> : humidité relative externe.

Y<sub>i</sub> : humidité relative de l'espace de tête du paquet.

$Y_{i, t = 0}$  : l'humidité relative à l'équilibre ( $H_r, \%$ ) dans l'espace de tête du paquet au début de l'essai.

$Y_{i, t}$  :  $H_r$  lorsque la teneur  $X_{eq}$  de l'échantillon a atteint sa valeur maximale.

# **Chapitre II**

**Approche expérimental**

### II.1. Introduction

L'isotherme de sorption, représentant la courbe de la variation de la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'activité de l'eau du produit ou de l'humidité relative du milieu à l'équilibre à une température constante donnée. C'est La première étape dans la compréhension scientifique de l'état de l'eau dans les aliments, et donc leur conservation, Elles permettent de déterminer la température et la teneur en eau finale à atteindre à la fin d'une opération de séchage d'un produit donné de manière à assurer sa stabilité physique, chimique et biologique pendant le stockage.

L'activité de l'eau dans le produit ( $a_w$ ) qui est égale à l'humidité de l'air (Hr) ; en effet les équilibres thermique et hydrique entre le produit (cœur de palmier) et l'atmosphère qui l'entoure (Air) est défini par les deux égalités suivantes : [39]

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{air}} = T_{\text{produit}} \\ Hr/100 = a_w \end{array} \right.$$

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

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.

Les courbes d'isothermes de sorption est caractéristique des nombreuses interactions entre le squelette solide et les molécules d'eau qui ont lieu à l'échelle microscopique. Elle offre donc pour ainsi dire des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique du produit. La connaissance de ces courbes est indispensable pour étudier le séchage des produits.

L'objectif de ce chapitre est la détermination expérimentale des isothermes de sorption du cœur de palmier (jomare) pour différentes températures et pour ce faire, on a opté pour une méthode statique : Méthode des solutions salines saturés. Les courbes de sorption expérimentales obtenues sont comparées à quatre modèles différents en vue de dégager l'équation la plus adéquate.

### II.2. Définition du produit à sécher

Le cœur de palmier est un légume blanc obtenu à partir du centre de variétés spécifiques de palmier. Les jeunes arbres sont abattus et corcés pour exposer leur



noyau interne blanc comestible, qui est ensuite coupé en longueurs pour un traitement ultérieur.

En AFRIQUE ou plus précisément en ALGÉRIE, le cœur de palmier est une espèce très répandue dans le sud de l'ALGÉRIE. Il est situé dans la partie centrale du tronc des palmiers, de couleur blanchâtre. Plusieurs espèces se distinguent de la voie d'exploitation (sauvage ou cultivée) [2].



**Figure II.1.** Un échantillon du cœur de palmier.

### **II.3. Variétés**

Le cœur de palmier change selon le cultivar de palmier qui a été pris de lui.

Il existe des milliers de cultivars, communément qualifiés de variétés. Comme le palmier-dattier est multiplié végétativement, ses cultivars sont des clones ou des groupes de clones. Les différents cultivars sont généralement classés selon la texture et la consistance des fruits à maturité en deux grands groupes : les dattes sèches et les dattes molles. Les dattes intermédiaires en demi-sèches ou demi-molles.

En Algérie, plus de 1160 cultivars sont recensés. 'Deglet noir', 'Ghars', 'Degla Beydha', 'Tilemsu/Hmiira', 'Tinnaser', 'Tigazza', 'Tazerzayet', 'Taquerbuch', sont très répandus. Il en existe bien d'autres caractérisant chaque région comme 'Seb'a Bedra', 'Aggaz', 'Cheykh Mhammed', 'Aabbad', 'Daglat Talmiin , .....etc.

### **II.3. Composition**

La composition du cœur de palmier est donnée par le tableau suivant ;

**Tableau II.1.** La composition du cœur de palmier pour 100g.

<b>Protéine</b>	2,7 g
Lipides (lipides totaux)	0,2 g
Calories (énergie)	115 kcals
Sucre, total	17,16 g
Fibres	1,5 g
Magnésium	10 mg
Potassium	1806 mg
Sodium	14 mg
<b>Les vitamines</b>	
Vitamine A	0 µg
Vitamine D	0 µg
Vitamine B <sub>11</sub>	24 µg
Vitamine E	0,5 mg

#### II.4. La production du cœur

Le cœur de palmier, pousse principalement en Amérique du sud. Il y a une trentaine d'année, le premier producteur était le Brésil. Ce dernier a commencé sa production avec des arbres sauvages. Devant la demande croissante de ce produit, des cultures ont été mises en place au Brésil, mais aussi au Costa Rica, en Équateur et en Colombie.

Dans le sud d'ALGERIE, et spécialement dans Touat, les habitants consomment ce produit comme complément alimentaire, mais en quantité très limitées et à périodes discrètes [40].

#### II.5. Le profil nutritionnel du cœur de palmier

Ce légume a un profil nutritionnel élevé et est connu pour avoir de multiples avantages pour la santé. Le cœur de palmier est riche en fibres avec une bonne quantité de protéines et un faible indice glycémique. Cela le rend approprié pour être mangé dans un régime de guérison.

La valeur nutritive du cœur de palmier est incroyable. Ils sont considérés comme d'excellentes sources de vitamine C, phosphore, calcium, manganèse,

etc. Ils stimulent le système immunitaire, aident à prévenir l'anémie, aide à la perte de poids, soutient la santé des os, et beaucoup plus.

### II.5. La consommation du cœur de palmier

Le cœur de palmier se consomme froid, en l'état ou accompagné d'une sauce vinaigrette. Il accompagne généralement les salades à base de maïs, d'haricots rouges, de tomate... Il peut être également proposé chaud, dans des soupes, quiches, lasagne, ...ect.

### II.6. Matériel et mode opératoire

La détermination des isothermes d'adsorption-désorption du cœur de palmier a été effectuée avec la méthode gravimétrique statique. Cette méthode assure la régularisation de l'humidité par contact avec des solutions salines saturées aqueuses au-dessus desquelles la pression de vapeur d'eau, à température donnée, Les sels saturés sont plus sûrs à utiliser et une humidité constante peut être maintenue en laissant un excès de sel dans la solution. De cette manière, on fait en sorte que la solution reste saturée pendant toute la durée de l'expérience malgré la libération ou l'absorption d'eau par le produit.

#### II.6.1. Préparation des solutions salines saturées

Les solutions salines saturées utilisées sont classés dans le tableau suivant

**Tableau II.2.** Les solutions salines saturées utilisées.

Les solutions salines saturées	Formule brute
L'hydroxyde de potassium	KOH
Le chlorure de magnésium	MgCl <sub>2</sub>
Le carbonate de potassium	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Le nitrate de magnésium	MgNO <sub>3</sub>
Le chlorure de potassium	KCl
Le sulfate de potassium	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Le chlorure de sodium	NaCl
Le chlorure de baryum	BaCl <sub>2</sub>



**Figure II.2.** les sels utilisées dans l'expérience.

Ces solutions permettent d'obtenir des humidités relatives variant de 6.30 à 96.4%. (Tableau II.3).

**Tableau II.3.** Valeurs standards des humidités relatives données par différents sels en fonction de la température.

<b>Les températures (°C)</b>	<b>T=40°</b>	<b>T=50°</b>	<b>T=60°</b>
Les sels	Hr (%)	Hr (%)	Hr (%)
KOH	6,3	5,7	5,5
MgCl <sub>2</sub>	31,6	30,5	29,3
MgNO <sub>3</sub>	49	46	43
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	42,3	45,6	45
NaCl	74,7	74,4	74,5
KCl	82,3	81,2	80,3
BaCl <sub>2</sub>	89,1	88,23	87,28
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	96,4	95,8	95,7

Il faut savoir que quand une solution est saturée, on ne peut plus dissoudre de soluté dans un solvant (ici le soluté est le sel et le solvant, l'eau).

Pour notre expérience, nous avons d'abord mesuré un volume d'eau de 100 mL que nous avons versé dans un bécher. Puis nous avons pesé 10g de chaque sel avant de le verser dans l'eau en agitant jusqu'à la dissolution complète du soluté. Nous avons ensuite ajouté du sel par portion de 5g, jusqu'à la saturation de notre solution.

En réalisant de simples calculs, nous avons pu constater que la masse maximale de sel que l'on peut dissoudre dans un litre d'eau est sa valeur de solubilité par exemple L'hydroxyde de potassium (1100g/l) ; ça-veut-dire la masse maximale de KOH que l'on peut dissoudre dans un litre d'eau est d'environ 1100g.

Dans le Tableau (II.4) on a consulté les différentes valeurs des solubilités des sels utilisés et cela pour avoir une idée préalable sur leurs masses.

**Tableau II.4.** Solubilités des sels utilisés.

Solutions	KOH	MgCl <sub>2</sub>	MgNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaCl	KCl	BaCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Solubilités(g/l)	1100.0	542.0	1120.0	1120.0	358.5	340.0	358.9	358.0

Chaque solution saturée est obtenue en dissolvant, dans une bouteille contenant 100 ml d'eau distillée, une masse  $m_i$  pesée dans une balance à affichage numérique de précision 0.001g ; pendant la préparation, l'agitation des solutions était nécessaire.



**Figure II.3.** Pesée des sels.

Les masses des sels ajoutées pour obtenir ces solutions salines saturées sont données dans le tableau (II.5).

Tableau II.5. Masses des sels utilisées pour la saturation.

Solutions	KOH	MgCl <sub>2</sub>	MgNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaCl	KCl	BaCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Masses m <sub>i</sub> (g)	110.0	54.2	112.0	112.0	35.85	34.0	35.89	35.8

Les solutions sont mises, ensuite, dans huit bocaux aux fermetures étanches.



Figure II.4. les bocaux aux fermetures étanches.

### II.2.2. Préparation du dispositif expérimental

La figure II.5. Présente le schéma du dispositif expérimental utilisé. Il se compose de huit bocaux contenant chacun une solution saline saturée différente de l'autre dans une étuve réglée à une température désirée.



Figure II.5. La disposition des boucaux dans l'étuve.

