

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique

Option: Systèmes Energétique Et Développement Durable

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de:

MASTER

Thème

**Détermination expérimentale des isothermes
de sorption de la menthe verte**

Présenté par:

TORKI Messaoud

Soutenu le: 31/05/2017

Devant le jury composé de:

Dr. LAKROUNE Abdelghani

Dr. CHOUCANE Nacer

Dr. CHABANE Foued

Président

Encadreur

Examineur

Promotion : Juin 2017

Dédicace

Avant tout je dédie ce travail avec tous mes sincères sentiments et respectueux hommages à mes chers parents qui m'ont aidé et souffert beaucoup pour moi durant toute ma vie

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

Comme je le dédie à mes frères et mes sœurs.

Enfin je le dédie à tous mes enseignants et tous les étudiants de la promo 2017 de la filière Mécanique.

Torki

Messaoud

Remerciement

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terminer ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à mes parents qui n'ont jamais épargné aucun effort pour m'aider dans cette vie, ainsi à ma petite famille, mes frères, mes sœurs, et tous ceux qui ont participé de proche ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.

Mes remerciements s'adressent en mon encadreur, Monsieur CHOUCHANE NACER, pour les conseils qu'il m'a donné tout au long de cette étude et l'attention qu'il a apporté au travail réalisé.

A grand merci va également à L'UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA pour la bonne réception.

Mes remerciements aussi, Mr. DJAMEL MENNOUCHE et Mr. RIDHA KHAMA professeurs de la Faculté de génie de procédés pour me donner des conseils et des informations pour réalisation mon travail.

Mes remerciements s'adressent également à tous mes collègues et les enseignants de la promo Mécanique.

Torki

Messaoud

SOMMAIRE

Sommaire	I
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	ix
Nomenclature	x
Introduction générale	01

CHAPITER-01- Etude bibliographique

Généralités sur les séchages et les isothermes de sorption

I. Généralités sur les séchages et les isothermes de sorption	03
I.1.Introduction	03
I.2. Séchage	03
I.2.1. Définition	03
I.2.2.Modes de séchage	03
I.2.2.1.Séchage par conduction	04
I.2.2.2.Séchage par convection	04
I.2.2.3.Séchage par rayonnement	05
I.2.2.4.Transferts de matière	06
I.2.2.5.Transferts d'eau en séchage	06
I.2.3.Description physique du séchage	07
I.2.4. Caractéristiques de l'air de séchage	10
I.2.4.1. Humidité absolue	10
I.2.4.2. Humidité relative	10
I.2.4.3. Degré de saturation	10
I.2.4.5. Températures caractéristiques de l'air humide	10
I.2.4.5.1. Température sèche « Température de bulbe sec» T_s	11
I.2.4.5.2. Température humide « Température de bulbe humide» T_h	

I.2.4.5.3. Température de rosée T_r	11
I.2.4.5.4. Température de saturation adiabatique T_{sa}	11
I.2.5. Caractéristiques des solides humides.....	11
I.2.5.1. Porosité volumique d'un produit	11
I.2.5.2. Description du solide humide	11
I.2.5.3. Humidité absolue (teneur en eau à base sèche.....)	12
I.2.5.4. Humidité relative (teneur en eau à base humide	13
I.2.5.5. Hygroscopicité.....	13
I.3. Activité de l'eau dans un produit	14
I.3.1. Teneur en eau	14
I.3.2. Isothermes de sorption	15
I.3.2.1. Définition	16
I.3.2.2. Hystérésis	16
I.3.2.3. Forme générale des isothermes	16
I.3.3. Les méthodes d'obtention des Isothermes de sorption.....	17
I.3.3.1. Les méthodes manométriques	18
I.3.3.2. Les méthodes hygrométriques	18
I.3.3.3. Les méthodes gravimétriques	19
I.3.4. Modélisation des isothermes de sorption.....	19
I.3.5. Intérêt des Isothermes	20
I.4. Conclusion.....	21
	21

CHAPITER-02-Etude bibliographique

Travaux antérieurs concernant les isothermes de sorption

II. Travaux antérieurs concernant les isothermes de sorption.....	22
II.1. Introduction.....	22
II.2. Quelques travaux pour trouver les isothermes de sorption.....	22
II.3. Conclusion.....	42

CHAPITER-03-Etude expérimentale

III.1.Introduction	43
III.2.Protocole expérimentale	43
III.2.1 Préparations Les solutions.....	43
III.2.1.1.Les solutions sels saturé utilisé.....	43
III.2.1.2.Pesée des sels	43
III.2.2.Préparation des échantillons de la Menthe verte	45
III.2.3.Matériel et mode opératoire	45
III.3. Préparation du dispositif expérimental	47
III.4.Résultats expérimentaux	48
III.4.1.Présentation graphique des résultats expérimentaux.....	49
III.4.2.Evolution de Xeq en fonction de HR pour les quatre températures	51
III.5. Estimation des résultats expérimentaux par le modèle d'Henderson	52
III.5.1.Le lissage polynômial	52
III.5.2.Modélisation des résultats expérimentaux.....	54
III.5.3.Evolution avec la température (modèle d'Henderson)	59
III.6.Conclusion	61
Conclusion générale.....	62
Référence Bibliographie	64

Liste des figures

CHAPITER-01-Etude bibliographique

Généralités sur les séchages et les isothermes de sorption

Figure-I-1: Représentation schématique d'un solide	07
Figure-I-2: Courbe de séchage $X= f(t)$	08
Figure-I-3: Courbe de séchage $dx/dt = f(t)$	08
Figure-I-4: Courbe de séchage $dx/dt = f(x)$	08
Figure-I-5 : Volume de contrôle microscopique	12
Figure-I-6 : Volume de contrôle macroscopique	12
Figure-I-7 : Description du solide humide	13
Figure-I-8 : Représentation graphique de l'activité de l'eau	14
Figure-I-9 : Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau	15
Figure-I-10 : Isothermes de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis.....	17
Figure-I-11 : Forme générale des isothermes	18

CHAPITRE-02-Etude bibliographique

Travaux antérieurs concernant les isothermes de sorption

Figure-II-1 : Séchoir coquillage hybride utilisé.....	22
Figure-II-2: Figue à consistance pâteuse	22
Figure-II-3 : Isotherme de désorption des figues à 60°C	23
Figure-II-4: Schéma du dispositif expérimental de détermination des isothermes de désorption	24
Figure-II-5 : Isothermes de désorption de la pulpe des fruits de l'ailé à différentes températures : comparaison des données expérimentales et calculées	

avec le modèle de G.A.B	24
Figure-II-6 : Isothermes des abricots de maturité optimale (● points expérimentaux, ----- modèle GAB) et des abricots de maturité moyenne (□ points expérimentaux, — — modèle GAB) à 25°C.....	25
Figure-II- 7: Isotherme de sorption du raisin à 25°C (* points expérimentaux, --- -- modèle GAB	25
Figure-II-8 : Isothermes des abricots de maturité moyenne (□ points expérimentaux, — — modèle GAB) et du raisin (* points expérimentaux, ----- modèle GAB) à 25°C	26
Figure-II-9 : Courbe de sorption calculée à partir du modèle d’Henderson pour différentes Températures	26
Figure-II-10: Isothermes de sorption de la verveine calculées à l’aide des modèles de B.E.T et d’Henderson pour $0 \leq HR \leq 100$ %	26
Figure-II-11: Schéma d’une unité du dispositif expérimental	27
Figure-II-12: Isothermes de sorption de la menthe : Points expérimentaux	27
Figure-II-13: Isothermes de sorption de la menthe calculées par le modèle d’Henderson	28
Figure-II-14: Aspect des rondelles de pommes chargées de solutés et séchées.....	28
Figure-II-15: Isothermes de sorption à 25°C et à 45°C des pommes déshydratées partiellement par osmose	29
Figure-II-16: Granulés de la farine de mil.....	29
Figure-II-17: dispositif expérimental de la détermination des isothermes de désorption par la méthode gravimétrique statique	30
Figure-II-18: Courbe expérimentale et simulée par le modèle modifié de GAB à 60°C	30
Figure-II-19: Isotherme de désorption des granulés de la farine de mil pour différentes températures	30
Figure-II-20: Isothermes de désorption de l’ail.....	31
Figure-II-21: Isothermes de désorption de la vapeur d’eau sur l’ail (Expérimentale et assimilée par le modèle de GAB.....	31
Figure-II-22: Dispositif expérimental pour la mesure des isothermes de sorption .	32

Figure-II-23: Isothermes de désorption et d'adsorption dans le système marjolaine/eau.....	32
Figure-II-24: Isothermes de désorption des feuilles de la marjolaine décrites par quatre modèles.....	33
Figure-II-25: Isothermes expérimentales de sorption du riz à $T = 293\text{ K}$	34
Figure-II-26: Isotherme de désorption de la viande de bœuf à différentes températures décrite par le modèle GAB	34
Figure-II-27: isotherme de désorption $T = 50\text{ °C}$	35
Figure-II-28: isotherme de désorption $T = 60\text{ °C}$	35
Figure-II-29: Isotherme de désorption $T = 70\text{ °C}$	35
Figure-II-30: isotherme de désorption $T = 80\text{ °C}$	35
Figure-II-31: Courbes des isothermes de désorption expérimentales et prédites par le modèle de Peleg pour la citrouille	36
Figure-II-32: Isothermes de désorption de la citrouille décrite par le modèle de GAB.....	36
Figure-II-33: Etat de grain conserve à 12 °C	37
Figure-II-34: Etat de grain conserve à 23 °C	37
Figure-II-35: Isothermes de désorption de blé.	37
Figure-II-36: Modélisation des isothermes de désorption par le modèle de GAB.	38
Figure-II-37: Isothermes de sorption de l'absinthe.	38
Figure-II-38: Isotherme de sorption de la menthe pouliot.	39
Figure-II-39: Comparaison entre les courbes expérimentales de sorption et prédites par le modèle de GAB pour les deux plantes.	39
Figure-II-40: Dispositif expérimental de mesure des isothermes de sorption	40
Figure-II-41: Les courbes des isothermes de sorption de la poudre de lait ajustée par des modèles empiriques	40
Figure-II-42: kabar (Capparis Spinosa. L dans les montagnes de Kenadza (Béchar)	41
Figure-II-43: Etuvage de type Binder 240 ED.....	41
Figure-II-44: Isotherme de désorption des feuilles de Kabar (Capparis spinosa L.) décrite par l'équation de GAB.....	41

Figure-II-45: Isotherme de désorption des feuilles de Kabar(<i>Capparis spinosa</i> L.) décrite par l'équation de Peleg	42
---	-----------

CHAPITRE-03-Etude bibliographique expérimentale

Figure-III-1: Les six sels utilisés.....	43
Figure-III-2: Pesée des sels	44
Figure-III-3: Agitation des solutions salines	44
Figure-III-4: Les six solutions salines préparées.....	44
Figure-III-5: ((a), (b), (c)) Préparations des échantillons de la Menthe verte	45
Figure-III-6: Unité du dispositif expérimental pour la détermination des isothermes de sorption	47
Figure-III-7: Appareillage pour la détermination des isothermes de sorption	48
Figure-III-8: Isotherme de sorption de la menthe pour $T = 20^{\circ}\text{C}$	49
Figure-III-9: Isotherme de sorption de la menthe pour $T = 35^{\circ}\text{C}$	50
Figure-III-10: Isotherme de sorption de la menthe pour $T = 45^{\circ}\text{C}$	50
Figure-III-11: Isotherme de sorption de la menthe pour $T = 55^{\circ}\text{C}$	51
Figure-III-12: Isothermes de sorption de la menthe (Points expérimentaux).....	52
Figure-III-13: Isotherme de sorption de la menthe calculée à partir du modèle d'Henderson à $T = 20^{\circ}\text{C}$	57
Figure-III-14: Isotherme de sorption de la menthe calculée à partir du modèle d'Henderson à $T = 35^{\circ}\text{C}$	57
Figure-III-15: Isotherme de sorption de la menthe calculée à partir du modèle d'Henderson à $T = 45^{\circ}\text{C}$	58
Figure-III-16: Isotherme de sorption de la menthe calculée à partir du modèle d'Henderson à $T = 55^{\circ}\text{C}$	58
Figure-III-17: Isothermes de sorption de la menthe calculée à partir du modèle d'Henderson pour différentes températures	59
Figure-III-18: Comparaison entre les courbes expérimentales de sorption par le modèle de Henderson $T=20^{\circ}\text{C}$	59

Figure-III-19: Comparaison entre les courbes expérimentales de sorption par le modèle de Henderson $T=35^{\circ}\text{C}$	60
Figure-III-20: Comparaison entre les courbes expérimentales de sorption par le modèle de Henderson $T=45^{\circ}\text{C}$	60
Figure-III-21: Comparaison entre les courbes expérimentales de sorption par le modèle de Henderson $T=55^{\circ}\text{C}$	61

Liste des tableaux

CHAPITER-03-Etude bibliographique

Généralités sur les séchages les isothermes de sorption

**Tableau-I-1-Modèles de description des isothermes de sorption
sélectionnés 20**

CHAPITER-03-Etude expérimentale

**Tableau-III-1-Les teneurs en eau à l'équilibre et X_{eq} obtenue pour six
sels pour les quatre températures de travail 48**

**Tableau-III-2-Les résultats expérimentaux utilisé pour trouver les
coefficients n et k..... 55**

**Tableau-III-3-Les valeurs des constants k et n pour les températures
20°C, 35 °C ,45 ° C et 55° C 55**

**Tableau-III-4-Les teneurs en eau à l'équilibre (X_{eq}) obtenues pour six
sels et les humidités relatives HR pour les quatre températures obtenues
par le modèle d'Henderson 56**

Nomenclateurs

<i>Symboles</i>	<i>Désignations</i>	<i>Unités</i>
H_a	<i>Humidité absolue de l'air</i>	<i>Kg eau/ kg (as)</i>
H_{as}	<i>Humidité absolue de saturation</i>	<i>%</i>
m_v	<i>Masse de vapeur d'eau</i>	<i>Kg</i>
m_{as}	<i>Masse de l'air sec</i>	<i>Kg</i>
H_r, HR	<i>Humidité relative de l'air</i>	<i>%</i>
P_t	<i>Pression total régnant dans l'installation</i>	<i>Pa</i>
P_v	<i>Pression partielle de la vapeur d'eau</i>	<i>Pa</i>
P_s	<i>Pression de saturation</i>	<i>Pa</i>
Ψ	<i>Degré de saturation</i>	<i>%</i>
T	<i>Température</i>	<i>°C</i>
T_a	<i>Température de l'air de séchage</i>	<i>°C</i>
T_s	<i>Température superficielle du produit à sécher</i>	<i>°C</i>
T_h	<i>Température humide</i>	<i>°C</i>
T_r	<i>Température de rosée</i>	<i>°C</i>
T_{sa}	<i>Température de saturation adiabatique</i>	<i>°C</i>
ε	<i>Porosité volumique</i>	<i>sans</i>
M_h	<i>Masse humide du produit</i>	<i>Kg</i>
M_s	<i>Masse de produit sec</i>	<i>Kg</i>
A_w	<i>Activité de l'eau dans un produit</i>	<i>%</i>
R	<i>Vitesse de séchage</i>	<i>Kg eau/ (kg ms.s)</i>
λ	<i>Conductivité thermique de la pellicule de produit</i>	<i>W /m. K</i>
DT/dt	<i>Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.</i>	<i>k/s</i>

Q	<i>La quantité de chaleur transférée par unité de surface</i>	W
α	<i>Le coefficient d'échange par convection</i>	$W/m^2.k$
A_1	<i>Surface du corps recevant le rayonnement</i>	m^2
A_2	<i>Surface de l'émetteur infrarouge</i>	m^2
φ	<i>Facteur de complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit.</i>	<i>Sans</i>
ε_1	<i>Emissivité du produit du corps recevant le rayonnement</i>	<i>Sans</i>
ε_2	<i>Emissivité de l'émetteur</i>	<i>Sans</i>
M	<i>Masse du produit à sécher</i>	Kg
A	<i>Surface à travers laquelle, s'opère le transfert d'humidité</i>	m^2
K_G	<i>Coefficient global de transfert de matière</i>	<i>Sans</i>
X	<i>Humidité absolue (teneur en eau à base sèche)</i>	$Kg\ eau / kg(m.s)$
X_r	<i>Humidité relative (teneur en eau à base humide)</i>	$Kg\ eau / kg(m.h)$
X_{eq}	<i>Teneur en eau d'équilibre</i>	$\%$
X_m	<i>La teneur en eau de la couche mono moléculaire</i>	$\%$

(A, B, C, K, K1 et K2 : sont des constantes qui dépendent généralement de la température de l'air, n= nombre des couches)

Introduction générale

L'utilisation des plantes aromatiques et médicinales a connu ces dernières années une évolution significative. Elles sont exploitées dans les domaines aromatiques et alimentaires, cosmétiques, pharmaceutiques et médicaux et aussi comme un composant pour la production de pesticides. En Algérie, il y a plus que 3120 espèces de plantes. La superficie totale cultivée est estimée, en 2011, à 6350 hectares répartis en plantes médicinales (1686 ha) et en plantes aromatiques (4356 ha)

Pour que la plante soit exploitée dans certains domaines, elle doit être conservée sèche. Généralement, le séchage de la menthe se fait d'une manière traditionnelle à l'air libre, mais à condition qu'il soit à l'ombre, car cette plante perd ses qualités en exposant directement en rayons solaires. [1].

La menthe verte est une plante riche en substance très recherchée appelées « principes actifs » : huiles essentielles, alcaloïdes, tanins, etc.... Cette richesse et cette diversification dans la composition moléculaire de la menthe en font d'elle une plante aromatique et médicinale par excellence. De par ses propriétés toniques, stimulantes digestives et analgésiques, cette plante est très utilisée dans la fabrication pharmaceutique. Sa flaveur a permis à cette plante d'entrer dans les domaines de la parfumerie, confiserie et liquoristerie. [2]

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. [3]

Les isothermes de sorption possèdent une grande importance dans l'industrie agroalimentaire et notamment dans le séchage solaire, le stockage et la conservation des aliments. Leur connaissance nous informe sur l'équilibre hygroscopique ou hydrique du produit considéré. En effet, nous ne pouvons connaître le domaine de stabilité du produit après séchage qu'à partir de ces courbes qui nous renseignent ainsi sur les types d'eaux présentes dans le produit. Cet équilibre est caractérisé à partir de ces courbes dont la détermination expérimentale exige un grand nombre de mesures. Elles sont également utiles lors d'un processus de séchage solaire convectif. En effet, c'est à partir des courbes de sorption qu'on détermine la teneur en eau finale d'un produit à sécher. [2]

L'objectif visé par cette étude est la détermination expérimentale des courbes de désorption de la menthe verte, et ce pour quatre valeurs de la température 20°C, 35°C, 45°C, et 55°C. On détermine ces équilibres par la méthode gravimétrique statique ; méthode des solutions sel saturées.

Pour estimer les résultats expérimentaux ont utilisé le modèle d'Henderson.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

Le premier est consacré à une étude bibliographique donnant les principales définitions et notions de base concernant le séchage (définition, les modes et les paramètres de séchage), l'activité de l'eau et les isothermes de sorption des produits humides indispensables pour notre étude, les méthodes et les modèles utilisés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les travaux effectués par les de recherches scientifiques concernant les isothermes de sorption.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats issus de l'expérience qui a duré d'un moi. Ces derniers sont présentés sous forme de tableaux, d'une part, et dans des graphes d'autre part. En effet, les isothermes de désorption de menthe verte sont tracées pour les quatre températures. Un lissage polynômial des points expérimentaux trouvés nous a permis de décrire les isothermes de désorption de la menthe verte pour les quatre températures et par suite l'obtention de quatre équations caractéristiques de la menthe verte (Équations expérimentales).et estime par le modèle d'Henderson et compare les résultats avec le modèle.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats et les perspectives de ce travail.

I-Généralités sur les séchages et les isothermes de sorption

I.1.Introduction

De nombreux produits agricoles, consommés en grandes quantités ne sont pas toujours disponibles au cours des saisons. Plusieurs solutions sont proposées pour pallier à cet, 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.[2]

Le premier chapitre est consacré à l'étude des principales définitions et notions de base concernant le séchage (définition, les modes et les paramètres de séchage), l'activité de l'eau et les isothermes de sorption des produits humides indispensables pour notre étude, les méthodes et les modèles utilisés.

I.2. Séchage

I.2.1. Définition

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide [4].

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année). L'élimination ou la séparation de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique. [5]

I.2.2.Modes de séchage

Parmi les techniques d'élimination d'eau par voie thermique, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire par évaporation l'eau d'un produit; des procédés par ébullition et des procédés par entraînement

✓ **Par ébullition**, le produit est porté à la température telle que la pression de vapeur d'eau du produit devient égale à la pression totale ambiante régnant dans le séchoir. La

température du liquide est donc déterminée par la pression d'ébullition (par exemple 100°C pour l'eau à $1,013 \times 10^5$ Pa)

✓ **Par entraînement**, l'énergie est apportée par un gaz vecteur en mouvement, généralement de l'air chaud. Ce gaz est conditionné de manière à ce que sa température soit supérieure à celle du produit, et la pression de vapeur d'eau P dans le produit est supérieure à la pression partielle d'eau P_v dans l'atmosphère qui l'entoure, Il y'a séchage par entraînement, si P_t est la pression totale régnant dans l'installation, vérifié l'inégalité : $P_v < P < P_t$. Il s'agit en fait d'un transfert de masse par gradient de pression de vapeur d'eau.

Ces deux mécanismes peuvent se succéder au cours d'une opération de séchage ou coexister dans un produit à un moment donné. [4], [5]

Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement, ainsi que le transfert de matière. Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux. [6]

I.2.2.1. Séchage par conduction

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée.

Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation:

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{DT}{dt} \quad (I-1)$$

Avec:

λ : Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/m. K)

$\frac{DT}{dt}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit [4]

I.2.2.2. Séchage par convection

En séchage industriel, il s'agit probablement du mode de séchage le plus courant. Il consiste à mettre en contact, un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent, autour du corps à sécher, qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de fibres ou de plaques, pour un séchage par convection, les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage sont déterminés par les coefficients de transfert à la surface, qui dépendent des caractéristiques de l'air (vitesse, température, humidité).

En régime convectif, la chaleur est directement transportée par un fluide caloporteur, qui emmagasine la chaleur (air chaud, vapeur, eau, etc.). La convection est un mode de transfert rapide.

- Si le mouvement de fluide est renforcé par un travail mécanique « artificiel » (ventilation, agitation, pompage d'un fluide), on parle de « convection forcée ».
- Si au contraire, le mouvement du fluide, n'est dû qu'à des courants thermiques ou des mouvements ascensionnels d'ébullition, la convection est dite « naturelle » [7].

D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température, entre le fluide et le produit, est augmentée. Toutefois la thermo-sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter), limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage.

Ce type de transfert utilise l'équation suivante:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_a - T_s) \quad (I-2)$$

Avec :

Q : La quantité de chaleur transférée par unité du temps (W)

A : La surface d'échange (m²)

$(T_a - T_s)$: L'écart entre la température de l'air de séchage et la température superficielle du produit à sécher (K)

α : Le coefficient d'échange par convection (W/m². K) [4]

I.2.2.3. Séchage par rayonnement

Ce mode est destiné aux produits en plaque (carton, viande), ou en fibre (tissu, papier), mais aussi aux produits granulaires de faibles épaisseurs (cigarettes). L'énergie est apportée aux produits à sécher par des ondes électromagnétiques (rayonnement), soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. La quantité de chaleur transmise au produit par unité du temps par ce mode de transfert est donnée par :

$$Q = A_1 \cdot C \cdot \varepsilon \cdot \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \cdot \varphi \quad (I-3)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (I-4)$$

A_1 : Surface du corps recevant le rayonnement (m²)

A_2 : Surface de l'émetteur infrarouge (m²)

ϕ : Facteur de complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit.

ϵ_1 : Emissivité du produit

ϵ_2 : Emissivité de l'émetteur [4]

I.2.2.4. Transferts de matière

Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base, telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment.

Les difficultés d'application des théories de transfert de masse, dans les processus de transformation des aliments, résultent des structures physiques complexes et de la composition chimique des denrées alimentaires qui varient pour même denrée et change pendant la transformation. [8]

Il est à noter que la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également s'effectuer par « Filtration » à travers le produit poreux sous l'action d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface. [5]

I.2.2.5. Transferts d'eau en séchage

Les corps à sécher sont constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière. Figure (I.1). [4]

Le séchage peut être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur, dans un matériau poreux non saturé.

Dans les produits biologiques le transfert interne d'eau est souvent le phénomène limitant. La taille des pores et la distribution des rayons des pores dans le produit, influent sur le caractère hygroscopique du produit (plus les pores sont petits, plus le caractère hygroscopique est important). [5]

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher, qui provoque la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes

(température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau [4].

