

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Hydrocarbures et Energies Renouvelables

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en :

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Thème :

**Isotherme de désorption/adsorption de la menthe verte,
étude expérimentale et détermination des propriétés
thermodynamiques**

Préparé par :

Mlle. MASMOUDI Asma

Mlle. BNOUMACHICH Fatima Zahra

Membres de jury d'évaluation :

M. DJEDID Kheira	Président	Pr.	Univ. Adrar
M. LARBI Ahmed Amine	Encadreur	MRB	URERMS (CDER). Adrar
M. DAHOU Mohammed Amine	Co-encadreur	MCB	Univ. Adrar
M. TAHRI Ahmed	Examineur	MRA	URERMS (CDER). Adrar

Année Universitaire : 2021/2022



شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): العربي أحمد أمين
المشرف على مذكرة الماستر الموسومة بـ :

Isotherme de Désorption/Adsorption de la Menthe Verte, Etude Expérimentale et Determination des Propriétés Thermodynamiques

من إنجاز الطالب(ة): مصمودي أسماء

و الطالب(ة): بن مشيش فاطمة الزهراء

كلية: العلوم و التكنولوجيا

القسم: محروقات و طاقات متجددة

التخصص: هندسة كيميائية

تاريخ تقييم / مناقشة: 2022/06/12

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين
النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.
وبإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والإلكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

ادرار في: 2022/06/20

مساعد رئيس القسم:

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu, De nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour mener et terminer ce travail de recherche.

*Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements à notre encadreur **Dr :LARBI Ahmed Amine***

qui nous a fourni le sujet de ce mémoire et nous a guidés de ses précieux conseils et suggestions, et la confiance qu'il nous a témoignés tout au long de ce travail.

*Nos remerciement s'adresse à **Dr :MEDIANI Ahmed** pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements .*

*nous désirons aussi remercier les travailleur de URERMS surtout les travailleurs d'équipe séchage solaire, **DJEBER A.Elkarim**,*

***Mr :TIGANI Chérif**, **Dr :MONGAR Houssine** et **Dr :LOUMANI Akil** qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de notre travail.*

nous tenons à remercier spécialement le président

Dr :DAHOU Mohammed

Finalement, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dedicaces

*A ma très chère mère
Quoi que je fasse ou que je dise , je ne
saurai point te remercier comme il se
doit . Ton affection me couvre , ta
bienveillance me guide et ta présence à
mes côtés a toujours été ma source de
force pour affronter les différents
obstacles .*

*A mon très cher père Tu as toujours été
à mes côtés pour me soutenir et
m'encourager . Que ce travail traduit
ma gratitude et mon affection .*

*A mes très chers frères et mes belles
sœurs.*

A ma famille , mes proches .

*A tous mes amis qui m'ont toujours
encouragé , et à qui je souhaite plus de
succès surtout : Fatima Zahra,
Khadidja et Marwa.*

*Puisse Dieu vous donne santé , bonheur
, courage et surtout réussite ! .*

Asma

Dedicaces

*A ma très chère mère
Quoi que je fasse ou que je dise , je ne
saurai point te remercier comme il se
doit . Ton affection me couvre , ta
bienveillance me guide et ta présence à
mes côtés a toujours été ma source de
force pour affronter les différents
obstacles .*

*A mon très cher père Tu as toujours été
à mes côtés pour me soutenir et
m'encourager . Que ce travail traduit
ma gratitude et mon affection .*

*A mes très chers frères et mes belles
sœurs.*

*A ma famille , mes proches .
A tous mes amis qui m'ont toujours
encouragé , et à qui je souhaite plus de
succès surtout : Asma , Khadija
et Marwa.*

*Puisse Dieu vous donne santé , bonheur
, courage et surtout réussite ! .*

Fatima Zahra

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو التحديد التجريبي لمتساويات الامتصاص والخصائص الديناميكية الحرارية للنعناع بعد المعالجة الحرارية والكيميائية الحيوية. الطريقة المختارة هي طريقة قياس الجاذبية لمحاليل الملح المشبعة بدرجات حرارة مختلفة. لنمذجة والتنبؤ بسلوك استرطابي أثناء التجفيف والتخزين ، تم اقتراح ثمانية نماذج رياضية (LANGMUIR و GAB و BET المعدلة و Peleg الخ) . سوف يعتمد تجانس هذه النماذج وتحسينها على المعالجة الإحصائية للبيانات التي تم الحصول عليها. يتم طلب درجات حرارة الامتصاص المتساوي للنعناع ، وسيتم إجراء حساباتهم باستخدام معادلة كلاوزيوس و كلابيرون ومن خلال هذه الدراسة ، يمكننا اقتراح تعبير يجعل من الممكن التنبؤ بالخصائص الديناميكية الحرارية للنعناع.

الكلمات المفتاحية: متساوي حرارة الامتصاص ، النعناع ، النموذج الرياضي ، الحرارة المتوازنة

Résumé

Le but de ce travail est la détermination expérimentale des isothermes de sorption et propriétés thermodynamiques de la menthe verte après traitement thermique et biochimique. La méthode choisie est la méthode gravimétrique des solutions salines saturées pour différentes températures. Pour modéliser et prédire le comportement hygroscopique pendant le séchage et le stockage, huit modèles mathématiques ont été proposés (LANGMUIR, GAB, BET modifié, Peleg...ets). Le lissage et l'optimisation de ces modèles se feront sur la base du traitement statistique des données obtenues. Les chaleurs de désorption isostérique de la menthe verte sont demandées, leur calculs se fera à l'aide de l'équation de Clausius-Clapeyron et à travers cette étude, on pourra proposer une expression permettant de prédire les propriétés thermodynamiques de la menthe verte.

Mots-clés : Isothermes de sorption, Menthe Verte, Modèle Mathématique, Chaleur Isostérique

Abstract:

Abstract: The aim of this work is the experimental determination of the sorption isotherms and thermodynamic properties of spearmint after thermal and biochemical treatment. The chosen method is the gravimetric method of saturated salt solutions for different temperatures. To model and predict hygroscopic behavior during drying and storage, eight mathematical models have been proposed (LANGMUIR, GAB, modified BET, Peleg, etc.). The smoothing and optimization of these models will be based on the statistical processing of the data obtained. The heats of isosteric desorption of spearmint are requested, their calculations will be made using the Clausius-Clapeyron equation and through this study, we can propose an expression that makes it possible to predict the thermodynamic properties of spearmint.

Keywords: Isotherms of Sorption, Spearmint, Mathematical Model, Isosteric Heat



SOMMAIRE

Sommaire

N°	Titre	Page
	Introduction général	1
CHAPITRE I: Etude bibliographique		
I .1	Introduction	3
I .2	Généralité sur le séchage	3
I .2.1	Définition	3
I .2.2	But de séchage	4
I .2.3	Historique	4
I .2.4	Le principe de séchage	4
I .2.5	Les modes de séchage	5
a)	Séchage conduction	5
b)	Séchage convection	5
c)	Séchage par les rayonnements:	6
d)	Séchage par micro-ondes	6
e)	Séchage par perte diélectrique	7
f)	Séchage par lyophilisation	7
I .2.6	Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage	7
I.2.6.1	Humidité	7
I .2.6.1.1	Humidité relative	8
I.2.6.1.2	l'humidité absolue	8
I.2.6.2	Degré de saturation	9
I.2.6.3	Température caractéristique de l'air humide	9
I.2.6.3.1	Température de bulbe sec	9
I.2.6.3.2	Température de bulbe humide	10
I.2.6.3.3	Température de rosée	10
I.2.6.3.4	Température de saturation adiabatique T_{sa}	11
I .2.7	Caractéristique des solide humides	11
I.2.7.1	Porosité volumique d'un produit	11
I.2.7.2	Description du solide humide	12
I.2.7.3	Humidité absolue (teneur en eau à base sèche)	12
I.2.7.4	Humidité relative (teneur en eau à base humide)	12
I.1.7.5	Hygroscopicité	13

I.2.8	Les procédés de séchage	13
I.2.8.1	Séchage mécanique	13
I.2.8.2	Séchage chimique	13
I.2.8.3	Séchage thermique	13
I.2.9	Choix du procédé de séchage	14
I.3	La cinétique de séchage	14
I.3.1	Les courbes de séchage	14
I.3.2	Les différentes phases de séchage	15
I.3.3	La vitesse de séchage	17
I.3.4	Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	17
I.3.4.1	Influence de la température de l'air	17
I.3.4.2	Influence de la vitesse de l'air	18
I.3.4.3	Influence de l'humidité de l'air	18
I.3.5	Modélisation des cinétiques de séchage	18
I.4	Le séchage solaire	20
I.4.1	Classification des systèmes de séchage solaire	20
a.	les séchoirs solaires directs	20
b.	les séchoirs solaires indirects	20
c.	les séchoirs solaires mixtes	20
I.4.2	Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire	22
I.5	Séchage du produit agro-alimentaire par entraînement	22
I.5.1	Séchage par entraînement	23
I.6	Activité de l'eau dans le produit	23
I.7	Taux d'humidité à l'équilibre	24
I.8	Isothermes de sorption	24
I.8.1	Définition	24
I.8.2	Formes et modèles des isothermes de sorption	25
I.8.2.1	Forme générale des isothermes	25
I.8.2.2	Modèles de représentation des courbes de sorption et désorption	27
I.8.3	Méthodes d'obtention des isothermes de sorption	28
I.8.3.1	Méthode gravimétrique (Eau)	28
I.8.3.2	Méthode dynamique (Azote)	29

a.	Adsorption	29
b.	Désorption	29
I.8.4	Chaleur isostérique de sorption	31
I.8.5	Estimation de la durée de vie	31
CHAPITRE II: Approche expérimentale		
A.	Isotherme de désorption/ adsorption	34
II.A.1	Introduction	34
II.A.2.1	Définition de Menthe verte (<i>Mentha spicata</i>)	35
II.A.2.2	Origines	35
II.A.2.3	Description	35
II.A.2.4	Habitat	36
II.A.2.5	Phénologie	36
II.A.2.6	Pollinisation	37
II.A.3	Les Propriétés de la menthe verte	37
II.A.4	Utilisation de la menthe verte	37
a.	Médicinale	38
b.	Drogue	38
II.A.5	Composition	38
II.A.6	MATERIEL ET MODE OPERATOIRE	39
II.A.6.1	Préparation des solutions salines saturées	39
1)	La détermination de volume d'eau approprié de préparation des solutions salines saturées	40
2)	Détermination de la masse de sels nécessaire pour obtenir des solutions salines saturées	40
II.A.6.2	Préparation du dispositif expérimental	42
B.	Détermination de quelques paramètres physicochimiques des échantillons avant et après le séchage	47
II.B.1	Définitions	47
i.	Matière sèche	47
ii.	Matière organique	47
iii.	Matière minérale	47
II.B.2	Détermination de la teneur en eau	47
II.B.3	Détermination de la teneur en cendres	48

CHAPITRE III: Résultats expérimentaux et modélisation

III.	Résultats expérimentaux et modélisation	50
III.A.1	Composition physicochimique du menthe verte	50
III.B.1	Masses sèches des échantillons du menthe verte	52
III.B.2	Masses humides et masses d'eau à l'équilibre des échantillons de la menthe verte	52
III.B.3	Résultats de l'expérimentation	53
III.B.3.1	Résultats de l'expérimentation de désorption	54
III.B.3.2	Résultats de l'expérimentation d'adsorption	56
III.B.4	Modélisation des courbes de sorption	58
III.B.4.1	Aperçu sur les modèles théoriques	58
III.B.4.2	Résultats de la modélisation	60
III.C	Détermination de la chaleur isostérique de sorption	68



Liste des tableaux

Liste des tableaux

N°	Tableau	Page
I.2.8.1	Quelques exemples des méthodes de séchage	13
I.3.5	Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces	19
I.4.1	Représentation typique des séchoirs solaires	21
I.4.2	Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire	22
I.8.2.2	Modèles des courbes de sorption, désorption	27-28
II.A.5	La composition de la menthe verte	38
II.A.6.1.1	Les valeurs standards des humidités relatives données par différents sels en fonction de la température	39
II.A.6.1.2	La solubilité et les masses des sels utilisées pour la saturation	42
III.A.1	Les masses d'échantillon de menthe verte	50
III.A.1	Les compositions de l'échantillon de menthe verte	51
III.B.1	Les valeurs des masses sèches de tous les échantillons de menthe verte sont reportées, pour 30°C, 40°C et 50°C	52
III.B.2.1	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre de menthe verte à T = 30°C	52
III.B.2.2	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre de menthe verte à T = 40°C	53
III.B.2.3	Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre de menthe verte à T = 50°C	53
III.B.3.1	La teneur en eau à l'équilibre de menthe verte de désorption	54
III.B.3.2	La teneur en eau à l'équilibre d'adsorption de menthe verte	56
III.B.4.1	Modèles de la sorption	59
III.B.4.2.1	Paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre de données de désorption de menthe verte à T=30, 40 et 50°C	63
III.B.4.2.2	Paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre de données d'adsorption de menthe verte à T=30, 40 et 50°C	67



Liste des figures

Liste de figures

N°	Figure	Page
I.2.5	Le cycle de lyophilisation	7
I.2.6.3.1	Température sèche	9
I.2.6.3.2	Température humide	10
I.2.6.3.3	Température de rosée	10
I.2.7.1.1	Volume de contrôle microscopique	11
I.2.7.1.2	Volume de contrôle macroscopique	11
I.2.7.2	Description du solide humide	12
I.3.1	Courbes de séchage caractéristiques, pour un séchage par gaz dont les caractéristiques sont maintenues constantes	15
I.3.2.1	Schématisation des transferts pendant la phase a vitesse constante	16
I.3.2.2	Schématisation des transferts pendant la phase de ralentissement	16
I.6	Représentation de l'activité de l'eau	24
I.8.1	Allure générale des isothermes de sorption	25
I.8.2.1.1	Différentes zones des isothermes de sorption	25
I.8.2.1.2	Différents types d'isothermes suivant la classification de l'IUPAC	26
I.8.3.1	Schéma d'un montage expérimental type pour la méthode des solutions salines	27
I.8.3.2.1	Schématisation de la phase de désorption	30
I.8.3.2.2	Schématisation de la phase d'adsorption	30
II.A.2.1.1	. Un échantillon du menthe vert (<i>Mentha spicata</i>)	35
II.A.2.1.2	Une image illustration des feuilles du menthe verte (<i>Mentha spicata</i>)	35
II.A.2.3	La morphologie de la menthe verte	36
II.A.6.1.1	Les sels utilisées dans l'expérience	40
II.A.6.1.	Le volume du solution saline approprié dans le bocal	41
II.A.6.1.2	Pesage des sels et préparation des solution salines saturées	41
II.A.6.1.3	Les bocaux aux fermetures étanches	42
II.A.6.2.1	Schéma du dispositif expérimental	43
II.A.6.2.2	Schéma d'une unité du dispositif expérimental	43
II.A.6.2.3.a	Pesage la masse de la menthe verte fraîche	44
II.A.6.2.3.b	Prendre un gramme au chaque sel utilisée pour le processus de désorption	44
II.A.6.4	Les deux échantillons fraîche et sèche dans chaque bocal	45
II.A.6.5	La disposition des boucaux dans l'étuve	45
II.A.6.5	L'échantillons du menthe verte à l'équilibre hygroscopique	46
II.A.6.6.	Placer l'échantillons à l'étuve de séchage à 105°C Après l'équilibre hygroscopique	46
II.A.6.7	Les masses sèches d'échantillon	46
II.A.6.8	Placer l'échantillons dans un dessiccateur après l'étuvage à 105°C	46
II.B.2.1	L'étuve de séchage	47
II.B.2.2.	L'étuvage à 105°C	47
II.B.3.1.	L'échantillons dans un four à moufle	48
II.B.3.2	La menthe verte Après l'incinération	48

III.A.1	Les compositions physicochimiques de l'échantillon de la menthe verte	51
III.B.3.1.a	Isothermes de désorption de la menthe verte à températures 30,40 et 50°C	55
III.B.3.1.b	Influence de la température sur les isothermes de désorption du menthe verte	56
III.B.3.2.a	Isothermes de d'adsorption de la menthe verte à températures 30,40 et 50°C	57
III.B.3.2.b	Influence de la température sur les isothermes de d'adsorption du menthe verte	58
III.B.4.2.a.	Isothermes de désorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, Peleg, Langmuir) à (T = 30°C).	60
III.B.4.2.b	Isothermes de désorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, Peleg, Langmuir) à (T = 40°C).	61
III.B.4.2.c	Isothermes de désorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifié, Peleg, Langmuir) à (T = 50°C).	62
III.B.4.2.d	Isothermes de d'adsorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, Peleg, Langmuir) à (T = 30°C).	64
III.B.4.2.e.	Isothermes de d'adsorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, Peleg, Langmuir) à (T = 40°C).	65
III.B.4.2.f.	Isothermes de d'adsorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, Peleg, Langmuir) à (T = 50°C).	66
Figure III.C.1	Isostères de désorption pour la menthe verte	68
Figure III.C.2	Isostères de adsorption pour la menthe verte	69
Figure III.C.3	Chaleur isostérique de désorption du menthe verte	70
Figure III.C.4	Chaleur isostérique de d'adsorption du menthe verte .	70



Nomenclature

Nomenclateur

Symboles	désignations	Unités
AW	Activité de l'eau	%
Mev	Masse de l'eau évaporée	Kg
MS	Masse sèche du produit	Kg
Mh	Masse humide du produit	Kg
Me	Masse du l'eau	Kg
Ma	Masse de l'air sèche	Kg
Hr = φ	Humidité relative de l'air	%
Has	Humidité absolue de saturation	Kg d'eau /kg (as)
Ha	Humidité absolue	Kg d'eau /kg (as)
X	Teneur en eau du produit à base sèche	Kg d'eau /kg de m.s
Xr	Teneur en eau du produit à base humide	Kg d'eau /kg de m.h %
Xeq	Teneur en eau d'équilibre	Kg d'eau /kg de m.s
Ψ	Degré de saturation	%
Qst	Chaleur isostérique de sorption	kJ/mol
R	Constante de gaz parfait	J/mol.°K
Pv	La pression partielle de la vapeur dans le mélange	Atm
PS (T)	La pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.	Atm
EST	l'erreur standard	Sans
EMR	l'erreur moyenne relative	Sans
R2	le coefficient de détermination	Sans
E	La porosité volumique	Sans
T	température	°C
t	Temps	S



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau les marées, la chaleur de la terre ...etc. les énergies renouvelables son des énergies "flux" par opposition aux énergies "stock". Ce sont les énergies de l'avenir, mais elles sont encore sous-exploitation par rapport à leur potentiel puis que ces énergies renouvelables ne couvrent que 20% de la consommation mondiale d'électricité.

Utiliser les énergies renouvelables présentes de nombreux avantages. Cela aide à lutter contre l'effet de serre, en réduisant notamment les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère. Cela participe de plus à une gestion intelligente des ressources locales et à la création d'emplois. [1] Il existe 5 familles d'énergies renouvelables :(L'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique). Puisque nous vivons dans une région désertique qui située dans le sud-ouest d'Algérie « la wilaya d'Adrar » où la plupart des heures de la journée sont lumineux, Cela signifie que nous avons un grand potentiel énergétique qui peut être utilisé pour une variété des activités quotidiennes. Le soleil est la plus forte source d'énergie et cette énergie est gratuite. Le terme énergie solaire désigne donc l'énergie fournie par la lumière solaire, et les technologies actives dans ce domaine transforment l'énergie solaire en plusieurs formes [2]. En outre, l'énergie solaire est devenue un élément essentiel de certains processus et analyses scientifiques, tels que le séchage solaire, le chauffage solaire et la distillation solaire...etc.

Le séchage solaire consiste à accumuler l'énergie du soleil à l'intérieur d'un dispositif qui collecte la chaleur, puis créer un flux d'air chaud par convection naturelle ou forcée. Lorsqu'il passe sur les aliments (élimination totale ou partielle de l'eau des produits humides), il permet d'obtenir un produit sèche qui peut être stocké un long temps pour consommation ou pour présenter à d'autre opération industrielle. C'est pour ça le domaine d'agro-alimentaire est basé par le séchage solaire comme un procédé principal. Les teneurs en eau d'équilibre d'un produit sont indispensables lors d'une opération de stockage et de séchage solaire. 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.

Les plantes médicinales et aromatiques et en particulier les feuilles de la menthe verte ont beaucoup d'importance pour la pharmacopée, la parfumerie, la confiserie et la liquoristerie.

Ce travail vise à la valorisation de cette plante produite en grande quantité dans le sud-ouest algérien. Il s'agit d'étudier la détermination et modélisation des propriétés de cette plante, dans le cadre de séchage de cette plante.

Nous voulons réaliser une étude pour la détermination expérimentale des isothermes de sorption et propriétés thermodynamique de la menthe verte. On a choisi la méthode gravimétrique des solutions salines saturées par l'utilisation de différentes températures pour modéliser et déterminer le comportement hygroscopique.

Ce travail a été effectué dans l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URMER) d'ADRAR chez l'équipe de séchage solaire. Alors notre mémoire est structuré à trois chapitres :

Le premier chapitre est une étude bibliographique donnant les définitions essentielles et les notions principales dans le séchage, l'activité de l'eau et les isothermes de sorption des produits humides indispensables pour notre étude, Aussi offre des informations sur la chaleur isostérique et la durée de vie du produit.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des données sur la plante à sécher (la menthe) et expliquons la méthode expérimentale adoptée pour déterminer les courbes de sorption de la menthe pour différents températures.

Le dernier chapitre comprend une présentation des résultats expérimentaux et leurs discussions, ainsi des interprétations sous forme des tableaux et des graphiques. En effet, les isothermes de sorption de la menthe seront étudiés, modélisés à l'aide des modèles mathématiques les plus connus dans le domaine.

En fin, nous avons achevé ce modeste travail par une conclusion qui englobait les résultats et les perspectives d'avenir de ce travail.

