



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département de Génie des procédés

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Génie des procédés*

Spécialité : *Génie chimique*

Par : MAATI Nour Elhouda/ MEGHAZI Khadidja

Thème

Détermination expérimentale et mathématique des isothermes de sorption des dattes de la variété Deglet-nour

Soutenu publiquement le : 22/06/2023

Devant le jury :

TRABELSI Amel	MAA	Univ. Ghardaïa	Président
BENARIMA Zin Elabidine	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
KHAZEN Souad	MAA	Univ. Ghardaïa	Examineur
DAOUED Djamal	Directeur de recherche	URAER	Encadrant
BENSEDDIK Abdelouahab	MRA	URAER	Co-encadrant

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Au nom de Dieu, le Très Gracieux, le Très Miséricordieux, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté, la patience et les moyens pour nous permettre d'accomplir cette humble œuvre.

Tout d'abord, nous remercions notre superviseur, Mr DAOUED Djamel, pour sa patience et sa disponibilité durant la rédaction de notre mémoire.

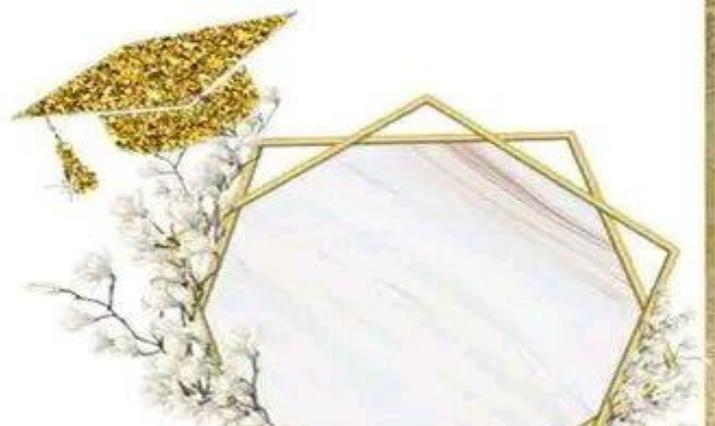
Nous remercions notre professeur Mr BENSEDDIK Abdelouahab pour nous avoir fait bénéficier de ses connaissances scientifiques, ses judicieux conseils.

Nous remercions aussi l'ingénieur du laboratoire de systèmes énergétiques pour l'agriculture M^{elle} OULAD HADJ YUCEF Khadidja, pour son assistance permanente.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à la faculté des sciences et technologies de l'université de Ghardaïa pour nous avoir donné l'opportunité de poursuivre une formation de Master, qui nous met en contact avec la vie professionnelle.

Enfin, merci à toutes les personnes qui nous ont aidés et conseillés lors de ces années d'études.

Khadidja et Nour El Houda



Résumé : L'objectif de cette étude est de déterminer expérimentalement et mathématiquement les isothermes de sorption et les propriétés thermodynamiques de la variété de Deglet Nour des dattes après un traitement thermique et biochimique à quatre températures (20°C, 30°C, 40°C et 50°C). Nous avons établi une relation entre l'activité de l'eau et la teneur en eau du produit. La méthode gravimétrique utilisant des solutions d'acide sulfurique a été choisie. Pour modéliser et prédire le comportement hygroscopique lors du séchage et du stockage, neuf modèles mathématiques (GAB, BET, Halsey, Peleg, Oswin, Henderson, Caurie, Smith et Iglesias) ont été utilisés. Le lissage et l'optimisation de ces modèles ont été réalisés sur la base du traitement statistique des données obtenues. La chaleur isostérique de sorption des dattes a été calculée à l'aide de l'équation de Clausius-Clapeyron. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour déterminer les courbes de séchage caractéristiques et les conditions de stockage optimales.

Mots clés : Isothermes de sorption ; Modèle de Peleg ; Méthode gravimétrique ; Chaleur isostérique de sorption.