Les difficultés sont plus complexes dans les aliments solides que dans les liquides. Le transfert de masse implique un transfert d'une variété de composants avec la phase et en interphase par diffusion moléculaire naturelle ou par convection forcée. La masse est transférée par gradient de concentration ou de pression partielle [8].

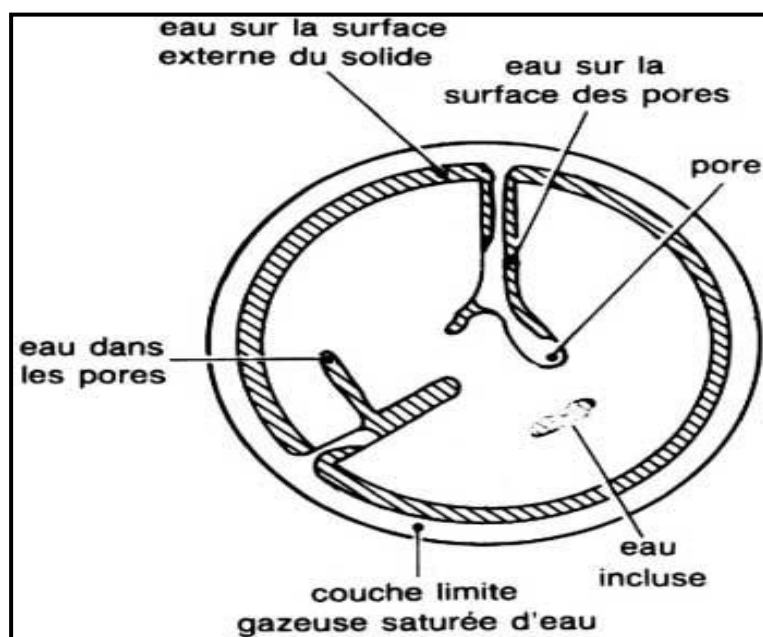


Figure-I-1: Représentation schématique d'un solide. [8]

I.2.3. Description physique du séchage

Les caractéristiques du séchage d'un produit ont une meilleure description lorsqu'elles sont représentées par des courbes. L'une des plus intéressantes et indispensable représentation est le taux d'humidité du produit n_s en fonction du temps t donnée sur la figure (I.2), ou encore la vitesse du séchage dx/dt en fonction du temps t donnée sur la figure (I.3). Ces courbes de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent).

Krisher a proposé un autre mode de représentation; c'est la vitesse de séchage dx/dt en fonction du taux d'humidité n_s représentée sur la figure (I.4).

Ces trois types de représentation, mettent en évidence l'existence de plusieurs phases, pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables. Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue :

- la phase transitoire de mise en température du produit à sécher (AB) ;
- la phase à vitesse de séchage constante (BC) ;

- la phase à vitesse de séchage décroissante (CD).

C: est le point critique du séchage. [4]

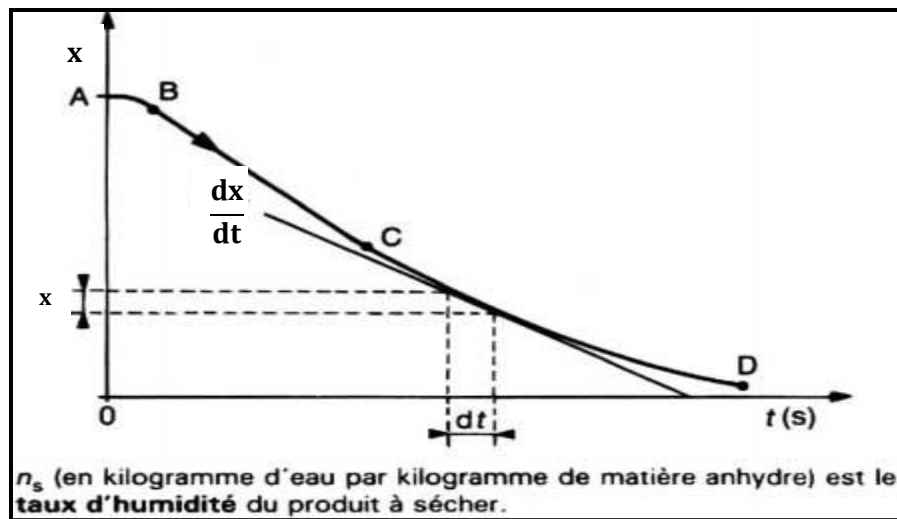


Figure-I-2: Courbe de séchage $X=f(t)$ [4]

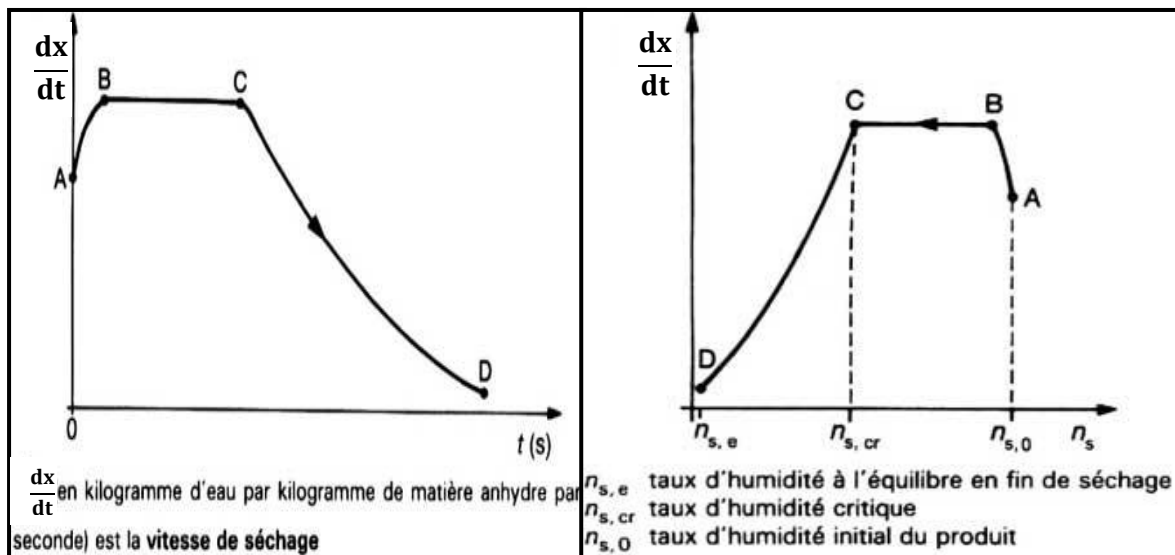


Figure-I-3: Courbe de séchage $dx/dt = f(t)$ Figure-I-4: Courbe de séchage $dx/dt = f(x)$ [4]

• **Phase transitoire (AB)**

A: est la valeur initiale de l'humidité.

Lorsque le produit, qui a une température et une humidité constante est mis dans le milieu du séchage, le produit ajuste sa température à la température humide du solide, parce que le produit est plus froid que l'air et la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit est faible. Dans ce cas l'air chaud entraîne une élévation de température du produit jusqu'à ce que le transfert de chaleur compense exactement le transfert de

matière. Elle n'est pratiquement pas détectée, et n'a pas lieu lors du séchage des produits en particules ou en feuilles. [9]

- **Phase à vitesse de séchage constante (BC)**

Pendant toute la durée de cette phase qui se poursuit jusqu'au point critique, la surface du produit est saturée en eau. Il s'y forme une couche limite, où la pression de vapeur d'eau est quasi égale à celle de l'eau pure dans les mêmes conditions de température et de pression. Cette situation résulte, soit de la présence d'eau en quantité importante à la surface du produit, soit d'une diffusion d'eau, au sein du produit vers sa surface externe, suffisamment rapide. Cette phase est comparable à l'évaporation d'un liquide. [4]

La température du produit reste constante et égale à la température dite humide du fluide de séchage. La nature du produit n'intervient pas au cours de cette période, par contre la forme du solide peut influencer sur la vitesse de séchage qui, pendant cette phase, est égale à:

$$\frac{dx}{dt} = M \frac{dn_s}{dt} = K_G \cdot A \cdot (P_S - P_v) \quad (I-5)$$

M: Masse du produit à sécher (kg)

A: Surface à travers laquelle, s'opère le transfert d'humidité (m²)

P_s : Pression de vapeur d'eau à la température T et à la surface du produit, pendant la phase à vitesse constante, cette pression est égale à la pression de vapeur saturée à la température du produit ou température humide (Pa)

P_v: Pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (Pa)

K_G : Coefficient global de transfert de matière (s/m)

Cette période s'achève lorsque le produit atteint une teneur en eau appelée, la teneur en eau critique. [10]

- **Phase à vitesse de séchage décroissante (CD)**

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 appelée « teneur en eau critique » ou point critique du séchage.

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. [4]

I.2.4. Caractéristiques de l'air de séchage [11, 12,13]

L'air sec peut être considéré comme un mélange de gaz dont la composition est couramment approchée à l'aide des 3 concentrations volumiques suivantes; O₂: 0,210, N₂: 0,781, Ar: 0,009

L'air humide peut être considéré comme un mélange d'air sec et de vapeur d'eau.

I.2.4.1. Humidité absolue

On définit l'humidité absolue H_a (kg_v /kg_{as}) comme la masse de vapeur d'eau contenue dans

l'air en kg par kg d'air sec. Cette humidité est donnée par la relation :

Où m_v et m_{as} sont les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume d'air humide.

$$H_a = \frac{m_v}{m_{as}} \quad (I-6)$$

I.2.4.2. Humidité relative

La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur, si $P_v < P_s(T)$. On définit alors l'humidité relative H_r comme le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air et la pression de saturation de cette vapeur d'eau à la même température T . l'humidité relative est donnée par la relation :

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (I-7)$$

I.2.4.3. Degré de saturation

Soit H_a la valeur de l'humidité absolue de l'air pour une certaine température et H_{as} la valeur de l'humidité absolue de l'air saturé pour la même température; on appelle degré de saturation de l'air, le rapport:

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (I-8)$$

I.2.4.5. Températures caractéristiques de l'air humide

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

I.2.4.5.1. Température sèche « Température de bulbe sec » T_s

La température sèche ou La température de bulbe sec T est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec, le thermomètre étant placé dans l'air.

I.2.4.5.2. Température humide « Température de bulbe humide » T_h

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

I.2.4.5.3. Température de rosée T_r

C'est la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air humide, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas.

I.2.4.5.4. Température de saturation adiabatique T_{sa}

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 .

I.2.5. Caractéristiques des solides humides

I.2.5.1. Porosité volumique d'un produit

La porosité volumique (figure I.5) est définie par :

$$\varepsilon = \frac{\text{volume de pores}}{\text{volume apparent de produit}} \quad (\text{I-9})$$

$$0 < \varepsilon < 1$$

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

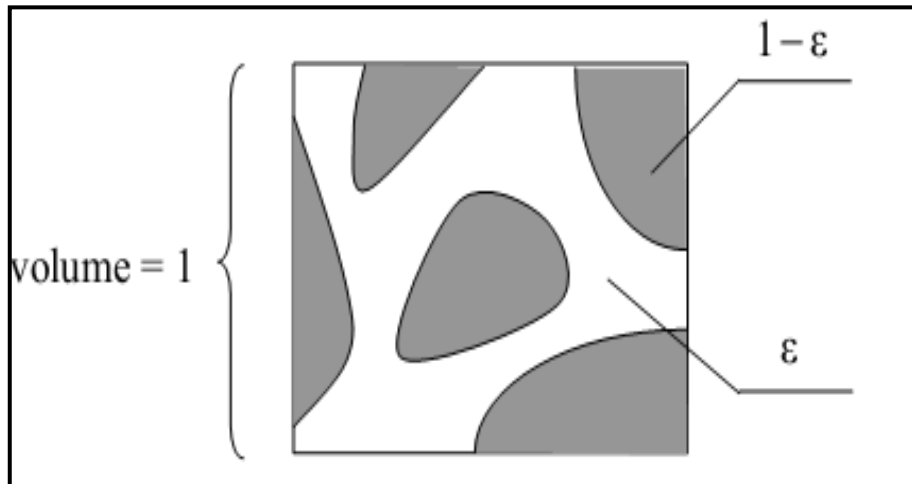


Figure-I-5: Volume de contrôle microscopique [11]

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure I.6). La définition est équivalente.

$$\epsilon = \frac{\text{volume de lamas} - \text{volume de produit}}{\text{volume de lamas}} \quad (I-8)$$

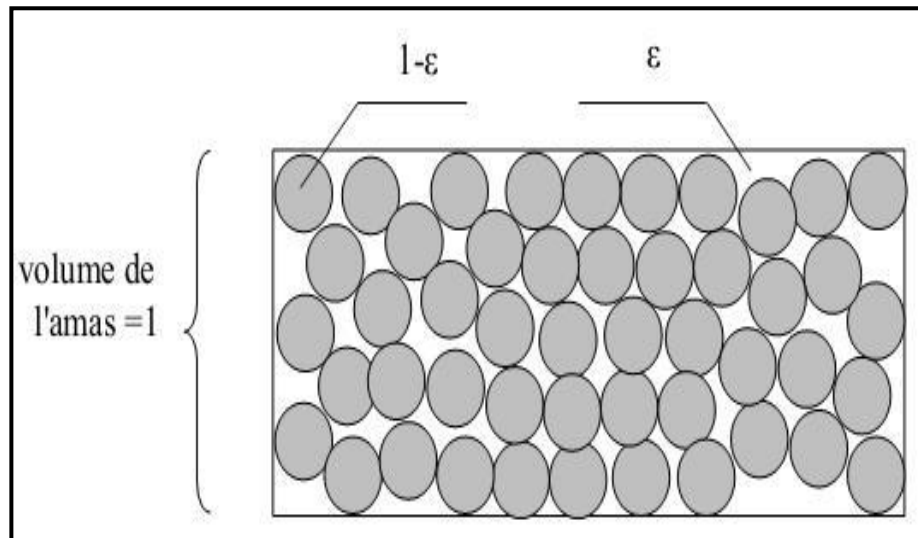


Figure-I-6: Volume de contrôle macroscopique [11]

I.2.5.2. 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.

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.7). [14].

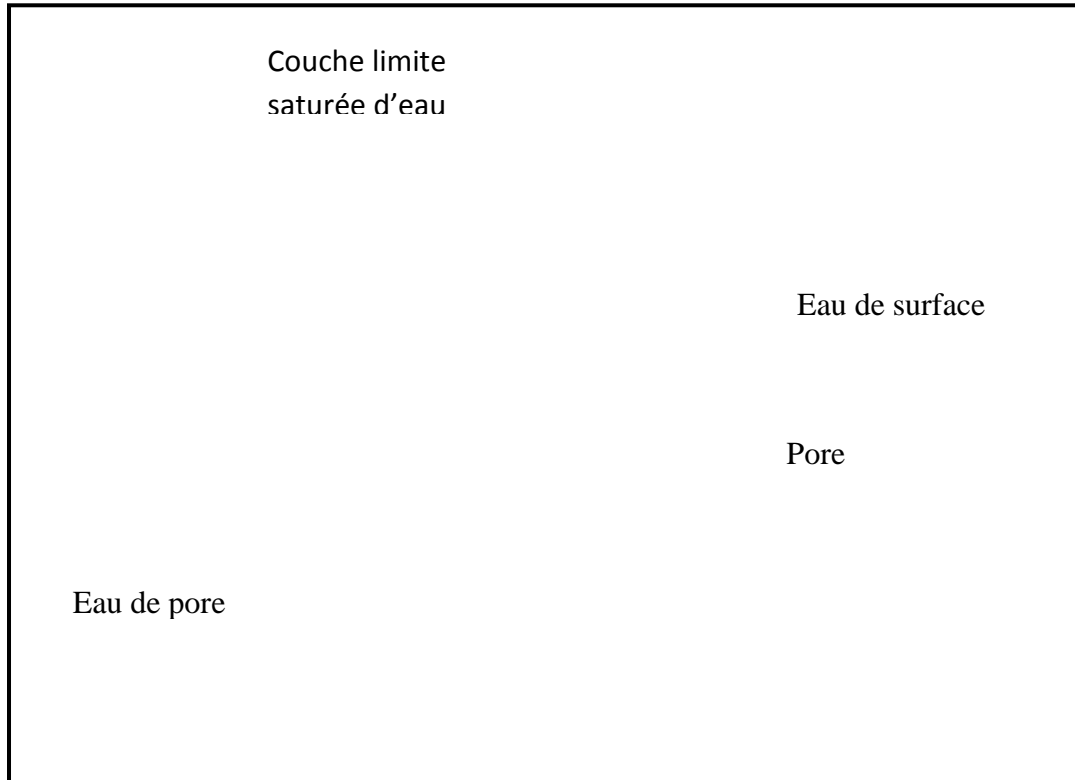


Figure-I-7:Description du solide humide [14]

I.2.5.3.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

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (I-9)$$

I.2.5.4.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. [15].

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (I-10)$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations :

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

$$X_r = \frac{X}{1+X} \quad (\text{I-12})$$

I.2.5.5. 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 [16].

I.3. Activité de l'eau dans un produit

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

$$A_W = \frac{P_V}{P_S} = \frac{\text{HR}(\%)}{100} \quad (\text{I-13})$$

Avec :

$P_V = P$: Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)

$P_S = P_0$: Pression partielle de vapeur saturante (Pa)

Hr: Humidité relative de l'air (%).

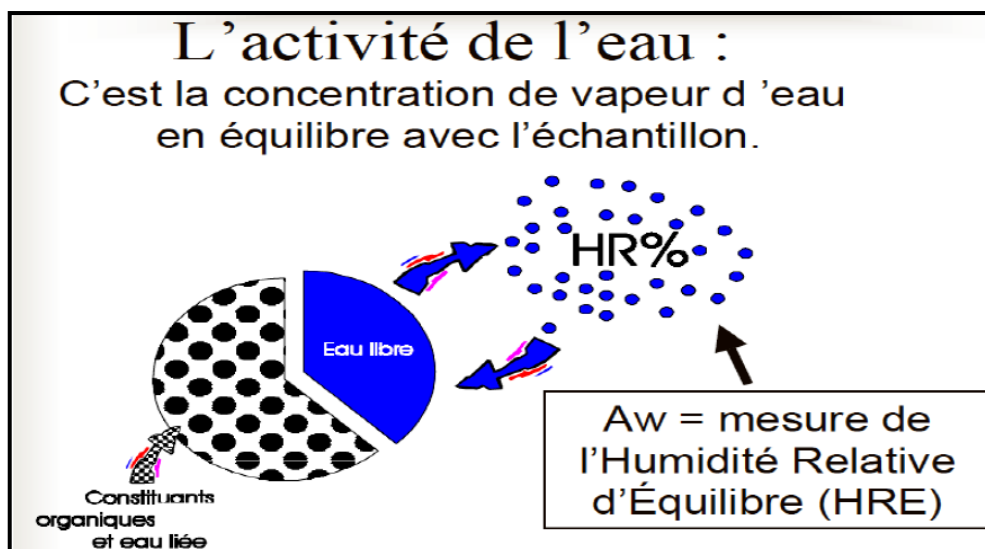


Figure-I-8: Représentation graphique de l'activité de l'eau [14]

L'activité de l'eau (A_W) est la mesure du degré de liberté de l'eau retenue dans diverses façons dans un produit hygroscopique.

L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques d'un matériau hygroscopique.

La figure (I.9) illustre l'importance de cette notion d'activité de l'eau dans un produit pour la conservation des denrées alimentaires (M. Belahmidi, & al. 1993, J. J. Bimbenet, & al. 1984, T. P. Labuza, 1968). Les conclusions déduites de leurs travaux peuvent se résumer comme suit :

- Pour $A_W < 0,9$, la plupart des bactéries nocives cessent de croître dans le produit donné
- Pour $A_W < 0,8$, beaucoup d'enzymes sont inactives
- Pour $A_W < 0,75$, la prolifération des bactéries halophiles est arrêtée
- Pour $0,8 < A_W < 0,7$, les réactions de Maillard (brunissement non enzymatique des sucres en présence de groupements aminés) présentent un maximum.

La zone optimale de conservation des produits, sans additif ni réfrigération, correspond à des valeurs d'activité A_W comprises entre 0,25 et 0,35 [17].

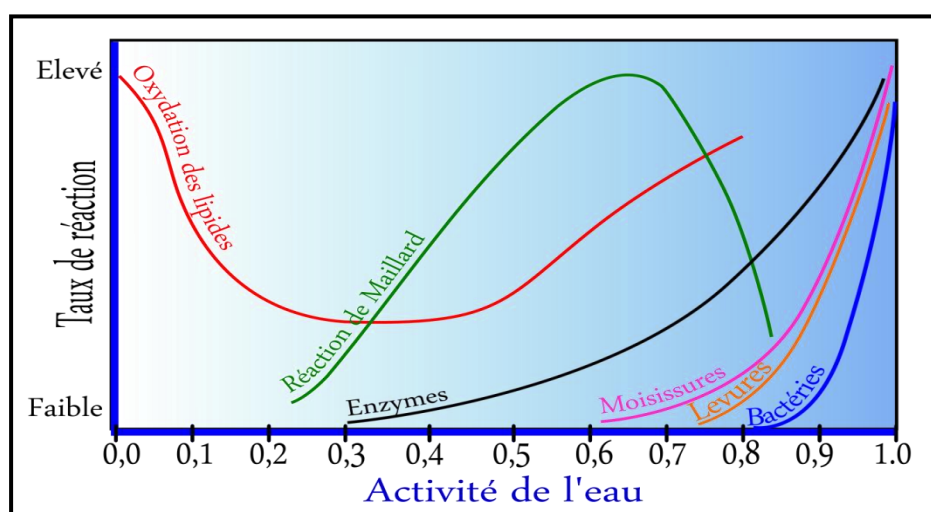


Figure-I-9: Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau [17]

I.3.1. 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.

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (I-14)$$

Avec :

X_{eq} : Teneur en eau d'équilibre (%)

M_s : Masse sèche (kg)

M_h : Masse humide (kg). [17].

I.3.2. Isothermes de sorption

I.3.2.1. Définition

L'activité de l'eau A_W dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau X et de sa température

La courbe représentant pour une température donnée la teneur en eau X 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.10) 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. [17].

I.3.2.2 Hystérésis

Le phénomène par lequel à une température et une activité de l'eau données, un absorbant contient plus d'eau pendant la désorption que pendant l'adsorption est appelé 'hystérésis' (Nkouam, 2007).[21]

De manière générale, les isothermes d'adsorption-désorption présentent la propriété dynamique d'hystérésis, la courbe d'adsorption est décalée par rapport à celle de désorption.

Les courbes d'isothermes de sorption donnent des informations sur la répartition et l'intensité des liaisons des molécules d'eau ainsi que leur disponibilité fonctionnelle dans les substances biochimiques et biologiques. La connaissance de ces courbes est indispensable pour étudier le séchage des produits (Boumediene, 2004). [17]

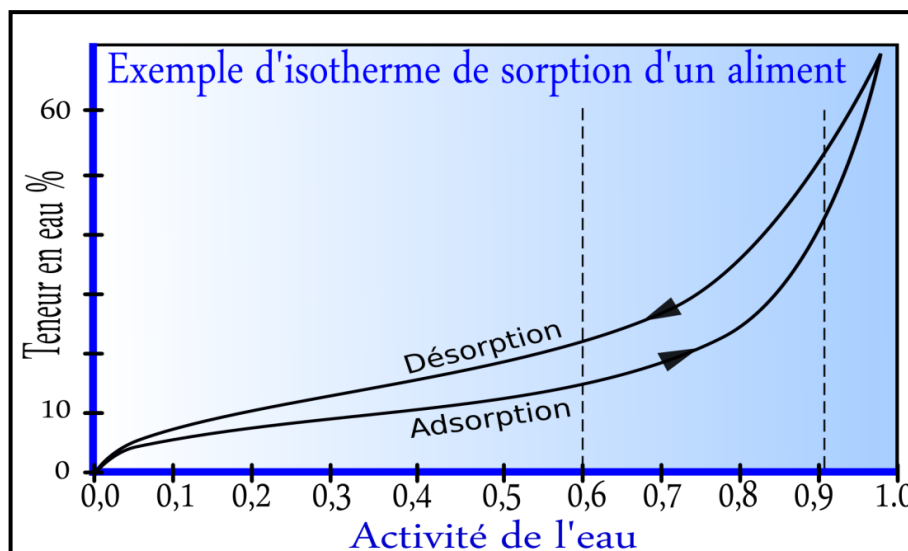


Figure-I-10: Isothermes de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis [17]

I.3.2.3. Forme générale des isothermes

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones (figure I.11). 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 : L'eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau.