CHAPITRE I

Etude bibliographique

I .1.Introduction :

L'utilisation de l'énergie solaire dans l'agriculture peut considérablement améliorer les moyens de subsistance en ouvrant l'accès à l'irrigation, au refroidissement, au séchage et à d'autres dispositifs de transformation agroalimentaire. [3]

L'utilisation de produits agroalimentaires au cours de l'année nécessite le conditionnement tout en préservant la qualité gustative, médicinales, etc. Pour ce faire, les procédés de congélation, de lyophilisation et de séchage ont fait déjà leurs preuves et leurs applications qui ont été développées par les industries agroalimentaire et pharmaceutique. Quel que soit le procédé retenu, le coût de la facture énergétique demeure l'obstacle majeur à la diversification de ses applications et son intensification. Sans nul doute, le séchage est un procédé largement exploité en recourant à différentes techniques. [4]

I .2. Généralité sur le séchage :

La plupart des produits biologiques sont profondément modifiés par le séchage (couleur, goût, texture, qualité, propriétés nutritionnelle, techno-fonctionnelles, etc.). Les conditions de séchage et leurs variations peuvent ainsi altérer le produit, ou lui conférer des propriétés nouvelles (formulation, texturation). Il est ainsi important que l'utilisateur puisse définir les propriétés attendues du produit et que l'on sache, ensuite, lier les altérations, ou les modifications, aux paramètres pertinents du séchage. [5]

I .2.1. Définition :

La déshydratation (ou le séchage) est définie comme l'application de la chaleur dans des conditions commandées pour enlever la majorité de l'eau dans un aliment par évaporation. Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, au dessous d'un seuil, dont les réactions enzymatique et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des microorganismes. [6]

I .2.2. But de séchage :

Le but d'une telle opération est, soit de rendre à une substance traitée ses qualités mécanique ou physico-chimique initiales, soit de faciliter son stockage et sa conservation. [6] Et en dehors de son premier objectif qui est la conservation, l'élimination d'eau permet de

réduire considérablement la masse et le volume des aliments, entraînant ainsi de substantielles économies d'encombrement et de transport.[4]

I .2.3. Historique :

Exposer les aliments au soleil est une des plus anciennes méthodes de conservation des aliments. Le principe est très simple, peu coûteux, mais demeure très long.

Les peuples primitifs faisaient déjà sécher les herbes, racines, fruits et viandes en les exposant au soleil. Les plus anciens documents écrits dans lesquels ils parlent de séchage remontent au temps où les Phéniciens et autres peuples pêcheurs de la Méditerranée faisaient sécher leurs poissons au soleil. Quant aux Chinois, ce sont les feuilles de thé qu'ils faisaient sécher.

Aux 15^e et 16^e siècles, les explorateurs se sont aussi servis d'aliments séchés pour leurs longs voyages. Ces aliments permettaient aux voyageurs d'apporter plus de nourriture, à cause de leur poids qui était diminué par la déshydratation. De plus, ces aliments se conservaient longtemps dans les bateaux.

Les Amérindiens étaient aussi de grands fervents de cette méthode de conservation des aliments. Poissons et viandes sauvages étaient les plus séchés.[7]

Pour ces applications traditionnelles, on fait encore beaucoup appel au séchage par l'air ambiant dit « naturel », le séchage dit « artificiel » avec apport d'énergie, n'étant qu'une technique complémentaire apportant une plus grande régularité face aux aléas climatiques, ou bien apportant de nouveaux services (lait sec ou café dits « instantanés », pâtes alimentaires sèches à longue conservation, etc.) [8]

I .2.4. Le principe de séchage :

Pour sécher un produit, il suffit de le ventiler par de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et l'humidité se produit entre cet air et le produit humide. L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage. Il existe donc deux facteurs importants pour contrôler les processus de séchage:

- Le transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire.
- Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide pour l'extraire des produits. [9]

I.2.5. Les modes de séchage :

On rencontre une grande diversité dans les modes de séchage et sont classés selon le mode d'apport de chaleur :

- a) **Séchage conduction** : le produit est mis en contact avec des surfaces chaudes
Exemples : le séchage de pommes de terre en flocons, pâte à papier. [10]

Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation: [6]

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

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.

- b) **Séchage convection** : on envoie sur le produit à sécher un courant gazeux chaud qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée
Exemples : le séchage de plantes aromatiques, de fruits, de grains, de boues d'épuration, de céramiques. [10]

Ce mode de séchage utilise l'équation suivante: [6]

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

Avec

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

A : la surface d'échange (m²)

α : le coefficient d'échange par convection (W/m².K)

- c) **Séchage par les rayonnements:** Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement.

Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible. [8] 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 : [6]

$$Q = A_1 \cdot C \left[\left[\frac{T_1}{100} \right] - \left[\frac{T_2}{100} \right] \right] \cdot \varphi \dots \dots \dots (3)$$

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

Avec

T_1 : Température de la source émettrice (K)

T_2 : Température du produit (K)

A_1 : Surface du ceps recevant le rayonnement

A_2 : Surface de l'émetteur infrarouge

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

- d) **Séchage par micro-ondes :** Les micro-ondes et les radiofréquences ont la capacité de chauffer grâce aux propriétés de perte diélectrique des matériaux. Ce phénomène est causé par la vibration et la rotation des molécules polarisées à l'intérieur du matériau, induites par l'inversion rapide de la polarité du champ électromagnétique (un million de fois par seconde). La génération de chaleur est presque instantanée et permet un processus parfaitement contrôlé grâce à un chauffage rapide et uniforme. De plus, la

quasi-totalité de l'énergie est transférée au produit traité, ce qui réduit considérablement les pertes d'énergie. [11]

- e) **Séchage par perte diélectrique** : Le séchage par pertes diélectriques est basé sur le chauffage par l'électricité des substances non conductrices (diélectrique). On l'obtient en plaçant la matière à sécher dans un champ électrique alternatif à très haute fréquence (1 à 30Mhz). Un tel champ existe entre les armatures d'un condensateur plan relie à un générateur. Sous l'action de ce champ, les molécules du diélectrique se polarisent et sont contraintes de changer de polarité à chaque alternance. Ce changement de polarité provoque des vibrations mécaniques des dipôles moléculaires qui causent des frictions inter atomiques et inter-moléculaires engendrant de la chaleur qui sert à l'échauffement régulier de la matière. [12]
- f) **Séchage par lyophilisation**: La lyophilisation est un processus de séchage à basse température permettant de retirer l'eau contenue dans un produit. Cela consiste en trois étapes : la congélation de ce dernier puis sa sublimation et enfin la désorption. Le procédé est réalisé en maintenant le produit à une basse température sous vide.

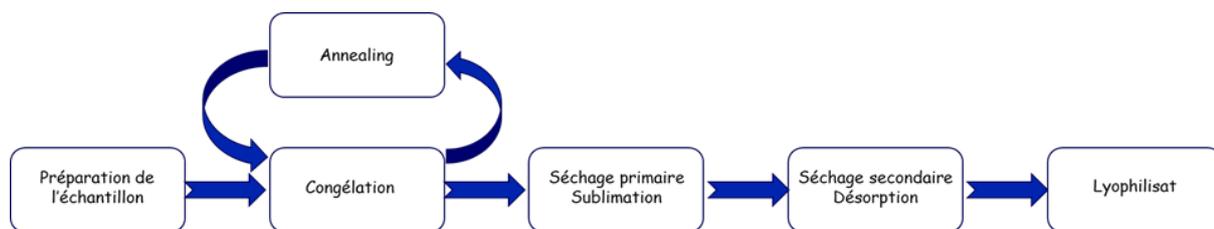


Figure I .2.5: Le cycle de lyophilisation [13]

Le produit obtenu est appelé lyophilisat. [13]

I .2.6. Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage :

De nombreux facteurs affectent le processus de séchage, notamment :

I.2.6.1 Humidité :

Cette variable représente le rapport entre la pression partielle (PV) et la pression de vapeur saturante. La relativité à l'air est de 100% lorsque l'air est complètement saturé, et en regardant la masse d'air humide qui occupe volume V à température T et sous pression P [6]

- o **Mh** représente la masse d'air humide est égale une somme de la masse d'air sec **Ma** et de la masse de vapeur d'eau **Mv**

$$Mh = Mv + Ma \dots\dots\dots (5)$$

○ **P** représente la pression d'air humide et est égale à la somme des pressions partielles d'air sec **Pa** et de la pression de vapeur d'eau **Pv**.

$$P = P_v + P_a \dots\dots\dots (6)$$

L'air a de nombreuses propriétés principales, et ce sont:

I .2.6.1.1 Humidité relative:

L'humidité relative, ou comme on l'appelle aussi, le degré hygrométrique est le rapport entre la pression moléculaire de la vapeur d'eau ce qui est présent dans l'air à la pression atmosphérique à l'état de saturation. Il est donné par la relation : [6]

$$H_r = \frac{P_v}{P_s (T)} \cdot 100 \dots\dots\dots (7) \qquad 0\% \leq H_r \leq 100$$

Ou

Hr : humidité relative (%).

P_v : pression partielle de vapeur (Pa).

P_s : pression de saturation de vapeur (Pa).

I.2.6.1.2 l'humidité absolue :

L'humidité absolue est le rapport entre une masse de vapeur d'eau et son contenu dans un volume d'air humide sur sa masse l'air sec est inclus dans cet argument, et l'humidité absolue est souvent appelée le rapport de mélange.

Il est désigné par le symbole (H_a) et est donné par la relation suivante : [6]

$$H_r = \frac{M_v}{M_a} \left[\frac{Kg_v}{Kg_a} \right] \dots\dots\dots (8)$$

H_a : humidité absolue. $\left[\frac{Kg_v}{Kg_a} \right]$

M_v : masse de vapeur d'eau (Kg_v).

M_a : masse d'air sec (Kg_a).

L'humidité absolue peut être écrite en termes de pression comme suit : [6]

$$H_a = 0.622 \cdot \frac{P_v}{P - P_v} \dots\dots\dots (9)$$

I.2.6.2 Degré de saturation:

Il représente le rapport entre l'humidité de l'air spécifique et l'humidité de l'air saturé à la même température. Le degré de saturation avec la relation suivante : [6]

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} [\%] \dots \dots \dots (10)$$

Ψ : Degré de saturation (%).

H_a : L'humidité absolue.

Dans le cas où P_v et P_s sont tous deux petits devant P (cas de l'air humide sous la pression atmosphérique et pour des températures peu élevées), on peut écrire : [14]

$$\Psi = \frac{H_a}{H_{as}} = \frac{P_v}{P_s} \dots \dots \dots (11)$$

I.2.6.3. Température caractéristique de l'air humide:

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

On distingue classiquement quatre températures remarquables. [15]

I.2.6.3.1. Température de bulbe sec :

La température du bulbe sec T_s en °C ou plus exactement température « sèche », est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec. [14]

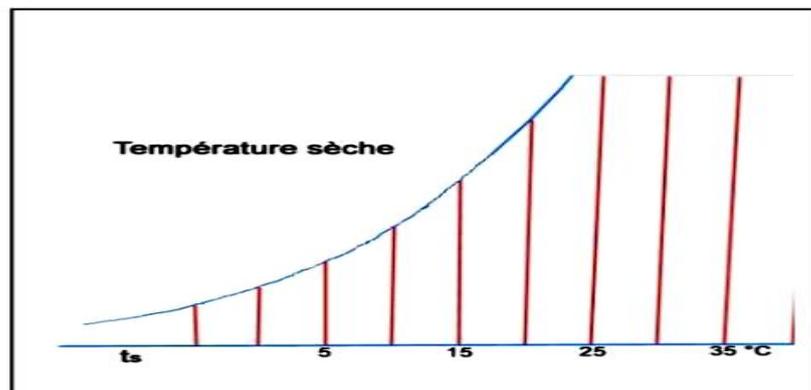


Figure I.2.6.3.1: Température sèche[15]

L'axe horizontal représente une grandeur fondamentale du diagramme psychrométrique.

Les lignes verticales, appelées isothermes sont des lignes où la température sèche est constante. [15]

I.2.6.3.2. Température de bulbe humide :

C'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation n'est prélevée que sur l'air [14]

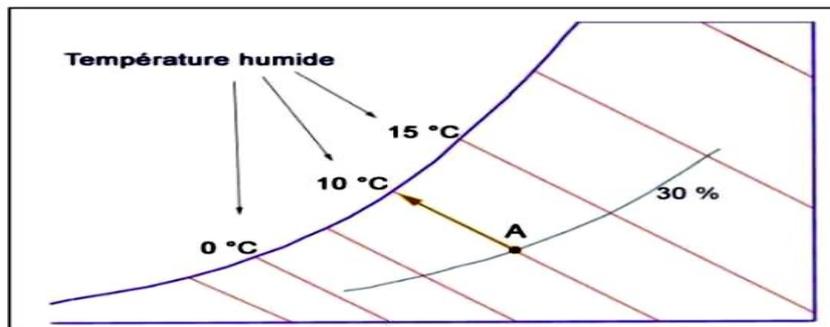


Figure I.2.6.3.2: Température humide[15]

Si d'un point A du diagramme on se déplace sur une isenthalpique, on atteint la courbe de saturation en un point dont la température lue sur l'axe horizontal est appelée communément température humide t_h du point initial considéré. On mesure les températures sèche et humide au moyen d'un appareil comportant deux thermomètres, appelé psychromètre. [15]

I.2.6.3.3. Température de rosée :

Il s'agit de la température pour laquelle l'air devient saturé pour la pression de vapeur d'eau P_v considérée. Or P_v intervient dans l'expression de l'humidité spécifique, si bien que la température de rosée représente encore la température de saturation à humidité spécifique constante. [14]

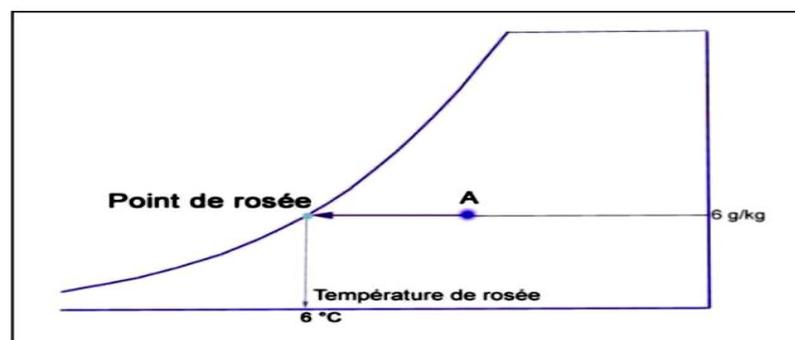


Figure I.2.6.3.3: Température de rosée [15]

Si on se déplace à partir d'un point A du diagramme, sur une iso hydre, de droite à gauche on atteint la courbe de saturation en un point appelé point de rosée, dont la température lue sur l'axe horizontal est la température de rosée de A : t_r [15]

I.2.6.3.4. 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 [15]

I .2.7. Caractéristique des solide humides :

I.2.7.1. Porosité volumique d'un produit :

La porosité volumique ϵ (figure I.2.7.1.1) est définie par : [15]

$$\epsilon = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume apparent du produit}} \dots\dots\dots(12)$$

$$0 < \epsilon < 1$$

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

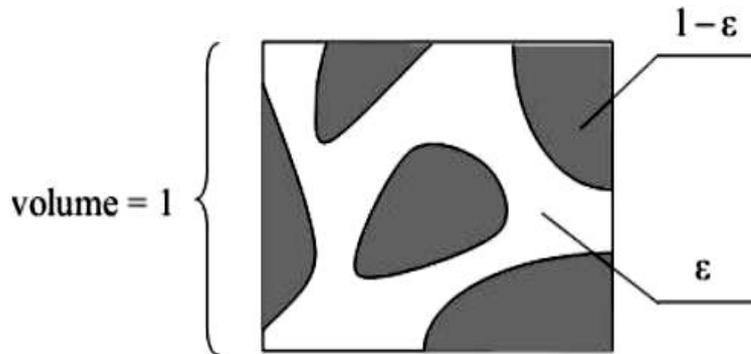


Figure I.2.7.1.1: Volume de contrôle microscopique [15]

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure I.2.7.1.2). La définition est équivalente: [15]

$$\epsilon = \frac{\text{volume de luamas} - \text{volume du produit}}{\text{volume de luamas}} \dots\dots\dots(13)$$

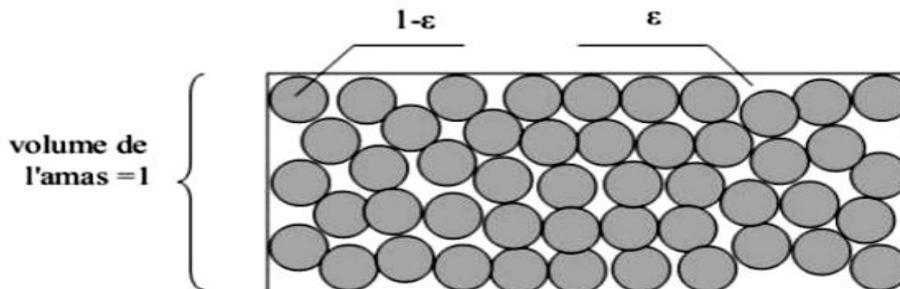


Figure I.2.7.1.2: Volume de contrôle macroscopique [15]

I.2.7.2. 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. [16]

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

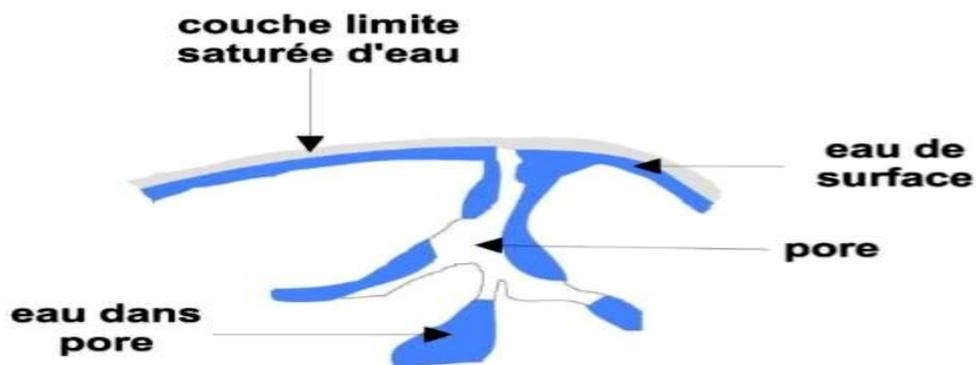


Figure I.2.7.2: Description du solide humide [16]

I.2.7.3 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.

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \dots \dots \dots (14)$$

I.2.7.4 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 base humide de ce produit.

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \dots \dots \dots (15)$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations

$$X = \frac{X_r}{1 - X_r} \dots\dots\dots(16)$$

$$X_r = \frac{X}{1 + X} \dots\dots\dots(17)$$

I.1.7.5. 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. [15]

I .2.8. Les procédés de séchage :

I.2.8.1. Séchage mécanique :

C’est l’élimination du liquide par des forces purement mécaniques (pressage, centrifugation,...). Certains processus de pré concentration et de pré séchage peuvent se réaliser sans transfert thermique mais par simple transfert de quantité de mouvement. [17]

Tableau I.2.8.1: Quelques exemples des méthodes de séchage [17]

Opération	Technique	Mécanisme	Applications
Concentration	Centrifugation	Sédimentation force	Jus de tomate
	Filtration	Tamisage	Boues résiduelles
	Ultrafiltration	Tamisage moléculaire	Lactosérum
Séchage	Egouttag	Gravit	Fromage
	Essorag	Tamisag	Cristaux de sucre
	Pressag	Expressio	Fourrage

I.2.8.2. Séchage chimique :

C’est un procédé basé sur l’utilisation de produits déshydratants (osmotique) (chlorure de calcium, acide sulfurique H₂SO₄ et acide phosphorique H₃PO₄). [17] [14]

I.2.8.3. Séchage thermique :

Ce type d’opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une «activation» de l’eau par une certaine quantité d’énergie apportée par un transfert de chaleur. Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne : [17]

- Transfert de chaleur interne, de la source de chaleur vers la surface du produit.
- Transfert de chaleur interne, de la surface vers le cœur du produit.
- Transfert de masse interne, du cœur vers la surface du produit.
- Transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur. [17]

I.2.9. Choix du procédé de séchage :

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

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale
- Débit de produit exigé.
- Sensibilité de produit vis-à-vis de la chaleur.
- Sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité,...). [16]

I.3. La cinétique de séchage :

I.3.1. Les courbes de séchage :

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (température, hygrométrie, vitesse de l'air asséchant). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps. Si dans une opération de séchage on procède à la mesure de la masse du produit à intervalles réguliers, on obtiendra ce qu'on appelle la courbe de vitesse de séchage. Le séchage peut être suivi graphiquement de différentes façons (figure suivante). [18]

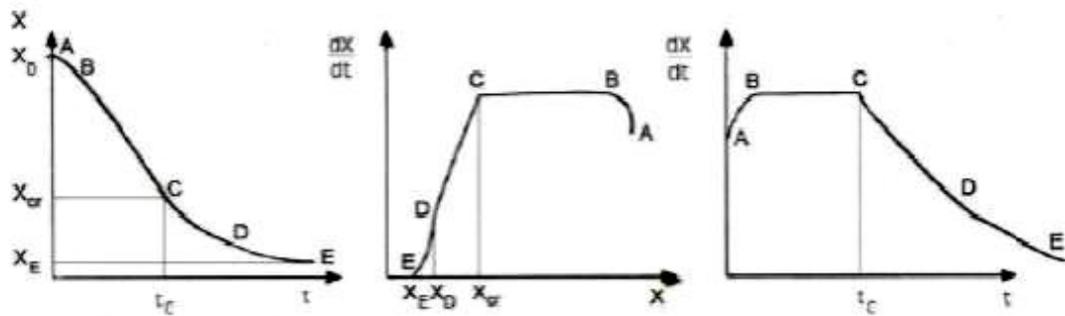


Figure I.3.1 : Courbes de séchage caractéristiques, pour un séchage par gaz dont les caractéristiques sont maintenues constantes [Bossart, 2006].

- ⇒ Le premier graphique montre l'évolution en fonction du temps du taux d'humidité du solide (humidité absolue).
- ⇒ Le deuxième graphique représente la vitesse de séchage (la quantité d'eau enlevée par kilogramme de matière sèche et par unité de temps) en fonction du taux d'humidité du solide.
- ⇒ Le dernier graphique montre l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps.

I.3.2. Les différentes phases de séchage : [18]

Les évolutions de la teneur en eau et de la vitesse de séchage d'un solide humide exposé à un flux d'air aux caractéristiques constantes (vitesse, température et humidité) présente 03 phases qui sont :

- **Phase 0** : phase transitoire, de mise en régime thermique (AB) :

Dans cette phase, la température du produit tend vers la température humide de l'air de séchage (la température humide est obtenue par l'utilisation du diagramme d'air humide). Cette période est courte et correspond à l'évaporation de surface. Le point B est atteint lorsque l'équilibre entre le produit et l'air asséchant est atteint en surface.