Les expériences d'adsorption et de désorption menées ont été réalisées à trois températures différentes : 40, 50 et 60°C et à huit valeurs d'humidité relative.

Les échantillons frais destinés au processus de désorption du cœur de palmier sont

découpés en petits morceaux environ de mêmes masses (1g)

Pour obtenir l'isotherme d'adsorption, les échantillons sont préalablement séchés dans une étuve réglée à une température de 105°C. comme le montre le figure II.5.



**Figure II.6.** préparation des échantillons secs.

Puis les échantillons sont introduits dans les bocaux et pesés tous les jours jusqu'à ce que la variation de masse entre deux mesures successives devient inférieure à 1%. [41] L'équilibre thermodynamique est alors considéré comme atteint. Dès que les masses humides d'équilibre sont déterminées, les échantillons sont introduits dans une étuve à 105°C pendant 24 heures afin de vérifier leurs masses sèches.

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 (II.1).

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (II.1)$$

# **Chapitre III**

## **Résultats expérimentaux et modélisation**



**III. Résultats expérimentaux et modélisation**

Des jeunes palmiers dattiers sont ramenés de la zone de URER, dans des bonnes conditions au laboratoire de l'URER/MS, pour extraire le cœur, et préparer les échantillons.

Pour chaque échantillon, nous avons utilisé une masse de  $1g \pm 10^{-3}$  du cœur de palmier sèche et  $0.5g \pm 10^{-3}$  du cœur de palmier fraîche.

**III.1. Composition physicochimique du cœur de palmier :**

Le tableau suivant représente les masses d'échantillon du cœur de palmier traitée dans ce travail :

**Tableau III.1.** Les masses d'échantillon du cœur de palmier.

Masse(g)	M <sub>v</sub>	M <sub>0</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>
1	24.747	2.003	25.151	24.776
2	25.762	2.002	26.227	25.797

M<sub>v</sub>=la masse de capsule vide.

M<sub>0</sub>=la masse de l'échantillon initiale.

M<sub>1</sub>= la masse de l'échantillon à (105°C).

M<sub>2</sub>=la masse de l'incinération (550°C).

1- La masse sèche et l'humidité dans le cœur du palmier sont calculées par les relations suivantes :

$$M_s = ((M_1 - M_v) / M_0) * 100 \tag{III.1}$$

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

**A.N:**

**a. Pour capsule 1:**

$$M_s(\%) = ((25.151 - 24.747) / 2.003) * 100 = 20.1\%$$

**b. Pour capsule 2:**

$$M_s(\%) = ((26.227 - 25.762) / 2.002) * 100 = 23.2\%$$

$$M_s = 21.65 \%$$

\*La masse humide dans le cœur du palmier est donc :

$$H(\%) = 100 - M_s$$

$$H(\%)=100-21.65=78.35$$

2- La masse minérale et la masse organique dans le Cœur de palmier sont calculées par les relations suivantes:

$$M_m=T_C(\%)=\left(\frac{M_2-M_V}{M_1-M_V}\right) * 100 \tag{III.3}$$

$$M_O=M_S-M_m \tag{III.4}$$

A.N :

$$T_C = ((24.776-24.747) / (25.151-24.747)) * 100 = 0.071$$

$$T_C(\%) = M_m = 7.1\%$$

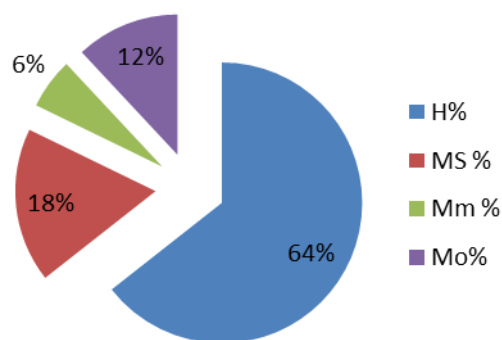
\*La masse organique contenant dans le cœur de palmier est donc :

$$M_O=M_S-M_m=21.65-7.1=14.55\%$$

Le tableau suivant représente les compositions de l'échantillon du cœur de palmier

**Tableau III.2.** Les compositions de l'échantillon du cœur de palmier.

Les compositions	H(%)	M <sub>S</sub> (%)	M <sub>m</sub> (%)	M <sub>o</sub> (%)	Saccharose (%)	η
	78.35	21.65	7.1	14.55	0.1	1.332



**Figure III.1.** Les compositions physicochimiques de l'échantillon du cœur de palmier.

**III.2. Masse sèche des échantillons du cœur de palmier**

Les valeurs des masses sèches de tous les échantillons du cœur de palmier 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 du cœur de palmier sont reportées, pour 40°C, 50°C et 60°C.

	Sels	KOH	MgCl <sub>2</sub>	MgNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaCl	KCl	BaCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
T= 40°C	M <sub>S</sub> (g)	0.555	0.556	0.535	0.533	0.554	0.554	0.559	0.554
	M <sub>F</sub> (g)	1.044	1.048	1.037	1.037	1.024	1.049	1.037	1.048
T= 50°C	M <sub>S</sub> (g)	0.508	0.511	0.505	0.511	0.509	0.507	0.502	0.519
	M <sub>F</sub> (g)	1.014	1.023	1.029	1.062	1.016	1.038	1.065	1.056
T= 60°C	M <sub>S</sub> (g)	0.529	0.517	0.516	0.517	0.51	0.522	0.517	0.525
	M <sub>F</sub> (g)	1.009	1.029	1.013	1.025	1.062	1.016	1.032	1.025

**III.3. Masses humides et masses d'eau à l'équilibre des échantillons de cœur de palmier**

Les masses humides M<sub>h</sub> et les masses d'eau à l'équilibre M<sub>e</sub> du cœur de palmier obtenue pour les trois températures de travail 40°C, 50°C et 60°C sont reportées dans les tableaux respectivement.

Les masses humides M<sub>h</sub> sont les valeurs des dernières pesées des échantillons et les masses d'eau M<sub>e</sub> sont calculées, après détermination des masses sèches M<sub>S</sub>, 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 du cœur de palmier à T = 40°C.

Sels	KOH	MgCl <sub>2</sub>	MgNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaCl	KCl	BaCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
M <sub>h</sub> (g)	0.55	0.578	0.566	0.558	0.735	0.898	0.664	0.605
	0.202	0.194	0.197	0.203	0.269	0.279	0.275	0.548
M <sub>e</sub> (g)	0.018	0.046	0.052	0.044	0.212	0.385	0.264	0.304
	0.012	0.016	0.026	0.022	0.096	0.136	0.037	0.393

**Tableau III.5.** Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre du cœur de palmier à T = 50°C.

Les sels		KOH	MgCl <sub>2</sub>	MgNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaCl	KCl	BaCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
M <sub>h</sub> (g)	T <sub>S</sub>	0.503	0.507	0.538	0.539	0.648	0.726	0.856	1.079
	T <sub>F</sub>	0.262	0.3	0.302	0.299	0.351	0.402	0.54	0.769
M <sub>e</sub> (g)	T <sub>S</sub>	0.01	0.046	0.06	0.05	0.161	0.275	0.436	0.643
	T <sub>F</sub>	0.018	0.031	0.033	0.028	0.09	0.143	0.296	0.552

**Tableau III.6.** Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre du cœur de palmier à T = 60°C.

Sels		KOH	MgCl <sub>2</sub>	MgNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaCl	KCl	BaCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
M <sub>h</sub> (g)	T <sub>S</sub>	0.495	0.508	0.523	0.519	0.599	0.539	0.88	0.898
	T <sub>F</sub>	0.248	0.266	0.269	0.266	0.305	0.277	0.439	0.484
M <sub>e</sub> (g)	T <sub>S</sub>	0.021	0.049	0.045	0.049	0.134	0.072	0.417	0.428
	T <sub>F</sub>	0.004	0.019	0.029	0.025	0.084	0.057	0.203	0.247

**III.4. Résultats de l'expérimentation**

Après avoir effectué les expériences des isothermes de sorption pondent plusieurs jours (de 10 à 15 jours), nous présentons les résultats expérimentaux de désorption et l'adsorption du cœur de palmier obtenu à 40, 50 et 60 °C dans les Figures III.2 et III.4.

La courbe d'absorption ne se superpose pas avec la courbe de désorption, mettant en évidence un phénomène d'hystérésis. L'isotherme de l'humidification (adsorption) est inférieure à celle de la déshydratation (désorption). Ils ont une apparence sigmoïdale selon la classification de BET. Comme on le voit sur les figures, la teneur en eau à l'équilibre augmente avec l'activité de l'eau à température constante. Selon la littérature, les courbes des isothermes de sorption du cœur de palmier peuvent être divisées en trois zones :

- Zone I (activité de l'eau comprise entre 0,05 et 0,3), est une zone d'une quantité minimale d'eau. Cette quantité est due aux sites actifs par les liaisons d'hydrogène dans les molécules des groupes polaires.
- Zone II (activité de l'eau entre 0,3 et 0,8), dans cette zone l'eau est plus faiblement lié, d'abord comme multicouche ci-dessus la monocouche; plus tard, la teneur en eau augmente, cette eau remplit successivement des

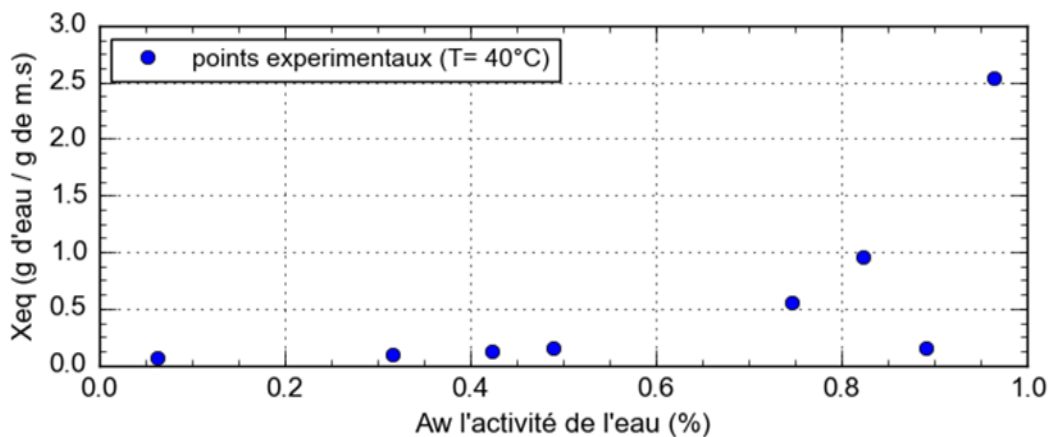
micropores et des macropores dans le système. Dans cette zone, les réactions chimiques et biochimiques nécessitant de l'eau solvant commencent à avoir lieu en raison de la mobilité accrue des solutés.