L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro capillaire constitue une phase continue [17].

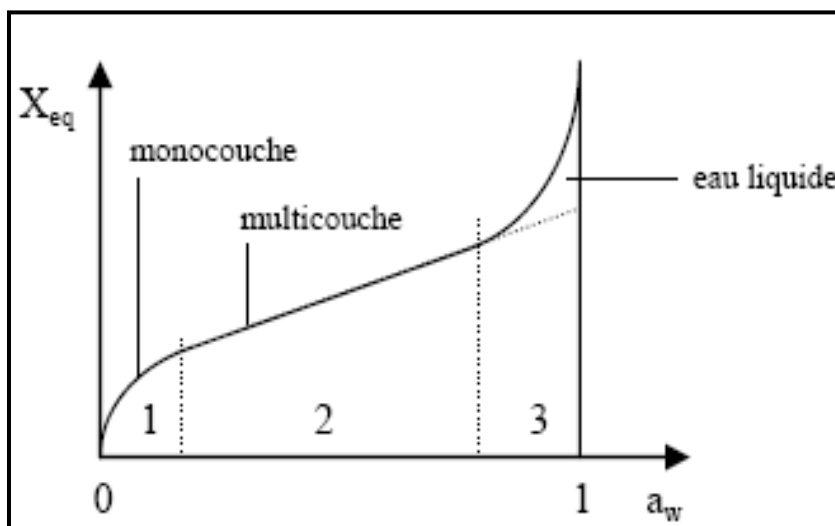


Figure-I-11:Forme générale des isothermes [17]

I.3.3.Les méthodes d'obtention des Isothermes de sorption

Les procédures d'obtention des isothermes de sorption de l'eau des produits agroalimentaire sont décrites différemment en détail par plusieurs auteurs, et cela en fonction de leur entendement (Ahouannouetal., 2010). Parmi ces procédures, on utilise soit des méthodes manométriques, soit hygrométriques ou encore gravimétriques (dynamique et statique) (Nkouam, 2007). D'autres méthodes utilisent les humidificateurs mécaniques et des dessiccateurs [18]

I.3.3.1.Les méthodes manométriques

La mesure manométrique, est une mesure basée sur les propriétés colligatives. Ici, l'échantillon (10-50g) est placé sous vide (moins de 200 umHg) dans un dessiccateur pendant 1-2 minute. 30 à 50 minutes après l'arrêt du vide à l'équilibre, la pression de vapeur d'eau est mesuré à l'aide d'un manomètre. La température doit être maintenue constante. Pour plus de précision, il importe que les changements de l'activité de l'eau dus à la perte d'eau par évaporation soient très faibles (le rapport du volume de l'échantillon sur le volume de vapeur est grand), et que le fluide manométrique soit de masse volumique et de pression de vapeur faibles.

Cette méthode présente les inconvénients des gradients de température, des changements de valeur de l' A_w par vaporisation et l'incompatibilité avec les aliments volatiles ou en processus de respiration. [19]

1.3.3.2. Les méthodes hygrométriques

On retrouve : les mesures du point de rosée et de dépression du bulbe humide à l'aide des hygromètres à cheveux et électriques permettant de mesurer l'activité de l'eau.

Pour ce qui est de la mesure de la température de rosée, un courant d'air (vapeur d'air) en équilibre avec l'échantillon étudié est soumis à la condensation à la surface d'un miroir refroidi. L'apparition de la première goutte d'eau sur le miroir est détectée à l'aide d'une cellule photoélectrique et correspond au point de rosée.

A partir de la mesure du point de rosée, l'humidité relative de l'échantillon est enregistrée par l'utilisation des paramètres psychrométriques. En combinaison avec des microprocesseurs, les valeurs directes de l' A_w pourraient être obtenues. L'exactitude de ces instruments est moindre à des niveaux d' A_w bas, à cause de l'insuffisance de vapeur dans l'espace principal pour couvrir le miroir.

Quant au principe des hygromètres à résistance électrique, il est basé sur le fait que la résistance de certaines substances est fonction de l'humidité relative.

Quant aux hygromètres à cheveux, après calibrage, donne une indication de l'humidité relative du milieu ambiant. Cette mesure indirecte de l' A_w est peu précise, surtout à des humidités relatives élevées. [19]

1.3.3.3. Les méthodes gravimétriques

Pour Jannot (2008), ce sont des méthodes quantitatives qui sont basées sur des mesures de masse d'un composé. Le principe d'obtention d'un point de l'isotherme est le suivant : on place un échantillon du produit dans une enceinte maintenue à température T et à humidité relative d'équilibre HRE de l'air constante. L'échantillon est pesé à intervalle régulier jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, il est alors en équilibre avec l'air à (T , HRE). Connaissant sa masse humide, il suffit alors de déterminer sa masse sèche pour en déduire sa teneur en eau X_{eq} , le couple (HR , X_{eq}), ce qui fournit un point de l'isotherme d'adsorption ou de désorption. On distingue les méthodes gravimétriques statique et dynamique.

Dans la méthode gravimétrique statique, seule la diffusion gouverne les transferts entre le produit et son environnement. Le produit est placé dans une enceinte étanche à l'intérieur duquel une solution maintient une humidité relative constante. La régulation de l'humidité relative de l'ambiance étant assurée soit par des solutions salines saturées, soit par des solutions diluées d'acide, communément l'acide sulfurique de concentration fixée.

La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatée. Et on utilise autant de sels ou de concentration d'acides différents (et donc de récipients) que l'on veut obtenir des points sur l'isotherme. Toutefois, cette méthode est très longue car l'équilibre air/produit n'est parfois atteint qu'après plusieurs semaines.[20] Dans les méthodes gravimétriques dynamiques, un courant gazeux est conditionné par un dispositif humidificateur avant d'atteindre l'échantillon. L'appareil est principalement constitué d'un cylindre calibré dans lequel évolue un piston et d'une éprouvette dans laquelle on place l'échantillon dont on veut mesurer la courbe de sorption. On rencontre également dans cette catégorie des appareils comportant une balance électronique incorporée, qui donnent en continu les mesures de la masse de l'échantillon. [21]

1.3.4. Modélisation des isothermes de sorption

Plusieurs modèles mathématiques, relations empiriques reposant sur des bases plus ou moins physiques, décrivent la relation entre la teneur en eau d'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la température. Huit modèles différents trouvés dans la littérature peuvent être étudiés: Henderson modifié, Chung-Pfost modifié, Oswin modifié, Halsey modifié, GAB, Peleg, Langmuir, et BET modifié. Le but est de déterminer le ou les modèles les plus adéquats pour la description des isothermes de sorption de notre produit. [17]

Tableau-I-1- Modèles de description des isothermes de sorption sélectionnés [17]

Auteurs	Equation du modèle	Références	Domaine de validité de courbe
Henderson modifié	$1 - A_W = \exp[-K(T + n) \cdot X_{eq}^C]$	Thomson & al, 1986	Complète
Chung Pfost modifié	$A_W = \left[\frac{-A}{T + B} \exp(-C \cdot X_{eq}) \right]$	Pfost & al, 1976	Complète
Oswin modifié	$X_{eq} = (A + BT) \left[\frac{A_W}{1 - A_W} \right]^C$	Oswin, 1946	Complète
Halsey modifié	$A_W = \exp \left[\frac{-\exp(A + BT)}{X_{eq}^C} \right]$	Iglesias & Chirife, 1976b	Complète
Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)	$X_{eq} = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot A_W}{[1 - B \cdot A_W][1 - B \cdot A_W + B \cdot C \cdot A_W]}$	Van den Berg, 1984	Complète

Peleg	$X_{eq} = A \cdot A_W^{K_1} + B \cdot A_W^{K_2}$	Peleg 1993	Complète
Langmuir	$X_{eq} = \frac{1}{[A + B \cdot A_W^{C-1}]}$	Langmuir I, 1916	Complète
Brunauer- Emmett- Teller (BET)modifié	$X_{eq} = A_W \frac{(A + BT) \cdot C \cdot A_W}{[1 - A_W][1 + C \cdot A_W]}$	Iglesias & chirife,1976c Iglesias & chirife,1982	Zone 1

(A, B, C, K, K₁ et K₂ : sont des constantes qui dépendent généralement de la température de l'air, n= nombre des couches)

I.3.5.Intérêt des Isothermes

Les isothermes ont comme intérêt de :

- Prévoir l'activité de l'eau A_W en fonction de la teneur en eau.
- Prévoir l'évolution de l'activité de l'eau A_W en fonction de la modification de la teneur en eau (hydratation, déshydratation) ou du passage, pour les denrées sucrées (confiserie), du sucre de l'état amorphe à l'état cristallisé.
- Prévoir l'activité de l'eau A_W à l'équilibre dans le cas de mélanges complexes de produits plus ou moins complètement déshydratés (préparations pour potages, soupes, ketchup).
- Décider du mode de conditionnement emballage pour une denrée en fonction de l'humidité relative de l'atmosphère dans laquelle elle est maintenue.
- Donner les conditions (température, HRE) qui protège le mieux les produits alimentaires lors de la conservation.
- Prédire et prévenir les phénomènes de dégradation lors du stockage de l'aliment.

Cependant, 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 un produit quelconque. [22]

I.4.Conclusion

A partir de l'analyse bibliographique que nous avons réalisé, nous pouvons confirmer que: La cinétique de séchage et les isothermes de sorption constituent une source d'information importante pour établir la stabilité des produits agro élémentaires, des plantes aromatiques et médicinales et leurs conditions de conservation.

II-Travaux antérieurs concernant les isothermes de sorption

II.1.Introduction

La détermination des isothermes de sorption des produits agroalimentaires constitue un passage incontournable pour la compréhension des mécanismes de déshydratation. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer expérimentalement les isothermes de sorption. Dans ce chapitre, nous avons opté pour quelques travaux effectués par les chercheurs concernant les isothermes de sorption pour une méthode statique (gravimétrique).

II.2. Quelques travaux pour trouver les isothermes de sorption

A. Ferradji et al.2011, ont travaillé sur les performances énergétiques d'un séchoir solaire familial de type coquillage (Figure II.1) et on utilisées se séchoir pour le séchage des figes de la variété taranimt (Figure II.2). L'isotherme de désorption de cette variété a été déterminée à 60°C. Ils ont estimées la teneur en eau de la couche mono moléculaire (X_m) par l'équation de GAB. (Figure II.3). [23]



Figure-II-1:Séchoir coquillage hybride utilisé [22]



Figure-II-2:Fige à consistance pâteuse [22]

La figure (II.3) présente l'isotherme de désorption à 60 °C qui a une forme sigmoïdale de type II spécifique aux fruits secs riches en sucres.

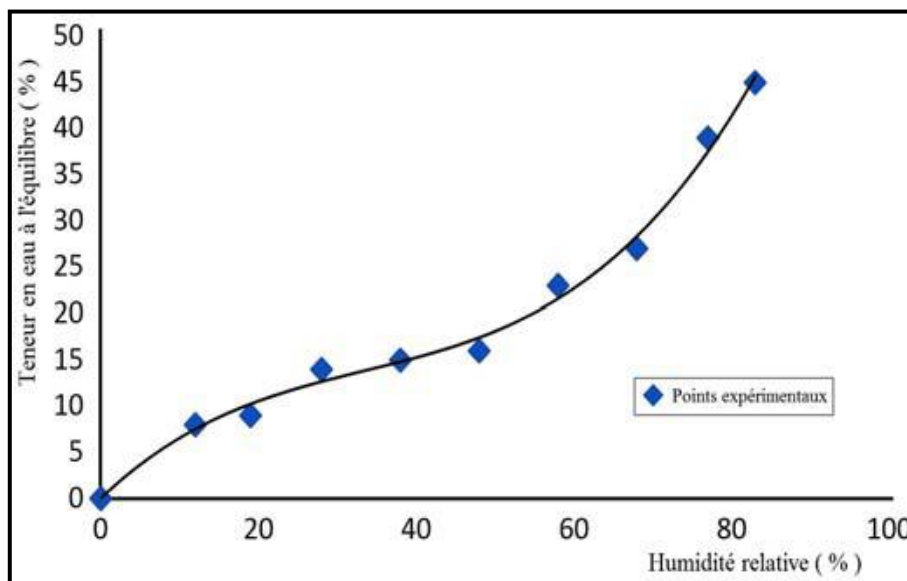


Figure-II-3: Isotherme de désorption des figues à 60 °C [23]

G.B. Noumi, et al. 2004, ont étudié la cinétique de séchage de la pulpe des fruits du *Canarium schweinfurthii* Engl ont utilisée un séchoir à circulation d'air chaud aux propriétés fixées et contrôlées: vitesse de l'air comprise entre 1 et 3 m/s, humidité relative entre 40 et 60% et température variant de 40 à 70 °C. Les résultats obtenus par G.A.B. Noumi, et al montrent d'une part, qu'il n'existe pas de phase de séchage à vitesse constante, et d'autre part, que la température et la vitesse de l'air sont les paramètres qui influencent le plus la durée de séchage dans les conditions explorées. Cet ensemble de résultats expérimentaux est représenté mathématiquement par une courbe dite «caractéristique de séchage». La méthode utilisée dans ce travail pour établir les isothermes de sorption est la méthode gravimétrique statique, mettant en œuvre des solutions diluées d'acide sulfurique.

Les échantillons à étudier sont placés dans dix coupelles en plastique préalablement tarées et suspendues dans dix bocal en verre contenant différentes solutions diluées d'acide sulfurique. (Figure II.4). [24]

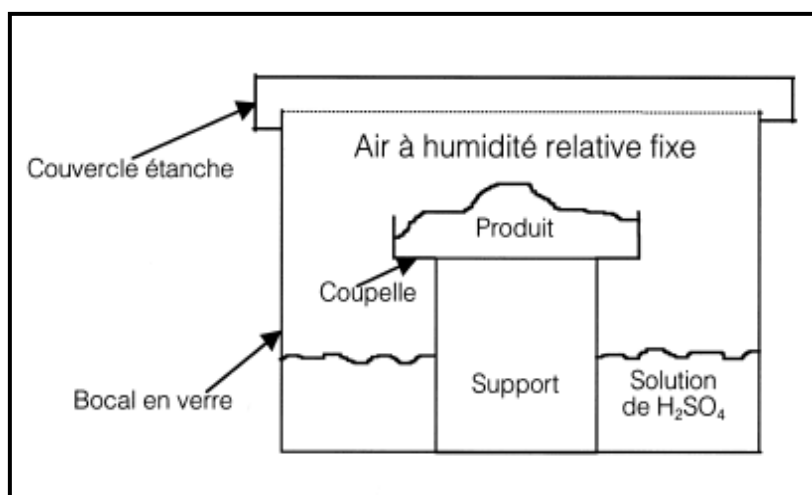


Figure-II-4:Schéma du dispositif expérimental de détermination des isothermes de désorption [24]

Les isothermes de désorption de la pulpe des fruits de l'ailé ont été déterminées à différentes températures (40, 50, 60 et 70 °C); le modèle de Guggenheim, Anderson et de Boer s'avère satisfaisant pour les décrire (Figure II. 5).

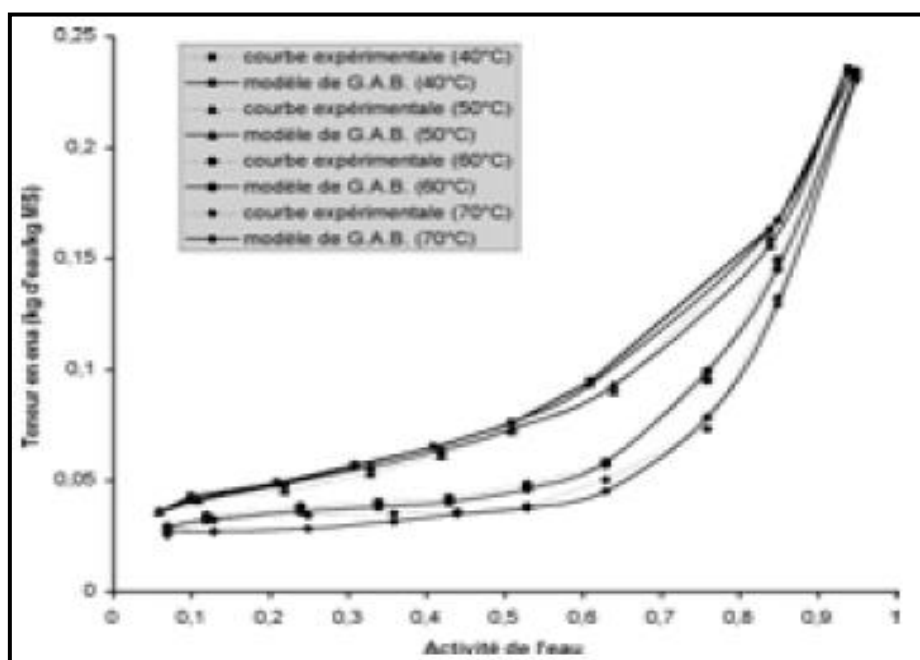


Figure-II-5: Isothermes de désorption de la pulpe des fruits de l'ailé à différentes températures - comparaison des données expérimentales et calculées avec le modèle de G.A.B [24]

G. Miranda, et al ,2011 ont effectué une série d'expériences pour déterminer des isothermes de sorption des abricots et du raisin. [25].

Pour estimer les résultats ils ont utilisé le modèle GAB (Figure II.6, II.7 et II.8).

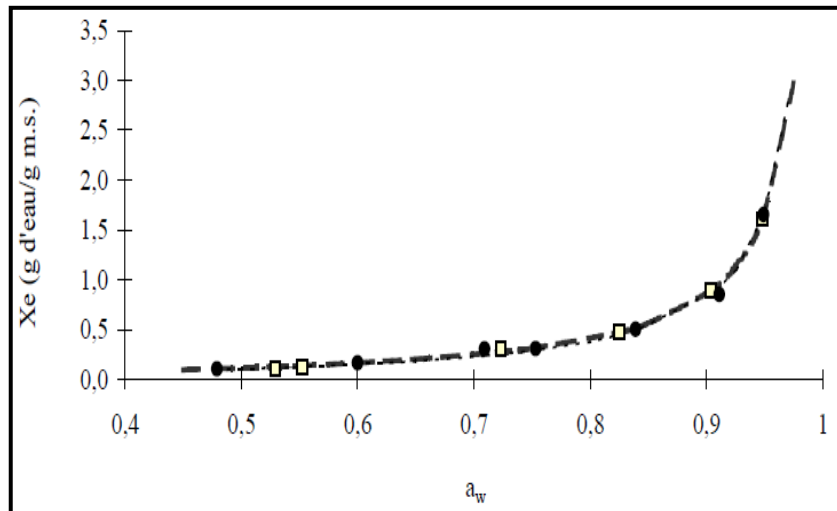


Figure-II-6: Isothermes des abricots de maturité optimale (● points expérimentaux, ----- modèle GAB) et des abricots de maturité moyenne (□ points expérimentaux, — — modèle GAB) à 25°C [25]

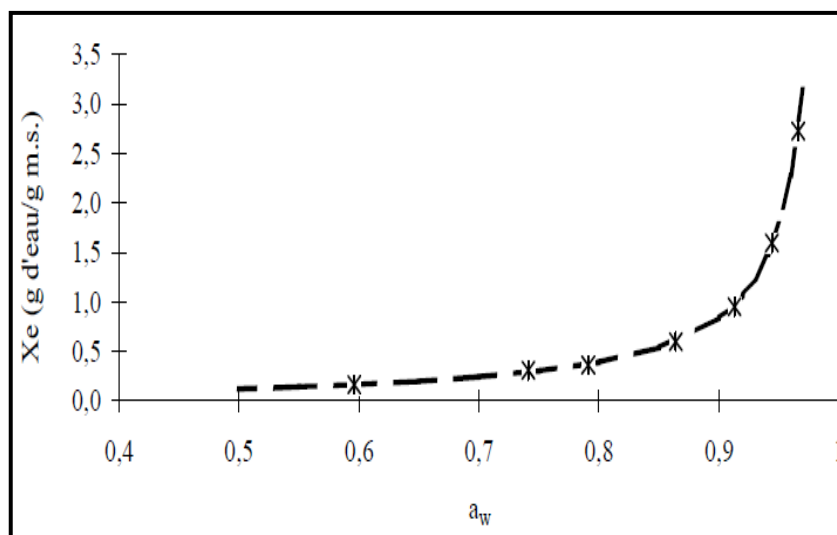


Figure-II-7: Isotherme de sorption du raisin à 25°C (* points expérimentaux, ----- modèle GAB). [25]

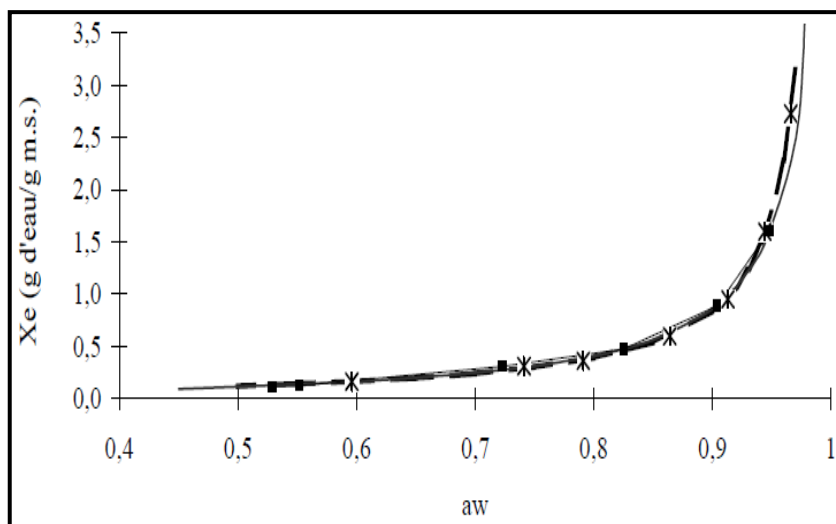


Figure-II-8: Isothermes des abricots de maturité moyenne (□ points expérimentaux, — modèle GAB) et du raisin (* points expérimentaux, ----- modèle GAB) à 25°C [25]

A. Belghit, et al ont déterminé expérimentalement les isothermes de sorption de la verveine pour différentes températures. Ensuite ils ont étudié l'influence de la vitesse, la température et l'humidité de l'air asséchant sur la cinétique de séchage du produit dans un séchoir tunnel. Pour estimer les résultats expérimentaux ils ont utilisé le modèle de B.E.T et d'Henderson (Figure II. 9 et II .10). [26]

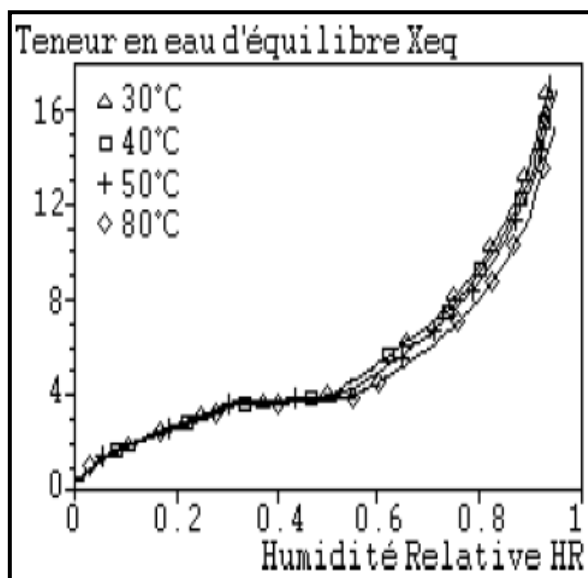


Figure-II-9: Courbe de sorption calculée à partir du modèle d'Henderson pour du modèle d'Henderson pour différentes Températures [26]

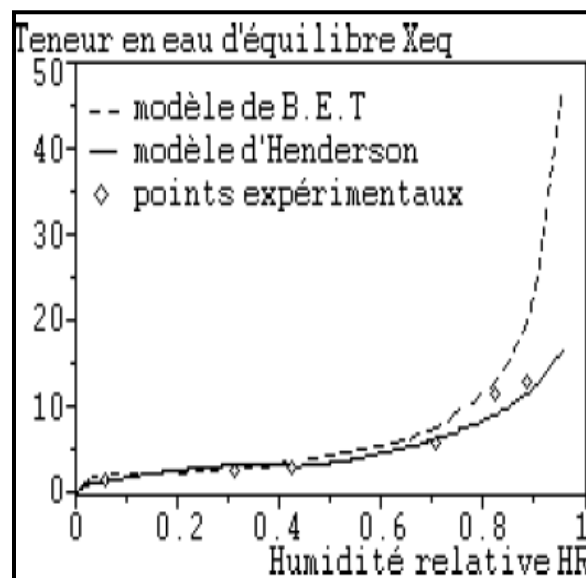


Figure-II-10: Isothermes de sorption de la verveine calculées à l'aide des modèles de B.E.T et d'Henderson pour 0 ≤ HR ≤ 100 % [26]

M. Kouhila, et al .1999, ont réalisé une étude expérimentale sur les isothermes de sorption de la menthe (*Mentha pulegium*) à l'aide de la méthode des solutions de sels saturés (Figure II.11) .Ils ont utilisé quatre valeurs des températures : 25 °C, 30 °C, 40 °C, et 50 °C. [27]

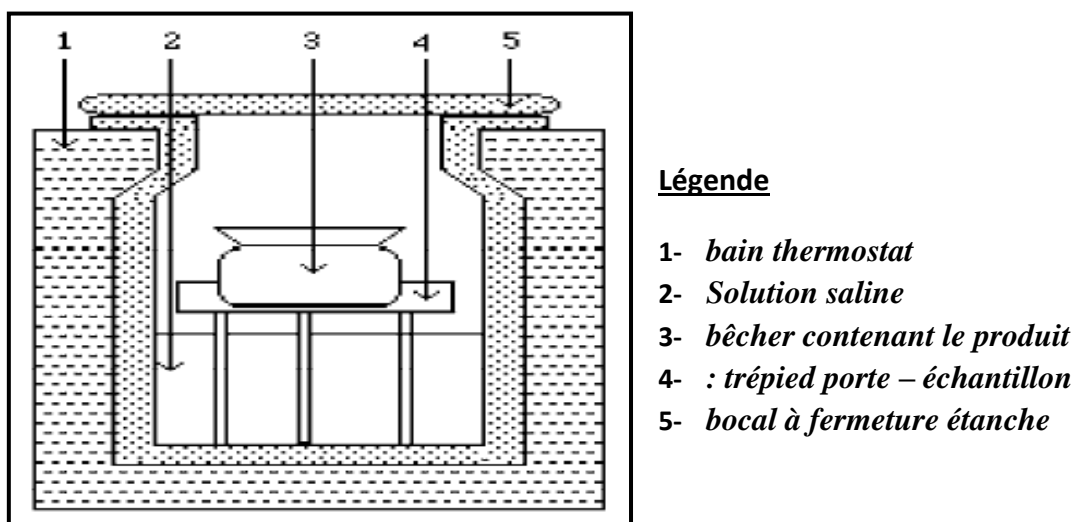


Figure-II-11:Schéma d'une unité du dispositif expérimental [27]

La figure (II.12) illustre la variation de la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'humidité relative **HR** de l'atmosphère entourant le produit pour les quatre températures.