- **Phase 1** : phase de séchage à vitesse constante (BC) :

Durant cette phase, la surface du produit est saturée, à cause soit de la présence en quantité importante d'eau à la surface du produit, soit d'une diffusion rapide d'eau de l'intérieure du produit vers sa surface (Chaurreau et al, 1991)

L'eau libre est éliminé a flux –masse constant par évaporation a la surface ou l'écart

entre la pression de vapeur saturante a la surface et celle de va peur de l'air ambiant est constant et ca est due a un apport de chaleur. (Figure suivante). [18]

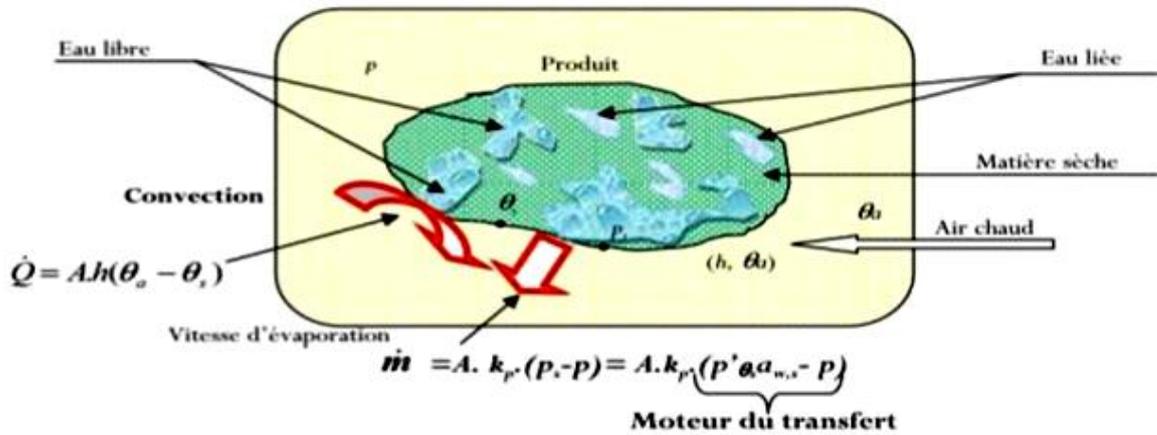


Figure I.3.2.1.: Schématisation des transferts pendant la phase a vitesse constante. [18]

L'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide; L'activité de l'eau (a_w) à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit. Le front de séchage recule au cœur du produit et la vitesse de séchage s'annule au point D ou la teneur en eau d'équilibre M_e est atteinte par le produit tout entier .

- **Phase 2** : phase de séchage à vitesse décroissante (CE) : [18]

Elle succède à la phase à vitesse constante. Elle débute du point critique atteint à la fin de la phase (I). Durant cette phase, la surface du produit à sécher n'est plus saturée en eau. Il se crée un front d'évaporation se dirigeant progressivement vers l'intérieur du produit. L'énergie apportée par la source de chaleur (l'air chauffé) ne sert plus uniquement à l'évaporation de l'eau du produit, mais aussi à augmenter sa température. Le potentiel d'échange (la vitesse de séchage) décroît et la température du produit augmente.(Voir figure suivante).

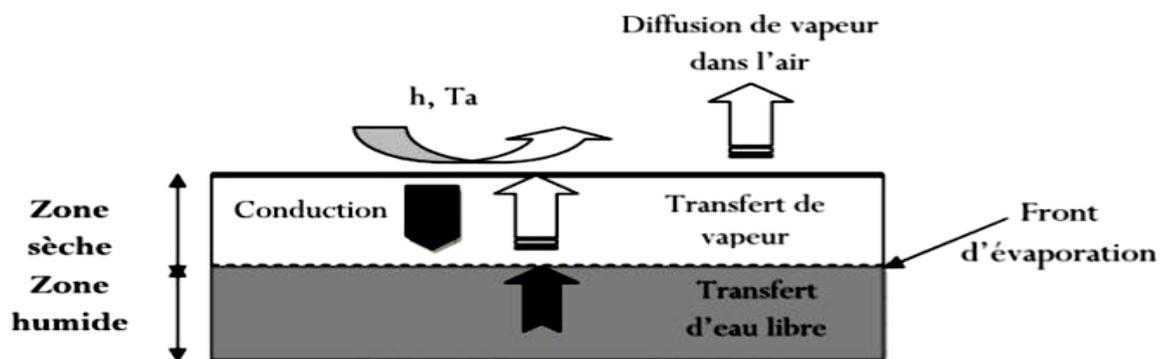


Figure I.3.2.2: Schématisation des transferts pendant la phase de ralentissement. [18]

L'allure de séchage dans cette phase dépend de la disparition de l'eau libre en surface de produit ; l'épaisseur du produit ; la diffusivité de l'eau dans le produit ; la résistance mécanique des parois cellulaires et le croutage.

Pour les matériaux hygroscopiques, il existe une phase supplémentaire ou tout le produit se trouve dans le Domain hygroscopique. Il reste juste de l'eau liée qui provoque une nouvelle diminution de la vitesse de séchage jusqu'à atteindre la teneur en eau finale équilibrée fournie par l'isotherme de sorption. [18]

I.3.3 La vitesse de séchage:

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

- ✓ La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- ✓ La température, l'humidité et la vitesse de l'air sécheur. [19]

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

- ✓ Soit on utilise les vitesses de séchage expérimentales d'une fine couche de produit en recherchant une corrélation qui donne directement l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps et des caractéristiques de l'air asséchant
- ✓ Soit on se donne un modèle logique de transfert d'humidité entre le produit et l'air, les résultats expérimentaux servant à recalibrer le modèle. [20]

I.3.4. Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage :

I.3.4.1. Influence de la température de l'air :

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air élevée. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau dans le produit augmentent avec la température. [21]

I.3.4.2. Influence de la vitesse de l'air :

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible. [21]

I.3.4.3. Influence de l'humidité de l'air :

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. De même que pour la vitesse de l'air, cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente. [21]

Il y a autres influences sont:

- Le taux de recyclage de l'air de séchage
- Le calibre du produit à sécher
- L'épaisseur du produit à sécher (E_p)

I.3.5. Modélisation des cinétiques de séchage :

Le problème de la modélisation des courbes de séchage solaire consiste en général à élaborer une fonction vérifiant l'équation suivante : $MR = f(t)$.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \dots \dots \dots (18)$$

Avec M_t , M_e et M_0 sont les valeurs de la teneur en eau (base sèche) respectivement à l'instant t , à l'infini (équilibre) et à $t=0$. [22]

Les vitesse de séchage ont été calculées en utilisant l'équation suivante :

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \dots \dots \dots (19)$$

Avec $M_{t+\Delta t}$ et M_t sont la teneur en eau à l'instant et la teneur en eau à l'instant $t + \Delta t$ en Kg d'eau / Kg de matière sèche, respectivement, t est le temps de séchage en minute. [22]

Etant donné la complexité des phénomènes intervenant lors du séchage d'un produit, plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques ou semi-empiriques pour décrire les courbes du séchage. Les équations de ces modèles expriment l'évolution de la teneur en eau réduite MR en fonction du temps.

Le Tableau I.3.5. regroupe quelques équations empiriques rapportées dans la littérature pour décrire la cinétique de séchage solaire en couche minces d'un produit. [22]

Tableau I.3.5: Modèles mathématiques de séchage solaire en couches minces [Benseddik, 2018].

N°	Modèles	Équations	Référence
01	Newton (Lewis, Exponential, Single exponential)	Model $MR = \exp(-kt)$	[Lewis, 1921]
02	Page Model	$MR = \exp(-kt^n)$	[Xanthopoulos et al., 2007]
03	Modified Page Model	$MR = \exp(-(kt)^n)$	[Midilli et al., 2002]
04	Henderson and Pabis (Single term, Generalized exponential) Model	$MR = a \exp(-kt)$	[Zhang et al., 1991]
05	Logarithmic (Asymptotic, Yagcioglu et al.) Model	$MR = a \exp(-kt) + b$	[Yaldiz et al., 2002]
06	Midilli-Kucuk (Midilli, Midilli et al.) Model	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[Yaldiz et al., 2002]
07	Approximation of Diffusion (Diffusion Approach) Model	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	[Yaldiz et al., 2002]

Le coefficient (R^2) était l'un des principaux critères pour sélectionner le meilleur modèle pour définir les courbes de séchage [Balbay et al., 2012]. En plus de (R^2), les différents paramètres statistiques tels que le (χ^2) et le racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ont été utilisés pour déterminer la qualité de l'ajustement. Ces coefficients peuvent être calculés comme suit [Naderinezhad et al., 2016 ; Ruhanian et al., 2016] :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{exp,i})^2} \dots\dots\dots (20)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N - n} \dots\dots\dots (21)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pré,i} - MR_{exp,i})^2} \dots\dots\dots (22)$$

$$\overline{MR_{exp}} = \frac{\sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{N} \dots\dots\dots (23)$$

Où MR_{exp} et $MR_{pré}$ sont, respectivement, la teneur en eau issue de l'expérience et prédite par le modèle, N est le nombre d'observations, n est le nombre de constantes du modèle. [22]

I.4. Le séchage solaire :

Le but du processus de séchage est d'éliminer l'humidité ou l'évaporation de l'eau à l'intérieur du produit, et ce processus ne se fait pas seulement en exposant les produits agricoles au soleil, en les stockant dans un endroit sec et en utilisant également l'air qui est chauffé sous l'influence du rayonnement solaire comme source de chaleur. [23]

I.4.1. Classification des systèmes de séchage solaire :

Les séchoirs solaires sont généralement classés en deux grandes catégories : [9]

- ⇒ Les séchoirs solaires passifs (à convection naturelle) utilisent l'énergie solaire pour chauffer l'air qui a tendance à monter vers le haut pour sortir à travers une cheminée.
- ⇒ les séchoirs solaires actifs (ou à convection forcée), le déplacement de l'air est assuré mécaniquement en utilisant des ventilateurs ou des soufflantes pour forcer l'air à circuler à travers le séchoir.

Sous chaque catégorie, trois familles de séchoirs solaires sont identifiées en fonction de la façon dont l'énergie du rayonnement solaire arrive au produit à sécher, à savoir : [9]

- a. les séchoirs solaires directs :** Dans ces séchoirs, les rayons du soleil frappent directement le produit. Ils sont simples et se composent d'une seule pièce qui représente à la fois la chambre de séchage et le capteur solaire.
- b. les séchoirs solaires indirects :** Dans les séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont même mis à l'abri de la lumière entraînant une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment. Les séchoirs indirects se composent essentiellement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage
- c. les séchoirs solaires mixtes :** Ces séchoirs combinent les principes des deux modes de séchage direct et indirect. Les produits subissent l'action combinée des radiations solaires directes sur le produit et de l'air réchauffé dans un capteur placé en dessous de la chambre de séchage. [9]

Les principaux types de séchoirs à énergie solaire sont illustrés dans le tableau :

Tableau I.4.1. Représentation typique des séchoirs solaires.

	Séchoirs actifs	Séchoirs passifs
Direct [23] [49]		
Indirect [23] [51]		
Mixte: [50] [52]		

I.4.2. Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire :

Tableau I.4.2. Les avantages et les inconvénients pour les différents systèmes de séchage solaire[6]

Type	Les avantages	Les inconvénients
Direct [6]	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure protection contre les poussières, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel. - Pas besoin de main-d'œuvre qualifié. - Grandes possibilités de conception. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dégradation de la qualité par exposition direct au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration. - Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement. - Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments. - Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risque de moisissure.
Indirect [6]	<ul style="list-style-type: none"> - Le produit n'est pas exposé directement au soleil. - Le produit conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C). - Température limitée (55°C). 	<ul style="list-style-type: none"> - Cout important. - Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.
Mixte [6]	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleur contrôle du séchage. - Cela peut être utilisé même en l'absence d'énergie solaire, ce qui réduit les risques d'endommagement du produit. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cout de production et d'investissement élevé. - Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz. - Personnel qualifié pour la maintenance.

I.5. Séchage du produit agro-alimentaire par entrainement :

Diverses techniques existent pour séparer l'eau d'un produit, qui ne supposent pas Forcément sa vaporisation – pressage, égouttage, essorage centrifuge, etc. – et qu'on appellera d'une façon générale « déshydratation ». Le séchage qui demeure la technique la plus répandue et la plus utilisée est donc une technique particulière de déshydratation, le terme de séchage étant réservé au cas de la séparation par vaporisation du solvant. [Vasseur, 2008].

I.5.1. Séchage par entraînement :

Lorsqu'un produit humide est placé dans un courant de gaz (air le plus souvent) suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle d'eau tel que : [24]

- le gaz apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à l'élimination de l'eau
- l'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau. La vapeur d'eau est transférée par diffusion et convection du produit dans le milieu ambiant et est ensuite entraînée par le gaz.

La température de surface du produit reste toujours inférieure ou égale à celle de l'air et donc nettement inférieure à la température d'ébullition de l'eau. [24]

I.6. Activité de l'eau dans le produit :

L'activité de l'eau dans le produit (A_w) est une grandeur liée à l'humidité du produit. G. Lewis & M. Randall, 1923 [17], G. Scott, 1957 [18], M. Loncin, 1961 [19], ont défini l'activité de l'eau a_w dans le produit par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit (P_{vp}) à la pression de vapeur de l'air saturé (P_{vs}). [21]



Figure I.6: Représentation de l'activité de l'eau [17]

$$W_a = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \dots\dots\dots(24)$$

avec :

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

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

Ces deux pressions sont fortement dépendantes de la température, tandis que leur rapport l'est beaucoup moins. Dans le même ordre d'idées, ils justifient que l'humidité relative (H_r) d'une atmosphère (un nombre sans dimension compris entre 0 et 100) est donnée par l'expression : [21]

$$H_r(\%) = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \times 100 \dots \dots \dots (25)$$

L'activité de l'eau dans le produit est donc directement liée à l'humidité relative d'équilibre au-dessus d'un produit par la relation : [21]

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{H_r(\%)}{100} \dots \dots \dots (26)$$

I.7. Taux d'humidité à l'équilibre :

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température. [17]

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} = \frac{M_e}{M_s} \dots \dots \dots (27)$$

I.8. Isothermes de sorption :

I.8. 1. Définition:

L'activité de l'eau a_w dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau (X_{eq}) et de sa température (T) (Boumediene, 2004).

La courbe représentant pour une température donnée la teneur en eau (X_{eq}) d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau (a_w) ou de l'humidité relative de l'air en équilibre (HRE) est appelée : [18]

- 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. [18]

La figure I.8. 1 montre que les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un Produit (passage d' $a_w = 1$ à $a_w = 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité. Il y a un phénomène d'hystérésis. [25]

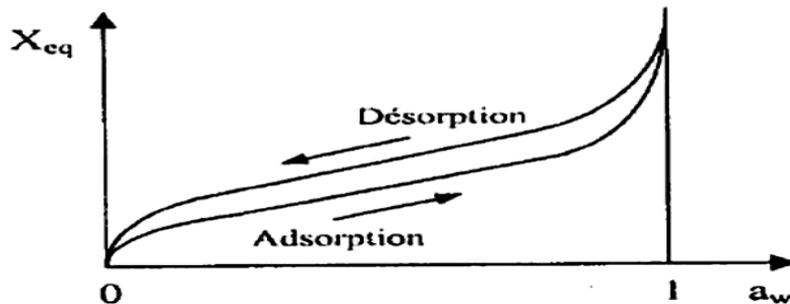


Figure I.8.1: Allure générale des isothermes de sorption [18]

I.8.2. Formes et modèles des isothermes de sorption :

I.8.2.1. Forme générale des isothermes:

Les isothermes d'adsorptions/désorption se composent de trois zones, chaque zone correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit. [26]

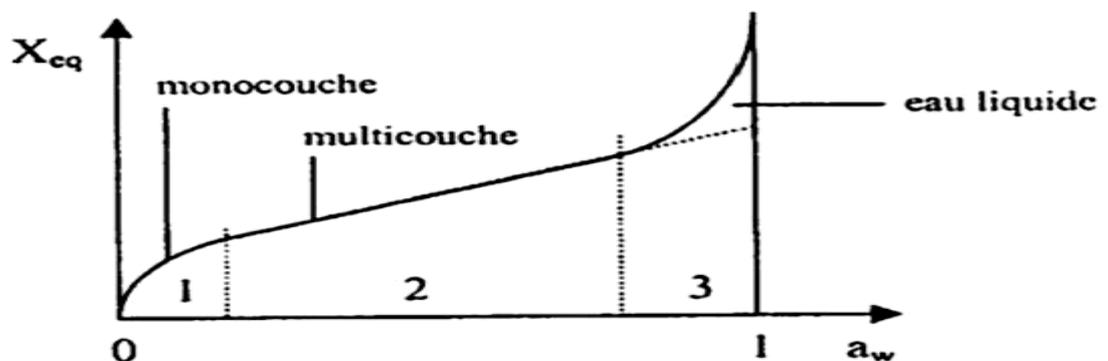


Figure I.8.2.1.1: Différentes zones des isothermes de sorption [27]

- ⇒ **Zone 1 ($a_w < 0.3$)** : correspond à l'eau "fortement liée" dite aussi eau de constitution. L'eau est intimement liée aux composantes biochimiques par des liaisons covalentes; cette eau n'est pratiquement pas disponible comme solvant ou réactif et correspond à la première couche (monocouche) qui entoure la matière sèche d'aliment.
- ⇒ **Zone 2 ($0.3 < a_w < 0.7$)**: correspond à l'eau "faiblement liée", sous forme de couche poly moléculaire (multicouche) recouvrant partiellement la surface du substrat sec. [26]

⇒ **Zone 3 ($a_w > 0.7$):** correspond à l'eau "libre" ou eau "liquide" qui n'est retenue à la surface du substrat sec que par des liaisons hydrogènes. Cette eau est disponible tant comme solvant que réactif. C'est uniquement sous cette forme que l'eau est utilisée par les micro-organismes et peut permettre les réactions enzymatiques. [26]

Cette description très générale des isothermes d'adsorption a été reprise de manière plus précise par l'IUPAC qui a établi six types différents d'isothermes correspondant chacune à un type différent d'interaction et de porosité (figure I.8.2.1.2). [27]

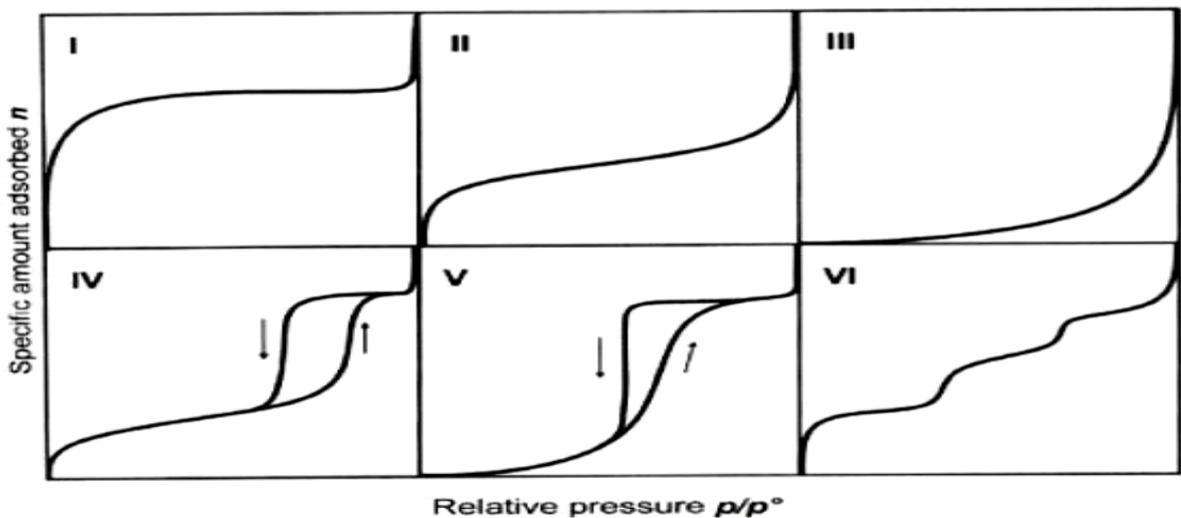


Figure I.8.2.1.2: Différents types d'isothermes suivant la classification de l'IUPAC[27]

- ⇒ **Type I :** Le milieu ne contient que des micropores saturés pour de faibles valeurs de p/p_s , il ne se produit ensuite aucune adsorption pour les valeurs plus élevées qui permettraient de remplir des mésopores.
- ⇒ **Type II :** Le milieu est non poreux ou macroporeux, cette isotherme est caractéristique d'une adsorption multimoléculaire : épaissement progressif de la couche adsorbée.
- ⇒ **Type III :** Le milieu est du même type que pour les isothermes de type II mais les interactions milieu poreux : gaz adsorbé sont faibles. Ce type d'isotherme est rarement rencontré.
- ⇒ **Type IV:** L'isotherme est identique à celle de type II aux basses pressions, un palier de saturation se développe aux hautes pressions. Elle correspond à un milieu mésoporeux dans lequel se produit une condensation capillaire. Le phénomène n'est pas réversible, on observe en général un hystérésis entre les courbes d'adsorption et de désorption. [27]

- ⇒ **Type V** : Le milieu est du même type que pour les isothermes de type IV mais les interactions milieu poreux / gaz adsorbé sont faibles. Ce type d'isotherme est rarement rencontré.
- ⇒ **Type VI**: Cette isotherme correspond à un milieu poreux dans lequel les couches adsorbées se forment les unes après les autres.

Les isothermes réelles obtenues expérimentalement ne correspondent que rarement de manière rigoureuse à l'un des types précités. Il faut donc interpréter chaque portion de l'isotherme en fonction des isothermes types pour interpréter une isotherme expérimentale. [27]

I.8.2.2. Modèles de représentation des courbes de sorption et désorption:

De nombreux modèles empiriques, semi-empiriques ou théoriques ont été proposés pour décrire le comportement des courbes de sorption/désorption déterminées expérimentalement. Toutefois deux modèles sont plus particulièrement utilisés par les chercheurs:

le modèle de BET (Brunauer-Emmet-Teller) particulièrement intéressant pour l'étude de la partie des courbes relative aux faibles teneurs en eau et le modèle de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) qui lui représente les courbes de sorption/désorption jusqu'à une activité de 0,80 à 0,85. [12]

Tableau I.8.2.2. Modèles des courbes de sorption, désorption[26]

Auteurs	Equation du modèle	Parameters	Domaine de validité de courbe	Références
Brunauer-Emmett-Teller (B.E.T)	$X_{eq} = (A+BT)(C a_w) / (1-a_w)(1-a_w+C.a_w)$	A, B, C	Zone 1	Iglesias & Cherif [28]
Oswin	$X_{eq} = (A+BT)(a_w / 1-a_w)C$	A, B, C	courbe Complète	Oswin [29]
Halsey	$X_{eq} = \exp [-\exp(A+BT) / X_{eq}^C]$	A, B, C	courbe Complète	Iglesias & Cherif [28]
Henderson	$1-a_w = \exp [-K.(T+n).X_{eq}^C]$	k n C	courbe Complète	Thompson [30]
Chung-Pfost	$a_w = \exp [(-A/(T+B)) \exp(-CX_{eq})]$	A, B, C	courbe Complète	Pfost [31]
Langmuir	$X_{eq} = 1/[A+B.a_w^{C-1}]$	A, B, C	courbe Complète	Langmuir [32]
Peleg	$X_{eq} = A.a_w^{k1} + B.a_w^{k2}$	A, B k1 k2	courbe Complète	Peleg [33]
Guggenheim Anderson-de Boer (G.A.B)	$X_{eq} = A.B.C.a_w / [1-B.a_w][1-B.a_w+B.C.a_w]$	A, B, C	courbe Complète	Van den Berg [34]

I.8.3. Méthodes d'obtention des isothermes de sorption :

Il y a deux méthodes plus utilisées pour déterminer expérimentalement les isothermes de sorption.