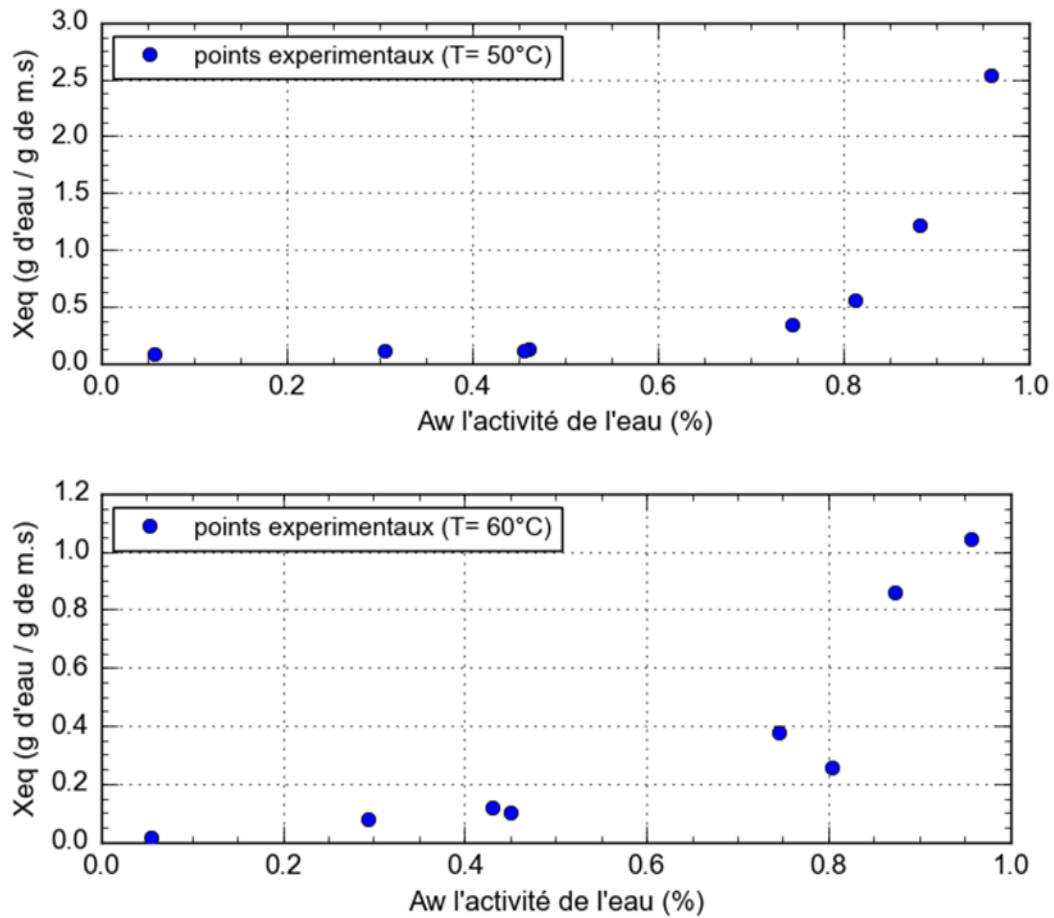
- Zone III (activité de l'eau entre 0,8 et 0,95), où l'excès d'eau dans les macro capillaires provoque la création ou la naissance microbienne qu'il devient une réaction dégradable majeure dans cette région.

III.4.1. Résultats de l'expérimentation de désorption

Tableau III.7. La teneur en eau d'équilibre de désorption du cœur de palmier.

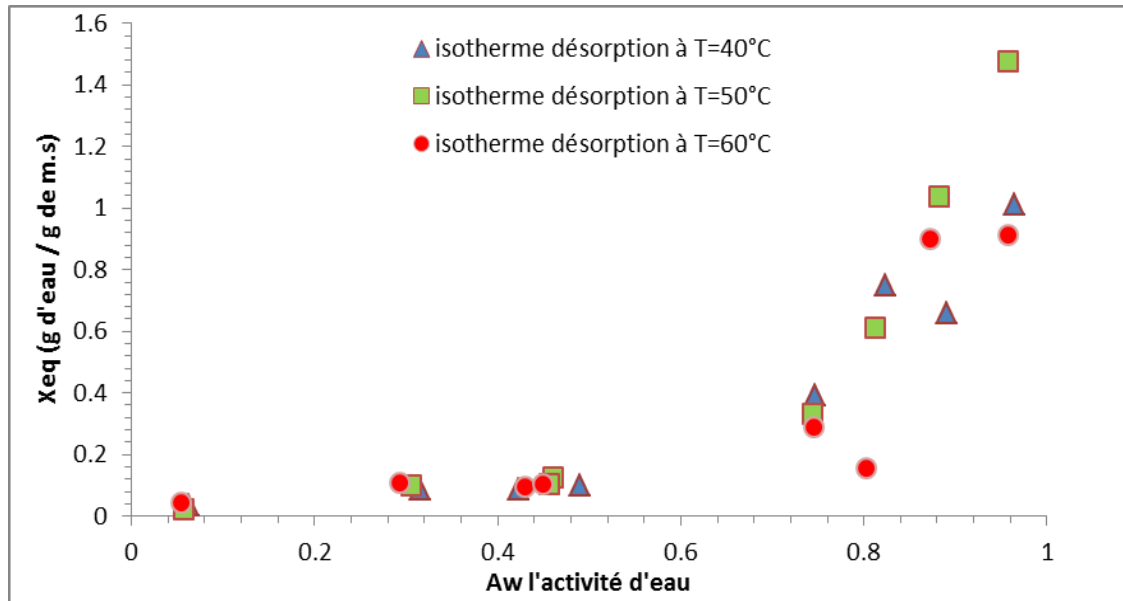
Sels	T = 40 °C		T = 50 °C		T = 60 °C	
	Aw	X <sub>eq</sub>	Aw	X <sub>eq</sub>	Aw	X <sub>eq</sub>
KOH	0.063	0.033834	0.057	0.020283	0.055	0.044303
MgCl <sub>2</sub>	0.316	0.086466	0.305	0.099783	0.293	0.106753
MgNO <sub>3</sub>	0.49	0.101167	0.46	0.125523	0.43	0.094142
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.423	0.085603	0.456	0.102249	0.45	0.104255
NaCl	0.747	0.391866	0.744	0.330595	0.745	0.288172
KCl	0.823	0.75048	0.812	0.609756	0.803	0.154175
BaCl <sub>2</sub>	0.891	0.66	0.8823	1.038095	0.8728	0.900647
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.964	1.009966	0.958	1.474770	0.957	0.910638





**Figure III.2.** Isothermes de désorption du cœur de palmier à températures 40,50 et 60°C.

La figure III.3 rapporte le lissage des courbes d'adsorption expérimentales pour les trois températures de travail. Cette figure illustre la variation de la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  en fonction de l'activité d'eau ( $A_w$ ) de l'atmosphère entourant le produit.



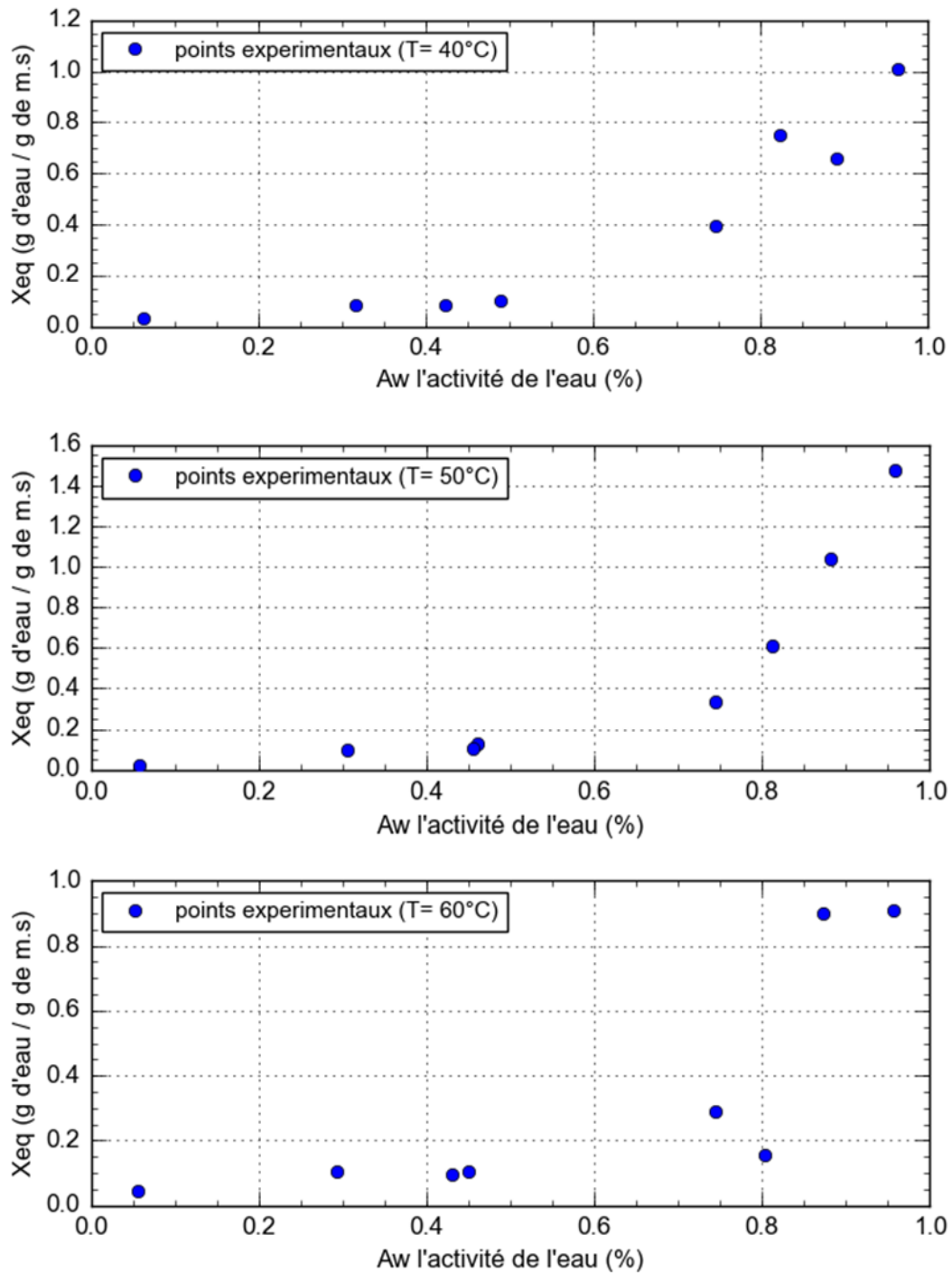
**Figure III.3.** Influence de la température sur les isothermes de désorption du cœur de palmier.