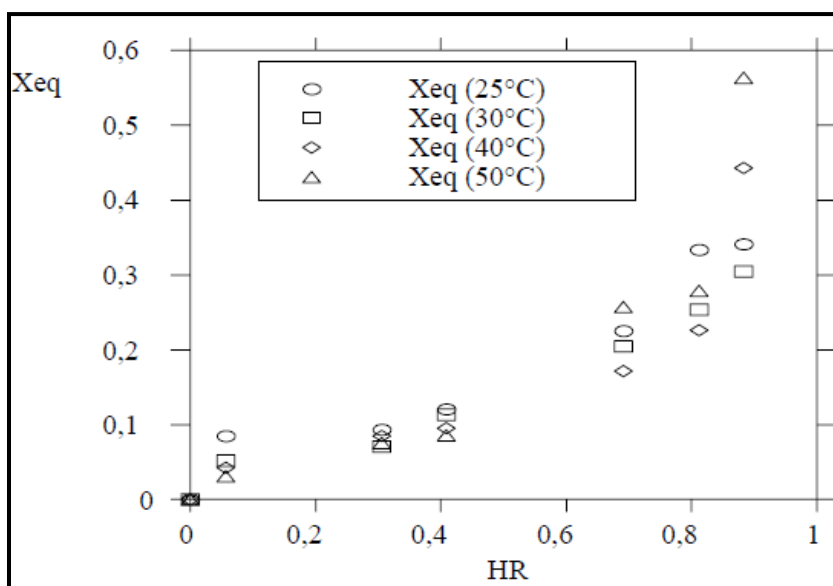


Figure-II-12:Isothermes de sorption de la menthe : Points expérimentaux [27]

Pour estimer les résultats expérimentaux ils ont utilisé le modèle d'Henderson Figure (II. 13)

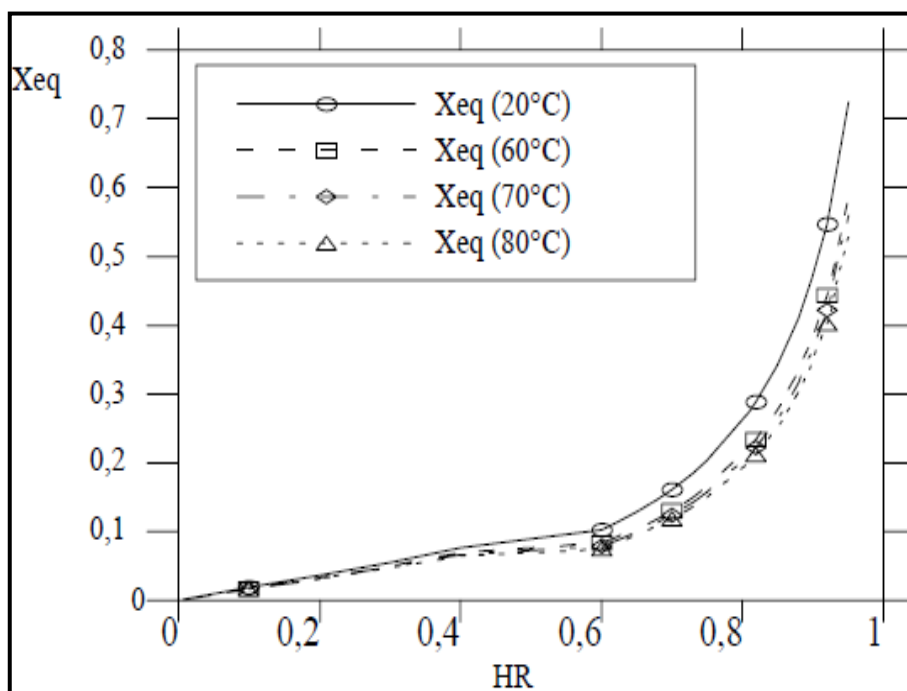


Figure-II-13: Isothermes de sorption de la menthe calculées par le modèle d'Henderson [27]

A. Ferradji, et al. 2000, ont déterminé expérimentalement les isothermes de sorption pour deux différentes températures (25 °C et 45 °C) de pomme (figure II. 14). Ils ont utilisé l'équation de sorption de Guggenheim – Anderson - de Boer (GAB) pour déterminer la teneur en eau de la couche mono moléculaire (Figure II .15). [28]



Figure-II-14: Aspect des rondelles de pommes chargées de solutés et séchées [28]

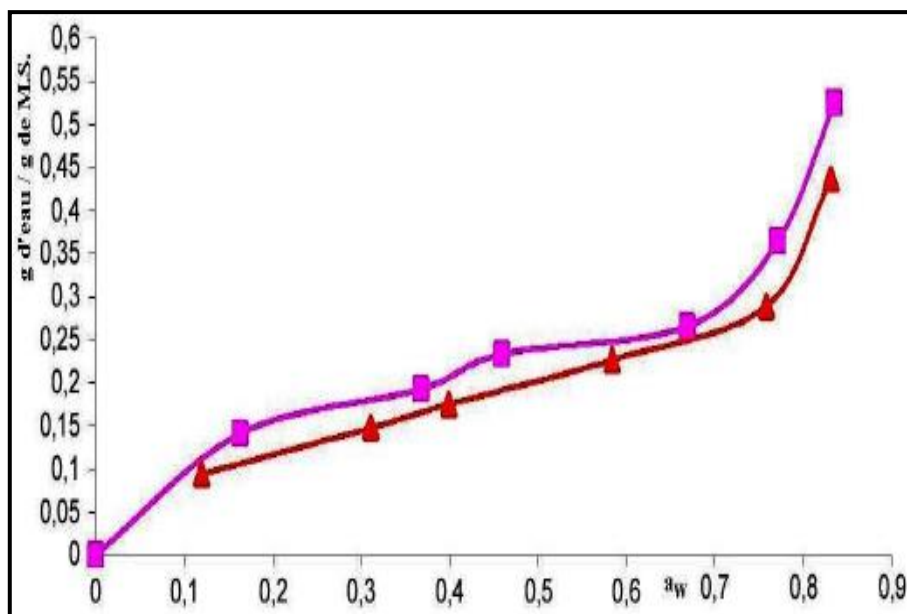


Figure-II-15: Isothermes de sorption à 25°C et à 45°C des pommes déshydratées partiellement par osmose [28]

P. T. BASSENE, Ont étudié expérimentalement les isothermes de sorption des granulés de la farine de mil, ils ont utilisé la méthode gravimétrique statique à différentes température 40°C, 50°C et 60°C, pour assimilé les résultats expérimentaux ont utilisé l'équation de sorption de Guggenheim – Anderson - de Boer (GAB). [29]



Figure-II-1: Granulés de la farine de mil [29]

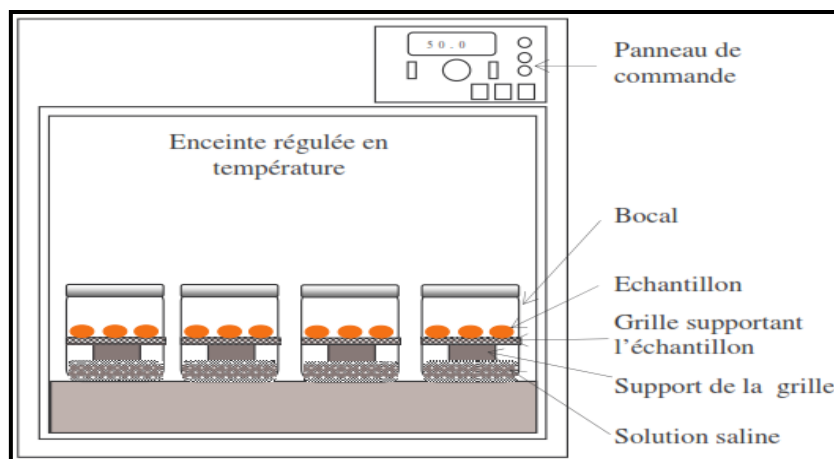


Figure-II-17:dispositif expérimental de la détermination des isothermes de désorption par la méthode gravimétrique statique [29]

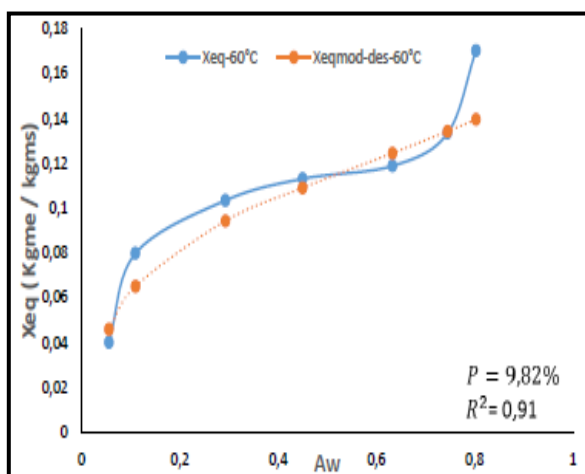


Figure-II-18:Courbe expérimentale et simulée par le modèle modifié de GAB à 60°C [29]

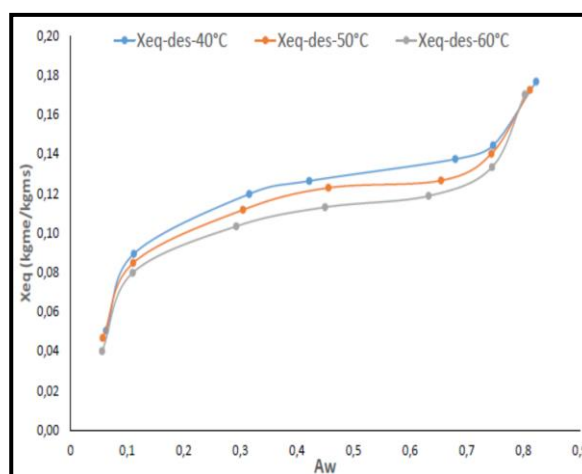


Figure-II-19:Isotherme de désorption des granulés de la farine de mil pour différentes températures [29]

A. Touil, et al. 2015, ont déterminé les isothermes de sorption de l'ail pour quatre températures différentes (40°C, 50°C, 60°C et 70°C) et ont estimé leurs résultats par six modèles : Oswin ; Oswin modifié ; Halsey ; G.A.B ; G.A.B modifié, Henderson et Aguerre. La modélisation macroscopique des isothermes de sorption montre que l'ail est bien décrit par le modèle de GAB. Ont appliqué aussi l'équation de Clausius Clapeyron aux isothermes de sorption pour calculer de la chaleur isothermique de sorption. Enfin ils ont montré que l'enthalpie et l'entropie d'adsorption augmentent avec la diminution de la teneur en eau. [30]

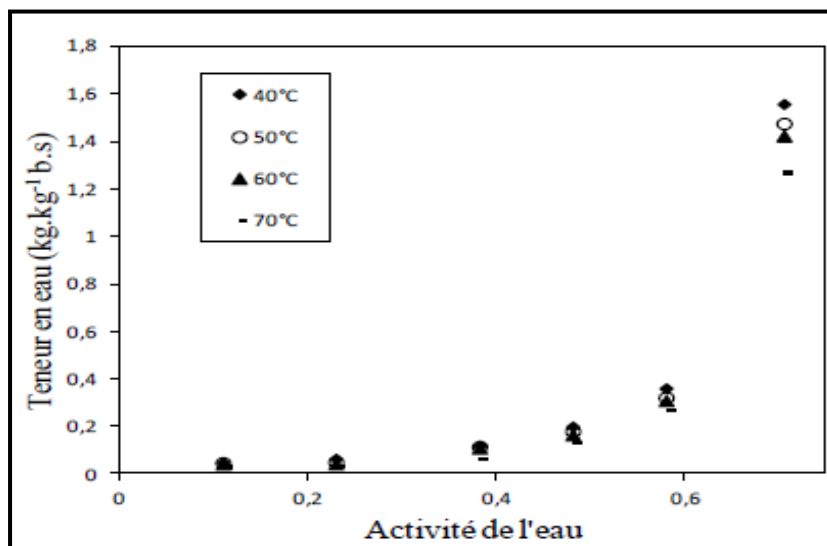


Figure-II-20: Isothermes de désorption de l'ail. [30]

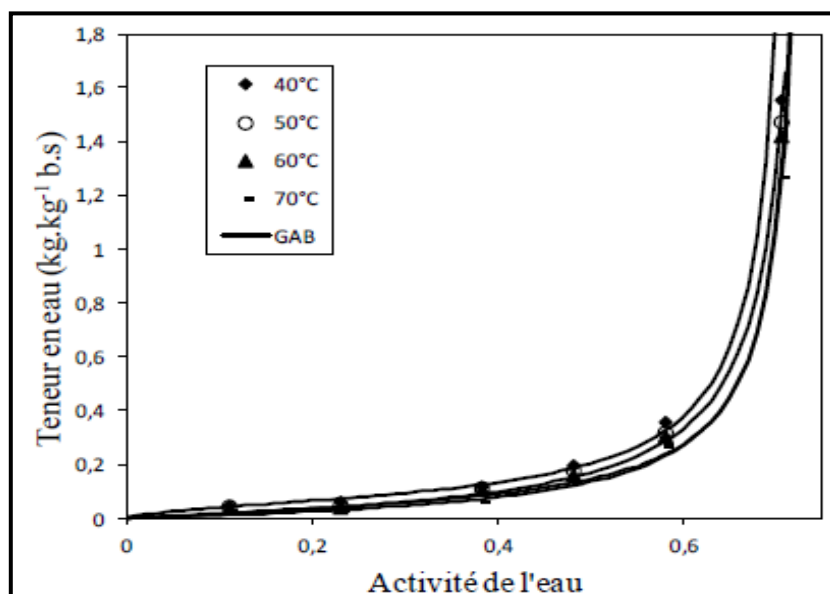


Figure-II-21: Isothermes de désorption de la vapeur d'eau sur l'ail
(Expérimentale et assimilée par le modèle de GAB) [30]

L'étude expérimentale d'A. Benhamou, et al. 2010, est basée sur la détermination des teneurs en eau d'équilibre de désorption et d'adsorption des feuilles de marjolaine (*Origanum majorana*) à 30, 40, et 50 °C par la méthode gravimétrique statique. Ils ont remarqué que l'équilibre est obtenu après 12 jours pour la désorption et 9 jours pour l'adsorption. Pour la modélisation des isothermes de sorption, et pour la prédiction du comportement hygroscopique lors du stockage ou du séchage, ils ont utilisé quatre modèles mathématiques. [31]



Figure-II-22: Dispositif expérimental pour la mesure des isothermes de sorption [31]

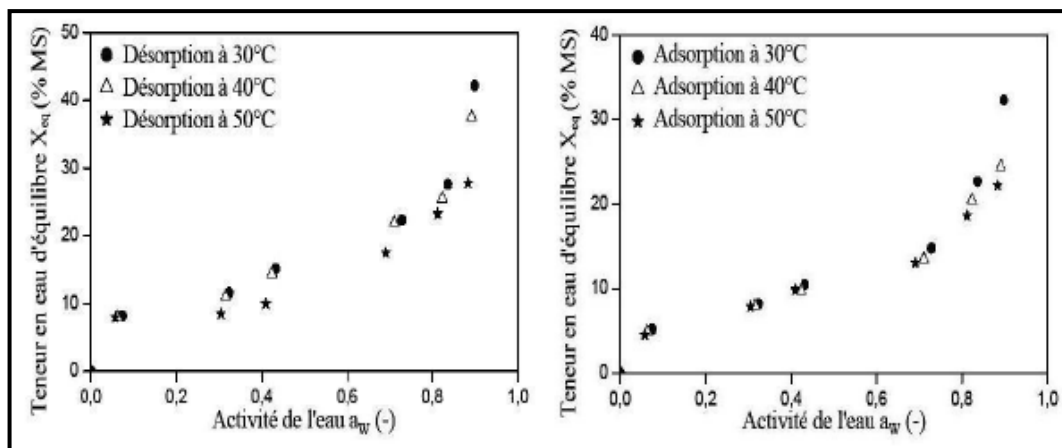


Figure-II-23: Isothermes de désorption et d'adsorption dans le système marjolaine/eau [31]

Une simple analyse des quatre modèles statistiques montre que le modèle de Peleg à 4 paramètres est le plus approprié pour décrire les isothermes de sorption de marjolaine Figure (II.24).

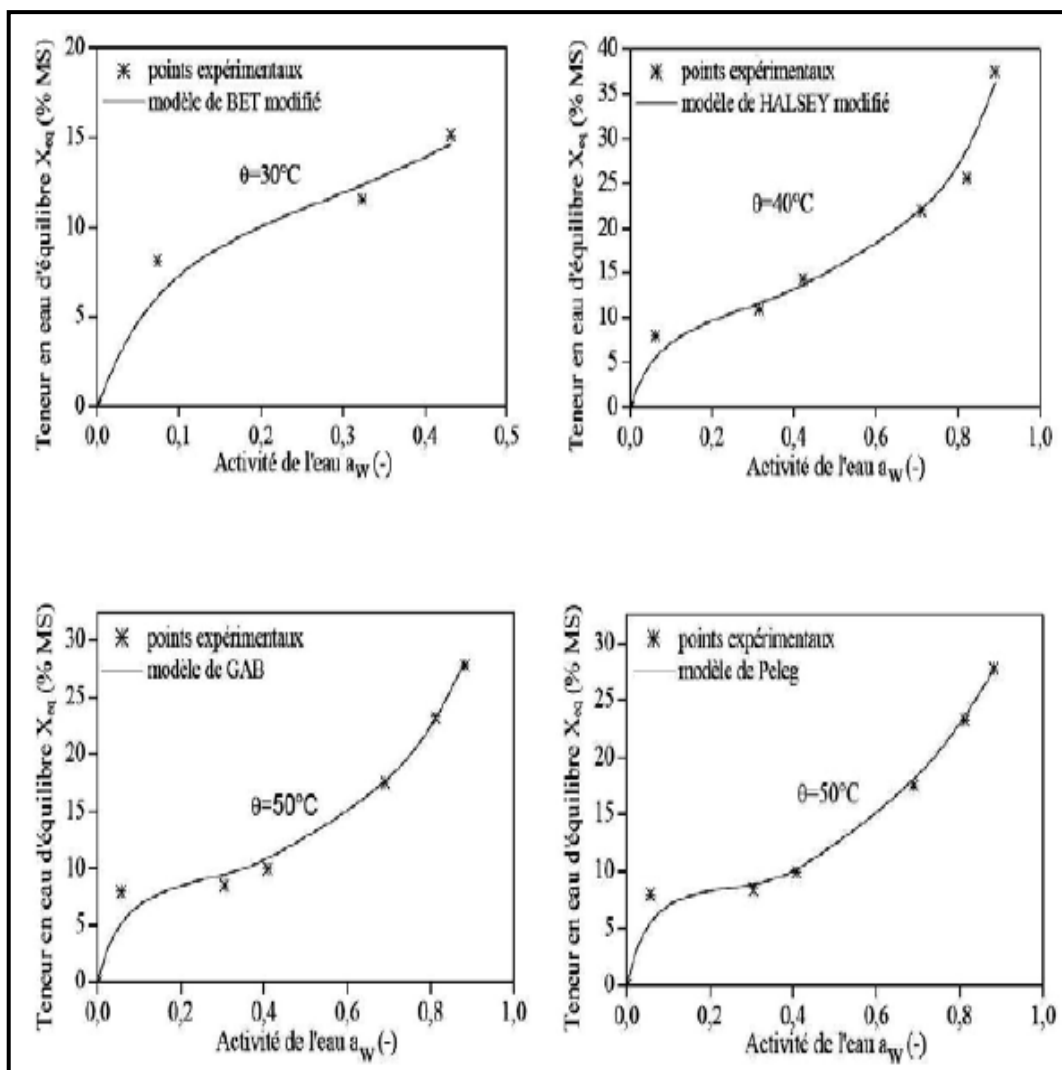


Figure-II-24: Isothermes de désorption des feuilles de la marjolaine décrites par quatre modèles [31]

Y. Khadraoui, et A. Terfous.1999, ont effectué une approche globale de normalisation des isothermes de sorption exploitant les résultats expérimentaux du riz obtenus par différents auteurs. On utilisé des méthodes de similitude et des corrélations pour aboutir des équations analytiques communes à tous les types de riz indépendamment de la température permettant la prévision des paramètres de calcul du séchage du riz. [32]

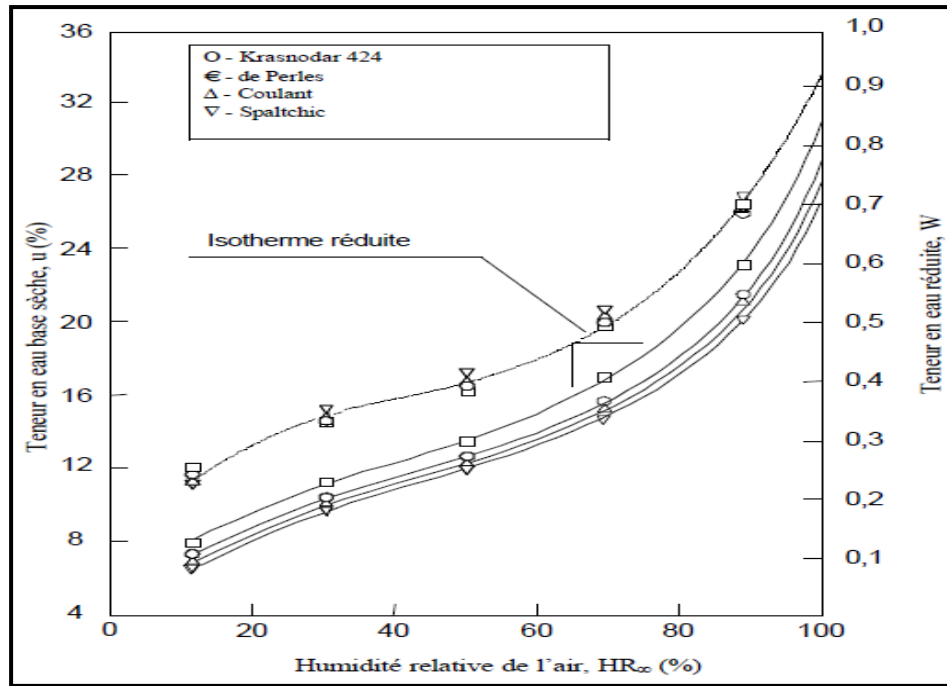


Figure-II-25: Isothermes expérimentales de sorption du riz à T = 293 K [32]

A. TOM, et al .2013, ont présenté une modélisation des transferts de chaleur et de masse entre la viande de bœuf et son environnement, ont modélisé les isothermes de désorption et les cinétiques de séchage pour les températures entre 30 C° et 50 C° à partir des résultats expérimentaux , ont estimé les résultats par le modèle de GAB . [33]

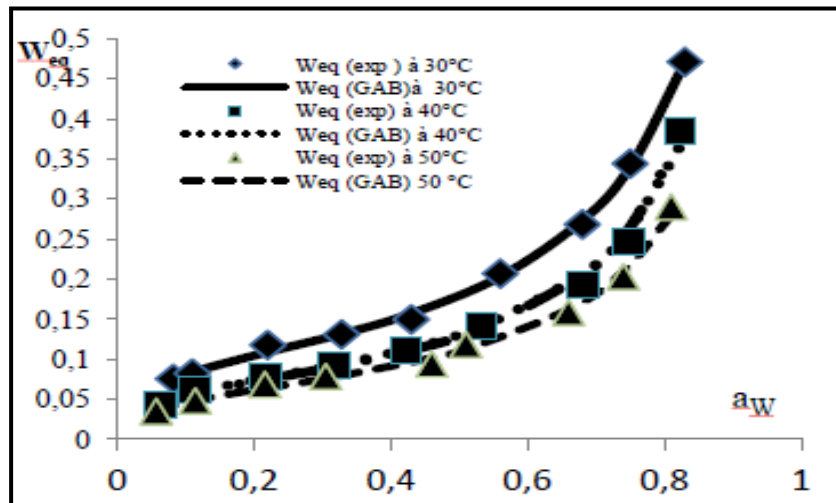


Figure-II-26: Isotherme de désorption de la viande de bœuf à différentes températures décrite par le modèle GAB [33]

J. Sana et B. Mohamed. 2015, ont déterminé les isothermes de désorption du phosphate di calcique par la méthode gravimétrique à températures de four (50, 60, 70 et 80°C) et pour un intervalle d'activité d'eau varié de 0.021 à 0.989. Ont remarqué que le model de Guggenheim, Anderson et de Boer (GAB) est le model le plus convenable pour leur étude. [34]

Les isothermes de désorption de la vapeur d'eau aux températures : 50, 60, 70 et 80 °C sur le phosphate di calcique sont portés sur les figures (II.27 à II.30).