I.8.3.1. Méthode gravimétrique (Eau) :

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 HR 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, HR). Connaissant sa masse humide, il suffit alors

de déterminer sa masse sèche pour en déduire sa teneur en eau X , le couple (HR, X) fournit un point de l'isotherme de sorption ou de désorption.

Le produit est placé dans un récipient étanche à l'intérieur duquel une solution maintient une humidité relative constante (figure I.8.3.1). Cette solution peut être une solution saline saturée en sel ou une solution d'acide sulfurique de concentration fixée. La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatée. On utilise autant de sels ou de concentration différents (et donc de récipients) que l'on veut obtenir de points sur l'isotherme. [27]

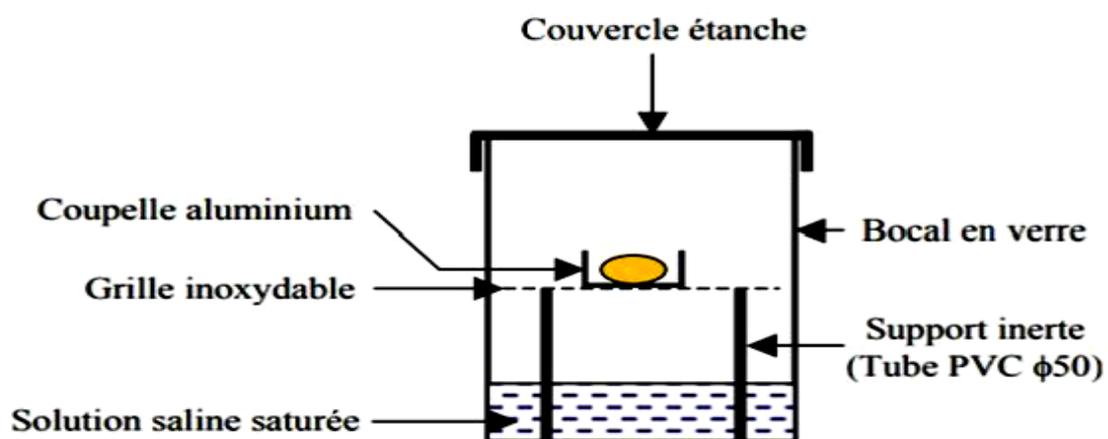


Figure I.8.3.1: Schéma d'un montage expérimental type pour la méthode des solutions salines [27]

I.8.3.2. Méthode dynamique (Azote) :

L'appareil est principalement constitué d'un cylindre calibré dans lequel évolue un piston et d'une éprouvette dans laquelle on place l'échantillon dont on veut mesurer la courbe de sorption. On peut déterminer deux types d'isothermes : [27]

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

Dans les deux cas, la connaissance des valeurs des pressions, des volumes et des températures permet de calculer : [27]

- la variation totale de masse d'eau dans le système entre deux injections ou retraits de volumes,
- la variation de masse de vapeur d'eau dans l'éprouvette, et d'en déduire la variation de la masse d'eau contenue dans l'échantillon et de remonter ainsi à la variation de sa teneur en eau. Les figures I.8.3.2.1 et I.8.3.2.2 illustrent le principe de la méthode. [27]

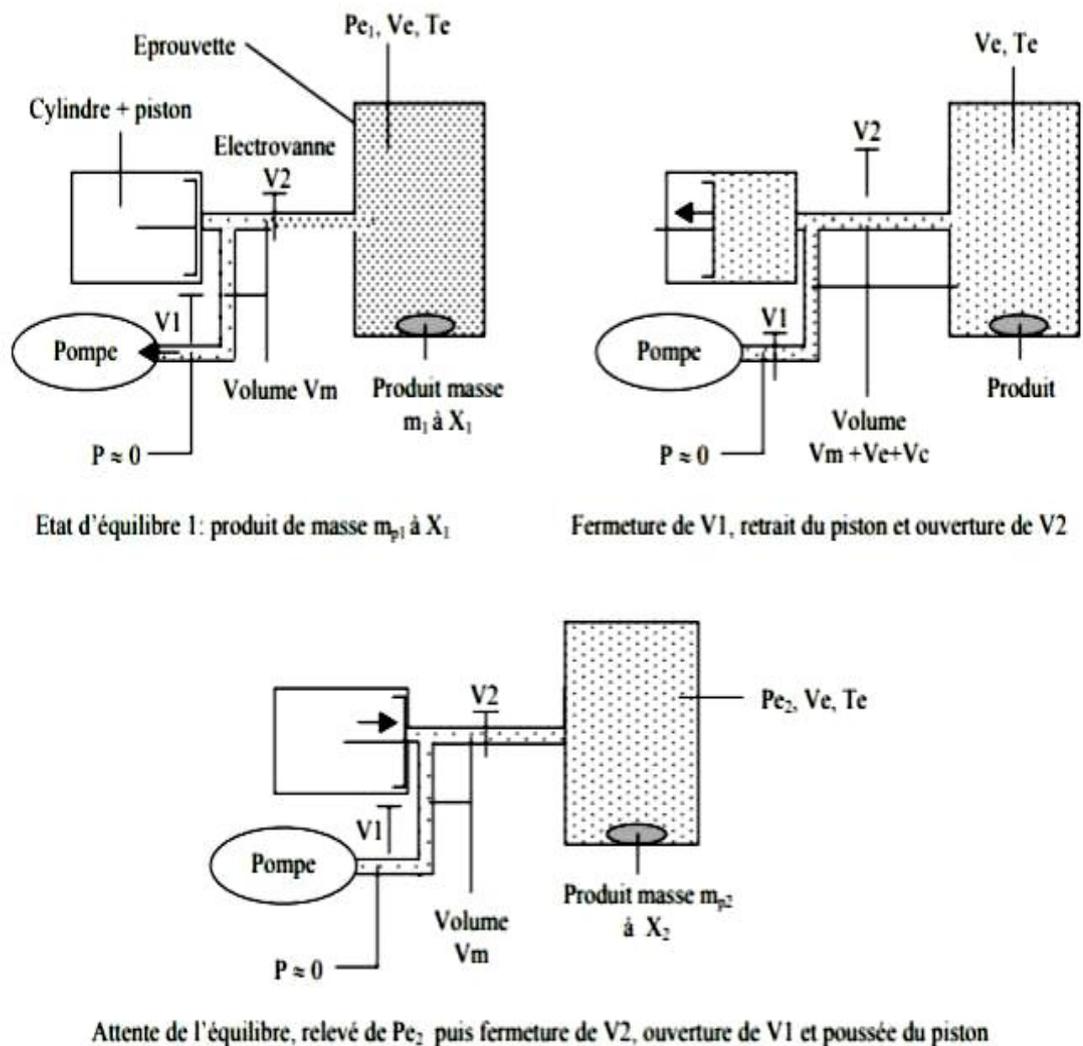


Figure I.8.3.2.1: Schématisation de la phase de désorption [27]

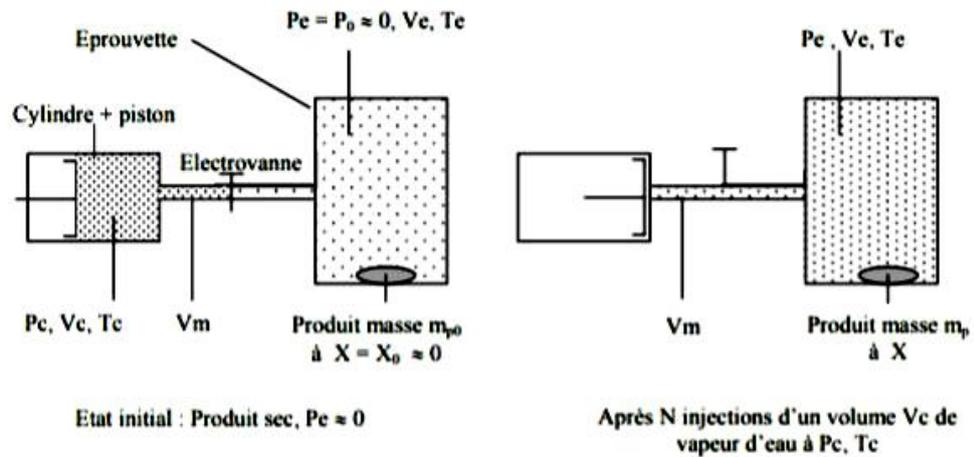


Figure I.8.3.2.2: Schématisation de la phase d'adsorption [27]

I.8.4. Chaleur isostérique de sorption :

Le principe de Vant Hoff Le Chatelier prédit qu'à teneur en eau constante, la pression de vapeur saturante diminue avec l'augmentation de la température. Il est donc possible de calculer la chaleur isostérique Q_{st} qui représente l'énergie de fixation de l'eau au substrat et donc la chaleur supplémentaire à la chaleur de vaporisation de l'eau pure nécessaire pour déshydrater le produit. Q_{st} peut être calculée en utilisant les courbes de sorption obtenues à différentes températures et l'équation de Clausius-Clapeyron (Iglesias & Chirife, 1976a; 1982) : [21]

$$\frac{\partial \ln(A_w)}{\partial(T)} = \frac{Q_{st}}{RT^2} \dots \dots \dots (28)$$

En intégrant l'équation (28) on obtient :

$$\ln(A_w) = -\left(\frac{Q_{st}}{R}\right) \frac{1}{T} + K \dots \dots \dots (29)$$

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

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

La valeur de Q_{st} (kJ/mol) augmente généralement à mesure que le degré de déshydratation augmente (C. T. Kiranoudis & al., 1993). [21]

I.8.5. Estimation de la durée de vie :

L'établissement de l'isotherme de sorption d'un aliment emballé peut aider à estimer sa durée de conservation dans des conditions de stockage données. Le modèle de Heiss et Eichner peut être utilisé pour estimer le temps de stockage potentiel sur la base d'un aw critique pour un système particulier dans des conditions de stockage données. Ce modèle était basé sur l'hypothèse que la vapeur de sorption d'eau est le facteur déterminant, entre autres comme la présence de bactéries de détérioration, d'oxygène et de lumière qui pourraient limiter la durée de conservation. L'équation est donnée comme: [35]

$$t_s = \frac{\ln\left(\frac{X_e - X_i}{X_e - X_c}\right)}{K_s \cdot \frac{A \cdot P_0}{M_s \cdot S}} \dots\dots\dots(30)$$

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

t_s : est la durée de conservation potentielle du produit (temps en jours pour que le produit emballé se gâte par détérioration microbienne et biochimique avec perte de qualité sensorielle).

A : est la superficie du paquet, m^2 .

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

P_0 : est la pression de vapeur à la température de stockage, en Pa .

S : est la pente de l'isotherme des produits, supposée linéaire sur la gamme X_e et X_c .

X_e : est la teneur en humidité à l'équilibre,

X_c : est la teneur en humidité de stockage en toute sécurité

X_i : est la teneur en humidité initiale du matériau lorsqu'il est emballé, kg / kg de base sèche.

La détermination de la durée de vie est dépende de la modèle choisi, ils diffèrent d'un modèle à l'autre, par exemple la formule de l'équation est : [35]

⇒ BET et GAB :

$$t_s = \frac{\ln\left(\frac{h_a - aw_c}{h_a - aw_0}\right)}{\frac{A \cdot P_{gv} \cdot e_s}{M \cdot P_{\alpha} \cdot \alpha}} \dots\dots\dots(31)$$

α : est la pente de l'isotherme (g / g),

P_α : est la pression atmosphérique (kPa),

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

e_s : est la pression de vapeur d'eau saturante à la température du colis (kPa),

A : est la surface de l'emballage (m^2)

g_v : est la conductance de l'emballage ($g\ m^{-2}\ s^{-1}$).

$$\Rightarrow \text{Hernandez : } t_s = \frac{\ln\left(\frac{Y_0 - Y_{i,t=0}}{Y_0 - Y_{i,t}}\right)}{\frac{P \cdot A \cdot P_{\text{sat}}}{M_s \cdot L}} \dots \dots \dots (32)$$

M_s : masse séchée (g).

P : perméabilité à la vapeur d'eau du film plastique ($g\ \mu m\ m^{-2}\ d^{-1}\ kPa^{-1}$).

A : surface effective de l'emballage (m^2) pour l'échange de gaz.

P_{sat} : pression de vapeur à saturation pour une température donnée (kPa).

Y_0 : humidité relative externe.

Y_i : humidité relative de l'espace de tête du paquet.

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

$Y_{i,t}$: Hr lorsque la teneur X_{eq} de l'échantillon a atteint sa valeur maximale. [35]

CHAPITRE II

Approche expérimentale

A. Isotherme de désorption/ adsorption

II.A.1. Introduction :

Les isothermes de sorption sont d'une grande importance dans l'industrie agro-alimentaire 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'eau présentes dans le produit. Cet équilibre est caractérisé à partir de ces courbes dont la détermination expérimentale exige un grand nombre de mesures. Elles sont également utiles lors d'un processus de séchage solaire convectif. En effet, c'est à partir des courbes de sorption qu'on détermine la teneur en eau final d'un produit à sécher. [36]

L'objectif visé par cette étude est la détermination expérimentale des courbes de sorption d'un produit de menthe verte (*Mentha spicata*) la plus consommée en Algérie, et ce pour différentes valeurs de la température de travail. Le choix de la plante est justifié par leur abondance et leur importance phytothérapeutique dans la région d'Adrar (au sud d'Algérie). Elle est très utilisée par exemple pour le thé et dans l'industrie cosmétique et pharmaceutique. Dans ce travail, on détermine l'équilibre par la méthode des solutions de sels saturés. A la fin de l'opération de séchage, la teneur en eau du produit atteint un seuil qui correspond à l'équilibre thermodynamique avec le milieu ambiant et sa masse devient quasiment stationnaire.

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 :

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

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 est réalisé dans cette étude par la méthode gravimétrique. Bien que les isothermes de sorption et de désorption aient des allures semblables. [36]

II.A.2.1. Définition de Menthe verte (*Mentha spicata*) :

La menthe verte (*Mentha spicata*) est une plante vivace de la famille des Lamiacées et qui porte aussi différents noms comme la « menthe en épi », la « menthe douce ». Cette espèce peut atteindre 60 cm de hauteur. Elle est pourvue de stolons qui assurent sa multiplication, ce qui peut la rendre envahissante. Ses feuilles, d'un vert profond, ils sont lancéolées et avec des bords en dents de scie. Ce feuillage porte des glandes sécrétant une essence. Ses fleurs, rosées ou blanches, se réunissent en épi et apparaissent en été. [37]



Figure II.A.2.1.1. Un échantillon du menthe verte (*Mentha spicata*)



Figure II.A.2.1.2. Une image illustration des feuilles du menthe verte (*Mentha spicata*)[45]

II.A.2.2. Origines :

Les origines de la menthe sont encore bien imprécises, la zone géographique de départ étant un des rares faits ou les auteurs se retrouvent, elle viendrait d'une vaste région englobant le nord de l'Afrique, le bassin méditerranéen, l'Europe et le Proche-Orient. Certaines études ont d'ailleurs montré que *Mentha spicata* est le résultat d'une hybridation entre *Mentha longifolia* et *Mentha suaveolens*. [37]

II.A.2.3. Description :

Plante vivace, robuste, de 50 cm à 1 mètre, d'un vert sombre, à odeur suave très pénétrante. [37]

- **Feuille** : Les feuilles sont opposées persistantes, sur les 2 faces, glabres ou presque glabres.
- **Fleur** : Les fleurs poussent en grappe à l'aisselle de la feuille. Les fleurs sont rosées ou lilas, en épis terminaux peu denses, longs, grêles, La fleur présente une bractée qui dépasse les pièces florales, la fleur est pentamère oligostémone et ses pétales sont soudés (gamopétales).
- **Inflorescence** : L'inflorescence est indéfinie en épi cylindrique dense.
- **Tige** : La tige de la menthe verte est dite quadrangulaire (carrée) ascendante (orthotrope). Elle est de couleur pourpre. La taille de la menthe verte peut atteindre au maximum une hauteur de 1,20 mètre mais en moyenne varie entre 0,30 et 0,60 m

Les tiges glabres ou glabrescentes, rameuses. La menthe verte est une plante à rhizomes traçants. [37]

- **Racines** : La racine est une racine pivotante qui dure plus de 3 ans. On les trouve en dessous de chaque pied, des rhizomes (tiges souterraines) servent à la propagation de la plante. [38]



Figure II.A.2.3. La morphologie de la menthe verte[46]

II.A.2.4. Habitat :

La menthe verte pousse essentiellement sur les terrains riches profonds et frais, elle n'aime pas les sols calcaires. On la trouve surtout en basse altitude dans les régions tempérées entre 400 et 1800 mètres. Elle préfère les lieux ensoleillés à semi ombragés. [38]

II.A.2.5. Phénologie :

La menthe verte fleurit de la fin du printemps au début de l'automne (de juin à septembre/octobre), parfumée et mellifère. Ses feuilles sont persistantes. [38]

II.A.2.6. Pollinisation :

La pollinisation est peu réalisée par le vent (anémophile) et plutôt par les insectes (entomophile). [38]

II.A.3. Les Propriétés de la menthe verte :

Les propriétés de l'huile essentielle de Menthe verte s'expliquent par la présence de composés actifs à l'origine présents dans les plantes fleuries de *Mentha spicata* (ou *viridis*).

- Cholagogue (favorise l'excrétion biliaire) ;
- antibactérienne ;
- anti-inflammatoire ;
- Cicatrisante ;
- Anti-oxydante ;
- Calmante, relaxante ; Les cétones de l'huile essentielle de menthe verte ont une action relaxante sur le système nerveux (en inhibant certains messagers spécifiques), ce qui aide à limiter les états d'anxiété ou de stress chronique ;
- Odeur très agréable. [37]

II.A.4. Utilisation de la menthe verte :

La menthe verte est utilisée dans de nombreux traitements et cela depuis la nuit des temps. Ses vertus sont multiples et ses modes d'utilisation en font une des plantes médicinales les plus connues. Elle est réputée pour soigner de nombreux troubles dont en voici quelques uns des plus courants : affections dermatologiques, troubles digestifs variés, spasmes du colon, colites, troubles fonctionnels digestifs d'origine hépatique, rhume, nez bouché, affections de la bouche et de l'oropharynx et bien plus encore.

Toutefois, il faut faire attention car son usage est interdit lors de la prise de médicaments homéopathiques. Prise en trop grande quantité elle peut être excitante et provoquer des convulsions.

La menthe verte est aussi utilisée en agroalimentaire dans différents produits du quotidien, comme par exemple les chocolats à la menthe (After Eight), les dentifrices et

lotions pour bain de bouche, ou encore dans certaines liqueurs. On l'utilise principalement car elle contient du menthol qui donne une sensation de fraîcheur. [38]

a. Médicinale :

Voici la liste des différents effets thérapeutiques qu'on lui accorde : [38]

- calmant
- cholagogue
- cholérétique
- cicatrisant
- bactéricide
- fébrifuge
- hépato stimulant
- vasoconstricteur
- tonique
- antispasmodique
- analgésique
- anti-inflammatoire

b. Drogue :

- feuille sèche

II.A.5. Composition :

Tableau II.A.5. La composition de la menthe verte. [39]

NUTRIMENT	MENTHE : TENEUR POUR 100 G
Protéine	3,6 g
Glucide	3,4 g
Lipide	0,8 g
Eau	84 g
Alcool	0 g
VITAMINE	
Bêta-carotène (provitamine A)	740,0 µg
Vitamine C	25,4 mg
Vitamine E (tocophérol)	5,0 mg
Vitamine B1 (thiamine)	0,1 mg
Vitamine B2 (riboflavine)	0,3 mg
Vitamine B3 (niacine)	1,3 mg
Vitamine B5 (acide panthoïque)	0,3 mg
Vitamine B6	0,1 mg
Vitamine B9 (acide folique)	110,0 µg
MINÉRAU	
Calcium	217,0 mg
Phosphore	69,3 mg
Magnésium	71,5 mg
Potassium	429,0 mg
Sodium (sel)	25,3 mg
Fer	8,8 mg
Cuivre	0,3 mg
Zinc	1,0 mg
Manganèse	1,2 mg

II.A.6. MATERIEL ET MODE OPERATOIRE :

Nous avons opté pour la méthode gravimétrique statique, et nous avons utilisé des solutions de sels saturés : NaOH, LiCl, KF, MgCl₂, (Mg(NO₃)₂, 6H₂O), NaNO₂, NaCl, KCl et (BaCl₂, 2H₂O). Ces solutions sont préparées dans des bocaux hermétiques et sont maintenues dans une étuve régulée en température.

L'échantillon est suspendu dans le bocal, au-dessus des sels, et reste donc dans une ambiance stabilisée en température et en hygrométrie. L'expérience est réalisée pour trois températures 30, 40 et 50 °C.

La masse du produit utilisé pour la désorption est de 2,000 ± 1,000 g et de 0,200 ± 0,100g pour l'adsorption.

Le suivi des pertes de masse pour la désorption et le gain de masse pour l'adsorption est assuré par une balance de précision ± 0,001 g. L'équilibre hygroscopique est obtenu lorsque l'échange entre le produit et l'air ambiant est terminé.

Dès que les masses humides sont déterminées, les échantillons sont introduits dans une étuve à 105°C pendant 24h afin de déterminer leurs masses sèches. Le produit subit un préséchage pour subir le phénomène d'adsorption.

Le préséchage est réalisé dans une étuve portée à une température de 60°C et ceci jusqu'à déshydratation maximale du produit. [40]

II.A.6.1. Préparation des solutions salines saturées:

Les solutions salines saturées utilisées sont classés selon leurs humidités relatives, qu'elles varient de 6 à 90% dans le tableau suivant. (Tableau II.A.6.1.)

Tableau II.A.6.1.1. Les valeurs standards des humidités relatives données par différents sels en fonction de la température [12] [47]

Les solutions salines saturées	Formule brute	Activité de l'eau (A _w)		
		À T=30°C	À T=40°C	À T=50°C
L'hydroxyde de sodium	NaOH	0,07	0,07	0,06
Le chlorure de lithium	LiCl	0,11	0,11	0,10
Le fluorure de potassium	KF	0,27	0,22	0,20
Le chlorure de magnésium	MgCl ₂	0,32	0,32	0,31
Le nitrate de magnésium	Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	0,51	0,48	0,45
Le nitrite de sodium	NaNO ₂	0,63	0,62	0,59
Le chlorure de sodium	NaCl	0,75	0,75	0,75
Le chlorure de potassium	KCl	0,84	0,82	0,81
Le chlorure de baryum	BaCl ₂ , 2H ₂ O	0,90	0,89	0,88



Figure II.A.6.1.1 Les sels utilisés dans l'expérience

- ❖ Il est important de savoir qu'une fois la solution est saturée, il n'est plus possible de résoudre de soluté dans un solvant (ici, le solvant est le sel et le solvant est l'eau).