#### III.4.2. Résultats de l'expérimentation d'adsorption

Les teneurs en eau d'équilibre d'adsorption du cœur de palmier de chaque sel dans les trois températures regroupé dans le tableau suivant:

**Tableau III.8.** La teneur en eau d'équilibre d'adsorption du cœur de palmier.

Sels	T = 40 °C		T = 50 °C		T = 60 °C	
	Aw	X <sub>eq</sub>	Aw	X <sub>eq</sub>	Aw	X <sub>eq</sub>
KOH	0.063	0.063158	0.057	0.073770	0.055	0.016393
MgCl <sub>2</sub>	0.316	0.089888	0.305	0.115241	0.293	0.076923
MgNO <sub>3</sub>	0.49	0.152047	0.46	0.122677	0.43	0.120833
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.423	0.121547	0.456	0.103321	0.45	0.103734
NaCl	0.747	0.554913	0.744	0.344827	0.745	0.380090
KCl	0.823	0.951049	0.812	0.552123	0.803	0.259091
BaCl <sub>2</sub>	0.891	0.155462	0.8823	1.213114	0.8728	0.860169
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.964	2.535484	0.958	2.543778	0.957	1.042194



**Figure III.4.** Isothermes d'adsorption du cœur de palmier à températures 40,50 et 60°C.

La figure III.5 rapporte le lissage des courbes d'adsorption expérimentales pour les trois températures de travail. Cette figure illustre la variation de la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  en fonction de l'activité d'eau ( $A_w$ ) de l'atmosphère entourant le produit.



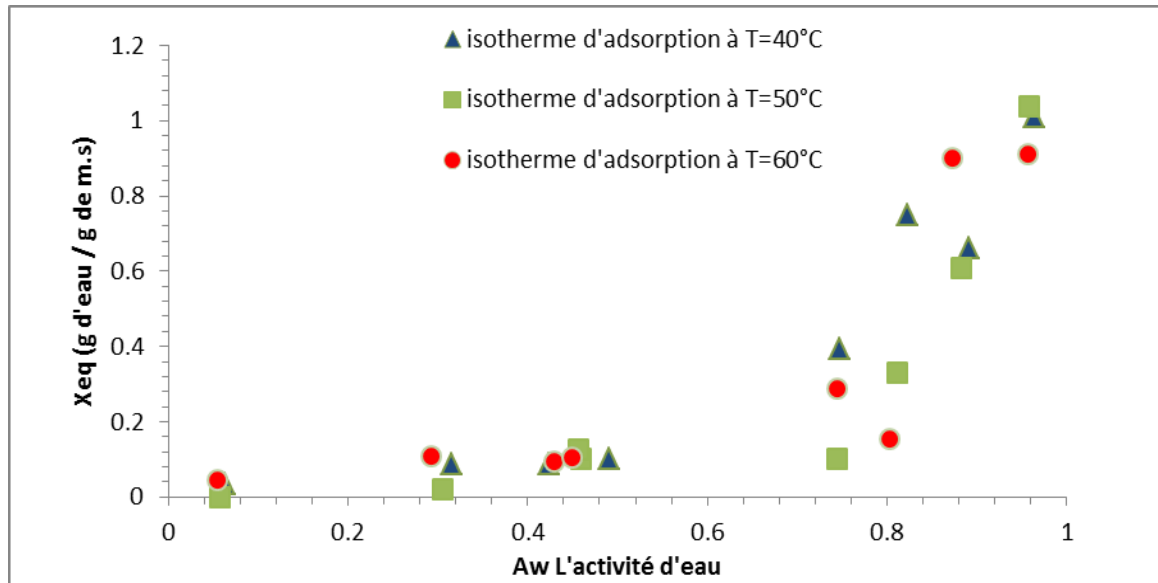


Figure III.5. Influence de la température sur les isothermes de d'adsorption du cœur de palmier.

### III.5.Modélisation des courbes de sorption

Après l’obtention des données expérimentales concernant les isothermes de sorption dans les parties précédentes. Il est indispensable d’obtenir la relation entre l’activité d’eau du produit et la teneur en eau en état d’équilibre pour contrôler et métriser ce phénomène par la voix de la modélisation.

#### III.5.1. Aperçu sur les modèles théoriques

Le problème de modélisation des isothermes de sorption de la vapeur d’eau consiste en général à trouver une fonction vérifiant l’équation suivante :

$$X_{eq} = f(A_w.T) \tag{II.1}$$

Étant donné la complexité des produits biologiques et des phénomènes intervenant lors de la sorption de l’eau. Plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques et semi empirique pour décrire les courbes d’équilibre. Quelques-uns sont cités dans le tableau II.9.

Tableau III.9. Modèles de la sorption. [20]

Auteurs	Equation du modèle
Langmuir	$X_{eq} = \exp[-k. (T + n). X_{eq}^c]$
GAB	$X_{eq} = \frac{A.B.C.a_w}{[1-B.a_w][1-B.a_w+B.C.a_w]}$
Halsey modifié	$X_{eq} = \exp\left[\frac{-\exp(A+BT)}{\ln(a_w)}\right]$
BET modifié	$X_{eq} = \frac{(A+BT) C.a_w}{[1-a_w][1-a_w+C.a_w]}$

Les résultats des essais expérimentaux effectués du cœur de palmier ont été analysés par les quatre équations mathématiques qui correspondent aux quatre modèles les plus connus et utilisé dans les produits agricoles pour décrire les isothermes de sorption tableau (III.9) .

Les paramètres de chaque équation ont été ajustés aux résultats expérimentaux en utilisant La méthode d’optimisation non linéaire Marquardt-Levenberg utilisant les logiciels « Curve Expert 2.6 » et « Origine pro 2016 » est utilisée pour calculer les coefficients des modèles qui décrivent les courbes d’équilibre de sorption du cœur de palmier et leurs paramètres statistiques afin d’avoir le modèle le plus adéquat pour la description des isothermes de sorption en basant sur le coefficient de détermination ( $R^2$ ) l’erreur moyenne relative (EMR) et l’erreur standard (EST) de la teneur en eau d’équilibre car le meilleur modèle aura le plus grande valeur de ( $R^2$ ) . plus petite valeurs de EMR et EST.

Les valeurs d'EMR et EST sont calculées par les relations suivantes :

$$EMR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{eq\ i,exp} - X_{eq\ i,pre})^2}{df}} \quad (III.2)$$

$$EST = \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{eq\ i,exp} - X_{eq\ i,pre}}{X_{eq\ i,exp}} \right| \frac{100}{N} \quad (III.3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{exp}} (X_{eq\ i} - X_{eq\ i,pre})^2}{\sum_{i=1}^{N_{exp}} (X_{eq\ i} - X_{eq\ i})^2} \quad (III.3)$$

Avec:

$X_{eq\ i,exp}$  : la  $i^{ème}$  teneur en eau d’équilibre expérimentale,

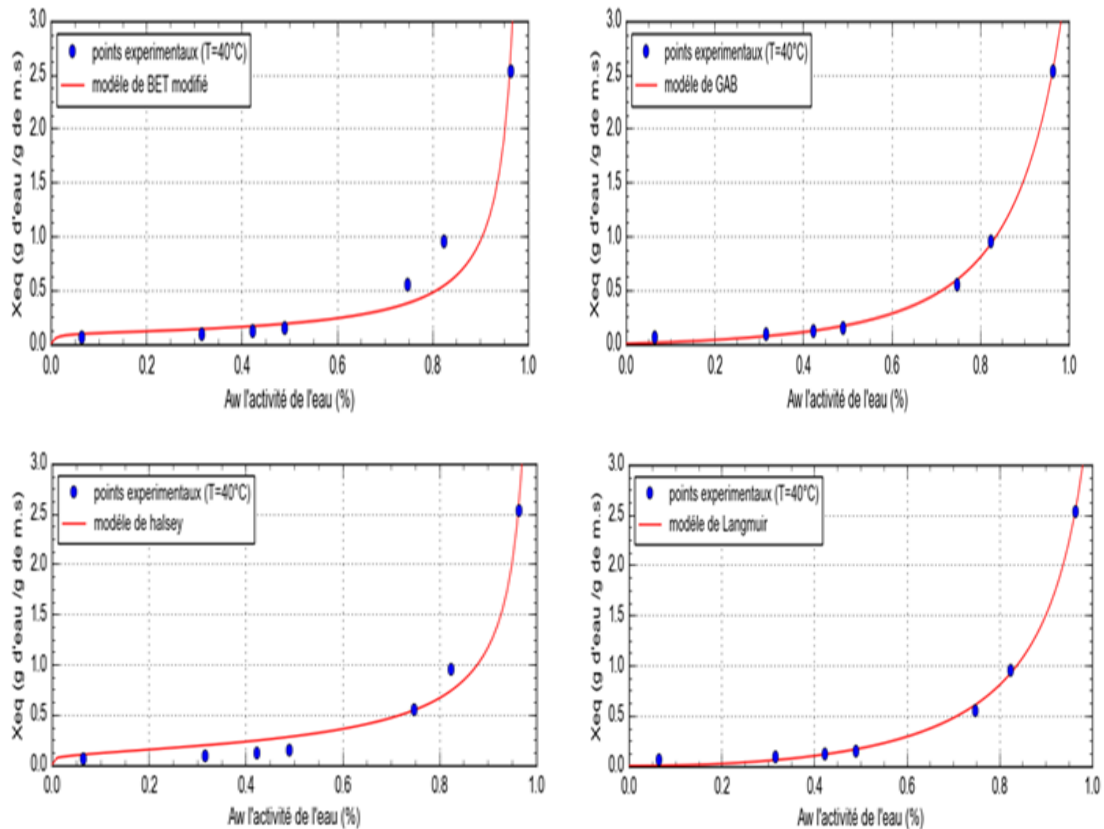
$X_{eq\ i,pre}$  : la  $i^{ème}$  teneur en eau d’équilibre prédite,

N : le nombre de points expérimentaux,

$df$  : le degré de liberté de la régression du modèle.