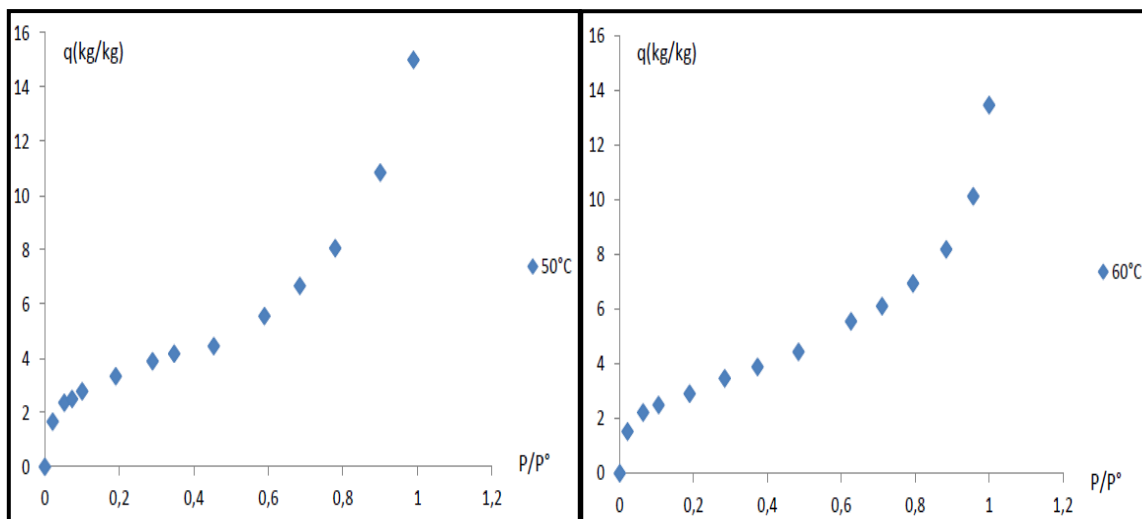


Figure-II-27:isotherme de désorption

T = 50 °C

Figure-II-28:isotherme de désorption

T = 60 °C

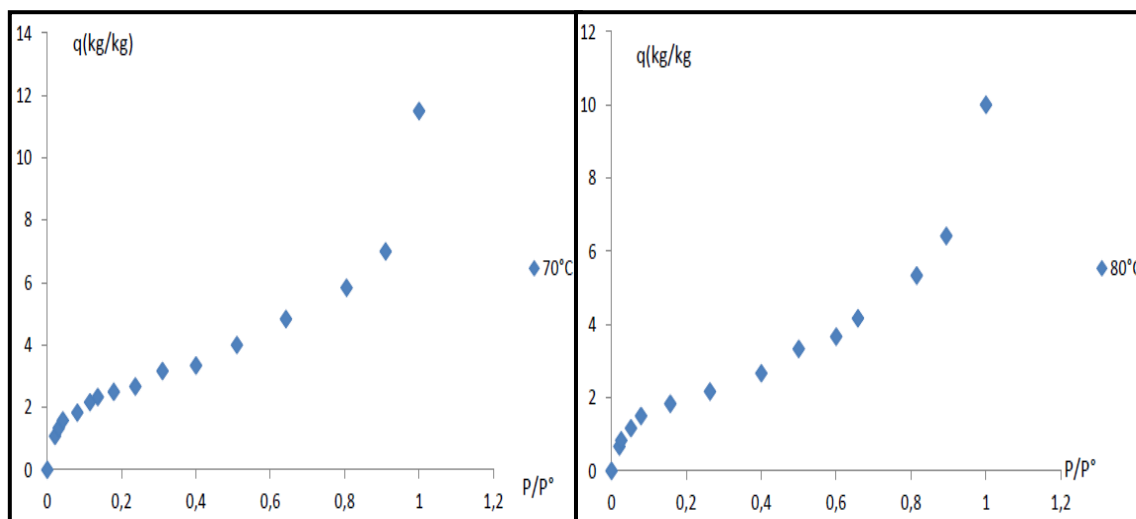


Figure-II-29:Isotherme de désorption

T = 70 °C [34]

Figure-II-30:isotherme de désorption

T = 80 °C [34]

Le travail d'A. Benseddik, et al. 2014 s'intéresse d'une part par la modélisation de l'isotherme de désorption, la connaissance fine de l'influence de la température sur le processus de désorption, et la prédiction du comportement hygroscopique lors du séchage

de la citrouille, et d'autre part par l'exploitation des résultats expérimentaux pour déterminer leurs chaleurs iso stériques de désorption. Neuf modèles mathématiques ont été utilisés, le modèle de Peleg à quatre paramètres optimise le lissage des points expérimentaux dans un domaine d'activité de l'eau assez important.

La figure ci- dessous présente les résultats expérimentaux de l'isotherme de désorption pour 30, 50 et 70°C, ainsi que les courbes de lissage de modèle de Peleg et GAB. [35]

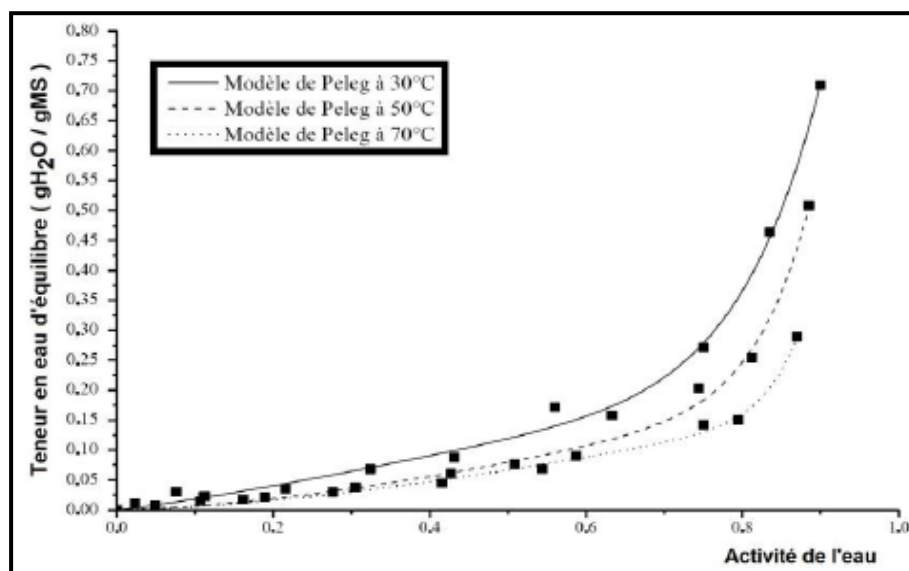


Figure-II-31: Courbes des isothermes de désorption expérimentales et prédites par le modèle de Peleg pour la citrouille [35]

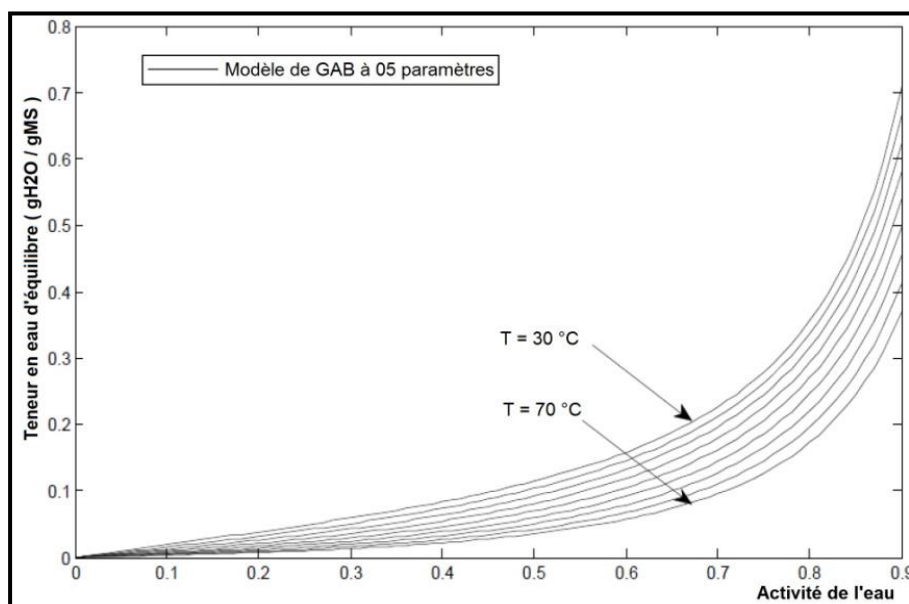


Figure-II-32: Isothermes de désorption de la citrouille décrite par le modèle de GAB [35]

S. JEBALI et S. Ben MABROUK. 2009, ont étudié les isothermes de sorption du blé pour deux températures 12 C° et 23 C°, ont montré que les courbes prennent une forme sigmoïdale.

Après l'interprétation et discussion des résultats expérimentaux et les résultats de modélisation ont déduit que le modèle de Guggenheim, Anderson et de Boer (GAB) est le plus représentatif. On a montré aussi que ni la vitesse de séchage, ni la température élevée (100°C) n'ont d'effet sur le pouvoir germinatif des grains séchés. [36]



Figure-II-33:Etat de grain conserve à 12°C

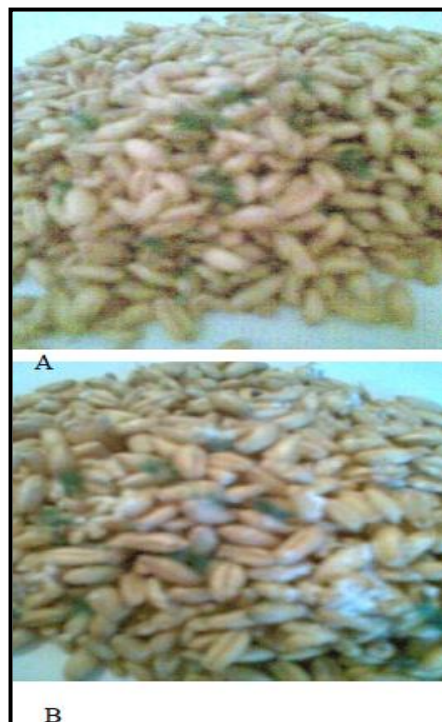


Figure-II-34:Etat de grain conserve à 23°C

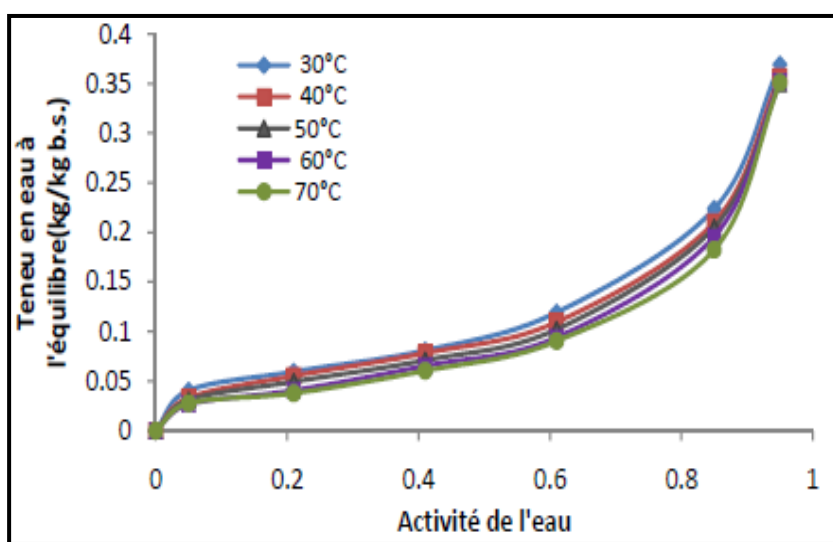


Figure-II-35:Isothermes de désorption de blé [36]

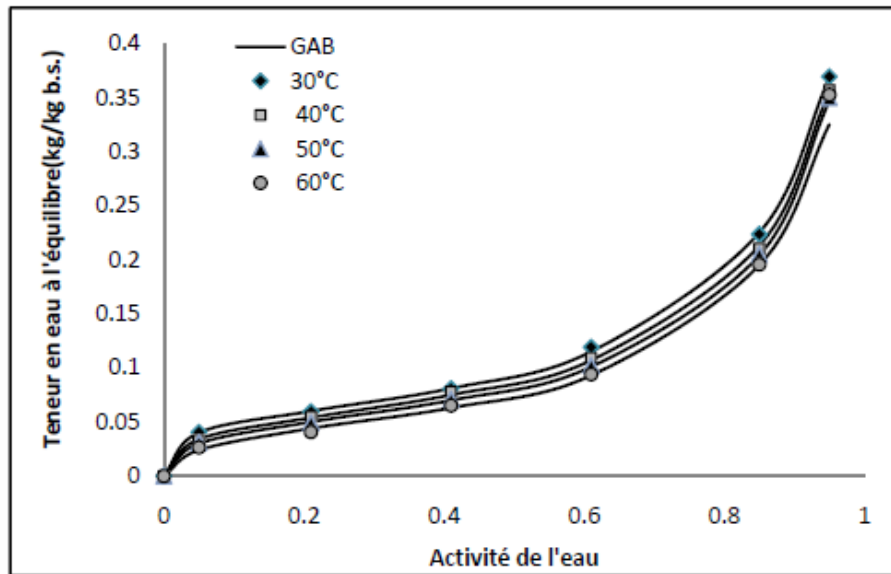


Figure-II-36:Modélisation des isothermes de désorption par le modèle de GAB [36]

L'étude expérimentale de **A. Lamharrar, et al.** 2007 est basée sur la détermination des isothermes de sorption de deux plantes *Artemisia arborescens* et la menthe pouliot (*Mentha pulegium*) pour les températures 30°C, 40°C et 50°C. Ils ont estimé les résultats expérimentaux par le modèle de GAB. [37]

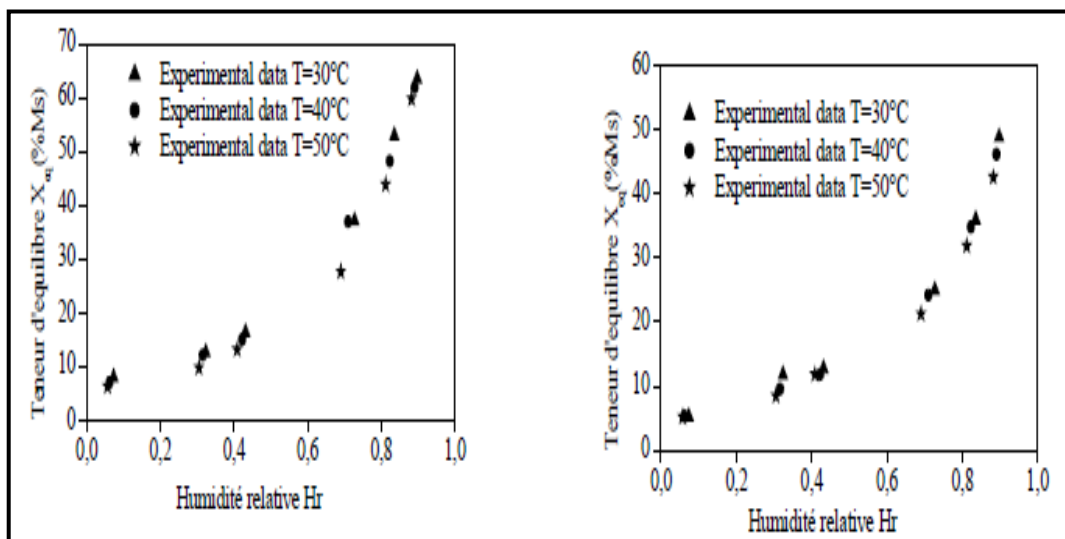


Figure-II-37:Isothermes de sorption de l'absinthe [37]

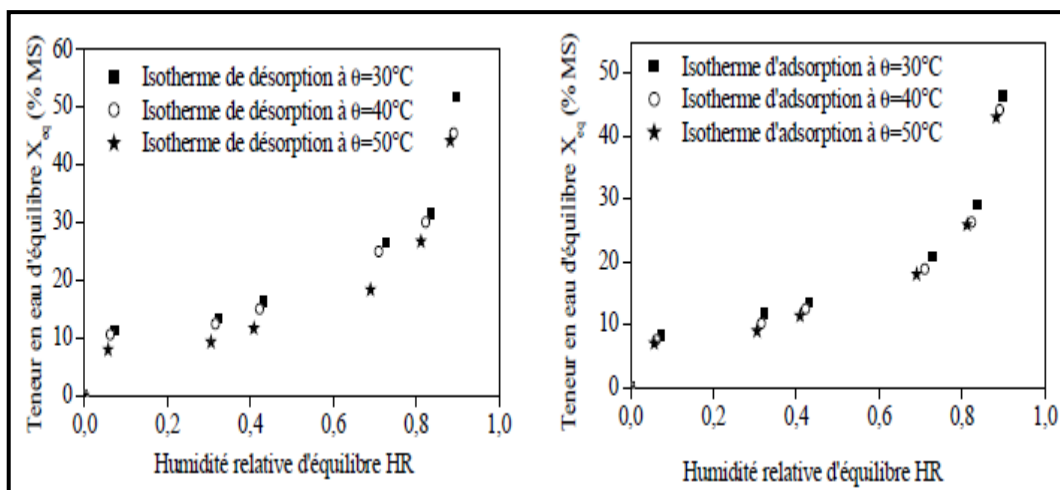


Figure-II-38: Isotherme de sorption de la menthe pouliot [37]

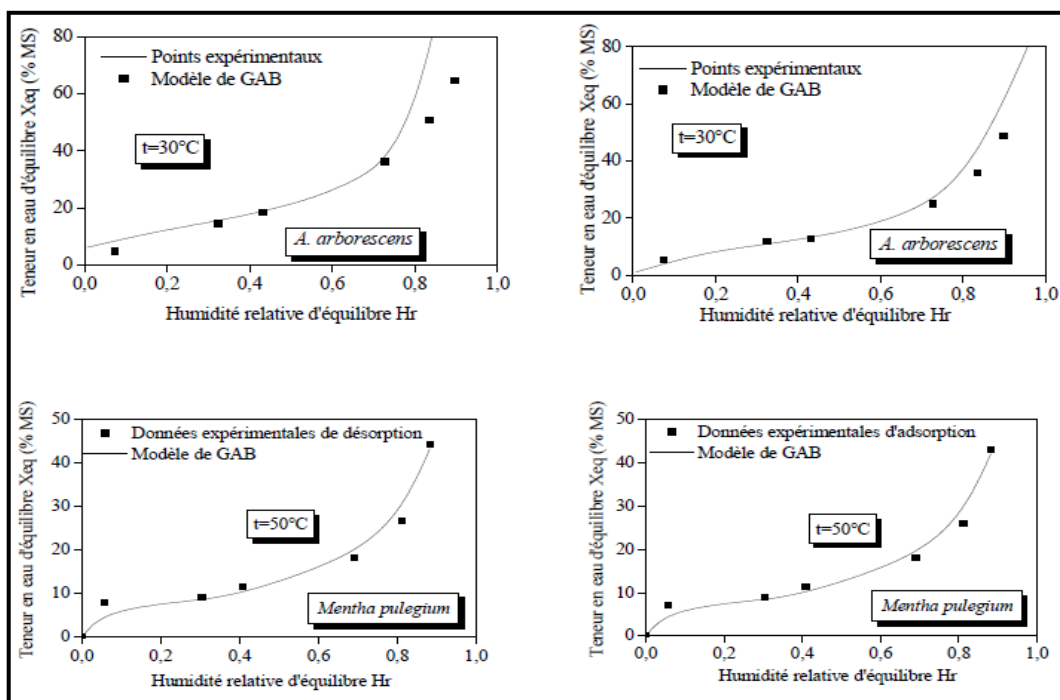


Figure-II-39: Comparaison entre les courbes expérimentales de sorption et prédites par le modèle de GAB pour les deux plantes [37]

N. Abdenouri, et al. 2008, ont effectué un travail sur les isothermes de sorption du lait en poudre, ont utilisé la méthode gravimétrique statique (figure. II.40) à 30, 40 et 50°C. Ils ont estimé les résultats par plusieurs modèles.

La figure II.41, présenté le dispositif expérimental utilisé pour déterminer les courbes de sorption du lait en poudre. [38]

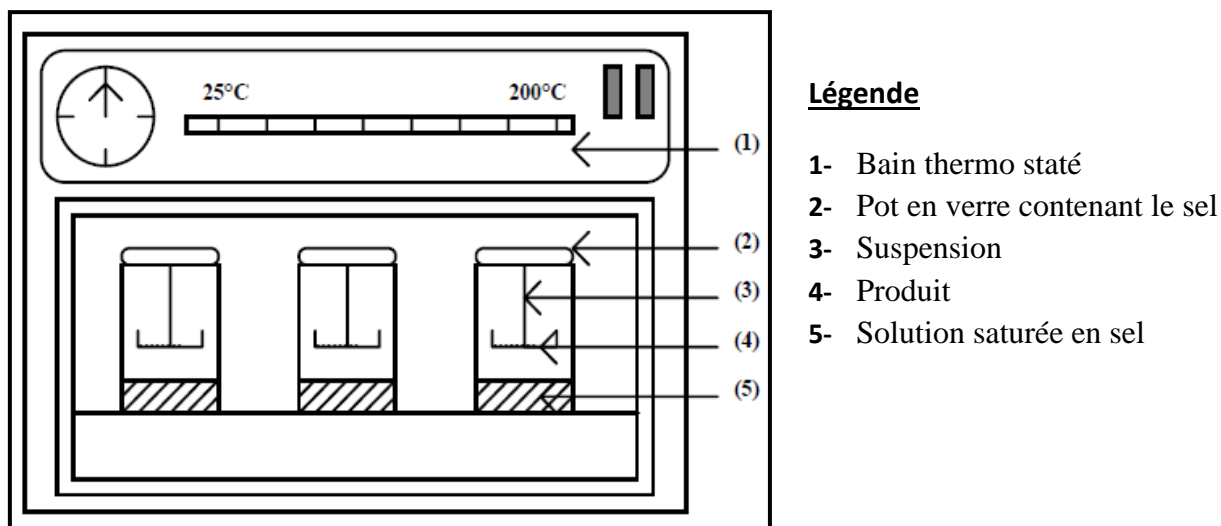


Figure-II-40:Dispositif expérimental de mesure des isothermes de sorption [38]

Les résultats expérimentaux obtenus et les courbes déduites des différentes équations sont représentés sur la figure. (II.42). à 30°C.