1) La détermination de volume d'eau approprié de préparation des solutions salines saturées:

Dans notre expérience, nous avons d'abord mesuré le volume d'eau approprié dans les bocaux hermétiques dans lesquels l'échantillon doit être placé. Nous avons donc obtenu 140 ml d'eau pour préparer chaque solution. À travers :

1. Mesurer le volume d'eau qui remplira le bocal complètement, ce qui est 700ml
2. Pour connaître le volume de la solution qui a créé un bon environnement humide, pour faire notre expérience, le volume total (700 ml) doit être cinq fois le volume de solution.

Donc, le volume de la solution est 140 ml.

2) Détermination de la masse de sels nécessaire pour obtenir des solutions salines saturées :

En réalisant de simples calculs, nous avons pu constater que la masse maximale de sel que l'on peut dissoudre dans un litre d'eau est sa valeur de solubilité par exemple :

Le fluorure de potassium (485g/l) ; ça-veut-dire la masse maximale de KF que l'on peut dissoudre dans un litre d'eau est d'environ 485g.

Dans le Tableau (II.A.6.1.2) on a consulté les différentes valeurs des solubilités des sels utilisés et cela pour avoir une idée préalable sur leurs masses.

Chaque solution saturée est obtenue en dissolvant, dans un bocal contenant 140 ml d'eau distillée, une masse mi pesée dans une balance à affichage numérique de précision 0.001g ; pendant la préparation, l'agitation des solutions était nécessaire

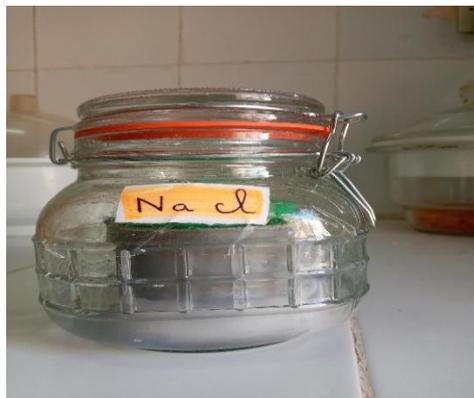


Figure II.A.6.1.1. Le volume de la solution saline approprié dans le bocal



Figure II.A.6.1.2. Le pesage des sels et préparation des solutions salines saturées

- ❖ Nous vous informons également que pour nous assurer que les solutions sont bien saturées, nous faisons de:
 - Versement de X g de soluté de sel lentement dans Les solutions que nous avons préparées plus tôt
 - l'Agitation de la solution (par un agitateur magnétique marque)
 - la Continuation ainsi l'opération jusqu'à saturation de la solution c'est à dire jusqu'au point où le solvant ne dissout plus le soluté de sel.

Les masses des sels ajoutées pour obtenir ces solutions salines saturées sont données dans le tableau (II.A.6.1.2)

Tableau II.A.6.1.2. La solubilité et la masses des sels utilisées pour la saturation

Solutions	Solubilités (g/l)	Masses (g)
NaOH	1090	167,6
LiCl	830	136,2
KF	485	67,9
MgCl ₂	542	90,88
Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	425	138,8
NaNO ₂	820	114,8
NaCl	359	50,26
KCl	340	52,6
BaCl ₂ , 2H ₂ O	360	50,4

- ❖ Les solutions sont mises, ensuite, dans neuf bocaux aux fermetures étanches.



Figure II.A.6.1.3. Les bocaux aux fermetures étanches

II.A.6.2. Préparation du dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure (II.A.6.2.1), consiste une série de neuf bocaux de chacun fermeture étanche.

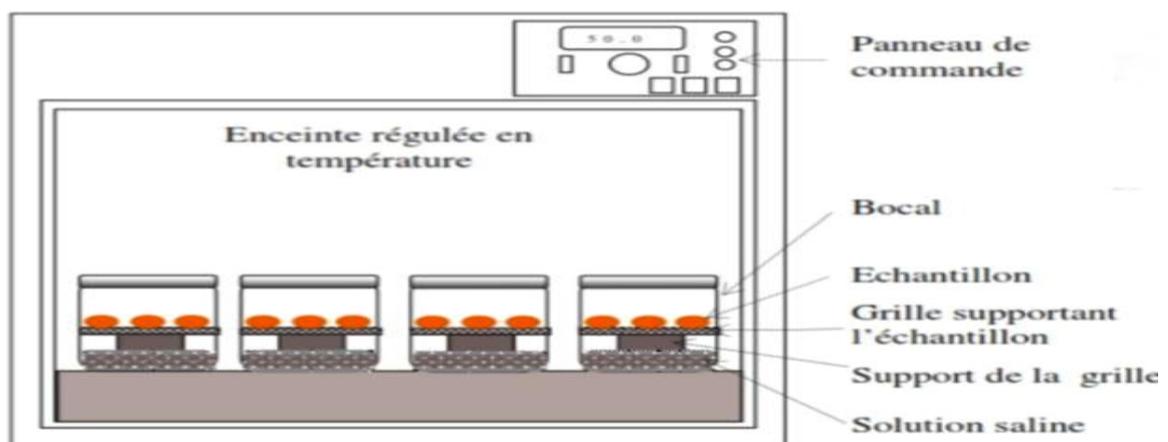


Figure II.A.6.2.1. Schéma du dispositif expérimental[48]



Figure II.A.6.2.2. Schéma d'une unité du dispositif expérimental

Chaque bocal est rempli au 140 ml d'une solution de sel saturé et comporte un grille supportant de l'échantillon lequel est placé un claie contenant environ 1 g de la menthe verte frais pour le processus de désorption.



Figure II.A.6.2.3.a. Le pesage de la masse de la menthe verte fraîche



Figure II.A.6.2.3.b. Prendre un gramme au chaque sel utilisées pour le processus de désorption

Pour obtenir l'isotherme d'adsorption, les échantillons de la menthe verte sont préalablement séchés dans une étuve réglée à une température de 60°C. Comme le montre la figure (II.A.6.4). Ensuite, nous plaçons une autre claie contenant environ 0,1 gramme de l'échantillon séché à côté de la première claie contenant l'échantillon frais. Comme le montre la figure (II.A.6.4)



Figure II.A.6.4. Les deux échantillons fraîche et sèche dans chaque bocal

Avant de mettre le produit à étudier dans les bocaux. On laisse les bocaux dans le bain thermostatée pendant 24 heures pour que les solutions salines puissent s'adapter à une température de travail fixe, soit 30 °C. pour qu'elles sont prêt à l'utilisation dont les expériences d'adsorption et de désorption qui seront étudiées à trois températures différentes : 30 puis 40 et à la fin 50°C et à neuf valeurs d'humidité relative.



Figure II.A.6.5. Le disposition des boucaux dans l'étuve

Pour déterminer les masses humides M_h du produit dans chaque bocal, Il faut noter que pesés tous les jours jusqu'à ce qu'il soit confirmé qu'il a été atteint que l'équilibre hygroscopique,



Figure II.A.6.5. L'échantillon de la menthe verte à l'équilibre hygroscopique

Dès que les masses des échantillons deviennent presque stationnaires, on arrête l'expérience et les échantillons sont pesés et placés dans une étuve réglée à environ 105 °C jusqu'à remarque que leurs masses ne varient plus avec le temps.



Figure II.A.6.6. L'échantillon à l'étuve de séchage à 105°C
Après l'équilibre hygroscopique

Figure II.A.6.7. Les masses sèches d'échantillon



Figure II.A.6.8. L'échantillon dans un dessiccateur après l'étuvage à 105°C

Cette dernière opération a pour but de déterminer les masses sèches M_s des neuf 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_{eq}

$$X_{eq} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \dots \dots \dots (2)$$

On change la température du bain thermostatée et on reprend la même expérience pour les températures de travail $T = 30 \text{ °C}$, 40 °C , et 50 °C .

B. Détermination de quelques paramètres physicochimiques des échantillons avant et après le séchage

II.B.1. Définitions :

- i. **Matière sèche** : La matière sèche (M_s) est ce que l'on obtient lorsqu'on retire l'eau d'un produit. [41]
- ii. **Matière organique** : La matière organique (M_o) est une matière carbonée d'origine végétale ou animale dont l'évolution sous l'action des micro-organismes. [41]
- iii. **Matière minérale** : Matière non organique faite de composants solide. [42]
La matière minérale est symbolisée (M_m).

II.B.2. Détermination de la teneur en eau :

La matière sèche des produits est déterminée par évaporation de leur humidité sans provoquer la volatilisation des substances constitutives du produit. Elle est obtenue par dessiccation à l'étuve à 105°C, Jusqu'à l'obtention d'un poids constant.



Figure II.B.2.1. L'étuve de séchage



Figure II.B.2.2. L'étuvage à 105°C

La teneur en eau calculée selon la formule suivante : [43]

$$H\% = \frac{(M_1 - M_2)}{P} \cdot 100 \dots \dots \dots (3)$$

Où:

M_1 : La masse de capsule + matière fraîche avant étuvage en (g)

M_2 : La masse de capsule + matière fraîche après étuvage en (g)

P : La masse de prise d'essai (g)

La teneur en matière sèche peut être exprimée par :

$$M_S\% = 100\% - H\% \dots \dots \dots (4)$$

II.B.3. Détermination de la teneur en cendres :

On fait calcinée les échantillons à 550°C dans un four à moufle jusqu'à l'obtention d'une cendre blanchâtre de poids constant.



Figure II.B.3.1. L'échantillons dans un four à moufle



Figure II.B.3.2. La menthe verte Après l'incinération

Le pourcentage en masse de cendre brutes est exprimé par la formule suivante : [44]

$$TC\% = \frac{(M_2 - M_0)}{(M_1 - M_0)} * 100 \dots \dots \dots (5)$$

Ou :

M₀ : Masse en gramme de la capsule d'incinération

M₁ : Masse en gramme de la capsule d'incinération chargée de la prise d'essai

M₂ : Masse en gramme de la capsule d'incinération chargée des cendres

La teneur en matière minérale (**M_m%**) est la même pourcentage en masse de cendre brute (**TC%**)

CHAPITRE III

Résultats expérimentaux et modélisation

III. Résultats expérimentaux et modélisation :

La région d'Adrar possède les meilleures qualités de plante de menthe verte dans Algérie. Nous avons choisir la menthe verte (spicata) pour faire notre étude qu'on ont travaillées dans laboratoire de l'URER/MS de l'équipe de séchage solaire.

Après avoir réalisé tous les expériences de notre étude, On a obtenu au des résultats que nous avons organisés comme suit :

III.A.1. Composition physicochimique du menthe verte :

Le tableau suivant représente les masses d'échantillon du menthe verte traitée dans ce travail :

Tableau III.A.1. Les masses d'échantillon du menthe verte

Masse (g)	M _V	M ₀	M ₁	M ₂
1	25,955	2,003	26,517	26,017
2	24,904	2,005	25,448	24,963
3	24,755	2,005	25,394	24,831

M_V= la masse de capsule vide.

M₀= la masse de l'échantillon initiale.

M₁= la masse de l'échantillon à (105°C).

M₂= la masse de l'incinération (550°C).

1- La masse sèche et humide dans la menthe verte sont calculées par les relations suivantes :

$$H\% = \left(\frac{M_0 - (M_1 - M_V)}{M_0} \right) \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

$$M_S = 100 - H(\%) \dots\dots\dots(2)$$

A.N:

a. Pour capsule 1:

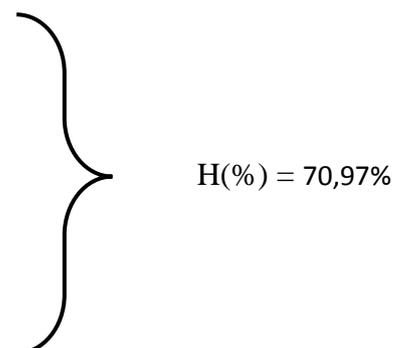
$$H(\%) = ((2,003 - (26,517 - 25,955))/2.003) \times 100 = 71,94\%$$

b. Pour capsule 2:

$$H(\%) = ((2,005 - (25,448 - 24,904))/2.005) \times 100 = 72,86\%$$

c. Pour capsule 3 :

$$H(\%) = ((2,005 - (25,394 - 24,755))/2.005) \times 100 = 68,12\%$$



La masse sèche dans la menthe verte est donc :

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

$$M_S\% = 100 - 70,97 = 29,03\%$$

La masse minérale et la masse organique dans la menthe verte sont calculées par les relations suivantes :

$$M_m = TC\% = \frac{(M_2 - M_V)}{(M_1 - M_V)} * 100 \dots \dots \dots (3)$$

$$M_O = M_S - M_m \dots \dots \dots (4)$$

A.N :

$$T_C\% = ((26,017 - 25,955) / (26,517 - 25,955)) * 100 = 11,03\%$$

$$T_C\% = M_m\% = 11,03\%$$

La masse organique contenant dans la menthe verte est donc :

$$M_O\% = M_S - M_m = 29,03 - 11,03 = 18\%$$

Le tableau suivant représente les composition de l'échantillon du menthe verte :

Tableau III.A.1. Les compositions de l'échantillon du menthe verte

Les compositions	H%	M _S %	M _m %	M _O %
	70,97	29,03	11,03	18

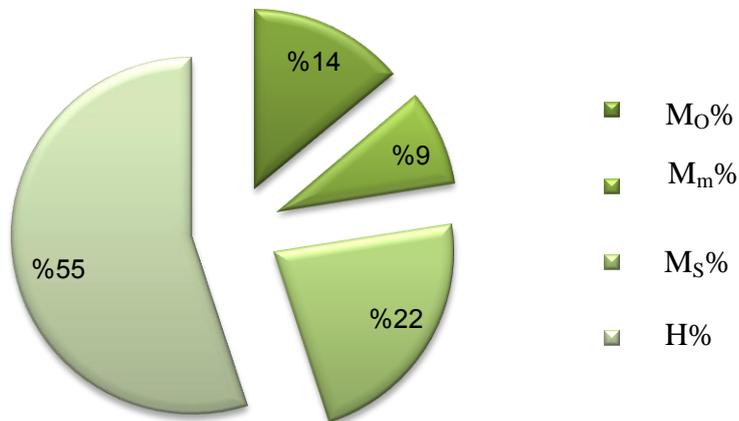


Figure III.A.1. Les compositions physicochimiques de l'échantillon de la menthe verte

III.B.1. Masses sèches des échantillons du menthe verte :

Les valeurs des masses sèches de tous les échantillons du menthe verte sont reportées, pour 30°C, 40°C et 50°C, dans le tableau (III.B.1)

Tableau III.B.1. Les valeurs des masses sèches de tous les échantillons du menthe verte sont reportées, pour 30°C, 40°C et 50°C

Sels	T = 30°C		T = 40°C		T = 50°C	
	M _S (g)	M _F (g)	M _S (g)	M _F (g)	M _S (g)	M _F (g)
NaOH	0.208	1.043	0.105	1.010	0.109	1.016
LiCl	0.208	1.012	0.109	1.005	0.110	1.013
KF	0.204	1.010	0.109	1.005	0.108	1.001
MgCl ₂	0.205	1.007	0.109	1.013	0.106	1.004
Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	0.205	1.025	0.110	1.017	0.100	1.019
NaNO ₂	0.205	1.029	0.103	1.002	0.101	1.021
NaCl	0.205	1.009	0.104	1.009	0.103	1.032
KCl	0.203	1.022	0.108	1.005	0.101	1.021
BaCl ₂ , 2H ₂ O	0.207	1.019	0.107	1.005	0.103	1.023

III.B.2. Masses humides et masses d'eau à l'équilibre des échantillons de la menthe verte :

Les masses humides M_h et les masses d'eau à l'équilibre M_e du menthe verte obtenue pour les trois températures de travail 30°C, 40°C et 50°C sont reportées dans les tableaux respectivement.

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

Tableau III.B.2.1. Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre du menthe verte à T = 30°C.

Sels	M _h (g)		M _e (g)	
	M _S (g)	M _F (g)	M _S (g)	M _F (g)
NaOH	0.207	0.262	0.004	0.010
LiCl	0.208	0.244	0.011	0.020
KF	0.23	0.307	0.032	0.047
MgCl ₂	0.202	0.344	0.005	0.124
Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	0.233	0.305	0.032	0.068
NaNO ₂	0.217	0.311	0.027	0.039
NaCl	0.211	0.312	0.018	0.080
KCl	0.232	0.340	0.033	0.107
BaCl ₂ , 2H ₂ O	0.253	0.348	0.082	0.153

Tableau III.B.2.2. Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre du menthe verte à $T = 40^{\circ}\text{C}$.

Sels	M_h (g)		M_e (g)	
	M_S (g)	M_F (g)	M_S (g)	M_F (g)
NaOH	0.102	0.197	0.003	0.005
LiCl	0.107	0.195	0.003	0.028
KF	0.116	0.200	0.012	0.019
MgCl ₂	0.134	0.251	0.030	0.057
Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	0.125	0.235	0.017	0.034
NaNO ₂	0.113	0.216	0.011	0.023
NaCl	0.116	0.166	0.011	0.029
KCl	0.124	0.270	0.023	0.061
BaCl ₂ , 2H ₂ O	0.140	0.343	0.040	0.107

Tableau III.B.2.3. Valeurs des masses humides et des masses d'eau à l'équilibre du menthe verte à $T = 50^{\circ}\text{C}$.

Sels	M_h (g)		M_e (g)	
	M_S (g)	M_F (g)	M_S (g)	M_F (g)
NaOH	0.110	0.184	0.008	0.011
LiCl	0.105	0.183	0.004	0.003
KF	0.114	0.204	0.013	0.022
MgCl ₂	0.126	0.228	0.027	0.051
Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	0.112	0.214	0.023	0.037
NaNO ₂	0.095	0.187	0.008	0.020
NaCl	0.104	0.208	0.011	0.036
KCl	0.117	0.287	0.023	0.063
BaCl ₂ , 2H ₂ O	0.160	0.265	0.063	0.105

III.B.3. Résultats de l'expérimentation :

Après avoir effectué les expériences des isothermes de sorption pondent plusieurs jours (de 10 à 15 jours), nous présentons les résultats expérimentaux de désorption et l'adsorption du menthe verte obtenu à 30, 40 et 50 °C dans les Figures III.2 et III.4.

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

1. Zone I (activité de l'eau comprise entre 0,07 et 0,3), est une zone d'une quantité minimale d'eau. Cette quantité est due aux sites actifs par les liaisons d'hydrogène dans les molécules des groupes polaires.
2. Zone II (activité de l'eau entre 0,3 et 0,75), dans cette zone l'eau est plus faiblement lié, d'abord comme multicouche ci-dessus la monocouche; plus tard, la teneur en eau augmente, cette eau remplit successivement des micropores et des macropores dans le système. Dans cette zone, les réactions chimiques et biochimiques nécessitant de l'eau solvant commencent à avoir lieu en raison de la mobilité accrue des solutés.
3. Zone III (activité de l'eau entre 0,75 et 0,9), où l'excès d'eau dans les macro capillaires provoque la création ou la naissance microbienne qu'il devient une réaction dégradable majeure dans cette région.

III.B.3.1. Résultats de l'expérimentation de désorption :

Tableau III.B..3.1. La teneur en eau à d'équilibre du menthe verte de désorption

Sels	T = 30°C		T = 40°C		T = 50°C	
	A _w	X _{eq}	A _w	X _{eq}	A _w	X _{eq}
NaOH	0.07	0.039683	0.07	0.026042	0.06	0.063584
LiCl	0.11	0.089286	0.11	0.167665	0.1	0.016667
KF	0.27	0.180769	0.22	0.104972	0.21	0.120879
MgCl ₂	0.32	0.563636	0.32	0.293814	0.31	0.288136
Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	0.51	0.28692	0.48	0.169154	0.45	0.20904
NaNO ₂	0.63	0.143382	0.62	0.119171	0.59	0.11976
NaCl	0.75	0.344828	0.75	0.211679	0.75	0.209302
KCl	0.84	0.459227	0.82	0.291866	0.81	0.28125
BaCl ₂ , 2H ₂ O	0.9	0.784615	0.89	0.45339	0.88	0.65625

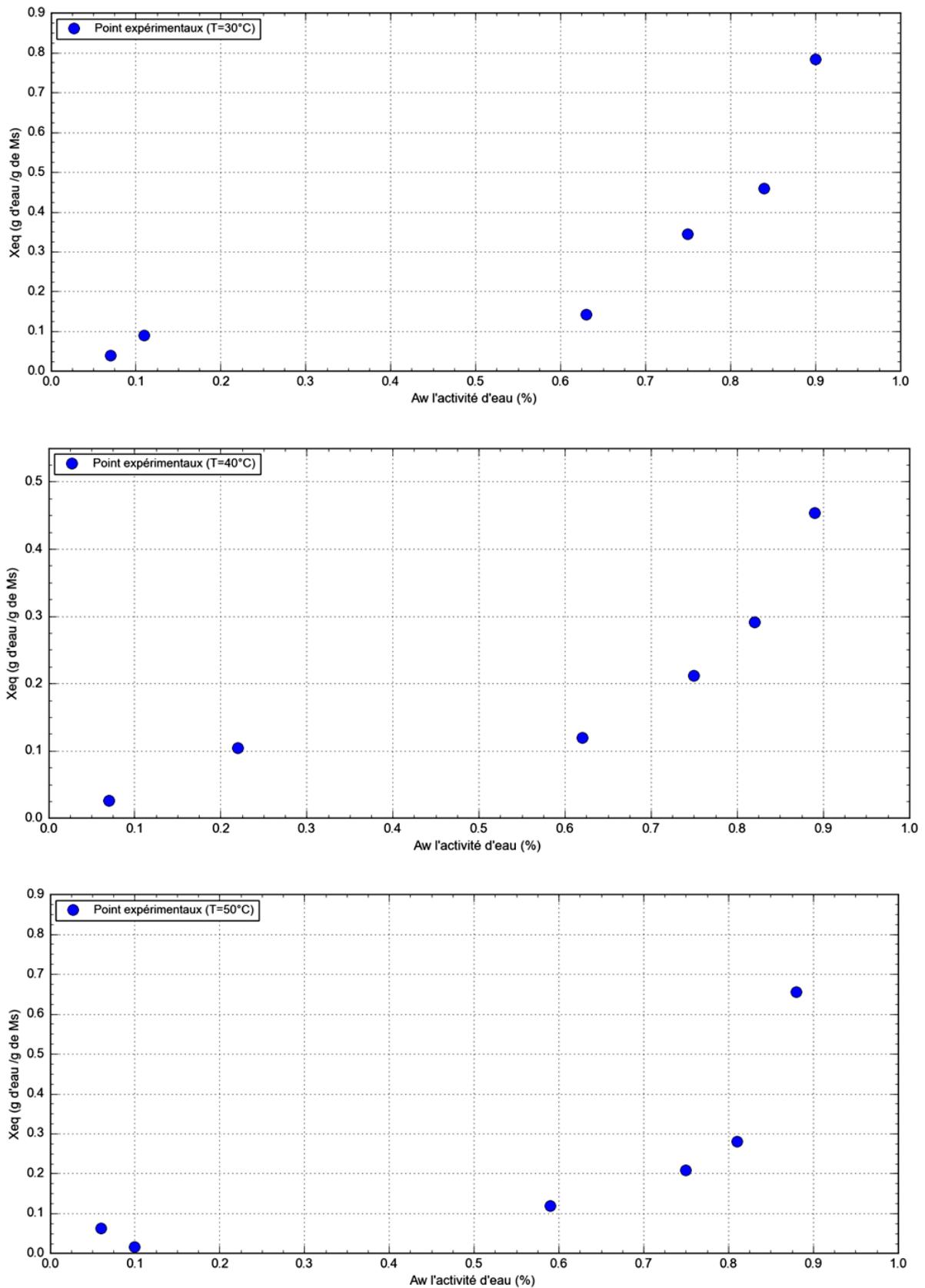


Figure III.B.3.1.a. Isothermes de désorption de la menthe verte à températures 30,40 et 50°C.