### III.5.2. Résultats de la modélisation

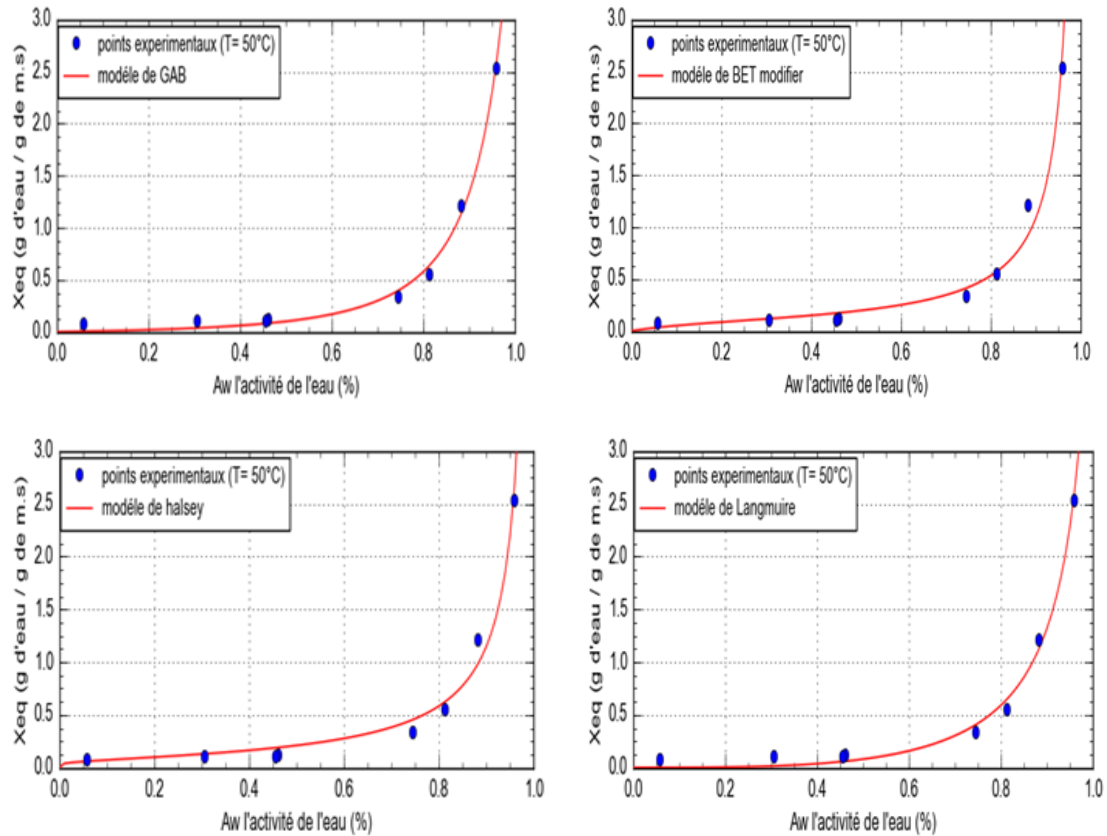
Les isotherme de désorption du cœur de palmier mesurée et calculés pour les quatre modèle pour les trois températures 40°C ,50°C et 60°C sont présenté respectivement dans les figure, ses isotherme sont en accord avec l'analyse des valeurs  $R^2$ , EST et EMR.



**Figure III.6.** Isothermes de désorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuir) à ( $T = 40^\circ\text{C}$ ).

### Remarque

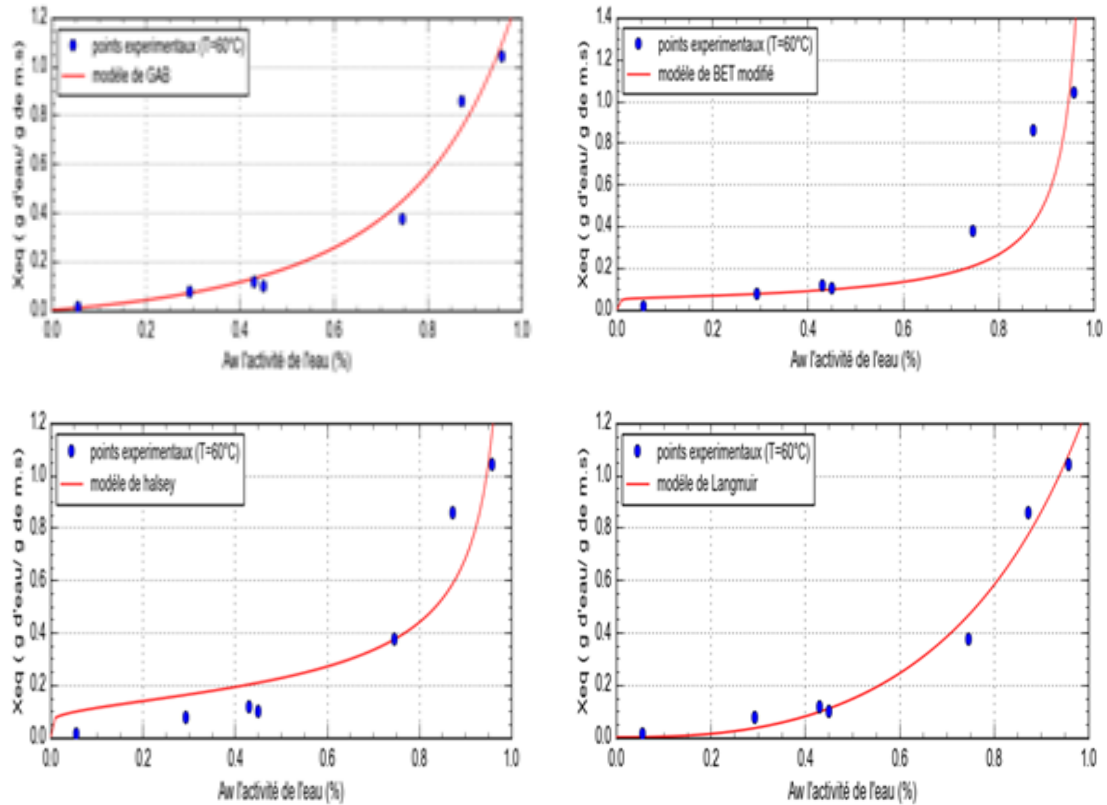
Dans la figure (III.6) approbateurs pour la température de  $40^\circ\text{C}$ , respectivement. On supprime les points expérimentaux (0.891;0.155462), à  $40^\circ\text{C}$  à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.



**Figure III.7.** Isothermes de désorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuir) à ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ).

### Remarque

Dans la figure (III.7) approuvateurs pour la température de  $50^{\circ}\text{C}$ , respectivement. On supprime les points expérimentaux (0.46;0.122677), à  $50^{\circ}\text{C}$  à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.



**Figure III.8.** Isothermes de désorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifié, halsey, Langmuir) à ( $T = 60^\circ\text{C}$ ).

### Remarque

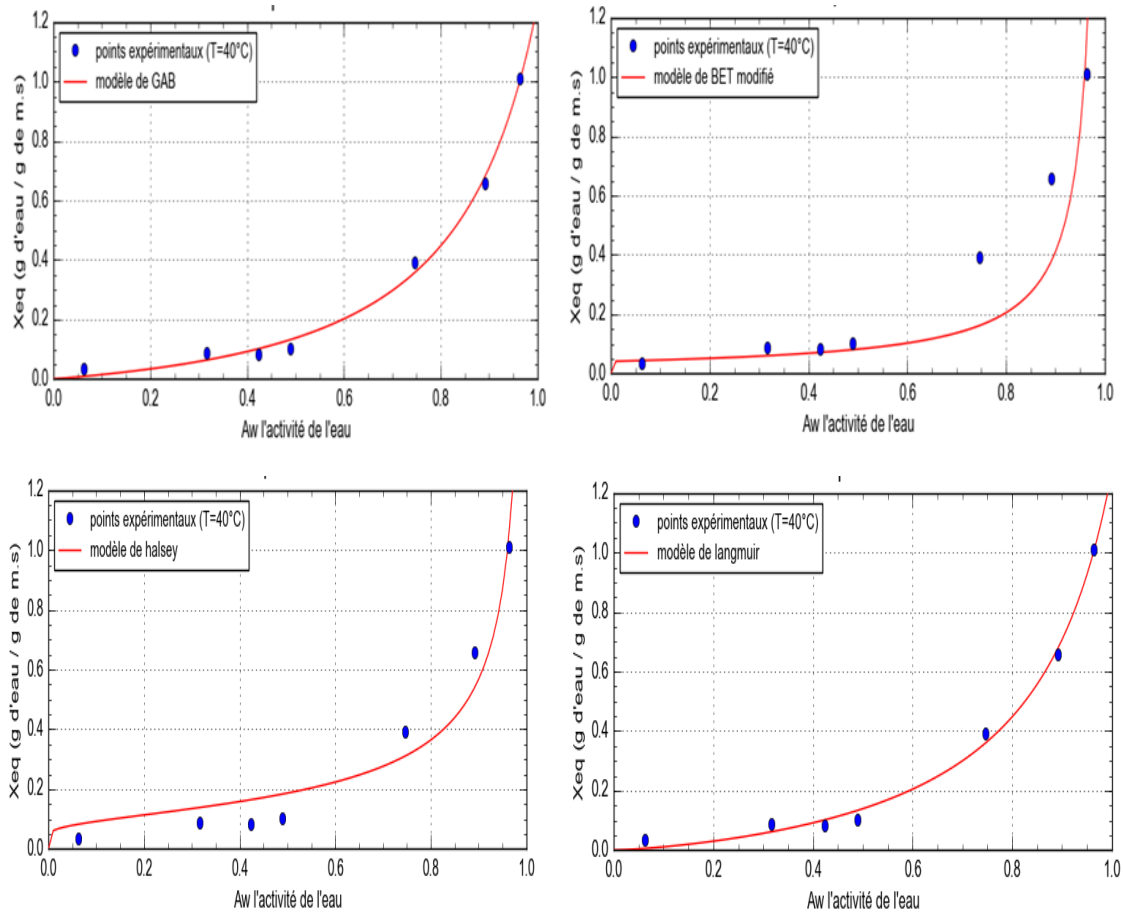
Dans la figure (III.8) approbateurs pour la température de  $60^\circ\text{C}$ , respectivement. On supprime les points expérimentaux (0.803;0.259091), à  $60^\circ\text{C}$  à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.