Abstract: The objective of this study is to determine the sorption isotherms and thermodynamic properties of Deglet nour variety of dates through experimental and mathematical analysis following thermal and biochemical treatments at four temperatures (20°C, 30°C, 40°C, and 50°C). Specifically, we aim to establish the relationship between water activity and the water content of the product at these specified temperatures. The gravimetric method utilizing sulfuric acid solutions has been selected as the preferred technique. In order to model and predict the hygroscopic behavior during the processes of drying and storage, a total of nine mathematical models (GAB, BET, Halsey, Peleg, Oswin, Henderson, Caurie, Smith, and Iglesias) have been employed. The optimization and smoothing of these models will be performed based on the statistical treatment of the acquired data. The isosteric heat of sorption for the dates will be calculated employing the Clausius-Clapeyron equation. The outcomes of this investigation hold potential for identifying distinctive drying curves and establishing optimal storage conditions.

Key words: Sorption isotherms; Peleg model; Gravimetric method; Isosteric heat of sorption.

ملخص: يهدف هذا العمل إلى إجراء تجارب تجريبية ورياضية لتحديد متساويات الامتصاص والخصائص الديناميكية الحرارية لصنف التمر "Deglet nour" بعد التعرض للمعالجة الحرارية والكيميائية الحيوية عند أربع درجات حرارة مختلفة (20 درجة مئوية، 30 درجة مئوية، 40 درجة مئوية، و 50 درجة مئوية). يهدف البحث أيضاً إلى استكشاف العلاقة بين النشاط المائي ومحتوى الماء في منتجنا. تم استخدام طريقة قياس الجاذبية لمحاليل حامض الكبريتيك كأداة للتحليل. وتم استخدام تسعة نماذج رياضية (GAB) ، BET ، Halsey ، Peleg ، Oswin ، Henderson ، Caurie ، Smith و Igesias) لنمذجة وتوقع سلوك الاضطراب خلال عمليات التجفيف والتخزين. سيتم تحسين هذه النماذج وتوحيدها باستخدام تحليل إحصائي للبيانات التي تم جمعها. تم حساب حرارة التجفيف المتساوية باستخدام معادلة كلاوزيوس وكلايرون. ومن الممكن استخدام نتائج هذه الدراسة لتحديد منحنيات التجفيف المميزة وظروف التخزين المثلى.

الكلمات المفتاحية: متساوي حرارة الامتزاز ; نموذج Peleg ; طريقة القياس الوزني ; الحرارة المتساوية للامتزاز .

Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
A_w	Activité de l'eau	%
M_S	Masse sèche du produit	Kg
M_h	Masse humide du produit	Kg
M_e	Masse de l'eau	Kg
M_a	Masse de l'air sèche	Kg
H_r	Humidité relative de l'air	%
H_{as}	Humidité absolue de saturation	Kg d'eau /kg (as)
H_a	Humidité absolue	Kg d'eau /kg (as)
X	Teneur en eau du produit à base sèche	Kg d'eau /kg de m.s
X_r	Teneur en eau du produit à base humide	Kg d'eau /kg de m.h
X_{eq}	Teneur en eau d'équilibre	% Kg d'eau /kg de m.s
Ψ	Degré de saturation	%
Q_{st}	Chaleur isostérique de sorption	kJ/mol
R	Constante de gaz parfait	J/mol.K
P_v	La pression partielle de la vapeur dans le mélange	Atm
$P_s (T)$	La pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température.	Atm
χ^2	Statistique du test ki-carrée	Sans
R^2	Coefficient de détermination	Sans
T	Température	°C
t	Temps	S
K	Constante de vitesse	/
N	Ordre	/

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Etude bibliographique	
I .1. Introduction	4
I .2. Généralités sur le séchage	4
I .2.1. Définition du séchage	5
I .2.2. Historique	5
I .2.3. But de séchage	5
I .2.4. Principe de séchage	6
I .2.5. Domaines d'applications de séchage dans l'industrie agro-alimentaire	6
I .2.6. Modes de séchage	7
I .2.6.1.Séchage par conduction	7
I .2.6.2.Séchage par convection	7
I .2.6.3.Séchage par rayonnement	8
I .2.6.4.Séchage par perte diélectrique	8
I .2.6.5. Séchage par lyophilisation	8
I .2.7. Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage	9
I .2.7.1. Humidité	9
I .2.7.2. Humidité absolue H_a	9
I .2.7.3. Humidité relative H_r	9
I .2.7.4. Degré de saturation	10
I .2.7.5.Température caractéristique de l'air humide	10
I .2.7.6.Température de bulbe sec	10
I .2.7.7. Temperature de bulbe humide	10
I .2.7.8.Température de rosée	10
I .2.8. Caractéristiques des solides humides	11
I .2.8.1. Humidité relative	11
I .2.8.2. Humidité absolue	11
I .2.8.3. Taux d'humidité	12
I .2.8.4. États de siccité	12