Figure III.B.3.1.a. rapporte le lissage des courbes de désorption expérimentales pour les trois températures de travail. Cette figure illustre la variation de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} en fonction de l'activité d'eau (A_w) de l'atmosphère entourant le produit.

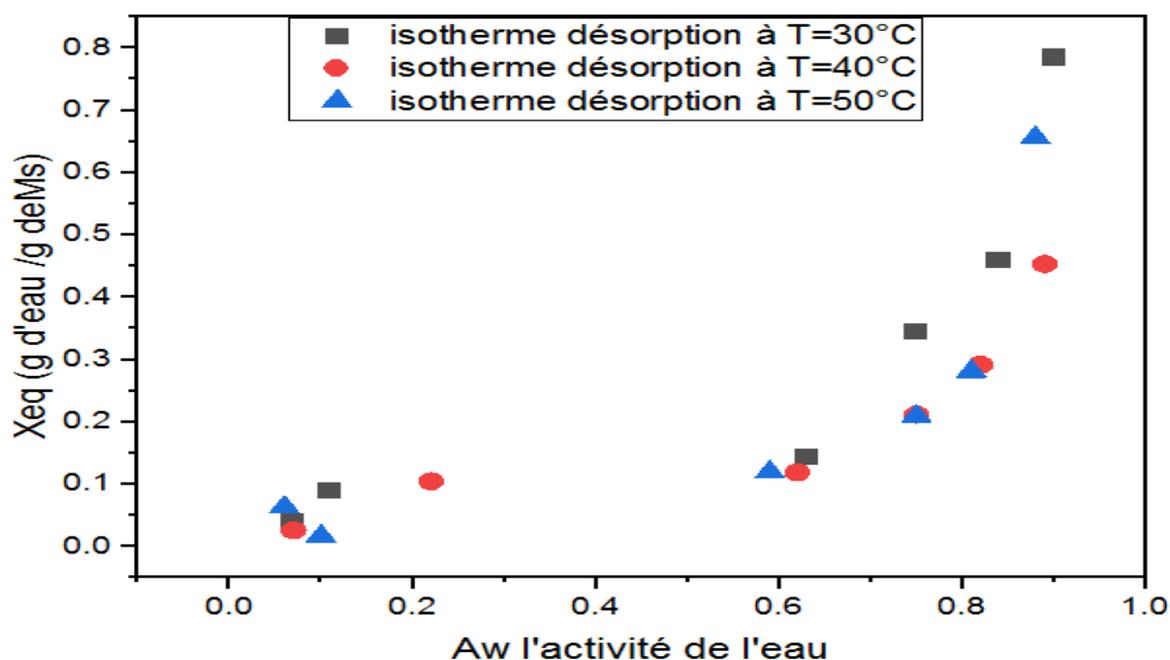


Figure III.B.3.1.b. Influence de la température sur les isothermes de désorption du menthe verte

III.B.3.2. Résultats de l'expérimentation d'adsorption

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

Tableau III.B.3.2. La teneur en eau d'équilibre d'adsorption du menthe verte

Sels	T = 30°C		T = 40°C		T = 50°C	
	A_w	X_{eq}	A_w	X_{eq}	A_w	X_{eq}
NaOH	0.07	0.019704	0.07	0.030303	0.06	0.078431
LiCl	0.11	0.055838	0.11	0.028846	0.1	0.039604
KF	0.27	0.161616	0.22	0.115385	0.21	0.128713
MgCl ₂	0.32	0.025381	0.32	0.288462	0.31	0.272727
Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O	0.51	0.159204	0.48	0.157407	0.45	0.258427
NaNO ₂	0.63	0.142105	0.62	0.107843	0.59	0.091954
NaCl	0.75	0.093264	0.75	0.104762	0.75	0.11828
KCl	0.84	0.165892	0.82	0.227723	0.81	0.244681
BaCl ₂ , 2H ₂ O	0.9	0.479532	0.89	0.4	0.88	0.649485

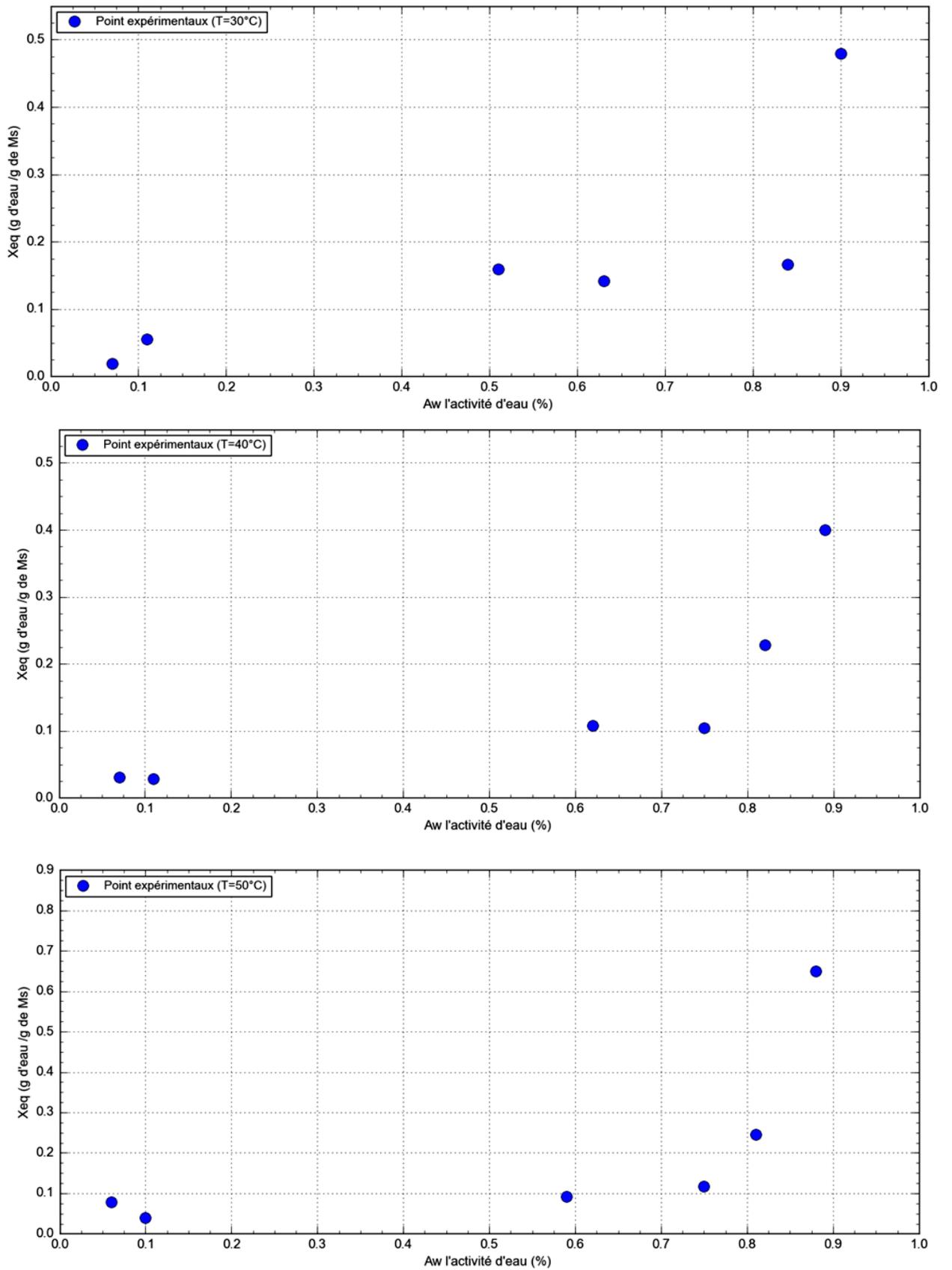


Figure III.B.3.2.a. Isothermes de d'adsorption de la menthe verte à températures 30,40 et 50°C

Figure III.B.3.2.a. rapporte le lissage des courbes d'adsorption expérimentales pour les trois températures de travail. Cette figure illustre la variation de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} en fonction de l'activité d'eau (A_w) de l'atmosphère entourant le produit.

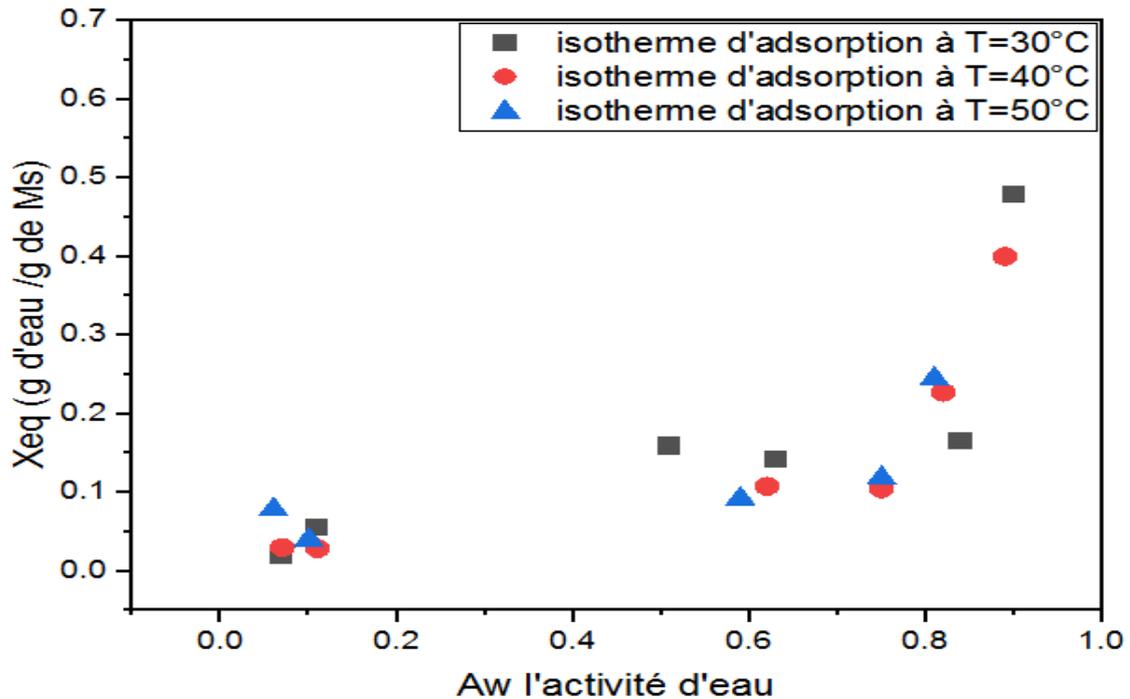


Figure III.B.3.2.b. Influence de la température sur les isothermes de d'adsorption du menthe verte

III.B.4. Modélisation des courbes de sorption :

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

III.B.4.1. Aperçu sur les modèles théoriques

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

$$X_{eq} = f(A_w \cdot T) \dots \dots \dots (5)$$

Étant donné la complexité des produits biologiques et des phénomènes intervenant lors de la sorption de l'eau. Plusieurs auteurs ont proposé des modèles mathématiques sous forme de relations empiriques et semi empirique pour décrire les courbes d'équilibre. Quelques-uns sont cités dans le tableau III.B.4.1.

Tableau III.B.4.1. Modèles de la sorption.

Auteurs	Equation du modèle
Brunauer-Emmet-Teller (B.E.T)	$X_{eq} = \frac{(A+BT)(Ca_w)}{(1-a_w)(1-a_w+Ca_w)}$ [28]
GAB	$X_{eq} = \frac{A.B.C.a_w}{(1-B.a_w)(1+(C-1).B.a_w)}$ [35]
Langmuir	$X_{eq} = \frac{K.C.a_w}{1+C.a_w}$ [35]
Peleg	$X_{eq} = A.a_w^{K_1} + B.a_w^{K_2}$ [35]

Les résultats des essais expérimentaux effectués du menthe verte ont été analysés par les quatre équations mathématiques qui correspondent aux quatre modèles les plus connus et utilisé dans les produits agricultures pour décrire les isothermes de sorption tableau (III.B.4.1).

Les paramètres de chaque équation ont été ajustés aux résultats expérimentaux en utilisant La méthode d’optimisation non linéaire Marquardt-Levenberg utilisant les logiciels «CurveExpertPro-2.6.3» et «OriginPro 2021b» est utilisée pour calculer les coefficients des modèles qui décrivent les courbes d’équilibre de sorption du menthe verte et leurs paramètres statistiques afin d’avoir le modèle le plus adéquat pour la description des isothermes de sorption en basant sur le coefficient de détermination (R2) l’erreur moyenne relative (EMR) et l’erreur standard (EST) de la teneur en eau d’équilibre car le meilleur modèle aura le plus grande valeur de (R2) . plus petite valeurs de EMR et EST.

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

$$EMR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{eq\ i, \text{exp}} - X_{eq\ i, \text{pre}})^2}{df}} \dots \dots \dots (6)$$

$$EST = \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{eq\ i, \text{exp}} - X_{eq\ i, \text{pre}}}{X_{eq\ i, \text{exp}}} \right| \frac{100}{N} \dots \dots \dots (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{exp}}} (X_{eq\ i, \text{exp}} - X_{eq\ i, \text{pre}})^2}{\sum_{i=1}^{N_{\text{exp}}} (X_{eq\ i, \text{exp}} - X_{eq\ i})^2} \dots \dots \dots (8)$$

Avec:

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

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

N : le nombre de points expérimentaux,

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

III.B.4.2. Résultats de la modélisation :

Les isotherme de désorption du menthe verte mesurée et calculés pour les quatre modèle pour les trois températures 30°C ,40°C et 50°C sont présenté respectivement dans les figure, ses isotherme sont en accord avec l'analyse des valeurs R^2 , EST et EMR.

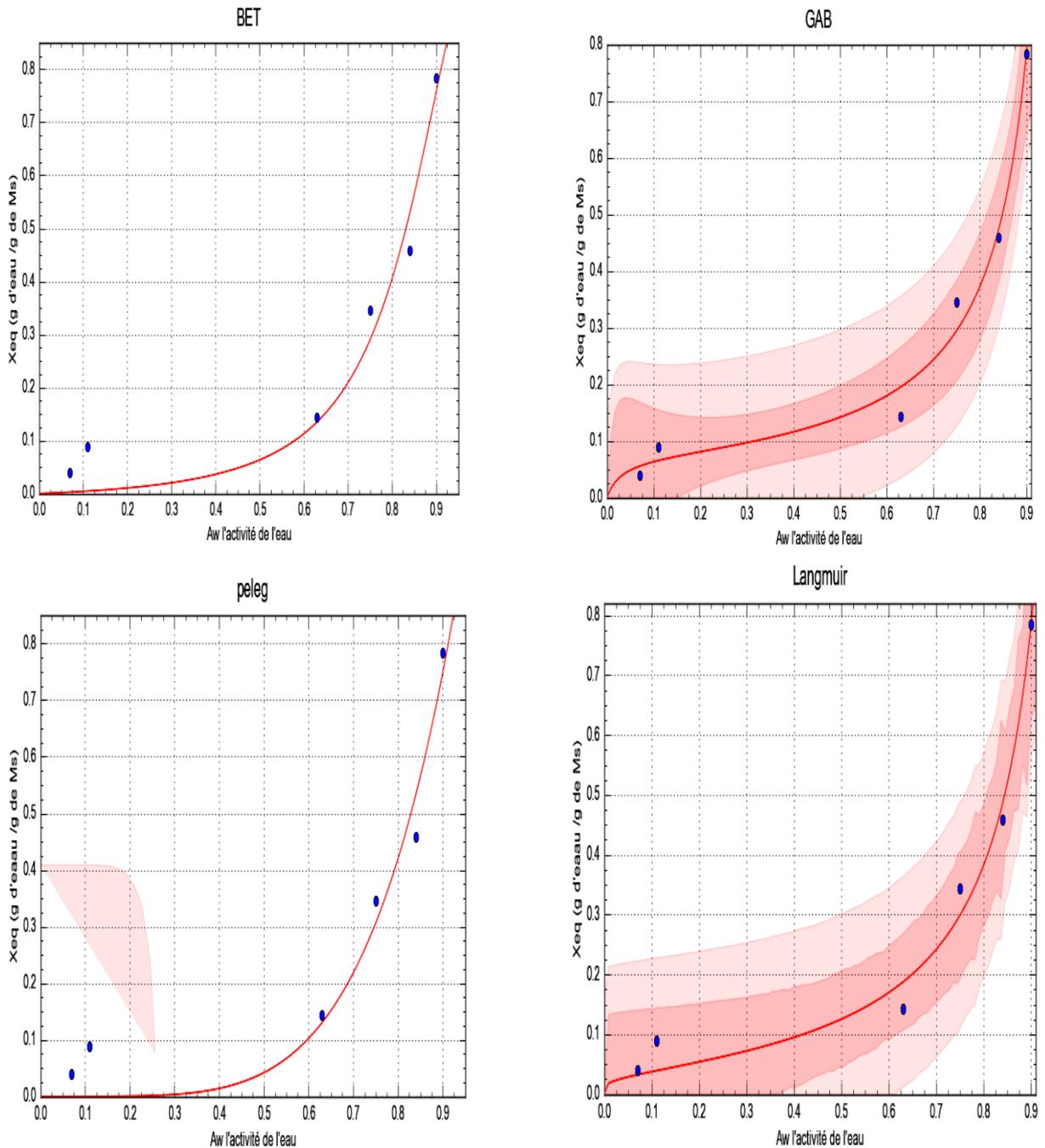


Figure III.B.4.2.a. Isothermes de désorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, Peleg, Langmuir) à ($T = 30^\circ\text{C}$).

Remarque

Dans la figure (III.B.4.2.a) approbateurs pour la température de 30°C, respectivement. On supprime les points expérimentaux [(0.27; 0.180769), (0.32; 0.563636), (0.51; 0.28692)], à 30°C à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.

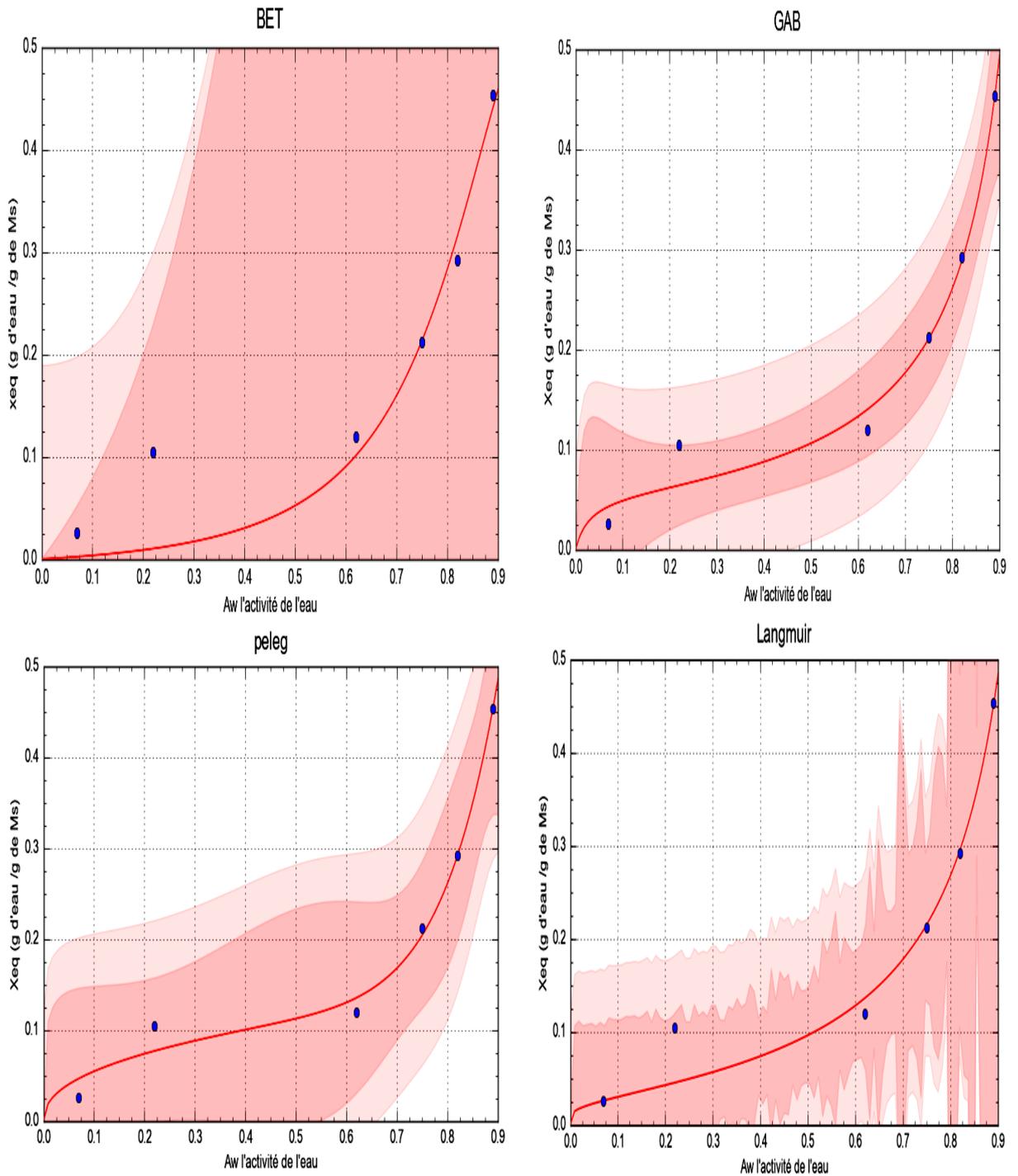


Figure III.B.4.2.b. Isothermes de désorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, Peleg, Langmuir) à (T = 40°C).