Le tableau III.10 résume les coefficients de quatre modèles de séchage en couche mince. La précision des différents modèles est analysé en comparant les coefficients de détermination ( $R^2$ ), l'erreur moyenne relative (EMR), l'erreur standard de la teneur en eau du produit (EST).

**Tableau III.10.** Paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre de données de désorption du cœur de palmier à T=40, 50 et 60°C.

Modèles	T(°C)	A	B	C	R <sup>2</sup>	EST	EMR
GAB	40	4.334	0.828	0.033	0.999	0.038	16.121
	50	4.5472	0.892	0.015	0.994	0.082	27.907
	60	9.347	0.666	0.025	0.990	0.071	16.386
BET Modifie	40	-18276.961	-456.922	117.510	0.954	0.235	28.7063
	50	80865.260	1617.307	11.766	0.979	0.158	22.576
	60	-9456.846	157.615	610.499	0.744	0.257	47.598
Halsey	40	5.158	1.334	-	0.981	0.134	47.754
	50	6.206	1.119	-	0.984	0.125	23.382
	60	3.278	1.705	-	0.889	0.151	50.440
Langmuir	40	1.326	1.589	1.157	0.998	0.047	20.338
	50	-0.229	0.467	-5.649	0.993	0.089	38.515
	60	0.383	1.172	1.630	0.982	0.067	26.644

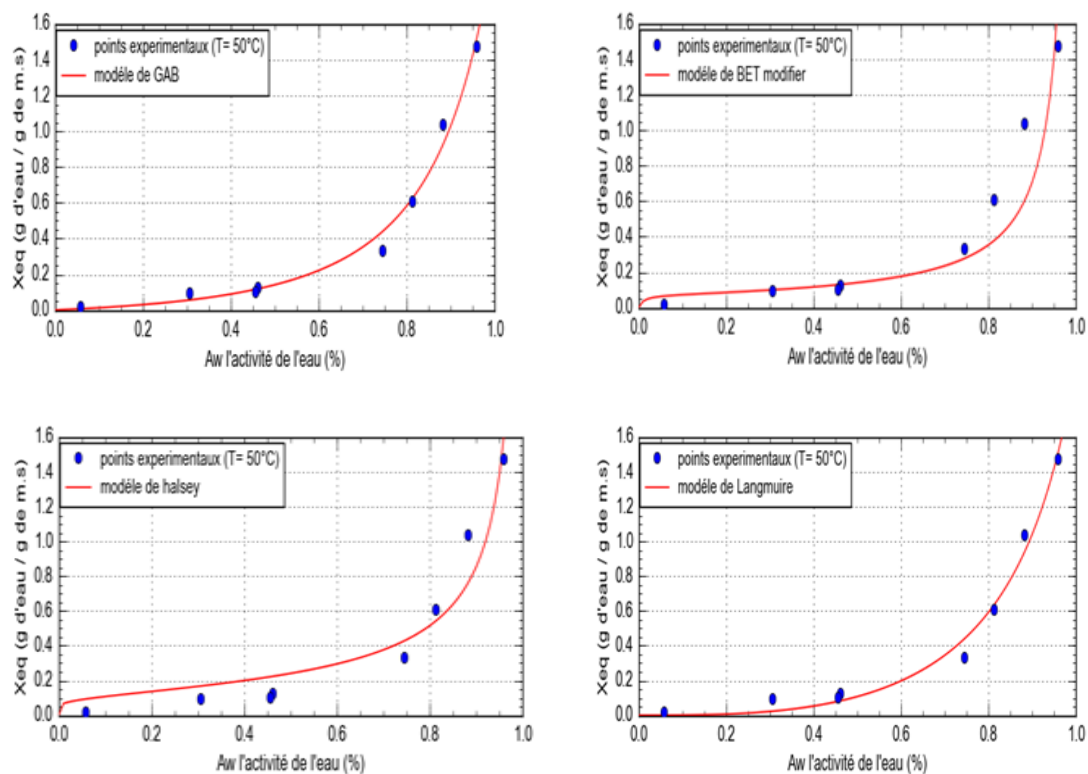
A partir les figure III.6, III.7 et III.8 et le tableau III.10 on constate que le modèle de GAB est le meilleur modèle décrivant l'ensemble des isothermes de désorption du cœur de palmier.



**Figure III.9.** Isothermes de d'adsorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuir) à ( $T = 40^\circ\text{C}$ ).

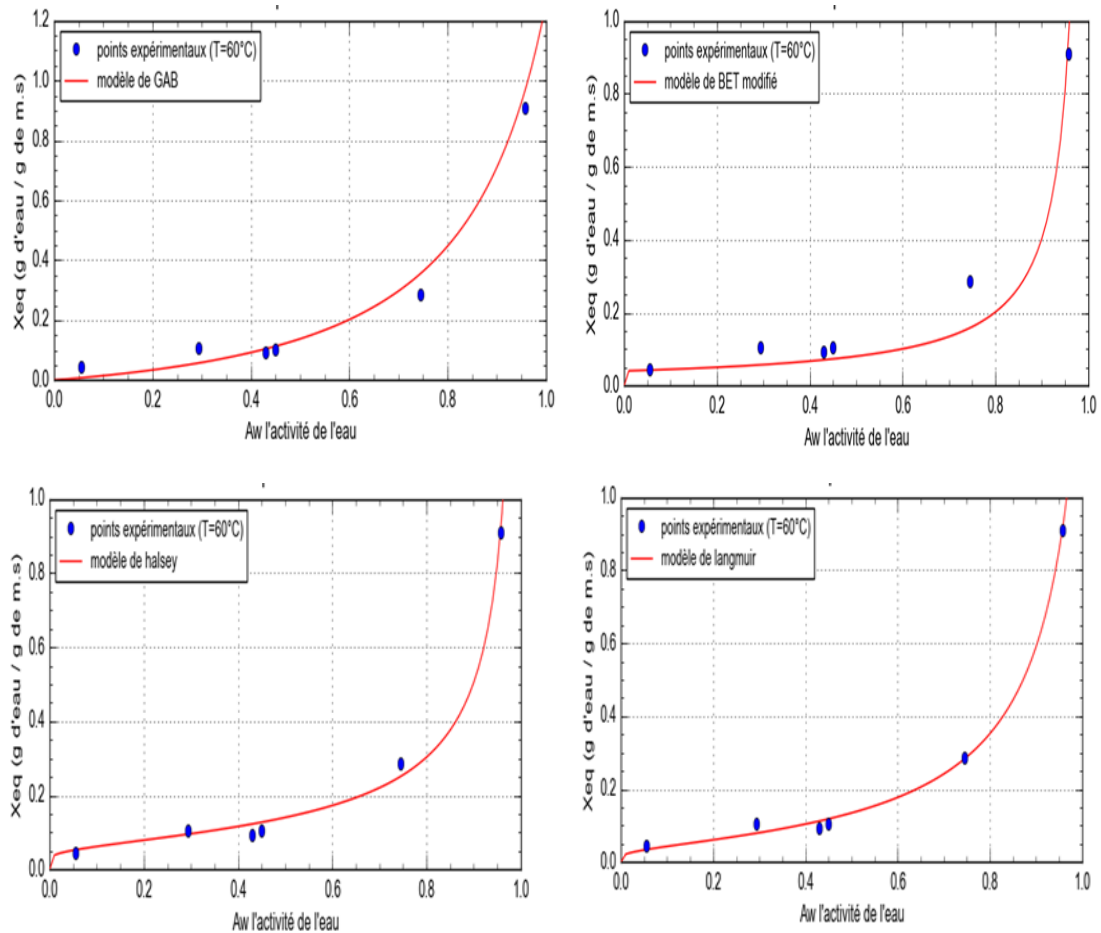
### Remarque

Dans la figure (III.9) approbateurs pour la température de  $40^\circ\text{C}$ , respectivement. On supprime les points expérimentaux (0.823;0.750487), à  $40^\circ\text{C}$  à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.



**Figure III.10.** Isothermes de d'adsorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuire) à ( $T = 50^\circ\text{C}$ ).





**Figure III.11.** Isothermes de d'adsorption du cœur de palmier lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, halsey, Langmuir) à ( $T = 60^\circ\text{C}$ ).

### Remarque

Dans la figure (III.11) approbateurs pour la température de  $60^\circ\text{C}$ , respectivement. On supprime les points expérimentaux  $(0.803; 0.154176)$  et  $(0.8728; 0.900648)$ , à  $60^\circ\text{C}$  à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.