I .2.8.5. Taux d'humidité à l'équilibre	12
I .2.8.6. Corps hygroscopique	12
I .2.9. Différentes méthodes de séchage	12
I .2.9.1. Séchage mécanique	12
I .2.9.2. Séchage chimique	12
I .2.9.3. Séchage thermique	13
I .3. Cinétique de séchage	13
I .3.1. Période de mise en température (Période 0)	14
I .3.2. Période à vitesse constante (Période 1)	14
I .3.3. Période de ralentissement (Période 2)	14
I .4. Effet des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	15
I .4.1. Influence de la température de l'air	15
I .4.2. Influence de la vitesse de l'air	16
I .4.3. Influence de l'humidité de l'air	16
I .5. Vitesse de séchage	16
I .6. Modélisation mathématique de la cinétique du séchage	17
I .7. Différents types de séchoirs solaires	17
I .7.1. Les séchoirs naturels	18
I .7.2. Les séchoirs solaires directs	18
I .7.3. Les séchoirs solaires indirects	19
I .7.4. Les séchoirs hybrides	19
I .7.5. Les séchoirs mixtes	20
I .7.6. Avantages et inconvénients des séchoirs solaires	21
I .8. Séchage par entraînement	22
I .9. Activité de l'eau dans un produit	22
I .10. Isotherme de sorption	24
I .10.1. Définition	24
I .10.2. Classification de l'I.U.P.A.C	26
I .10.3. Modèles de représentation des courbes de sorption et désorption	27
I .10.4. Méthodes d'obtention des isothermes de sorption	28
I .10.4.1. Méthode gravimétrique (Eau)	28

I .10.4.2. Méthode dynamique (Azote)	29
I .10.5. Chaleur isostérique de sorption	30
I .11. Etude review sur l'isotherme de sorption des dattes	31
I .12. Conclusion	36

Chapitre II : Matériels et méthodes

II .1. Introduction	38
II .2. Matière végétale	38
II .2.1. Description et choix des variétés	38
II .2.2. Caractères morphologiques de la variété de Deglet nour	38
II .2.3. Composition	39
II .3. Matériels et mode opératoire	40
II .3.1. Préparation des solutions d'acide sulfurique	40
II .3.2. Préparation des échantillons	43
II .4. Teneurs en eau à l'équilibre des échantillons des dattes	46
II .5. Modèles de description des isothermes de sorption	47
II .6. Détermination de la chaleur isostérique de sorption.	49
II .7. Conclusion	49

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Introduction	50
III.2. Isothermes de sorption	50
III.3. Modèles de description des isothermes d'adsorption	55
III.4. Détermination de la chaleur isostérique de sorption	68
III.5. Variation.de la chaleur isostérique de.sorption de trois variétés de dattes	69
III.6. Conclusion	70