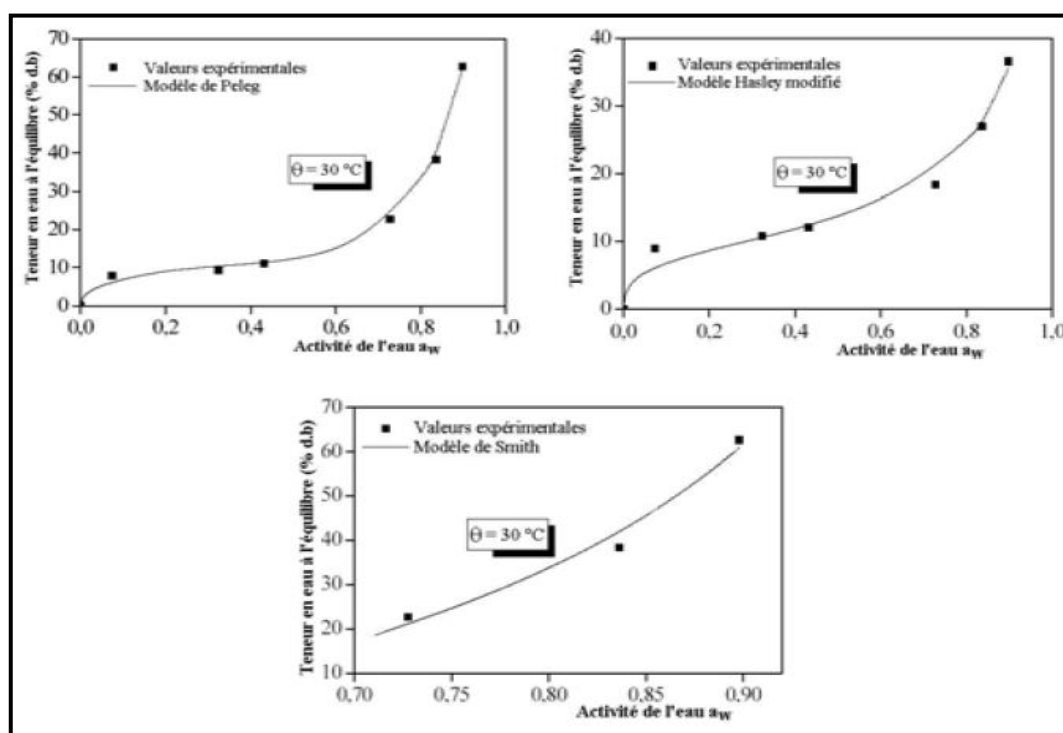


Figure-II-41:Les courbes des isothermes de sorption de la poudre de lait ajustée par des modèles empiriques [38]

S. Bennaceur, et al. 2013, ont déterminé expérimentalement les isothermes de désorption et d'adsorption de *Capparis Spinosa L* pour les températures 30C, 40C° et 50C° par la méthode gravimétrique. Ont estimé ensuite les résultats expérimentaux par deux modèles ; GAB (Figure II.45) et Peleg .Figure (II.46) [39]



Figure-II-42:Kabar (Capparis Spinosa.Ldans les montagnes de Kenadza (Béchar) [39]



Figure-II-43:Etuvage de type Binder 240 ED [39]

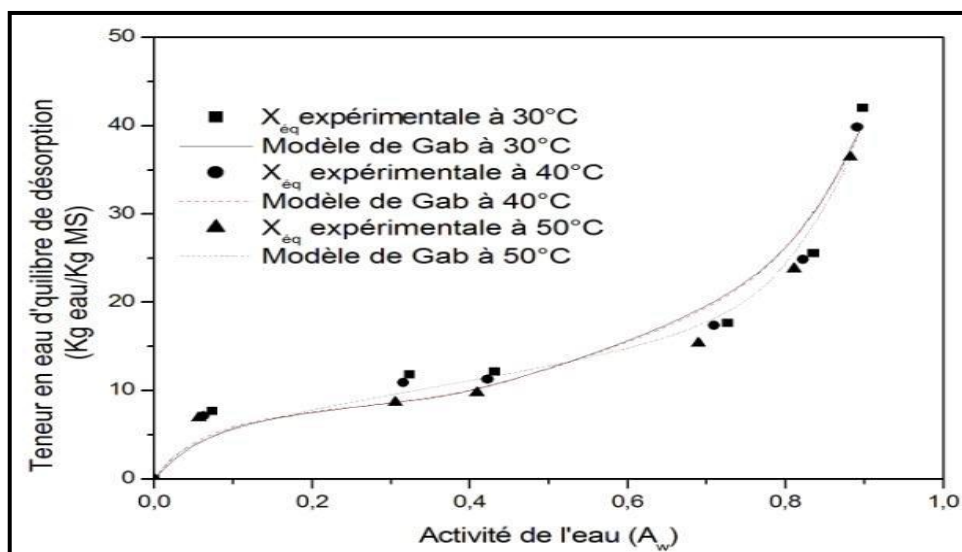


Figure-II-44:Isotherme de désorption des feuilles de Kabar (Capparis spinosa L.) décrite par l'équation de GAB [39]

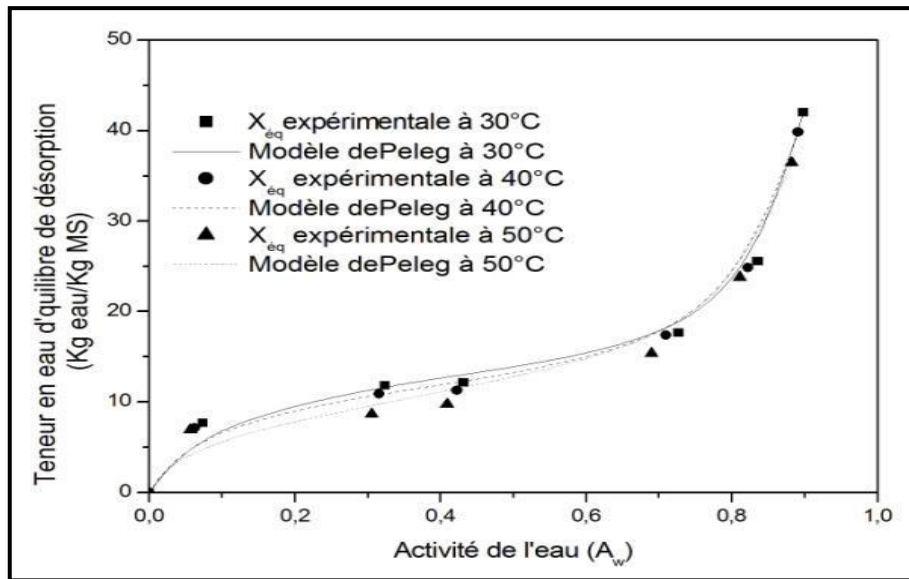


Figure-II-45: Isotherme de désorption des feuilles de Kabar (Capparis spinosa L.) décrite par l'équation de Peleg [39]

II.3. Conclusion

A partir de l'analyse bibliographique que nous avons effectuée on conclue que : Les isothermes de sorption sont d'une grande importance dans l'industrie agroalimentaire et notamment dans les opérations de séchage solaire, de stockage et de conservation des aliments. Leur connaissance donne des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique d'un produit du fait qu'elles permettent de connaître le domaine de stabilité du produit après séchage et renseignent ainsi sur les types d'eaux présentes dans le produit. [27]

On conclut aussi que la plupart des travaux expérimentaux effectués par les chercheurs ont été basés sur les méthodes gravimétriques (les solutions sels saturés) et les modèles les plus utilisés pour l'estimation des résultats expérimentaux sont le modèle B.E.T, Henderson et spécifiquement le modèle de G.A.B.

III.1.Introduction

L'isotherme de sorption indique la teneur en eau en fonction de l'humidité à une température constante donnée. 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 produits.

Les courbes d'isothermes de sorption donnent des informations sur la répartition et l'intensité des liaisons des molécules d'eau ainsi que leur disponibilité fonctionnelle dans les substances biochimiques et biologiques. La connaissance de ces courbes est indispensable pour étudier le séchage des produits. [17]

L'objectif de ce chapitre est la détermination expérimentale des isothermes désorptions de la menthe verte pour différentes températures par la méthode des solutions salines saturées. Les courbes de sorption expérimentales obtenues sont comparées par le modèle d'Henderson.

III.2.Protocole expérimentale

III.2.1 Préparations les solutions

III.2.1.1.Les solutions sels saturé utilisé

La première étape consiste à choisir les six sels saturés, ils sont les suivants : Figure (III.1)

- $MgCl_2$: Chlorure de Magnésium.
- $K_2 CO_3$: Carbonate de Potassium.
- KOH : Hydroxyde de [potassium](#).
- $NaNO_3$: [Nitrate](#) de [sodium](#).
- KCl : Chlorure de potassium.
- $BaCl_2$: Chlorure de baryum.



Figure-III-1:Les six sels utilisés

III.2.1.2. Pesée des sels

Afin de mesurer le poids de la solution que nous utilisons un équilibre particulier de sa haute précision comme le montre sur la figure(III.2) .Ensuite, est agitation des solutions salines et bien mélangé par le dispositif. Figure (III.3)



Figure-III-2:Pesée des sels



Figure-III-3:Agitation des solutions salines



Figure-III-4:Les six solutions salines préparées

III.2.2. Préparations des échantillons de la menthe verte

Les échantillons frais destinés au processus de désorption de la Menthe verte sont découpés en petites feuilles environ de mêmes masses. Chaque échantillon est, ensuite, suspendu dans le bocal (sur une grille perforée en acier inoxydable préparée à l'avance), au dessus de la solution saline, et reste donc dans une ambiance stabilisée en température et hygrométrie. Figures (III.5)

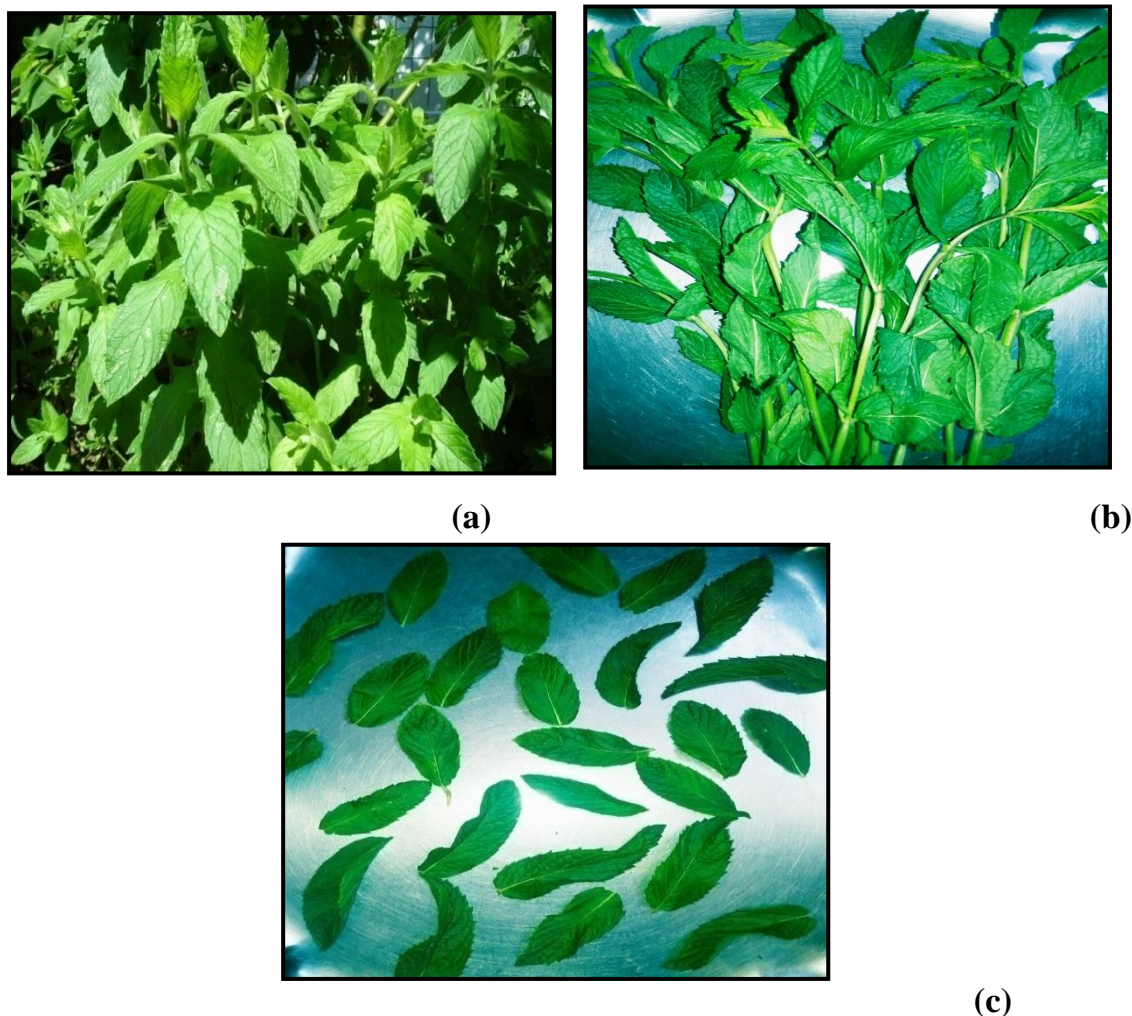


Figure-III-5:((a), (b), (c)) Préparations des échantillons de la menthe verte

III.2.3. Matériel et mode opératoire

Les isothermes de sorption sont décrites habituellement par une courbe rapportant la teneur en eau à l'équilibre X_{eq} du produit à étudier en fonction de l'humidité relative HR de l'atmosphère qui l'entoure, pour une température de travail fixe. Ceci peut se traduire par l'expression suivante :

$$X_{eq} = f(HR) \text{ pour } T = \text{constante} \quad (\text{III-1})$$

Ces courbes sont déterminées en suivant l'adsorption d'eau sur un échantillon du produit exposé à une atmosphère à humidité relative HR imposée. L'équilibre hygroscopique peut être réalisé par plusieurs méthodes dynamiques ou statiques [39]. Bien que les isothermes de sorption et de désorption aient des allures semblables, le principe permettant leur obtention est complètement différent. L'expérience montre que les courbes de sorption et de désorption présentent une hystérésis dans la plupart des cas [40].

Pour déterminer les isothermes de sorption de la Menthe verte, nous avons opté pour une méthode gravimétrique statique. Il s'agit de la méthode des solutions de sel saturé. En effet, les solutions salines même si elles exigent une durée très longue (un à deux mois) pour que l'équilibre thermodynamique se réalise, elles ont l'avantage de présenter un domaine plus restreint de variation de l'activité de l'eau, A_w , et sont beaucoup plus stables que les solutions d'acide sulfurique.

Le dispositif expérimental dont une unité est présentée sur la figure (III.6), consiste en une série de six bocaux de un litre chacun et à fermeture étanche. Chaque bocal est rempli au quart environ d'une solution de sel saturé et comporte un trépied porte-échantillon sur lequel est placé un flacon contenant environ 0,1 g de la menthe.

Les six bocaux contiennent chacun une solution saline différente (il s'agit des sels KOH, $MgCl_2$, K_2CO_3 , $NaNO_3$, KCl, $BaCl_2$), Avant de mettre le produit à étudier dans les bocaux, Ces derniers sont immergés dans un bain-marie thermostaté réglé à une température de consigne fixe. On laisse les bocaux dans le bain thermostaté pendant 24 heures pour que les solutions salines puissent s'adapter à une température de travail fixe, soit 35 °C

Les six échantillons subissent un séchage préalable dans une étuve réglée à une température voisine de 50 °C et ceci jusqu'à déshydratation maximale du produit. L'eau est rajoutée au bain thermostaté au fur et à mesure qu'une quantité s'évapore surtout pour les températures voisines de 50 °C. Pour déterminer les masses humides M_e du produit dans chaque bocal, les échantillons sont pesés tous les cinq jours car la durée d'atteinte de l'équilibre hygroscopique est très longue. Il faut noter que d'autres travaux [39,41] ont en effet confirmé que le temps nécessaire pour que l'équilibre hygroscopique soit atteint, varie entre un et deux mois. Cette durée dépend de la nature du produit, des solutions salines utilisées et de la température du bain thermostaté. Ceci justifierait peut être pourquoi la prise de pesée se fait tous les cinq jours. Chaque échantillon est ensuite placé dans le flacon, puis dans le bocal.

Dès que les masses des échantillons deviennent stationnaires, on arrête l'expérience et les échantillons sont pesés et placés dans une étuve réglée à environ 100 °C jusqu'à ce que leurs masses ne varient plus avec le temps (masse entre deux mesures successives devienne inférieure à 1%). L'expérience [41] montre que le temps de déshydratation maximale du produit varie entre cinq et huit heures selon la nature du produit et la température du bain thermostaté. Cette dernière opération a pour but de déterminer les masses sèches M_s des six échantillons. Ainsi, la différence de masse avant et après séchage dans l'étuve, nous permet d'avoir la teneur en eau d'équilibre, soit :

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (III-2)$$

On change la température du bain thermostaté et on reprend la même expérience pour les températures de travail $T = 20\text{ °C}$, 35 °C , 45 °C et 55 °C

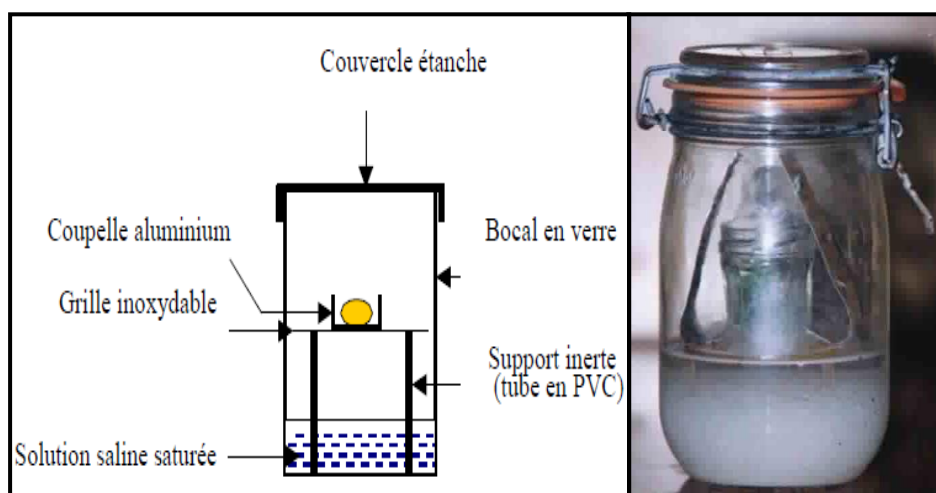


Figure-III-6: Unité du dispositif expérimental pour la détermination des isothermes de sorption

III.3. Préparation du dispositif expérimental

L'étuve qui est utilisé, en vérité, une enceinte climatique pour des conditions constantes à régulation programmable. (BINDER – APT. line TM KBF – ICH). L'enceinte est équipée d'un régulateur à écran et à microprocesseur avec technologie à deux canaux pour température et humidité ainsi que d'un affichage digital précis à 0.1 °C et à 0.1 .Hr. près. Les domaines d'ajustement sont donnés dans le tableau suivant : [43]

Température	-10°C à +100°C
Humidité	0% Hr à 95% Hr
Vitesse de ventilation	0% à 100%

Les expériences de désorption menées ont été réalisées à quatre températures différentes : 20°C, 35°C, 45 °C et 55 °C et à six valeurs d'humidité relative. Pour chaque température de travail, on a utilisé une étuve. Donc, dans chaque étuve, il y a six bocal hermétiques. Figure (III.7.)



Figure-III-7:Appareillage pour la détermination des isothermes de sorption

III.4.Résultats expérimentaux

A l'aide d'une balance électronique à affichage numérique, de précision 0,001 g, chaque échantillon est pesé régulièrement par intervalle de temps de cinq jours, jusqu'à l'obtention d'une masse fixe (masse humide du produit M_e) indiquant la fin de l'échange entre le produit et l'air ambiant. Ceci caractérise la position d'équilibre hygroscopique.

Les teneurs en eau d'équilibre X_{eq} de la menthe obtenues pour quatre valeurs de la température de travail (25 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C) sont présentées sur le (Tableau III.1) qui regroupe également la valeur standard des humidités relatives HR de l'air données pour les six sels en fonction de la température.

Tableau-III-1-Les teneurs en eau à l'équilibre et X_{eq} obtenue pour six sels pour les quatre températures de travail.

T (°C)	$T = 20^{\circ}C$		$T = 35^{\circ}C$		$T = 45^{\circ}C$		$T=55^{\circ}C$	
	HR%	X_{eq}	HR%	X_{eq}	HR%	X_{eq}	HR%	X_{eq}
KOH	16,478	0,0825	16,457	0,0674	10,769	0,041	9,974	0,0238
MgCl₂	32,344	0,0971	32,434	0,0832	31,890	0,074	32,434	0,0587

K_2CO_3	45,595	0,1334	45,964	0,1183	44,604	0,102	46,235	0,0804
$NaNO_3$	74,926	0,2187	75,198	0,2026	74,926	0,186	75,198	0,1649
KCl	88,205	0,3332	88,728	0,3175	90,359	0,301	91,447	0,2783
$BaCl_2$	94,416	0,3515	94,688	0,3393	94,960	0,329	95,775	0,3059

Nous étudions l'influence de la température de travail sur les courbes d'équilibre de la variété de la menthe. Les figures représentent les points expérimentaux (HR, Xeq) de la menthe obtenus par la méthode des sels saturés pour quatre températures travail.

III.4.1. Présentation graphique des résultats expérimentaux

L'équilibre hygroscopique pour la désorption de la menthe verte est réalisé au bout d'un mois. Les figures (III (8 à 12)) montrent que les isothermes de désorption prennent une allure sigmoïdale. Ceci est en concordance avec le comportement des autres plantes et produits médicaux.