Remarque

Dans la figure (III.B.4.2.b) approbateurs pour la température de 40°C, respectivement. On supprime les points expérimentaux[(0.11; 0.167665), (0.32; 0.293814), (0.48; 0.169154)], à 40°C à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.

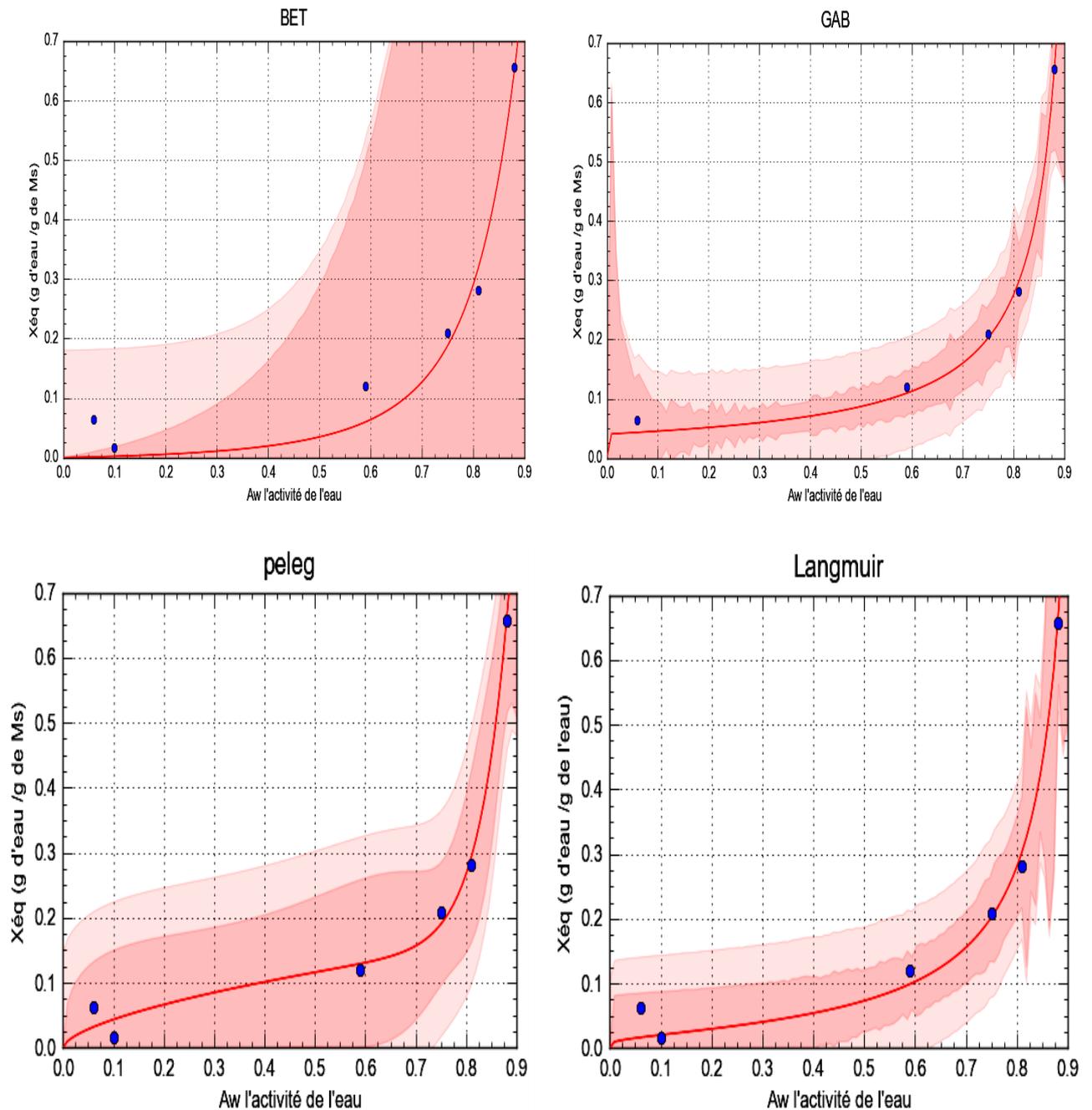


Figure III.B.4.2.c. Isothermes de désorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifié, Peleg, Langmuir) à ($T = 50^\circ\text{C}$).

Remarque

Dans la figure (III.B.4.2.c) approbateurs pour la température de 50°C, respectivement. On supprime les points expérimentaux [(0.21; 0.120879), (0.31; 0.288136), (0.45; 0.20904)], à 50°C à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.

Le tableau III.B.4.2.1 résume les coefficients de quatre modèles de séchage en couche mince. La précision des différents modèles est analysé en comparant les coefficients de détermination (R²), l'erreur moyenne relative (EMR), l'erreur standard de la teneur en eau du produit (EST).

Tableau III.B.4.2.1 Paramètres estimés et les critères pour les modelés de teneur en humidité d'équilibre de données de désorption du menthe verte à T=30, 40 et 50°C.

Modèle	Paramètre	Température		
		30°C	40°C	50°C
GAB	A	0.072	0.055	0.040728
	B	1.009	0.987	1.065582
	C	32.422	34.725	17859.242757
	R ²	0.984	0.979	0.996
	EST	0.045	0.028	0.020
	EMR	0.992	0.989	0.996
	BET Modifie	A	2121.785	-2883.809
B		-70.692	72.109	71.788
C		0.033	0.051	0.010
R ²		0.957	0.910	0.964
EST		0.076	0.059	0.056
EMR		0.978	0.954	0.982
Peleg		a	105.406	0.149
	b	-104.149	0.842	3.536
	K ₁	4.904	0.437	0.609
	K ₂	4.904	8.517	15.442
	R ²	0.955	0.987	0.991
	EST	0.095	0.027	0.033
	EMR	0.977	0.993	0.034
Langmuir	A	-814.887	-2068.254	-1400.020
	B	814.974	2068.831	1398.823
	C	0.986	0.993	0.984
	R ²	0.982	0.967	0.988
	EST	0.049	0.036	0.032
	EMR	0.99	0.983	0.994

A partir les figures III.B.4.2.a, III.B.4.2.b et III.B.4.2.c et le tableau III.B.4.2.1 on constate que le modèle de GAB est le meilleur modèle décrivant l'ensemble des isothermes de désorption du menthe verte.

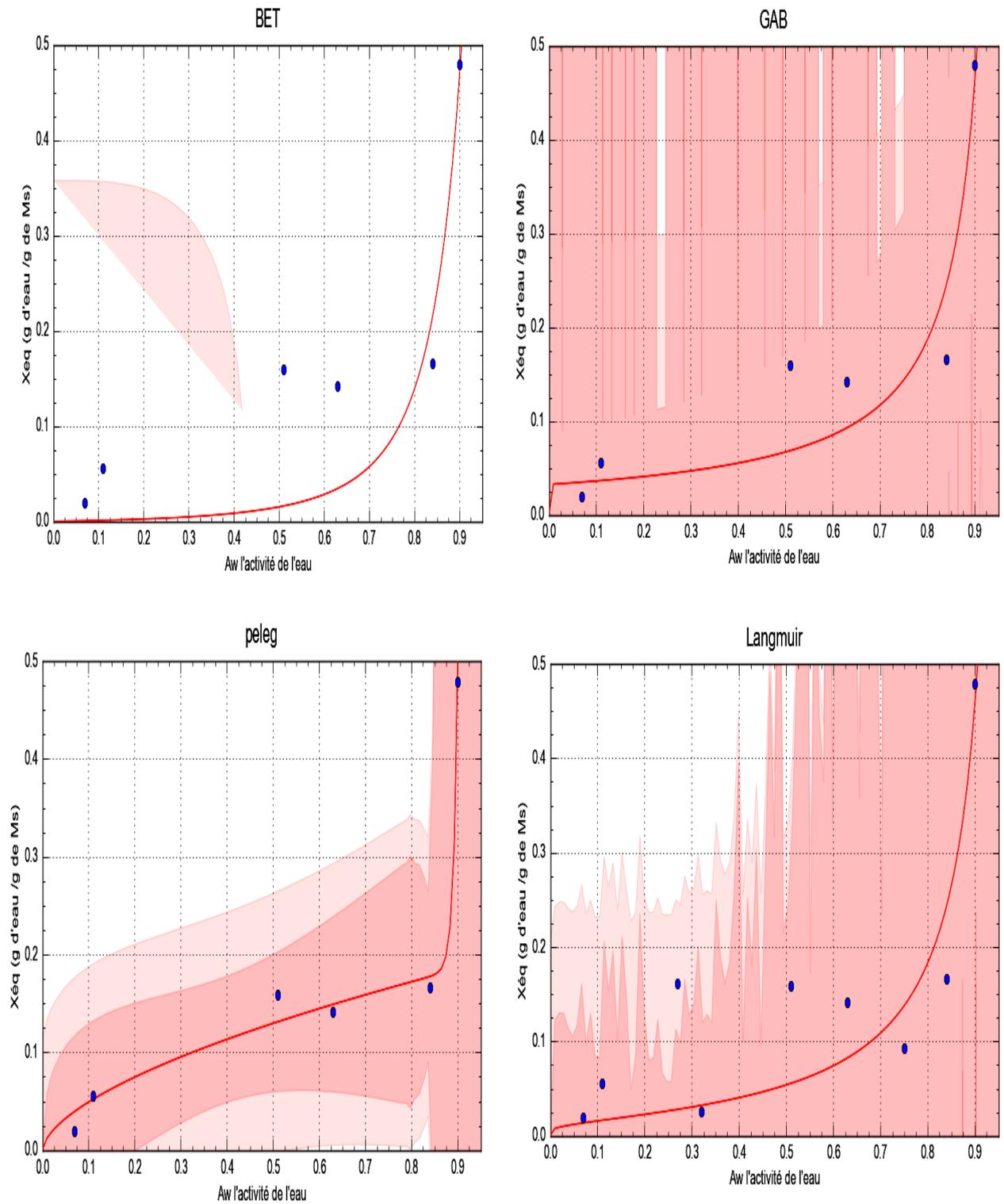


Figure III.B.4.2.d. Isothermes de d'adsorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, Peleg, Langmuir) à (T = 30°C).

Remarque

Dans la figure (III.B.4.2.d) approbateurs pour la température de 30°C, respectivement. On supprime les points expérimentaux [(0.27; 0.161616), (0.32; 0.025381), (0.75; 0.093264)] à 30°C à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.

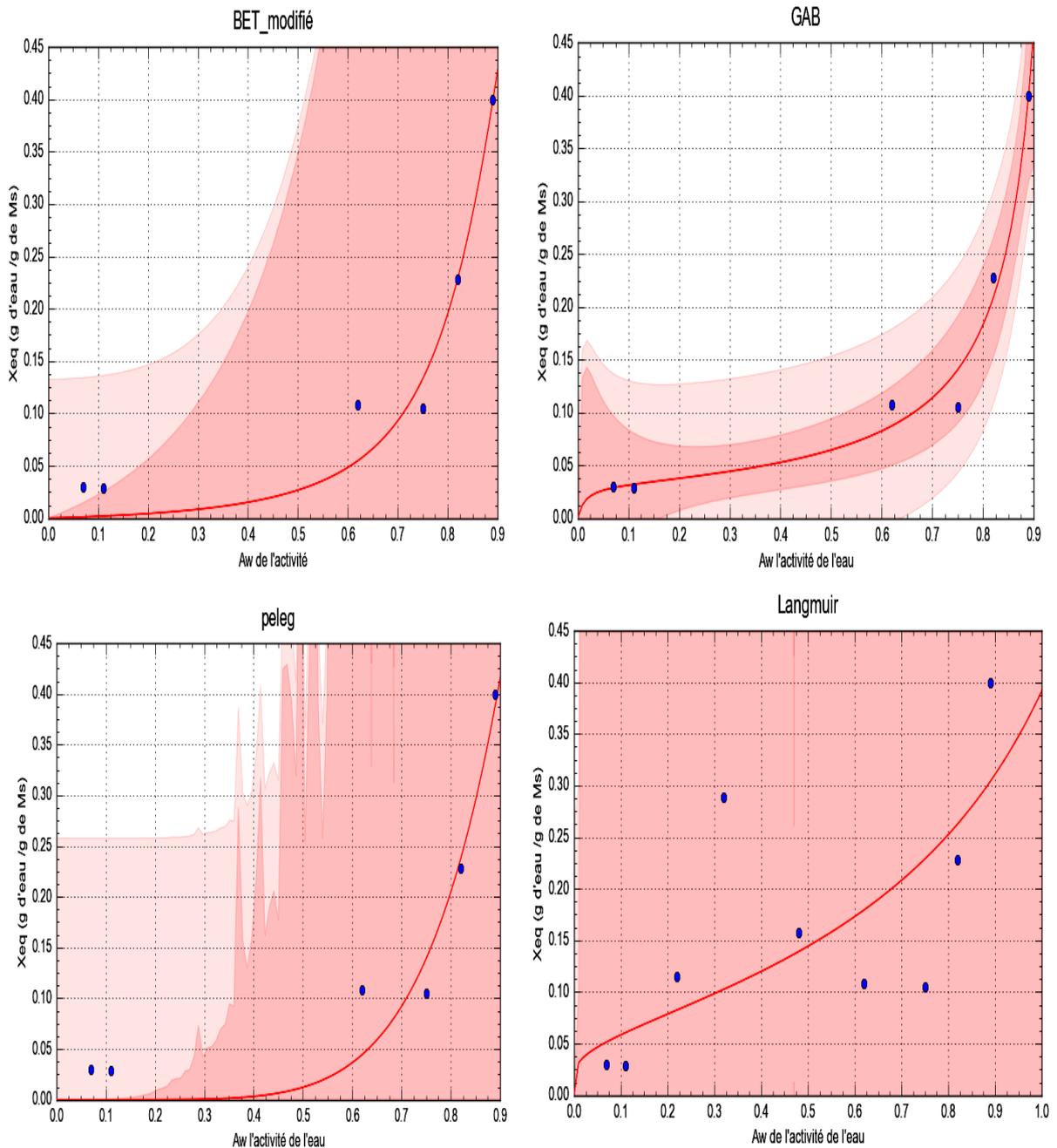


Figure III.B.4.2.e. Isothermes de d'adsorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, Peleg, Langmuir) à (T = 40°C).

Remarque

Dans la figure (III.B.4.2.e) approbateurs pour la température de 40°C, respectivement. On supprime les points expérimentaux [(0.22; 0.115385), (0.32; 0.288462), (0.48; 0.157407)] à 40°C à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.

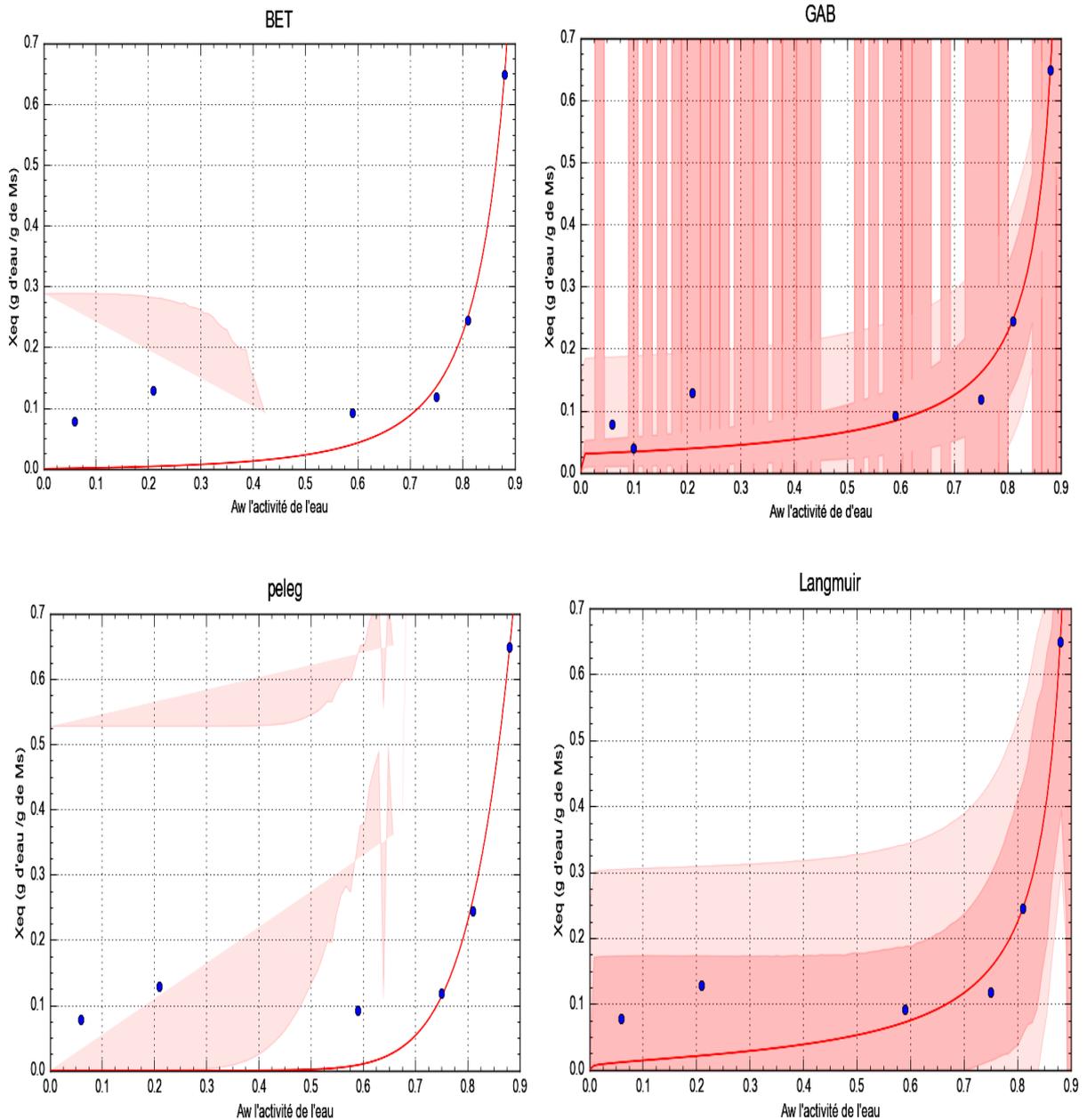


Figure III.B.4.2.f. Isothermes de d'adsorption du menthe verte lissées par les quatre modèles (GAB, BET modifier, Peleg, Langmuir) à ($T = 50^\circ\text{C}$).

Remarque

Dans la figure (III.B.4.2.f) approbateurs pour la température de 50°C, respectivement. On supprime les points expérimentaux [(0.21; 0.128713),(0.31; 0.272727),(0.45; 0.258427)] à 50°C à cause des erreurs dans l'expérience lors de la détermination de la masse d'échantillon sec de produit.

Tableau III.B.4.2.2. Paramètres estimés et les critères pour les modèles de teneur en humidité d'équilibre de données d'adsorption du menthe verte à T=30, 40 et 50°C.

Modèle	Paramètre	Température		
		30°C	40°C	50°C
GAB	A	0.032	0.031	0.030
	B	1.033	1.035	1.083
	C	26149026.386	68.703	162421752.488
	R ²	0.865	0.979	0.955
	EST	0.077	0.026	0.055
	EMR	0.930	0.989	0.977
BET Modifie	A	707.496	-2868.836	3555.752
	B	-23.534	71.737	-70.932
	C	0.005	0.021	0.001
	R ²	0.713	0.948	0.897
	EST	0.112	0.042	0.090
	EMR	0.845	0.974	0.947
Peleg	a	0.197	-229.05	-105.32
	b	11030.397	229.832	107.909
	K ₁	0.604	6.005	10.875
	K ₂	99.953	6.005	10.875
	R ²	0.989	0.929	0.875
	EST	0.026	0.059	0.122
EMR	0.995	0.964	0.935	
Langmuir	A	-7847.084	-11648.698	-899.531
	B	7846.336	11651.25	897.168
	C	0.996	0.999	0.966
	R ²	0.724	0.432	0.926
	EST	0.084	0.107	0.076
	EMR	0.851	0.657	0.962

A partir des figures III.B.4.2.d, III.B.4.2.e et III.B.4.2.f et le tableau III.B.4.2.2. on ne constate que le modèle de GAB est le meilleur modèle décrivant l'ensemble des isothermes d'adsorption du menthe verte par rapport aux deux températures 40°C et 50°C, Comme pour la température 30°C le modèle Peleg est le meilleur.

III.C. Détermination de la chaleur isostérique de sorption :

D'une manière générale, la vaporisation d'une molécule d'eau nécessite une chaleur égale à la somme de la chaleur latente (L_{vap}) et de la chaleur isostérique de sorption (Q_{st}). Les chaleurs isostérique sont calculées à partir des isostères de sorption, c'est à dire la courbe donnant $\ln(A_w)$ en fonction de $1/T$ à une teneur en eau constante selon l'équation :

$$\ln(A_w) = -\left(\frac{Q_{\text{st}}}{R}\right)\frac{1}{T} + K \dots \dots (9)$$

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

De la pente des isostères et pour chaque teneur en eau X , on peut déduire la chaleur isostérique correspondante et tracer la courbe $Q_{\text{st}} = f(X_{\text{eq}})$. Les chaleurs isostérique nettes du menthe verte sont représentées respectivement dans les figures III.C.1 et III.C.2.