**Tableau III.11.** Paramètres estimés et les critères pour les modelés de teneur en humidité d'équilibre de données d'adsorption du cœur de palmier à T=40, 50 et 60°C.

Modèles	T (°C)	A	B	C	R <sup>2</sup>	EST	EMR
GAB	40	0.280	0.835	0.559	0.996	0.031	20.171
	50	9.319	0.778	0.014	0.986	0.076	32.172
	60	0.080	0.953	11.219	0.997	0.025	12.238
BET Modifie	40	19420.436	485.509-	242962.58	0.819	0.194	26.484
	50	-4529.900	90.599	97.822	0.849	0.144	26.795
	60	8473.4606	-141.223	315694.21	0.961	0.187	15.749
Halsey	40	1.615	1.693	-	0.949	0.091	52.559
	50	4.173	1.486	-	0.933	0.117	28.951
	60	2.310	1.473	-	0.995	0.123	39.366
Langmuir	40	-3.268	4.054	-0.367	0.996	0.031	21.671
	50	-0.743	1.238	-2.023	0.985	0.091	40.804
	60	-1589.637	1590.309	0.993900	0.998	0.114	25.685

A partir les figure III.9, III.10 et III.11 et le tableau III.11 on ne constate que le modèle de GAB est le meilleur modèle décrivant l'ensemble des isothermes de désorption du cœur de palmier.

### III.6. Détermination de la chaleur isostérique de sorption

D'une manière générale, la vaporisation d'une molécule d'eau nécessite une chaleur égale à la somme de la chaleur latente ( $L_{vap}$ ) et de la chaleur isostérique de sorption ( $Q_{st}$ ).

Les chaleurs isostériques sont calculées à partir des isostères de sorption, c'est à dire la courbe donnant  $\ln(A_w)$  en fonction de  $1/T$  à une teneur en eau constante selon l'équation :

$$\ln(A_w) = -\left(\frac{Q_{st}}{R}\right) \frac{1}{T} + K \tag{III.4}$$

Cette chaleur isostérique pour le cas de cœur de palmier (jomare) est calculée à partir des isostères de désorption et d'adsorption les figures III.12 et III.13.

De la pente des isostères et pour chaque teneur en eau  $X$ , on peut déduire la chaleur isostérique correspondante et tracer la courbe  $Q_{st} = f(X_{eq})$ . Les chaleurs isostériques nettes du cœur de palmier sont représentées respectivement dans les figures III.14 et III.15.

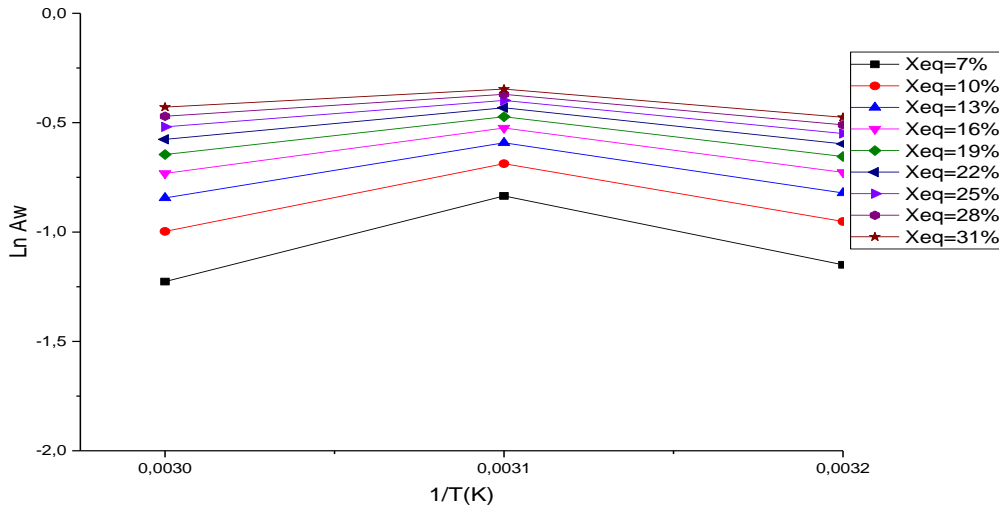


Figure III.12. Isostères de désorption pour le cœur de palmier.

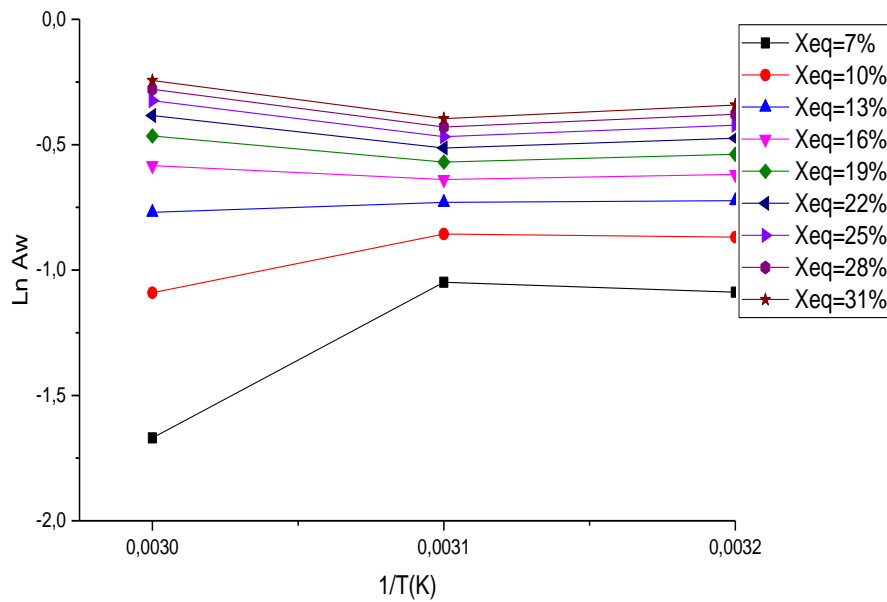


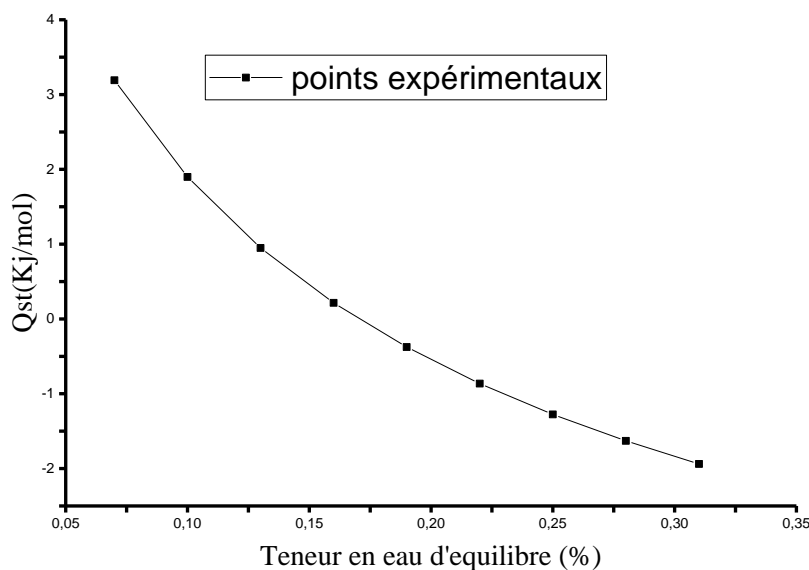
Figure III.13. Isostères de l'adsorption pour le cœur de palmier.

Les chaleurs isostériques net de sorption du cœur de palmier obtenues pour différentes teneurs en eau d'équilibre ont été déterminées en utilisant le modèle GAB en combinaison avec l'eq. (III.4).

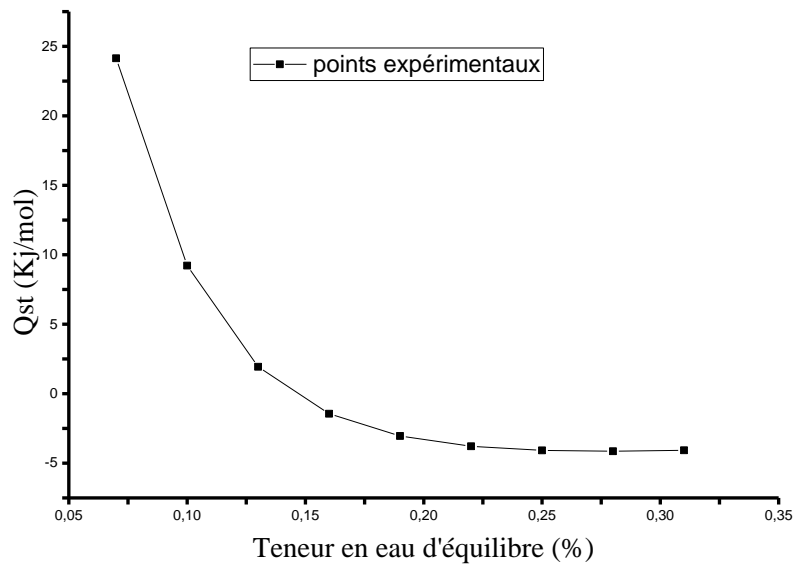
Ces courbes montrent que la chaleur isostérique est plus importante pour les faibles valeurs de la teneur en eau, ce qui illustre la forte liaison de l'eau avec le substrat, et elle devient négligeable devant la chaleur latente pour les humidités élevées.

Selon E. Tsami 1991[42], la diminution rapide de la chaleur isostérique pour les faibles teneurs en eau du produit est due à l'existence des sites polaires de grande activité dans le produit qui sont couverts de molécules d'eau formant la monocouche moléculaire.