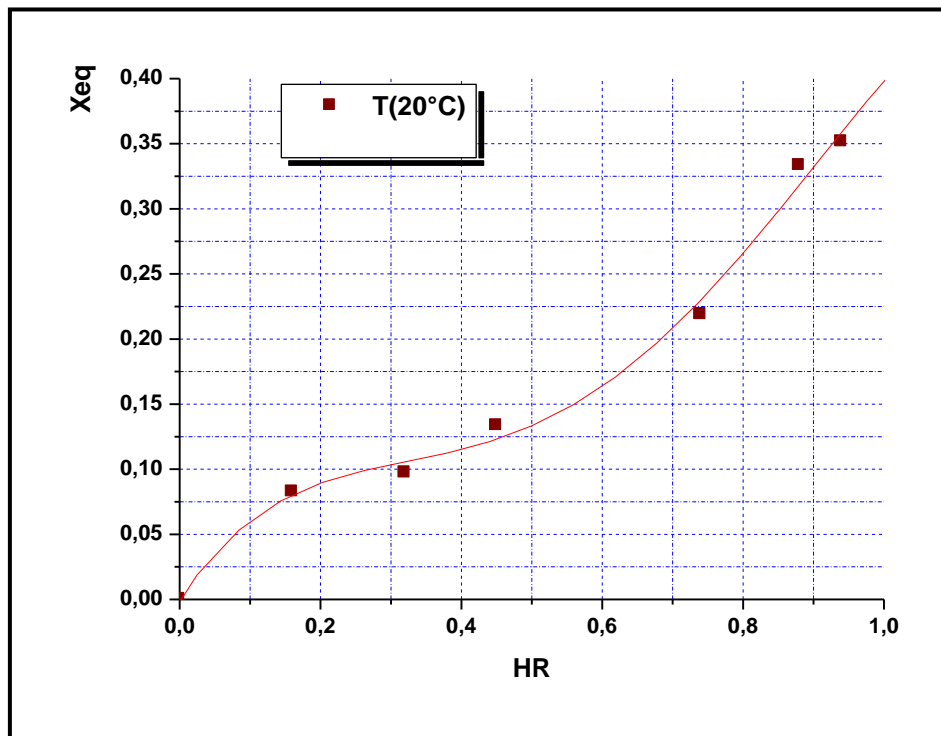


Figure-III-8: Isotherme de sorption de la menthe pour $T = 20\text{ °C}$

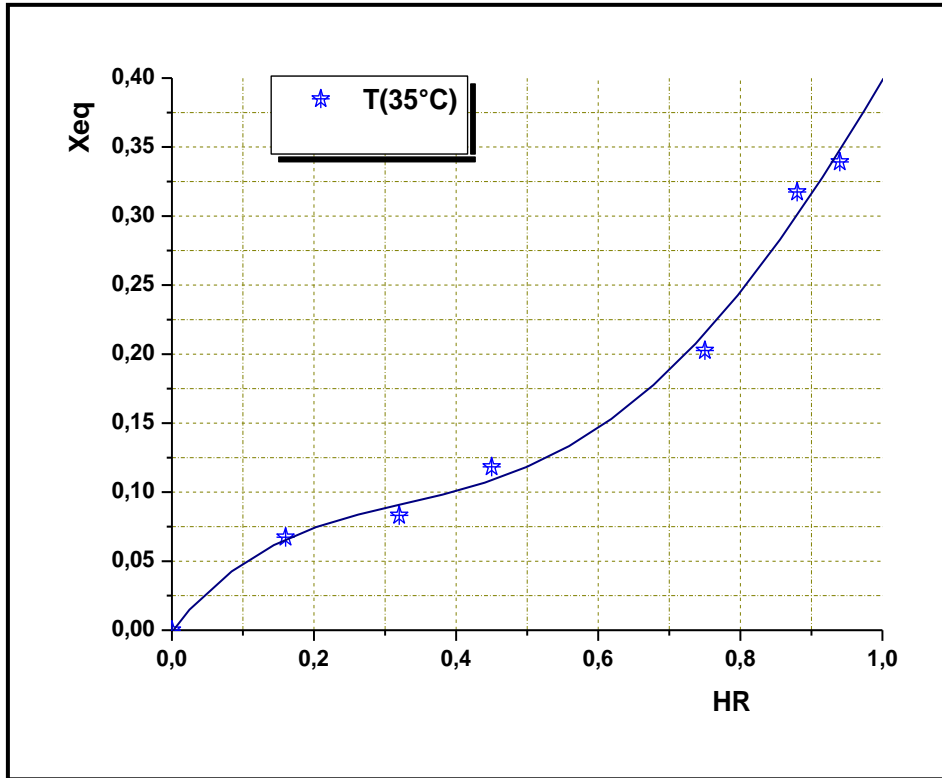


Figure-III-9: Isotherme de sorption de la menthe pour $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$

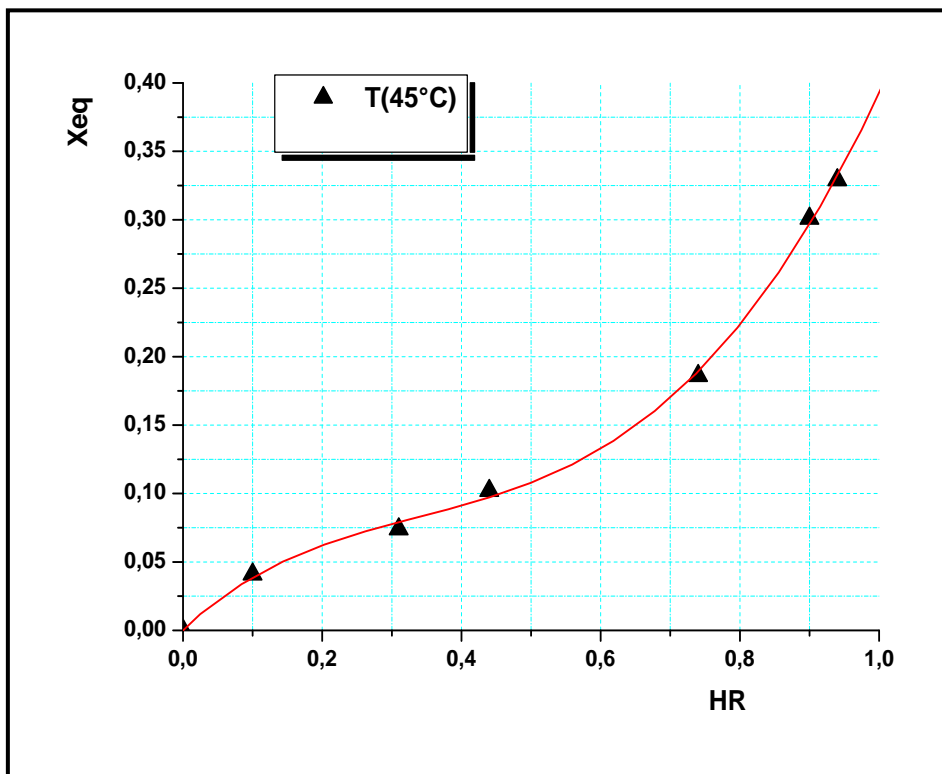


Figure-III-10: Isotherme de sorption de la menthe pour $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$

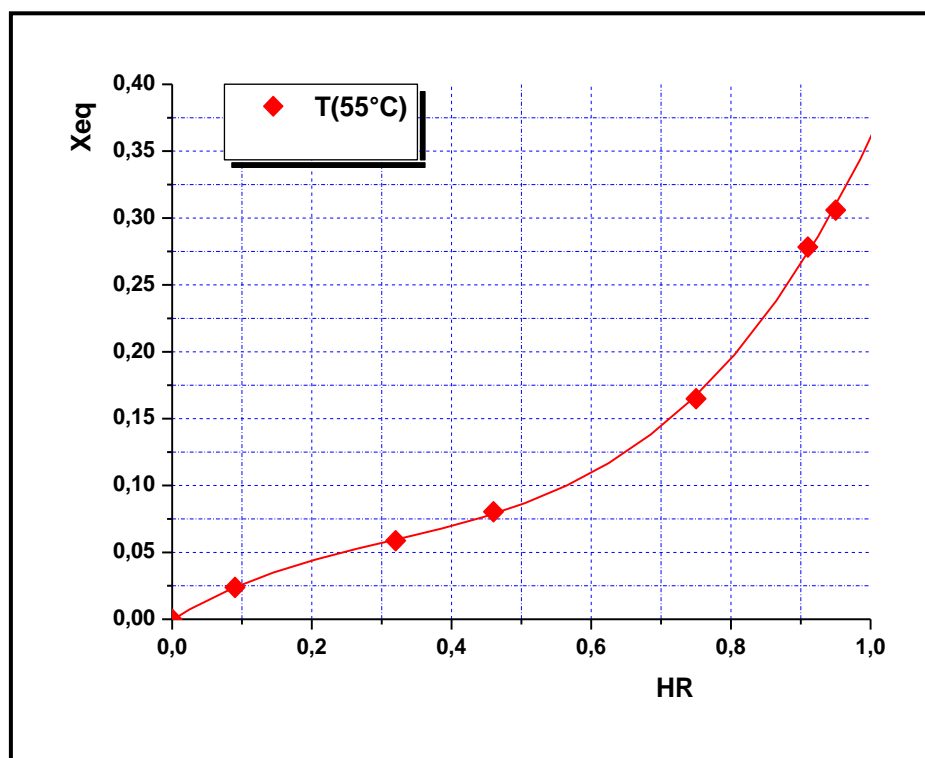


Figure-III-11: Isotherme de sorption de la menthe pour $T = 55\text{ °C}$

III.4.2. Evolution de X_{eq} en fonction de HR pour les quatre températures

La figure (III.12) rapporte la distribution des points expérimentaux pour les quatre températures de travail. Cette figure illustre la variation de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} en fonction de l'humidité relative HR de l'atmosphère entourant le produit. Notons que lorsque l'équilibre hygroscopique est atteint, les échanges d'eau entre l'air et le produit s'équilibrent et l'activité de l'eau A_w devient identique à l'humidité relative HR .

Pour une même humidité relative, la quantité d'eau fixée diminue lorsque la température augmente.

Autrement dit, la teneur en eau à l'équilibre de la Menthe vert diminue lorsque la température augmente pour une même valeur de l'activité de l'eau. Ceci est observé pour les activités de l'eau supérieure à 0.6.

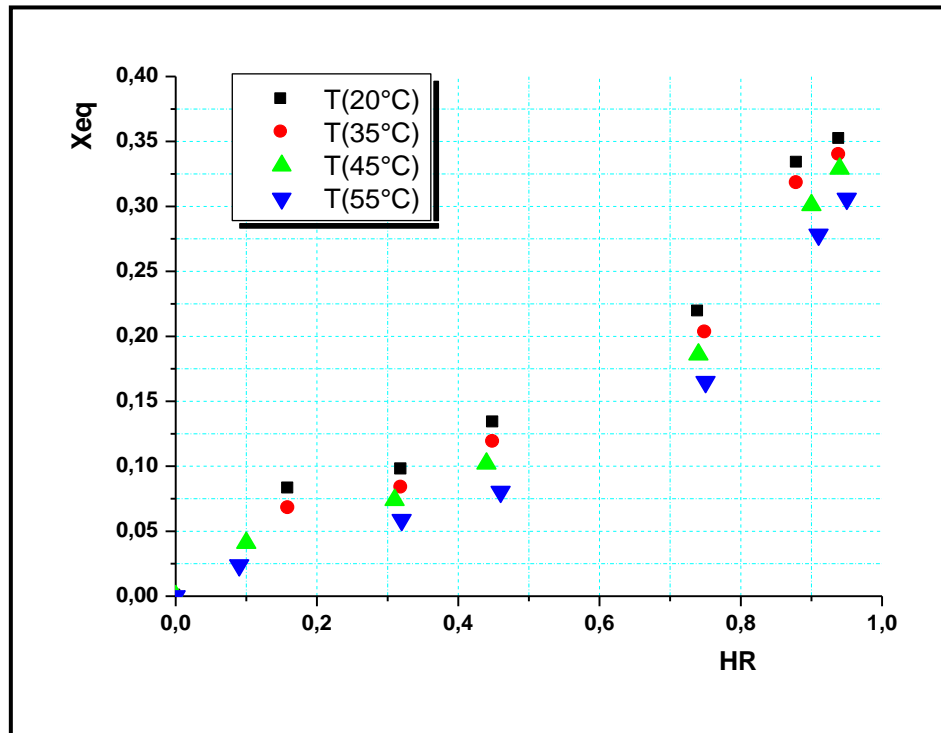


Figure-III-12: Isothermes de sorption de la menthe (points expérimentaux)

III.5. Estimation des résultats expérimentaux par le modèle d'Henderson

III.5.1. Le lissage polynômial

Un lissage polynômial de ces points expérimentaux, permet de décrire les isothermes de sorption de la menthe pour une température donnée. Les polynômes d'interpolation dont le degré a été optimisé, s'expriment par les équations algébriques suivantes :

(III-3)

Pour trouver les coefficients a_0 , a_1 , a_2 , a_3 et a_4 on utilise les données qu'on a trouvé dans

le tableau (III.1), on obtient un système d'équations.

➤ **Cas d'une température $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$.**

On obtient le système d'équations suivant :

Pour résoudre ce système on a utilisé la méthode d'élimination de Gauss avec un code de MATLAB.

Les solutions de ce système sont :

On remplace les coefficients : a_0, a_1, a_2, a_3 et a_4 dans l'équation (III.3) on trouve la corrélation suivante.

(III-4)

Pour les corrélations concernant les températures $T = 35\text{ °C}$, 45 °C et 55 °C on suit les mêmes étapes précédentes.

➤ **Cas d'une température $T = 35\text{ °C}$.**

(III-5)

➤ **Cas d'une température $T = 45\text{ °C}$.**

(III-6)

➤ **Cas d'une température $T = 55\text{ °C}$.**

(III-7)

III.5.2. Modélisation des résultats expérimentaux

Pour modéliser ces isothermes, de nombreuses corrélations empiriques existent dans la littérature scientifique. Afin de mieux tenir compte de l'influence de la température sur l'équilibre hygroscopique, et pouvoir réaliser des interpolations, nous utilisons le modèle d'Henderson. En effet, le choix de ce modèle se justifie par le fait qu'il a l'avantage de décrire l'ensemble des isothermes de sorption pour une plage plus large de la température et de l'humidité relative du milieu entourant le produit. Ceci n'est pas le cas du modèle de Guggenheim, Anderson et Boer (G.A.B) ou du modèle de Brunauer, Emmet et Teller (B.E.T) qui est valable uniquement pour les faibles valeurs de l'humidité relative HR.

La corrélation exprimant le modèle d'Henderson s'écrit :

$$X_{eq}(T, HR) = \left[\frac{-\ln(1 - HR)}{k(1.8T + 492)} \right]^{\frac{1}{n}} \tag{III - 8}$$

Cette équation permet de calculer les isothermes de désorption pour n'importe quelle température de travail T , les constantes k et n de l'équation de Henderson dépend de la température et des caractéristiques du produit.

Pour estimer les résultats expérimentaux on utilise l'équation de Henderson (III.8) et les équations algébrique de lissage (III.4), (III.5), (III.6) et (III.7).

➤ **Cas d'une température $T = 35\text{ °C}$.**

D'après l'équation (III.8) on obtient.

$$\tag{III-9}$$

$$\tag{III-10}$$

L'équation (III.10) : c'est une équation d'une droite de régression telle que :

$$\tag{III-11}$$

$$\tag{III-12}$$

$$\tag{III-13}$$

$$\tag{III-14}$$

Pour $T = 35\text{ °C}$

$0 < HR < 0.35$

Pour $(HR = 0.18)$; $X_{eq} =$ 1 0.070

Pour $(HR = 0.31)$; $X_{eq} = 0.089$ 2

$n=2.608$, $k=0.367$

Tableau-III-2-Les résultats expérimentaux utilisé pour trouver les coefficients n et k

T (°C)	HR	X_{eq} (Expérimentale)	domaine de HR
20°C	0.15	0.077	$0 < HR < 0,3$
	0.25	0.097	
	0.50	0.130	$0,4 < HR < 1$
	0.80	0.260	
35°C	0.18	0.070	$0 < HR < 0,35$
	0.31	0.089	
	0.60	0.146	$0,35 < HR < 1$
	0.90	0.319	
45°C	0.19	0.060	$0 < HR < 0,35$
	0.33	0.081	
	0.64	0.145	$0,5 < HR < 1$
	0.93	0.322	
55°C	0.16	0.037	$0 < HR < 0,35$
	0.30	0.057	
	0.67	0.132	$0,59 < HR < 1$
	0.95	0.309	

Tableau-III-3-Les valeurs des constants k et n pour les températures 20°C, 35°C, 45°C et 55°C

T (°C)	n	k	domaine de HR
20°C	2.486	0.180	$0 < HR < 0,3$
	1.075	0.0117	$0,4 < HR < 1$
35°C	2.608	0.367	$0 < HR < 0,35$
	1.179	0.0159	$0,35 < HR < 1$

45°C	2.153	0.156	0 < HR < 0,35
	1.347	0.0213	0,5 < HR < 1
55°C	1.657	0.0694	0 < HR < 0,35
	1.169	0.020	0,59 < HR < 1

On remplace les valeurs de n et k dans l'équation de Henderson

$$X_{eq}(T, HR) = \left[\frac{-\ln(1 - HR)}{k(1.8T + 492)} \right]^{\frac{1}{n}}$$

On trouve des nouvelles valeurs pour Xeq et HR (voire le tableau III.4)

Tableau-III-4-Les teneurs en eau à l'équilibre (Xeq) obtenues pour six sels et les humidités relatives HR pour les quatre températures obtenues par le modèle d'Henderson

T (°C)	n	K	HR	Xeq (Henderson)	domaine de HR
20°C	2.486	0.180	0.15	0.077	0 < HR < 0,3
			0.25	0.096	
	1.075	0.0117	0.50	0.130	0,4 < HR < 1
			0.80	0.286	
35°C	2.608	0.367	0.18	0.070	0 < HR < 0,35
			0.31	0.089	
	1.179	0.0159	0.60	0.146	0,35 < HR < 1
			0.90	0.320	
45°C	2.153	0.156	0.19	0.060	0 < HR < 0,35
			0.33	0.081	
	1.347	0.0213	0.64	0.158	0,5 < HR < 1
			0.93	0.323	
55°C	1.657	0.0694	0.16	0.037	0 < HR < 0,35
			0.30	0.057	
	1.169	0.020	0.67	0.132	0,59 < HR < 1
			0.95	0.309	

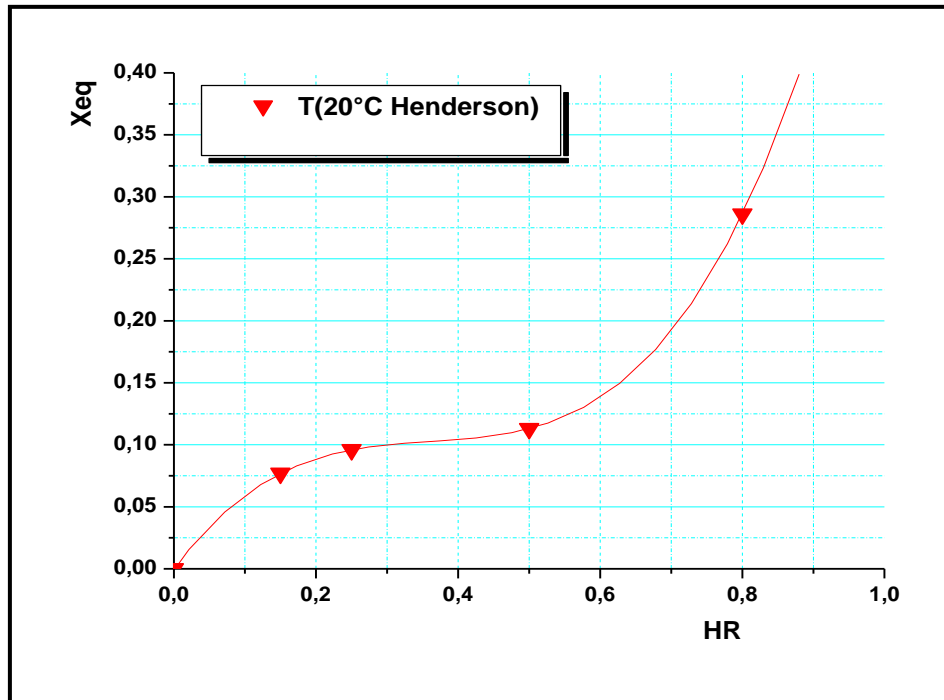


Figure-III-13: Isotherme de sorption de la menthe calculée à partir du modèle d'Henderson à T = 20 °C

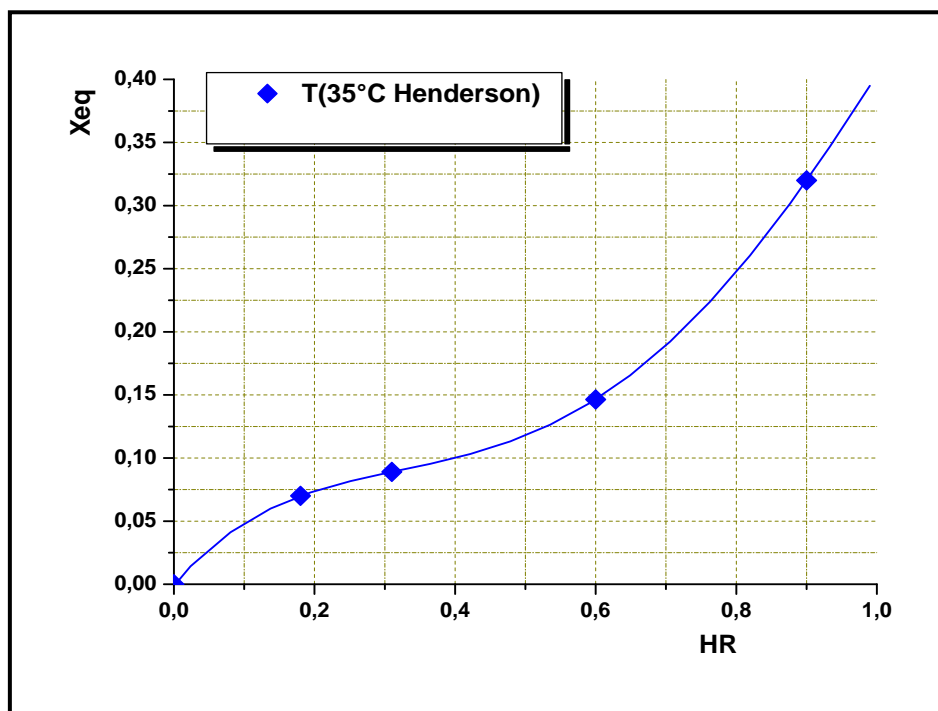


Figure-III-14: Isotherme de sorption de la menthe calculée à partir du modèle d'Henderson à T = 35 °C

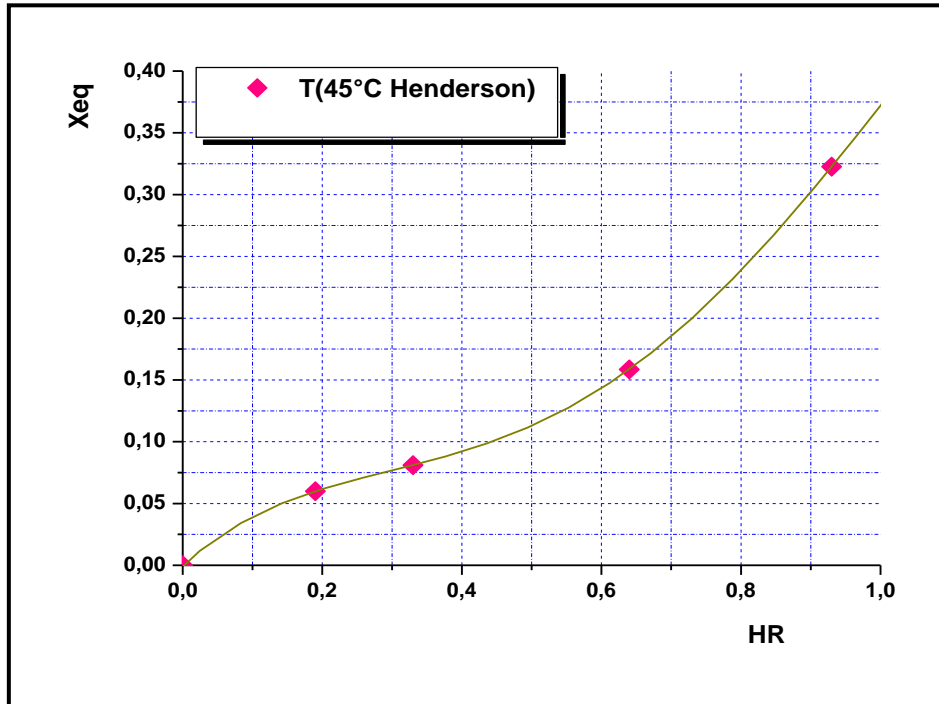


Figure-III-15: Isotherme de sorption de la menthe calculée à partir du modèle d'Henderson à T = 45 °C

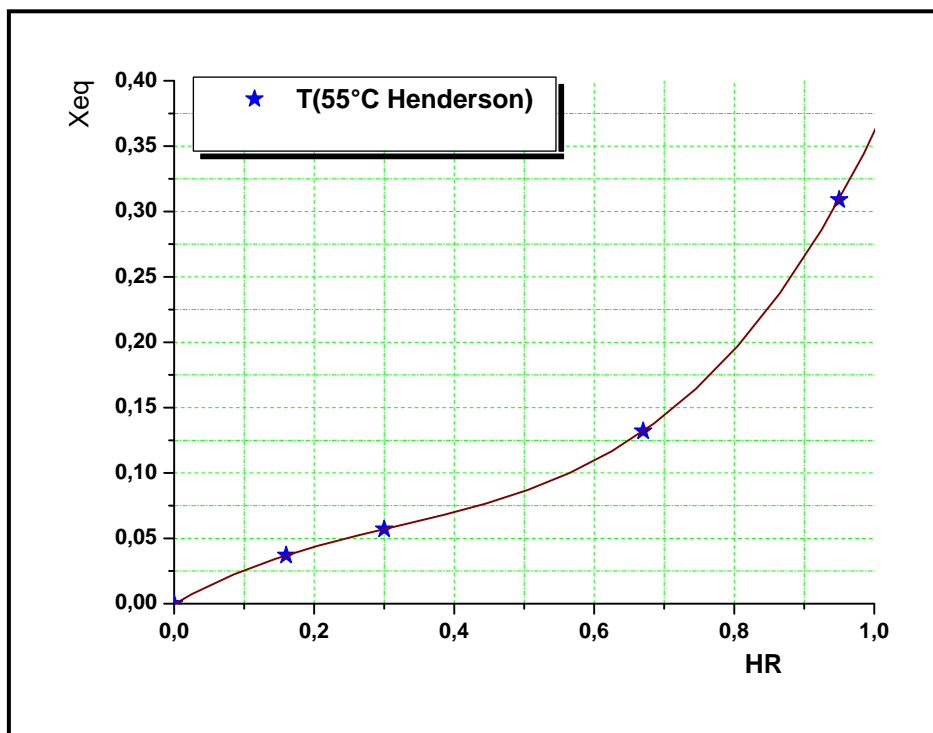


Figure-III-16: Isotherme de sorption de la menthe calculée à partir du modèle d'Henderson à T = 55 °C

III.5.3. Evolution avec la température (modèle d'Henderson)

Nous avons approché les points expérimentaux par le modèle d'Henderson qui décrit l'ensemble des isothermes pour toutes les gammes d'humidité et de température utilisées. Figure (III.17).