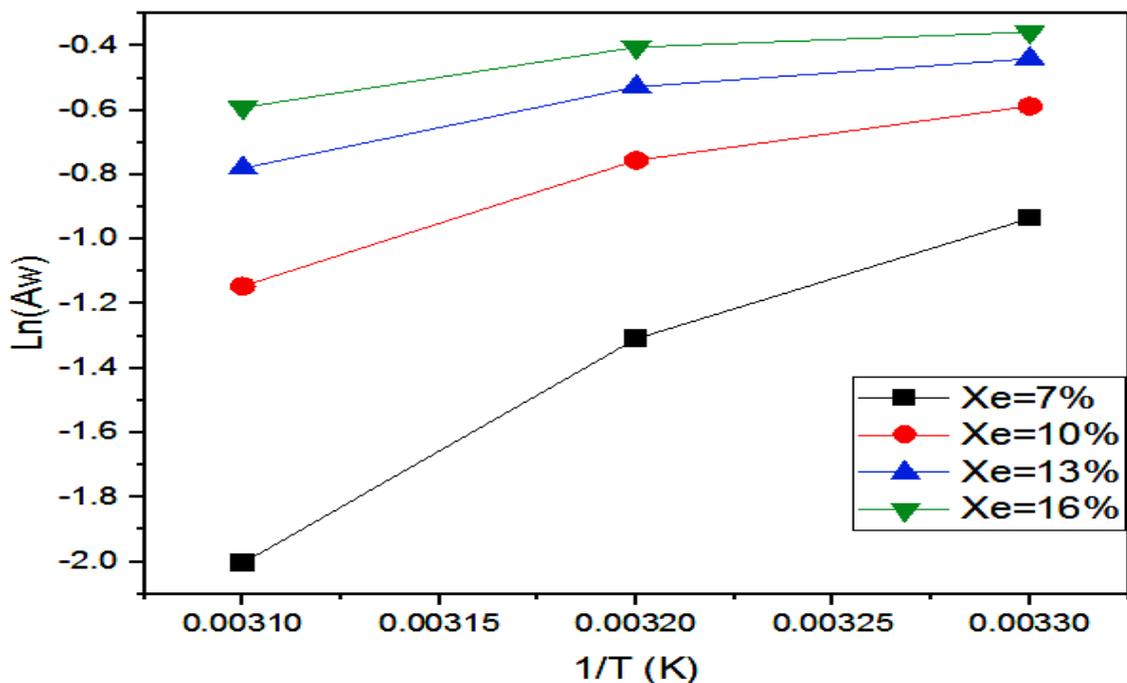


Figure III.C.1 : Isostères de désorption pour la menthe verte

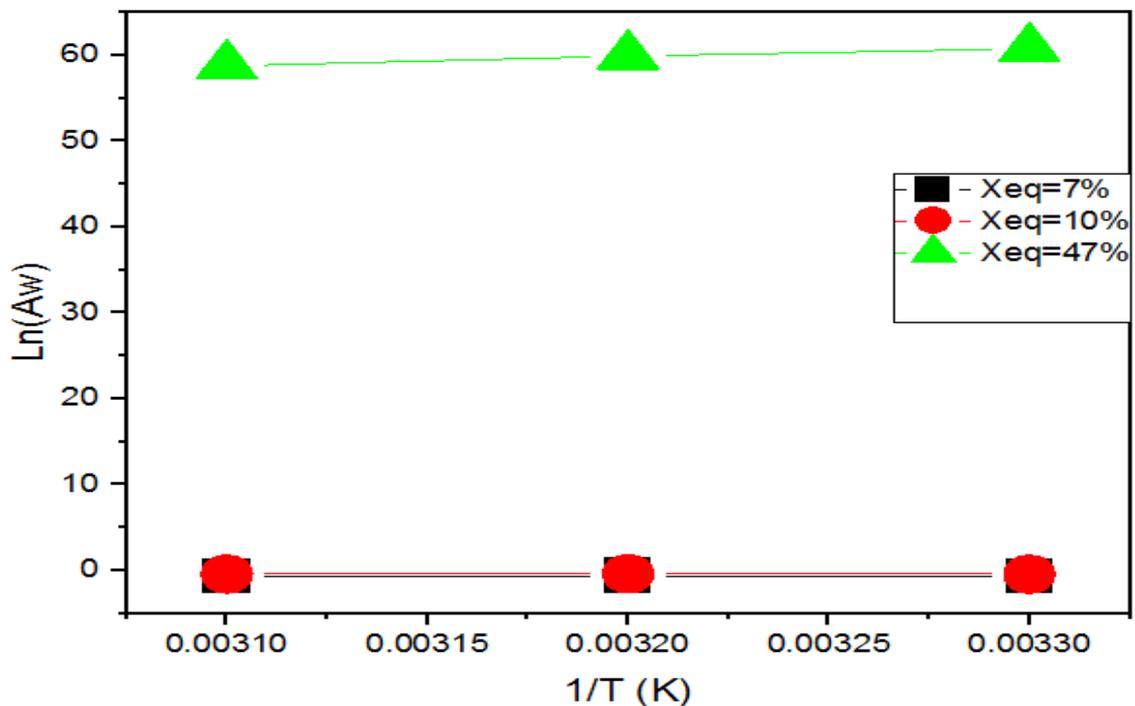


Figure III.C.2 : Isostères de adsorption pour la menthe verte

Les chaleurs isostérique net de sorption du menthe verte obtenues pour différentes teneurs en eau d'équilibre ont été déterminées en utilisant le modèle GAB en combinaison avec l'eq (9).

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

Selon E. Tsami 1991[53], la diminution rapide de la chaleur isostérique pour les faibles teneurs en eau du produit est due à l'existence des sites polaires de grande activité dans le produit qui sont couverts de molécules d'eau formant la monocouche moléculaire.

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

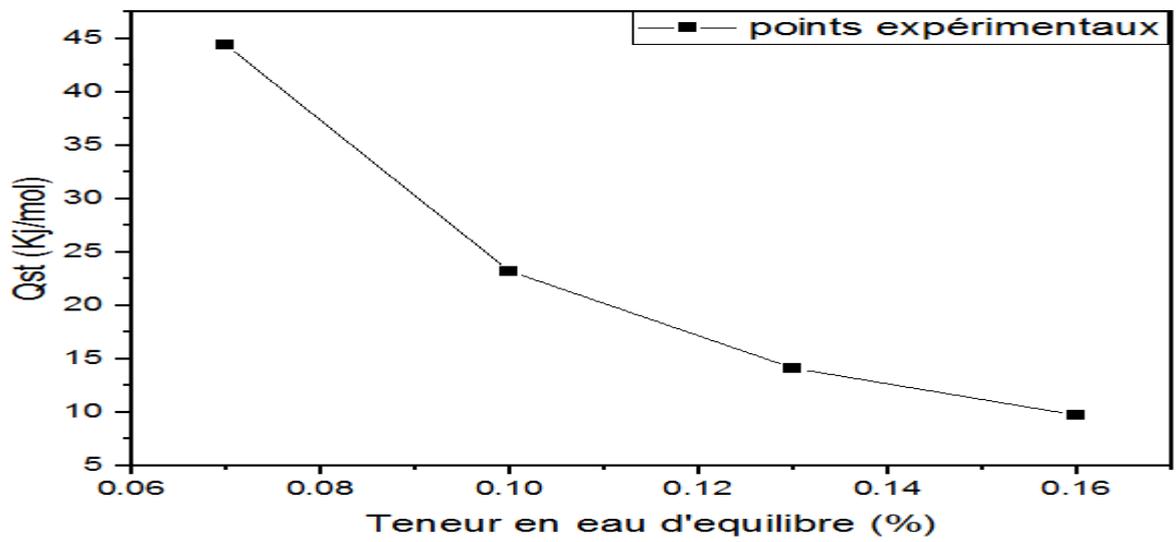


Figure III.C.3. Chaleur isostérique de désorption du menthe verte .

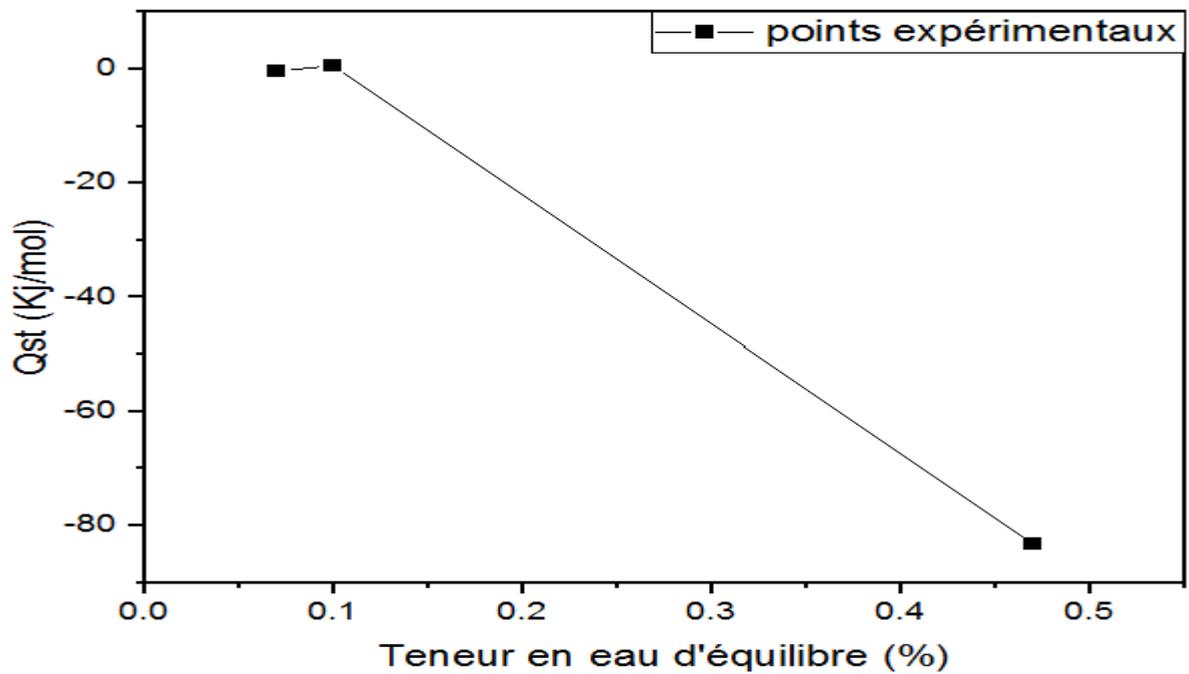


Figure III.C.4. Chaleur isostérique de d'adsorption du menthe verte .

Les figure III.C.3 et III.C.4 montre que la chaleur isostérique de sorption est élevée, à faible teneur en eau d'équilibre. La chaleur isostérique de sorption diminue lorsque la teneur en eau augmente. La pente dévolution est forte pour les faibles teneurs en eau.

les chaleurs isostérique sont supérieures à celles requises pour les teneurs en eau. Il peut aussi être vu que la chaleur isostérique de désorption est supérieure à celle de l'adsorption.

Ce fait indique que l'énergie nécessaire dans le processus de désorption est supérieure à celle dans le processus d'adsorption.



CONCLUSION GENERALE

Les recherches menées dans cette mémoire portent sur la détermination expérimentale et la modélisation théorique des isothermes de sorption de la menthe verte. Dans la première partie de notre étude, nous avons déterminé la teneur en eau initiale de menthe verte et les isothermes de sorption. En apprenant à les connaître, nous pouvons sécher ses plantes dans des conditions qui assurent sa conservation tout en préservant leur produit actif et leur couleur.

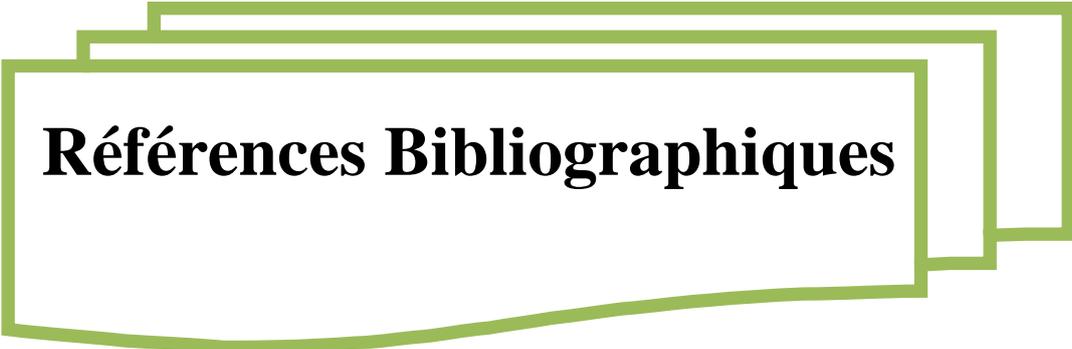
Les courbes de sorption de notre échantillon ont été déterminées expérimentalement à partir d'isothermes pour trois températures différentes (30, 40 et 50°C). Ce dispositif est basé sur la méthode de la solution saline saturée, qui se caractérise par une grande stabilité et une précision des mesures. Les mesures ont un niveau élevé de cohérence et de précision. Ce qui a affecté sur notre étude, en particulier lors de la détermination de la chaleur isostérique, où plusieurs facteurs influents sur ici, y compris la qualité du sel utilisé et la proportion de la saturation des solutions salines.

Les courbes de sorption expérimentales ont été ensuite approchées par quatre modèles (GAB, BET Modifié, Peleg, Langmuir) car il y a plus d'autres modèles utilisables dans ce domaine. L'équation de modèle GAB a été le meilleur pour la prédiction du phénomène désorption et d'adsorption parmi les quatre modèles couramment utilisés. Les isothermes désorptions et d'adsorption ont démontré l'apparition de l'effet hystérésis qui est plus visible pour la température 50°C. puis La chaleur isostérique de désorption et d'adsorption de cette plante ont été calculées en utilisant l'équation Clapeyron.

Nous avons souhaitées que peut continuer notre étude, pour obtenir des objectifs. nous ne pouvons pas atteindre en raison du manque de temps et d'éviter de dépasser la taille précisée de la mémoire, ces objectifs sont représentés dans les points suivants.:

- Détermination de la cinétique de séchage de la menthe verte, sur laquelle nous avons travaillé et obtenu de bons résultats, seulement nous n'avons pas pu analyser et modéliser les résultats
- Estimation de la durée de vie de la menthe verte

Enfin, on conclue à travers de notre étude les isothermes de sorption donnent des informations précieuses pour l'industrie agro-alimentaire. En effet, pour connaître les paramètres de stockage de la menthe verte 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 donné.



Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **Boubeghal, A., et al.** "Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection naturelle." *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07*, Tlemcen (2007): 315-320.
- [2] **Mediani, Ahmed, et al.** "The Isothermal Sorption Measurement and the Isosteric Heats Determinations for the South Algerian Date Varieties." *Journal homepage: <http://ijeta.org/journals/i2m>* 18.4 (2019): 389-396
- [3] **Moungar, H., et al.** "Séchage solaire des produits alimentaires-Caractérisation et modélisation du rayonnement solaire du site d'Adrar par deux approches semi empiriques." *Revue des Energies Renouvelables ICESD 11* (2011): 221-226
- [4] **Derkaoui M,** Contribution à l'analyse du couplage d'un séchoir agro-alimentaire à une machine thermique fonctionnant à l'énergie solaire, Mémoire de Magister, Université Hassiba Benbouali de chlef, 2012 .
- [5] **Moungar, H., et al.** "Séchage solaire des produits alimentaires-Caractérisation et modélisation du rayonnement solaire du site d'Adrar par deux approches semi empiriques." *Revue des Energies Renouvelables ICESD 11* (2011): 221-226.
- [6] **Hamadi A, Hamzaoui Z,** L'étude de séchage solaire d'une plante médicinale de la région d'Adrar, Mémoire de Master en Physique énergétique, Université Ahmed Draia – Adrar. 2021
- [7] **Briki, A., ZIDANI, Z., & LAKSACI, H.** (2021). Etude De Séchage Et Caractérisation Physicochimique Et Hygiénique D'un Produit Alimentaire Du Site D'Adrar (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [8] **Harma W,** L'étude d'un capteur solaire thermique à air (Théorique & expérimentale); Mémoire de Master en Physique énergétique et énergie renouvelable, Université Ahmed Draia – Adrar, 2020
- [9] **Souheyla K,** Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie, Thèse de doctorat université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2018.
- [10] **Benseddik A,** Modélisation et simulation du séchage de la figure par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée, Mémoire de Magister énergétique, Université Abou Bekr Belkaid-TLEMCEN, 2011
- [11] **KADDOURI, L., & MEDIANI, A. E.** (2018). Contribution à l'amélioration des performances d'un capteur solaire destiné au séchage solaire (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draia-Adrar).

- [12] **Boughali S**, Etude et optimisation du séchage solaire des produit agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques, Doctorat en sciences en génie mécanique, Université HADJ LAKHDAR BATNA, 2010
- [13] <https://www.biopharmatech.fr/actualites/lalyophilisation/#:~:text=La%20lyophilisation%20est%20un%20processus,une%20basse%20temp%C3%A9rature%20sous%20vide>
- [14] **Idder K, Mebaarki K**, Mesure expérimentale des isothermes d'adsorption/ désorption de cœur de palmier (jomare) et détermination des propriétés thermodynamique; Mémoire de Master Génie chimique; Université Ahmed Draia – Adrar,2020
- [15] **Benbahi M, Morakchi B**, Bilan thermique d'un sécheur de tomate de type à tambour rotatif, Mémoire de Master Génie mécanique, Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2020
- [16] **Reggadi A, Babahadj M**, Contribution à l'amélioration de fonctionnement d'un capteur solaire : "Utilisation d'un MCP", Mémoire de Master en Physique énergétique et énergie renouvelable, Université Ahmed Draia – Adrar, 2018
- [17] **Touati Tliba M, Drihem B**, Etude expérimentale du séchage solaire des plante feuillues, Mémoire de Master Académique en énergies renouvelables en mécanique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2018
- [18] **Saddaoui M**, Etude et réalisation d'un séchoir électrique automatique en vue de son utilisation dans un laboratoire de recherche agro-alimentaire, Mémoire de Master Académique en génie mécanique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016
- [19] **Benbey A, Salmi H**, Stockage de la chaleur par un matériau à changement de phase, application au séchage solaire, Mémoire de Master en Physique énergétique et énergie renouvelable, Université Ahmed Draia – Adrar, 2021
- [20] **Michel D**, les séchoirs solaires théorie et pratique, Paris,1985.
- [21] **Boumediene T**, Etude théorique expérimentale de séchage solaire des feuilles de la MENTHE VERTE (MENTHA VIRIDIS), Thèse Doctorat de Physique énergétique et matériaux, Université Abou-Bekr-Belkaid-Tlemcen, 2008

Références Bibliographiques

- [22] **Ben djelloul W, Reham A**, Réalisation et expérimentation d'un prototype séchoir solaire de type serre avec systèmes de stockage thermique, par chaleur latente et sensible, Mémoire de Master Académique en génie mécanique, Université KASDI MERBAH-OUARGLA, 2019
- [23] **Amer H A, Selkh A H**, Amélioration des performances thermique et dynamique d'un capteur destine au séchage, Mémoire de Master énergies renouvelable en électrotechnique, Université de GHARDAIA, 2020
- [24] **Djerroud D**, Modélisation markovienne du séchage continu par contact avec agitation, Doctorat de Génie des procédés et de l'environnement, Université de TOULOUSE, 2010
- [25] **Kalengi Handdy**, Détermination des isothermes de sorption (adsorption - désorption) [cas de l'aubergine (solanum melongena l)], Ingenieur Agronome, Université de KINSHASA, 2014
- [26] **Nadir N**, Approche théorique et expérimentale du séchage solaire des produit agro-alimentaires, Thèse de Doctorat en physique énergétique; Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021
- [27] **Yves J**, Isotherme de sorption: modèles et détermination, Juillet 2008
- [28] **Iglesias H.A, Chirife J**, On the local isotherm concept and modes of moisture binding in food products. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1976 Vol,24: 24-77.
- [29] **Oswin C.R**, The kinetics of package life. III. Isotherm. Journal of Society of Chemical Industry 1946. Vol. 65: 419-421.
- [30] **Thompson T.L, al**, Mathematical simulation of corn drying a new model. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, 1986. Vol.11: 582-586.
- [31] **Pfost , al**. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. Society of Agricultural Engineers, 1976. P 76-3520.
- [32] **Langmuir I**, Journal of American Chemical Society, 1916. Vol. 46: 1361-1362.
- [33] **Peleg**, Assessment of semi-empirical four parameter general model for sigmoid sorption isotherm. Journal of Food Processing Engineering.1993. Vol. 16(1): 21-37.

Références Bibliographiques

- [34] **Van den Berg C**, Description of water activity of Food Engineering purposes by means of the GAB model of sorption, in: McKenna, B.M. (Ed). Engineering and Foods, New York: Elsevier, 1984. p.119.
- [35] **Essalih A M**, Modélisation des isothermes de désorption du produit agroalimentaire, Mémoire de Master en Physique énergétique et énergies renouvelables, Université Ahmed Draia – Adrar, 2018.
- [36] **Kouhila M, Belghit A et Daguene M**, Approche Expérimentale des courbes de sorption de la Menthe en vue d'un séchage par Energie Solaire; Rev. Energ. Ren. Vol. 2 (1999) 61 – 68
- [37] **Ben youcef H et Djediat M**, Etude biologique des huiles essentielles du Mentha spicata et formulation d'un lave-mains, Mémoire de Master Génie chimique, Université A. M. OULHADJ – Bouira, 2018-2019.
- [38] **Douay S**, Menthe verte (Mentha spicata), Systématique des Angiospermes, Faculté Libre des Sciences et Technologies, 2009.
- [39] <https://sante.journaldesfemmes.fr/calories/menthe/aliment-11027>
- [40] **Lamharrar A, Cheikh S E K, Idlimam A, Akkad S, Mohammed K, Mimet A, Ahachad M**, Détermination expérimentale des isothermes de sorption et de la chaleur isostérique des feuilles d'absinthe et de menthe pouliot. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00167248
- [41] https://www.gastronomiac.com/ustensiles_et_vocabu/matiere-seche/
- [42] <https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/matiere-minerale/>
- [43] <http://fdanieau.free.fr/cours/bts/A2/biochimie/TP/TP7MatiereSeche.pdf>
- [44] http://www.memoireonline.com/02/08/940/m_approche-physico-chimique-pouvoir-conservateur-sel-pseudotolithus-senegalensis19.html
- [45] <https://www.plantaisie.com/aromatiques/4010032-menthe-verte.html>

Références Bibliographiques

[46] SEMMANI, I., ELALOUI, F., & LOUMANI, A. (2021). Appréciation microbiologique et physico chimique du Mentha puleguim L avant et après le séchage solaire (Doctoral dissertation, universite Ahmed Draia-ADRAR)

[47] https://www.researchgate.net/figure/Eemples-de -solutions-salines-utilisables-en-fonction-de-lhumidite-souhaitee_fig29_281531646

[48] **Baassene P T**, Détermination expérimentale des isothermes de désorption et de la chaleur isostérique des granulés de la farine de mil, CONGRES sur les Aliments Traditionnels Africains

[49] https://www.researchgate.net/figure/schema-descriptif-du-sechoir-solaire_fig1_267510002

[50] <https://docplayer.fr/89387246-Etude-de-differentes-methodes-de-sechage-de-la-pomme-de-terre.html>

[51] <https://apprendre-preparer-survive.com/autonomie/nourriture/conserver-ses-aliments-avec-un-sechoir-solaire-simple-et-durable/>

[52] https://www.researchgate.net/figure/schema-descriptif-du-sechoir-solaire_fig2_2648584146

[53] **TASMI E**, Net isosteric heat of sorption in dried fruits, Journal of Food Engineering, 1991.