Les chaleurs isostériques nettes de désorption et d'adsorption de l'eau du cœur de palmier ont été corrélées avec la teneur en eau d'équilibre du produit par les relations empiriques suivantes :



**Figure III.14.** Chaleur isostérique de désorption du cœur de palmier.



**Figure III.15.** Chaleur isostérique d'adsorption du cœur de palmier.

Les Figures III.14 et 15, illustre la chaleur iso stérique du cœur de palmier, la courbe est sous forme logarithmique, par contre aux résultats obtenus par A. Larbi et all,2019 [43], ils ont trouvé une courbe linéaire, ce qui est peut-être dû aux :

- le cultivar de palmier utilisé dans notre expérience est différent de celui utilisé.
- Les solutions salines saturés utilisés dans l'expérience.
- le modèle mathématique utilisé pour la simulation.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

L'étude qui a été entreprise dans ce travail, concerne la détermination expérimentale et la modélisation théorique des isothermes de sorption de cœur du palmier

Dans la première partie de notre étude nous avons déterminé le teneur en eau initiale de cœur du palmier et isothermes de sorption. Leur connaissance permet de sécher ces plantes dans des conditions qui assurent leur conservation tout en gardant leur produit actif et leur couleur.

Les courbes de sorption de notre échantillon ont été déterminées expérimentalement sur un banc d'isothermes pour trois températures différentes (40, 50 et 60°C). Ce dispositif s'appuie sur la méthode des solutions salines saturées caractérisée par une grande stabilité et une précision des mesures

Les courbes de sorption expérimentales ont été ensuite approchées par quatre modèles car nous utilisons six modèles plus utilisables dans ce domaine. L'équation de modèle GAB a été le meilleur pour la prédiction du phénomène désorption et d'adsorption parmi les quatre modèles couramment utilisés. Les isothermes désorptions et d'adsorption montrent l'apparition de l'effet hystérésis qui est plus visible pour la température 50°C. La chaleur isostérique de désorption et d'adsorption de cette plante ont été calculées en utilisant l'équation Clapeyron.

En perspective, nous souhaitons prolonger nos travaux par :

- Une étude dynamique des isothermes de sorption afin de trouver une teneur en eau d'équilibre du produit très réaliste,
- La détermination des cinétiques de séchage de cœur du palmier, plus précises, dans une soufflerie de laboratoire pour éviter la mesure de la perte en eau du produit à l'extérieur de l'enceinte de séchage,
- L'étude de l'influence des paramètres du séchage sur la qualité du produit à sécher,
- Estimation de la durée de vie de cœur de palmier

# **Références**

# **Bibliographique**



## Référence Bibliographique

---

### Références Bibliographique

- [1]. VISAVALE, G. L. Principles, classification and selection of solar dryers. Solar drying: Fundamentals, Applications and Innovations, Ed. Hii, CL, Ong, SP, Jangam, SV and Mujumdar, AS, Published in Singapore, 2012, 1-50.
- [2]. TABORA, P. C., et al. Hearts of palm (Bactris, Euterpe and others). Williams, JT (Edited). UNDERUTILIZED CROPS: Pulses and Vegetables, Published by Chapman & Hall, London, 1993.
- [3]. SYLVESTER, Olivia; AVALOS, Gerardo. Illegal palm heart (*Geonoma edulis*) harvest in Costa Rican national parks: Patterns of consumption and extraction. *Economic Botany*, 2009, 63.2: 179.
- [4]. AVIARA, Ndubisi A. Moisture Sorption Isotherms and Isotherm Model Performance Evaluation for Food and Agricultural Products. In: *Sorption in 2020s*. IntechOpen, 2020.
- [5]. KALENGI .H . Détermination des isothermes de sorption (adsorption-désorption) [cas de l'aubergine (*solanum melongena* l.).2014.memoire online : /02/16/9434/Determination-des-isothermes-de-sorption-adsorption-desorption-cas-de-l-aubergine-solanum-mel.html.
- [6]. TOUATI, Boumediene. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*). 2008. PhD Thesis. Lyon, INSA.
- [7]. DAGUENET, Michel. Les séchoirs solaires. 1985.
- [8]. PANGAVHANE, Dilip R.; SAWHNEY, R. L.; SARSAVADIA, P. N. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*, 2002, 27.6: 579-590.
- [9]. KOUHILA, M., et al. Etude expérimentale du séchage convectif de la menthe dans un séchoir modulaire polyvalent à chauffage partiellement solaire. *Revue des Énergies Renouvelables*, numéro spécial, Alger, 1998, 1.6.
- [10]. SCHWEITZER, Philip A., et al. Handbook of separation techniques for chemical engineers. New York: McGraw-Hill, 1988.

## Référence Bibliographique

---

- [11]. PRÉVOST, Philippe, et al. Le terroir, un concept pour l'action dans le développement des territoires. [VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement, 2014, 14.1.
- [12]. INOUYE, Sharon K.; CHARPENTIER, Peter A. Precipitating factors for delirium in hospitalized elderly persons: predictive model and interrelationship with baseline vulnerability. *Jama*, 1996, 275.11: 852-857.
- [13]. DEGLA, Adnane; SIOUED, Rima. Séchage solaire des dattes Deglet-Nour: Simulation numérique.
- [14]. BENSEDDIK, ABDELLOUAHAB. Modélisation et simulation du séchage de la figure par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée. 2011.
- [15]. ABELLAH, Mohammed Essalih, et al. Modélisation Des Isothermes De Désorption Du Produit Agroalimentaire. 2018.
- [16]. CHOUICHA, S. Etude expérimentale du séchage solaire Des dattes humides et impact Sur la qualité. 2010.
- [17]. A.KHENBLOUCHE. Etude et réalisation d'un nouveau procédé de séchage couplé à un système de chauffe-eau solaire. Mémoire de Master: Université Kasdi Merbah. Ouargla.2014.
- [18]. BENALIA, Elmechri; MENNOUCHE, D. Exploitation de la source thermique de l'eau Albien dans le séchage solaire des produits agro-alimentaires. PhD Thesis.
- [19]. MCCABE, Warren Lee; SMITH, Julian Cleveland; HARRIOTT, Peter. Unit operations of chemical engineering. New York: McGraw-hill, 1967.
- [20]. JANNOT, Yves. Isothermes de sorption: modèles et détermination. LEPT-ENSAM,(1-5), 2003.
- [21]. DEGLA, Adnane; SIOUED, Rima. Séchage solaire des dattes Deglet-Nour: Simulation numérique.
- [22]. SCHNELL, D. Technique de séchage. Traduit de l'allemand, GMBH, Eschborn, 1983.

## Référence Bibliographique

---

- [23]. SADDAOUI, Massinissa. Etude et réalisation d'un séchoir électrique automatique en vue de son utilisation dans un laboratoire de recherche agro-alimentaire. 2016. PhD Thesis. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [24]. SOLTANI, Ahlem; AZZOUZ, Soufien; REZOUGA, Feriel. Modélisation mathématique des cinétiques de séchage en couches minces des feuilles de laurier noble (*Laurus nobilis*). Recueil des résumés, 90.
- [25]. MARIEM, Sana Ben; MABROUK, Slah Ben. Cinétique de séchage et Courbe caractéristique de séchage d'une couche mince de tomate.
- [26]. BOUGHALI, Slimane. Etude Et Optimisation Du Séchage Solaire Des Produits Agro-Alimentaires Dans Les Zones Arides Et Désertiques. 2010. PhD Thesis. Université de Batna 2.
- [27]. BELACHI, Warda; BOUCHEKIMA, Bachir; BOUGHALI, Slimane. Application du séchage solaire pour la conservation des produits agro-alimentaires. 2009. PhD Thesis...
- [28]. SCOTT, W. J. Water relations of food spoilage microorganisms. In: *Advances in food research*. Academic Press, 1957. p. 83-127
- [29]. LONCIN, Marcel. Les opérations unitaires du génie chimique. 1961.
- [30]. Multon, J L, E Trentesaux, and A Guilbot. 1971. "Methode Rapide de Determination Des Isothermes de Sorption de L'eau Par Les Solides." *Lebensm Wiss Technol Food Sci Technol Sci Technol Aliment*.
- [31]. YOUNG, James Francis. Humidity control in the laboratory using salt solutions—a review. *Journal of Applied Chemistry*, 1967, 17.9: 241-245.
- [32]. BELGHIT, Abdelhamid; KOUHILA, M.; BOUTALEB, B. C. Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41.12: 1303-1321.
- [33] BRUNAUER, Stephen; EMMETT, Paul Hugh; TELLER, Edward. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American chemical society*, 1938, 60.2: 309-319.

## Référence Bibliographique

---

- [34] LABUZA, T. P.; KAAANANE, A.; CHEN, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food science*, 1985, 50.2: 385-392.
- [35] MASKAN, Medeni. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of food engineering*, 2001, 48.2: 177-182.
- [36] IGLESIAS, H. A., et al. ISOSTERIC HEATS OF WATER VAPOR SORPTION ON DEHYDRATED FOODS. I. ANALYSIS OF THE DIFFERENTIAL HEAT CURVES. 1976.
- [37] KAPSALIS, John G. Influences of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherms. 1987.
- [38] HEISS, R.; EICHNER, K. Moisture content and shelflife. *Food Manufacture*, 1971.
- [39] BONAZZI, Catherine; BIMBENET, Jean-Jacques. Séchage des produits alimentaires principes. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire*, 2003, 2.F3000: F3000. 1-F3000. 14
- [40]. BELLAL, Naziha, et al. Détermination Expérimentale et Modélisation des Isothermes de Sorption du Cœur de Palmier à Différentes Températures. 2017. PhD Thesis. Université Ahmed Draia-ADRAR
- [41]. BENNACEUR, Said, et al. Experimental study and modeling of sorption isotherms of Kabar Sid EL Cheikh Capparis spinosa L. from Bechar (south west Algeria). *Energy Procedia*, 2012, 18: 359-367.
- [42]. TSAMI, E. Net isosteric heat of sorption in dried fruits. *Journal of Food Engineering*, 1991, 14.4: 327-335.
- [43]. LARBI, Ahmed Amine, et al. Experimental Measurement of Moisture Sorption Isotherms and Isosteric Heat of Palm Hearts (Jomare) Harvested in the Algerian Sahara. *Journal homepage: <http://iieta.org/journals/i2m>*, 2019, 18.3: 297-304.