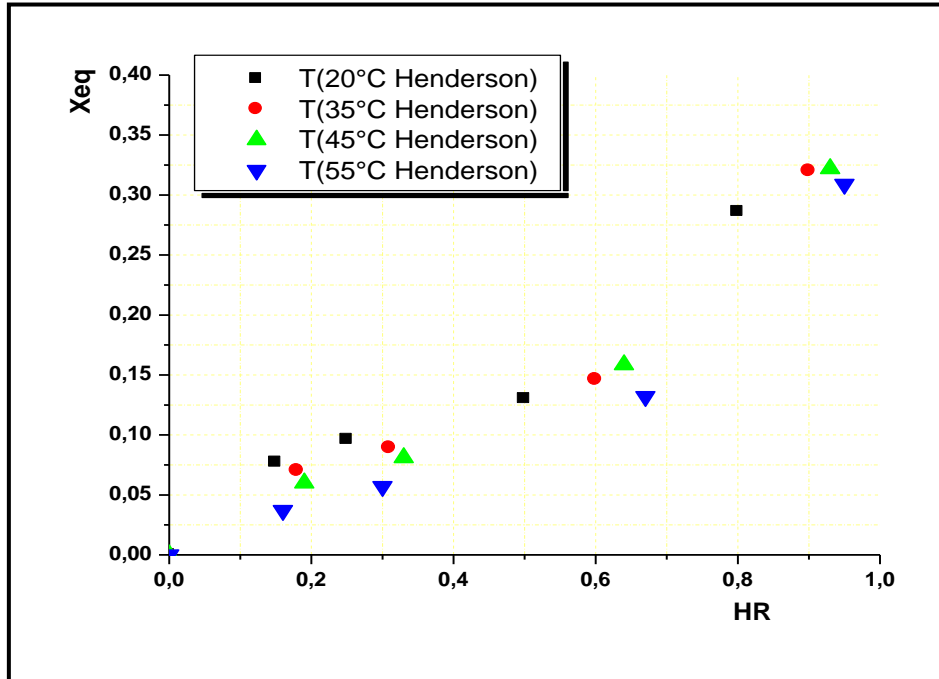


Figure-III-17: Isothermes de sorption de la menthe calculée à partir du modèle d'Henderson pour différentes températures

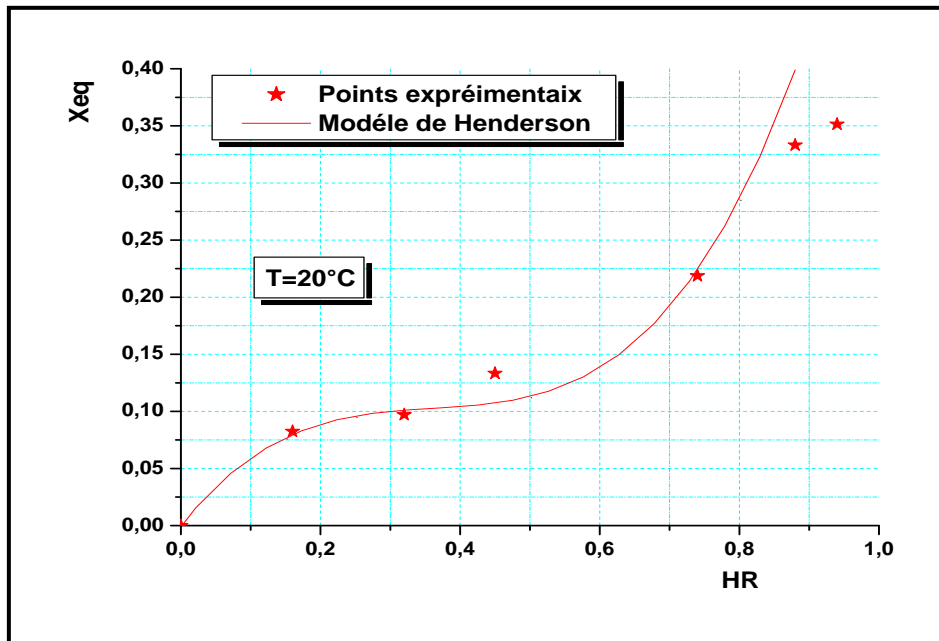


Figure-III-18: Comparaison entre les points expérimentaux de sorption et le modèle d'Henderson pour T=20°C

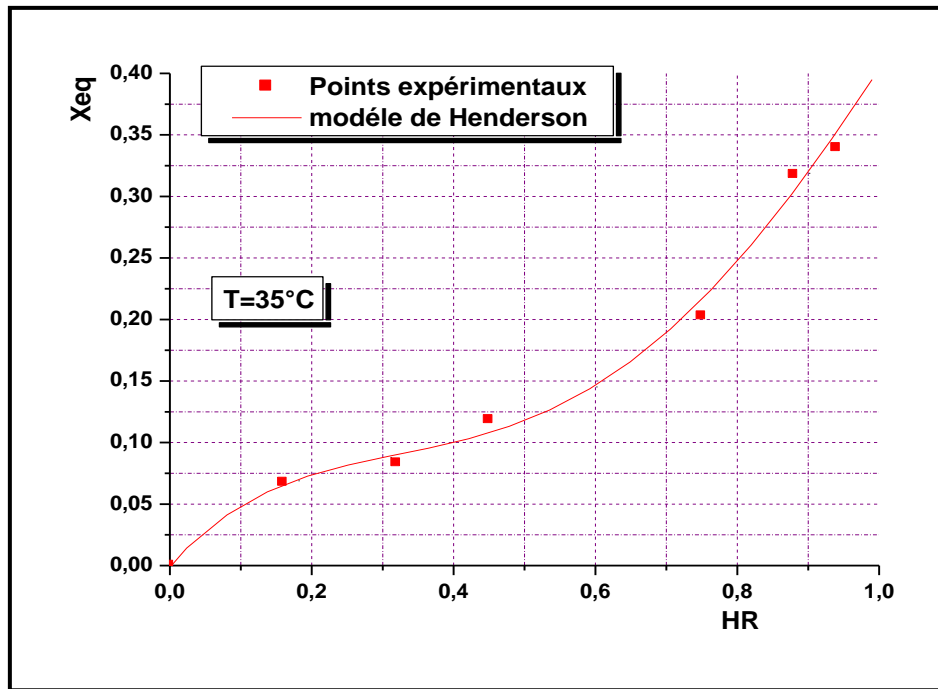


Figure-III-19: Comparaison entre les points expérimentaux de sorption par le modèle d'Henderson $T=35^{\circ}\text{C}$

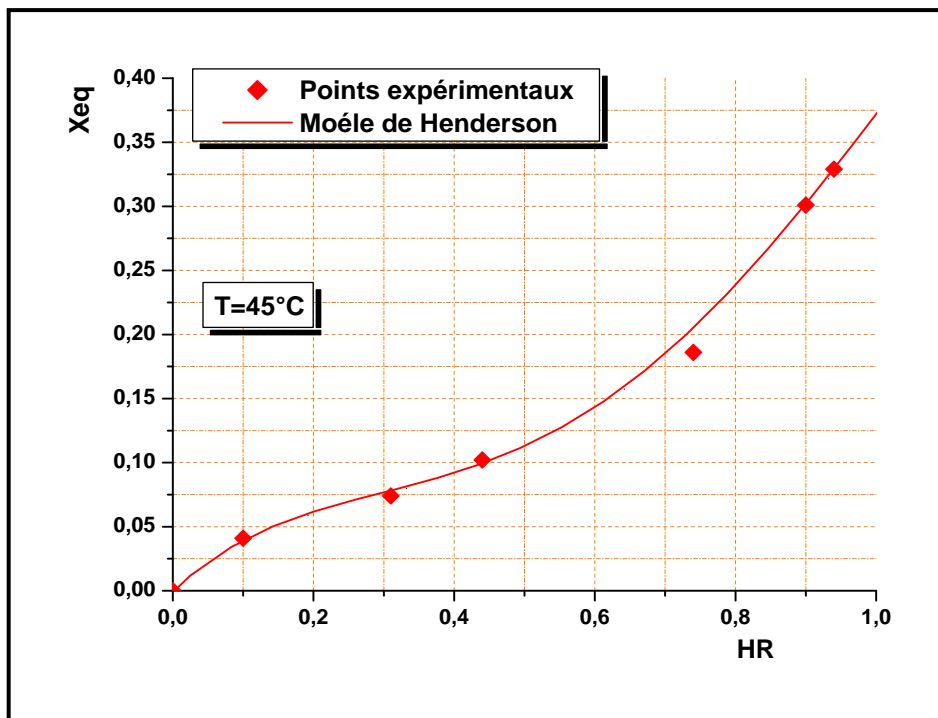


Figure-III-20: Comparaison entre les points expérimentaux de sorption par le modèle d'Henderson $T=45^{\circ}\text{C}$

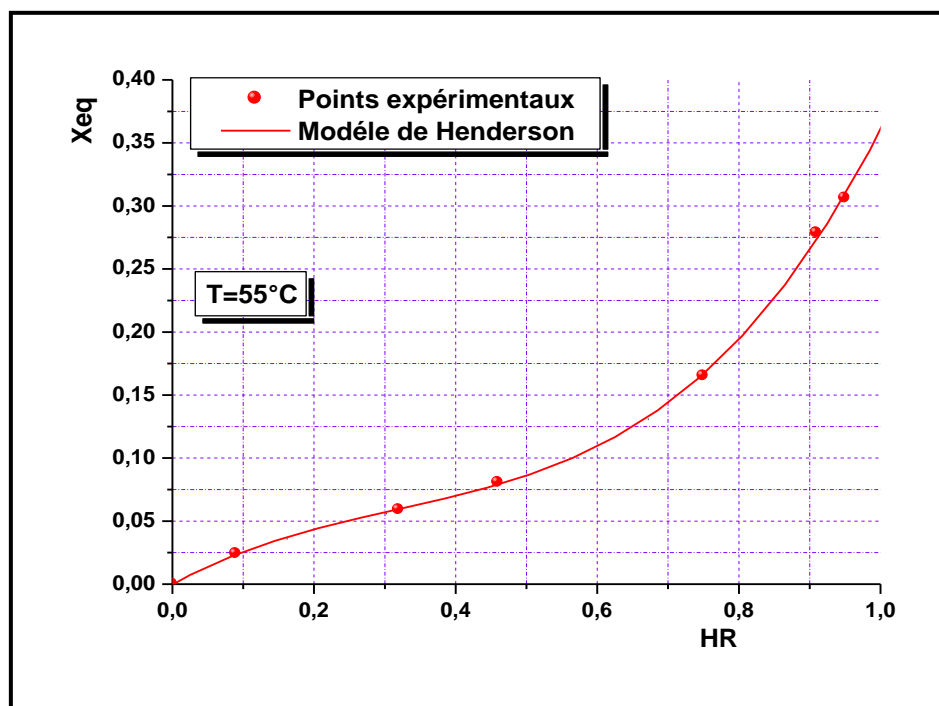


Figure-III-21: Comparaison entre les points expérimentaux de sorption par le modèle d'Henderson T=55°C

III.6. Conclusion

A partir de l'étude expérimentale que nous avons réalisé, nous pouvons confirmer que :

- La détermination des isothermes de sorption des plantes aromatiques constitue un passage incontournable pour la compréhension des mécanismes de déshydratation de la feuille de menthe par exemple.
- Les isothermes de désorption prennent une allure sigmoïdale. Ceci est en concordance avec le comportement des autres plantes et produits médicaux.
- Lorsque l'équilibre hygroscopique est atteint, les échanges d'eau entre l'air et le produit s'équilibrent et l'activité de l'eau A_w devient identique à l'humidité relative HR.
- L'utilisation du modèle d'Henderson se justifie par le fait qu'il a l'avantage de décrire l'ensemble des isothermes de sorption pour une plage plus large de la température et de l'humidité relative du milieu entourant le produit. Ceci n'est pas le cas du modèle de Guggenheim, Anderson et Boer (G.A.B) ou du modèle de Brunauer, Emmet et Teller (B.E.T) qui est valable uniquement pour les faibles valeurs de l'humidité relative HR.
- La présentation graphique des résultats expérimentaux est identique avec la présentation obtenue par le modèle d'Henderson.

• ***Conclusion général***

- La détermination des isothermes de sorption des plantes aromatiques et médicinales constitue un passage incontournable pour la compréhension des mécanismes de déshydratation de la feuille de menthe par exemple.
- Les isothermes de sorption donnent des informations précieuses pour l'industrie agro-alimentaire. En effet, pour connaître les paramètres de stockage de la menthe à une certaine température de conservation, il suffit de se référer aux courbes de sorption qui fournissent les valeurs de la teneur en eau d'équilibre du produit et l'humidité relative de l'atmosphère qui l'entoure et ce, pour une température de travail donnée.
- L'objectif de ce travail est la détermination expérimentale des courbes de désorption de la menthe verte pour quatre températures différentes de travail à savoir 20°C, 35°C, 45°C et 55 °C par la méthode des solutions salines saturées, estimé par le modèle d'Henderson.
- Notre modeste étude nous a permis de conclure en constatant, à travers les travaux antérieurs théoriques et expérimentaux, que la détermination de ces courbes est indispensable dans le domaine du séchage et que la compréhension des équilibres entre l'air asséchant et le produit humide à sécher est impérative.
- Lors de notre approche expérimentale, nous avons pu constater l'importance de la métrologie et de la manière avec laquelle nous devons procéder, dans le but d'arriver à des résultats avec un taux d'erreur minime et arriver, par conséquent, aux explications justes des phénomènes physiques.
- Les quatre courbes de la désorption de la menthe verte étaient en bonne concordance avec celles trouvées dans beaucoup de travaux scientifiques précédents. En effet, la teneur en eau à l'équilibre est inversement proportionnelle à la température, cela était très clair sur les isothermes, quand l'activité de l'eau dépasse 0.6.
- Enfin le lissage des points expérimentaux nous a permis de trouver des équations expérimentales caractérisant la désorption de la menthe verte à 20 °C, 35 °C, 45 °C, et 55°C.
- Nous projetons dans le futur de travailler avec d'autres températures et en utilisant d'autres sels en plus des sels utilisés, et cela pour décrire la désorption de la menthe verte d'une manière plus exacte et pourquoi pas valider quelques modèles

mathématiques cités dans le chapitre-I- aux résultats trouvés par l'expérience, ou conclu notre propre équation mathématique.

Référence Bibliographique

- [1] **Document Technique**, 'Amélioration de la Qualité et du Positionnement des Plantes Aromatiques et Médicinales', Etude de l'Agence de Promotion des Investissements Agricoles (APIA), 2013
- [2] **H. Bizot, N. Riou et J.-L. Multon**, "Guide pratique pour la détermination des isothermes de sorption et de l'activité de l'eau", Sciences des Aliments, numéro hors série, 1987.
- [3] **M. Daguenet**, "Les séchoirs solaires : théorie et pratique ", Publication de l'UNESCO, Paris, France (1985).
- [4] **A. Charreau, et R. Cavaille**, 1991. Séchage théorie et pratique Technique de l'Ingénieur, génie des procédés, 2480-1; 2480-23
- [5] **J.J. Bimbenet**, 1984. Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris 2^{ème} édition pp34 Cité par H. Madjoudj
- [6] **J. C. Charpentier**, 1996. Technique de l'Ingénieur, génie des procédés, 2480-4; 2480-20.
- [7] **P. Mafart**, 1991. Les procédés physiques de conservation Edition Lavoisier Tec et Doc, série Apria, pp295
- [8] **D. Saravacos George**, 1995. Mass transfer proprieties of foods Engineering proprieties of foods, INC 2^{ème} edition, pp531
- [9] **D. Mihoubi**, 2004. Déshydratations d'argile par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation. Thèse de doctorat, université de Pan et des pays de l'Adour, école doctorale des sciences exactes et de leur application
- [10] **L. Bennamoun**, 2001. Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local Magister, Université de Mentouri Constantine, Faculté des Sciences, Département de physique
- [11] **R. Cavalle , A. Charreau**, Séchage : Théorie et alculs, Technique de l'ingénieur, J 2480 ,1-23, (1991).

[12] **F. Vachet**, Séchage dans l'industrie chimique, Technique de l'ingénieur, J 2483, (1-19),(1993).

- **J. Castaing-Lavignottes**, Air humide : propriétés thermodynamiques, opérations unitaires et technologie associées à son emploi, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France, (2003).
- **W. L. McCabe, J. C. Smith, et P. Harriott**, "Unit operation of chemical engineering ", Hill Book Company (1985).
- **Y. Jannot**, Isothermes de sorption : Modèles et détermination, LEPT-ENSAM, (1-5), (2003).
- **S. Ben Ramdane**, "étude expérimentale du procédé de séchage sur les produits agroalimentaires (tomates) dans un séchoir solaire direct à convection naturelle», mémoire de Master, Universitaire de Ouargla, (2011).
- **B. TOUATI**, 2008 Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte.
- **S. H. RIZVI**, 1986. *Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration*. In M. A. RAO & S. S. H. RIZVI (eds), *Engineering Properties of Foods*, chapter 2, Marcel Dekker, Inc, New York 10016, pp 140-164.
- **J. C. CHEFTEL, H. CHEFTEL, & P. BESANCON**, 1983. *Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments*, vol 2, Techniques et Documentation Lavoisier, Paris, pp 167-198, 201-204, 210.
- **Y. Jannot**, 2008. *Isothermes de sorption : modèles et détermination via consulté le 24/12/2014*.
- **G. NKOUM**, 2007. *Conservation des fruits du karité (Vitellariaparadoxa Gaertn.) et de l'aïète (Canzriumschweinfurthii Engl.) : isothermes de sorption d'eau et d'extraction des matières grasses des fruits stockés, thèse de doctorat, Université de Ngaoundéré, 288p*.
- **K. MBWALALA**, 2014. Université de KINSHASA - Ingénieur Agronome- *Détermination des isothermes de sorption (adsorption-désorption)[Cas de l'aubergine (Solanum melongena L.)]*.

- **A. Ferradji et al.** 2011, Séchage solaire des figues: Bilan thermique et isotherme de désorption.
- **G.B. Noumi, et al.** 2004, Modélisation de la déshydratation de la pulpe des fruits du *Canarium schweinfurthii* Engl.
- **G. Miranda, et al.** 2011, Détermination des isothermes de sorption de l'eau des abricots et raisins.
- **A. Belghit, et al.** 1999, Approche Expérimentale de la Cinétique de Séchage de la Verveine (*Lippia Citriodora*).
- **M. Kouhila, et al.** 1999, Approche Expérimentale des Courbes de Sorption de la Menthe en vue d'un Séchage par Energie Solaire.
- **A. Ferradji, et al.** 2000, Isothermes d'adsorption à 25 °C et 45 °C des pommes chargées de solutés et séchées.
- **P. T. BASSENE,** Détermination expérimentale des isothermes de désorption et de la chaleur iso stérique des granulés de la farine de mil.
- **A. Touil, et al.** 2015, Isothermes de sorption et propriétés thermodynamique de l'*Allium sativum*.
- **A. Benhamou, et al.** 2010, Modélisation des isothermes de sorption des feuilles de marjolaine.

- **Y. Khadraoui, et A. Terfous.** 1999, Normalisation des Isothermes de Sorption des Différents Types de Riz.
- **A.TOM, et al.** 2013, Séchage solaire de viande de bœuf : caractérisation expérimentale du produit, modélisation et mise en place d'un séchoir solaire adapté au pays tropicaux.
- **J. Sana et B. Mohamed.** 2015, Modélisation des isothermes de désorption du phosphate di-calcique.
- **A.Benseddik, et al.** 2014, Modélisation des isothermes de désorption de la citrouille en vue de leur séchage solaire.
- **S. JEBALI et S. Ben MABROUK.** 2009, Phénomène de séchage convectif du blé.

- **A. Lamharrar**, et al.2007, Détermination expérimentale des isothermes de sorption et de la chaleur iso stérique des feuilles d'absinthe et de menthe pouliot.
- **Abdenouri**, et al.2008, **Etude** hygroscopique du lait en poudre.
- **S. Bennaceur**, et al.2013, Étude hygroscopique des feuilles de Kabar (*Capparis Spinosa L.*) en vue de leur séchage.
- **N. Kechaou, M. Bagane, M. Maalej et C. Capseu**, “Approche empirique de la cinétique de séchage des dattes”, in CDER & ENIM (Eds), Actes des 7èmes Journées Internationales de Thermique JITH 95, Marrakech, Maroc, 1995, pp. 581-593.
- **J. L. Multon**, “Etat de liaison de l’eau dans les aliments : problèmes fondamentaux de séchage”, ATP-PIREDS, 1980
- **M. Belahmidi, A. Belghit, A. Mrani, A. Mir et M. Kaoua**, “Approche expérimentale de la cinétique de séchage des produits agro-alimentaires”, Rev Gén de Therm, n° 380-381, 1993, pp. 444-453.
- **H. BENZITA, 2011**, Université Kasdi Marbah Ouargla, Département de Génie des Procédés, « Détermination expérimentale et simulation des courbes de sorption d’un produit agroalimentaire en vue d’un séchage solaire convectif ».

ملخص

إن تحديد كمية الماء في وضع التوازن لأي منتج معد للتجفيف هو ضروري أثناء عملية التخزين والتجفيف الشمسي بالحمل الحراري المدعم ، وغالبا ما يتم أخذ هذه القيم من المنحنيات ويطلق عليها إيزوتارم التحرير

يعد تحديد منحنيات الإيزوتارم خطوة ضرورية لتحديد توزيع وكثافة روابط الماء في منتجات محل التجربة ، تسمح هذه المنحنيات بتحديد كمية الماء النهائية التي سيتم التوصل إليها من أجل تحسين ظروف تجفيف هذه المنتجات وتوفير معلومات قيمة عن التوازن الإسترطابي.

و الواقع إن إيزوتارم التحرير يدل على كمية الماء بدلالة الرطوبة في درجة حرارة ثابتة معطاة لذلك فإن أي تغيير في نوعية أو تكوين المواد يؤدي إلى تغيير في الإيزوتارم التحرير الخاص بها. و نظرا لتعقيد ظواهر التحرير فإنه لا يمكن التنبؤ بإيزوتارم التحرير من منطلقات نظرية ولكن يجب إجراؤه تجريبيا لكل منتج .

وهكذا , فإن هذه الدراسة التجريبية و التي تهدف إلى تحديد منحنيات إيزوتارم التحرير لمنتوج نباتي عطري وهو النعناع الأخضر وذلك باستخدام المحاليل الملحية المشبعة .وقد أجريت من أجل أربعة قيم مختلف لدرجة الحرارة : 55° 45° 35° 20° ، وإلى تأثير درجة الحرارة على منحنيات التوازن في المنتج ووصف إيزوتارم التحرير النعناع الأخضر من أجل كل درجة ، وذلك باستخدام تمديد الحدود من النقاط التجريبية ، وأخيرا مقارنتها بنموذج هندرسون

كلمات البحث : إيزوتارم التحرير - طريقة غرافيميتريك - محلول الأملاح المشبعة - التجفيف

Résumé

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

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

Ainsi, le présent travail se propose de déterminer expérimentalement les isothermes de désorption d'un produit agricole médicinale et aromatique, la menthe verte, à l'aide de la méthode des solutions salines saturées. (L'expérience est réalisée pour quatre valeurs de la température différentes : 20°C , 35°C , 45°C et 55°C d'étudier l'influence de la température sur les courbes d'équilibre du produit et de décrire l'isotherme de désorption de la menthe verte pour chaque température à l'aide d'un lissage polynomial des points expérimentaux trouvés. et enfin elle compare avec le modèle d'Henderson.

Mots clés: Isothermes de désorption - Méthode gravimétrique –Solutions salines saturées - Séchage.

Abstract

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

The determination of these isotherms is an indispensable stage to know the distribution and the intensity of the water links in the products to be tested. The isotherms permit to determine the final quantity of water to be reached to optimize the conditions of the drying of these products and give precious information on the hygroscopic equilibrium.

Thus, the present work intends to determine, experimentally, the isotherms of desorption of a medicinal and aromatic agricultural product, Green Mint, using the method of the saturated saline solutions. The experience is achieved for four values of temperature different: 20°C, 35°C, 45°C and 55 °C, to study the influence of the temperature on the curves of equilibrium of the product and to describe the isotherm of desorption of the Green Mint for each of the four temperatures with the help of a polynomial expansion of the experimental points found and finally compare it with Henderson's model.

Keywords: Isotherm of desorption - Gravimetric method - Saturated saline Solutions - Drying.