Conclusion générale	72
----------------------------	----

Liste des figures

I .1. Le cycle de lyophilisation	8
I .2. Température de rosée	10
I .3. Cinétique de Séchage	13
I .4. Schématisation des transferts pendant la phase de ralentissement	14
I .5. Le principe de séchage à l'air libre	17
I .6. Le principe de séchoir solaire direct	18
I .7. Le principe de séchoir solaire indirect	18
I .8. Le principe de séchoir hybride	19
I .9. Le principe de séchoir mixte	20
I .10. Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau	23
I . 11.Allure générale des isothermes de sorption	24
I .12. Différentes zones des isothermes de sorption	24
I .13. Classification de l'I.U.P.A.C	26
I .14. Schéma d'un montage expérimental type pour la méthode des solutions salines	28
I .15. Schématisation de la phase de désorption.	29
I .16. Schématisation de la phase d'adsorption	29
II .1. Caractéristique morphologique de datte de variété Deglet Nour	37
II .2. Composition de la pulpe de datte fraîche Deglet-Nour	37
II .3. Acide sulfurique utilisée	41
II .4. Préparation des solutions et mise dans les boucaux	41
II .5. Préparation des échantillons	42
II .6. Les échantillons à l'étuve de séchage	42
II .7. Les échantillons dans un dessiccateur après l'étuvage à 85°C	43
II .8. Le disposition des boucaux dans l'étuve	43
II .9. Balance de précision	44
III.1. Les teneurs en eau d'équilibre de Datte Ouargla, Grara et Hassi Lfhal et en fonction de l'activité de l'eau à différentes températures.	50

- III.2. Isothermes d'adsorption de la Datte (Ouargla) lissées par les 59
modèles : BET, Caurie, GAB, Peleg, Halsey, Henderson, Igesias,
Oswin et Smith à différentes températures.
- III.3. Isothermes d'adsorption de la Datte (Grara) lissées par les 61
modèles : BET, Caurie, GAB, Peleg, Halsey, Henderson,
Igesias, Oswin et Smith à différentes températures.
- III.4. Isothermes d'adsorption de la Datte ((Hassi Lfha) lissées par les 63
modèles : BET, Caurie, GAB, Peleg, Halsey, Henderson,
Igesias, Oswin et Smith à différentes températures.
- III.5. Isostères d'adsorption pour les dattes du (Ouargla,Grara,Hassi 65
Lfhal)
- III.6. Chaleur isostérique nette de sorption des dattes 65
du(Ouargla,Grara,Hassi Lfhal) en fonction de la teneur en eau
d'équilibre.

Liste des tableaux

I .1. Modèles mathématiques de la cinétique du séchage.	16
I .2. Les avantages et les inconvénients de séchoirs solaires	20
I .3. Modèles des courbe de sorption, désorption	26
II .1. La densité-concentration complète des solutions aqueuses d'acide sulfurique	38
II .2. Les masses et les volumes de H_2SO_4 et H_2O	39
II .3. A_w de solution H_2SO_4 sur une plage de températures de $0^\circ C$ a $100^\circ C$ et concentration H_2SO_4 de 5% a 85 % (par poids)	39
II .4. Les équations des Modèles sélectionnés.	44
III .1. Valeurs des masses sèches et humides et les teneurs en eau d'équilibre de tous les échantillons des dattes Deglet noir à $20^\circ C$, $30^\circ C$	47
III .2. Valeurs des masses sèches et humides et les teneurs en eau d'équilibre de tous les échantillons des dattes Deglet noir à $40^\circ C$, $50^\circ C$	49
III .3. Paramètres d'isothermes d'adsorption de la Datte (Ouargla) lissées par les modèles : GAB, BET, Smith, Henderson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.	52
III .4. Paramètres d'isothermes d'adsorption de la Datte (Grara) lissées par les modèles : GAB, BET, Smith, Henderson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.	54
III .5. Paramètres d'isothermes d'adsorption de la Datte (Hassi Lfhal) lissées par les modèles : GAB, BET, Smith, Henderson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures	55

Introduction générale

Introduction générale

Le palmier dattier constitue l'élément fondamental de l'écosystème oasien. Il joue un rôle primordial sur le plan économique grâce à la production de la datte et des sous-produits (pâtes, farine, sirop, vinaigre, levure, alcool, confiserie, ...etc). Ces derniers représentent la base de l'alimentation humaine et animale des régions sahariennes. Le palmier dattier assure aussi la stabilité de la population saharienne [1].

La datte est un aliment de grande valeur énergétique. Elle est très appréciée aussi bien sur le plan national qu'international, particulièrement, la variété Deglet-Nour. La recherche de la qualité de cette variété relève de la technologie. Celle-ci recouvre toutes les opérations, en commençant par la récolte jusqu'à la commercialisation, Ces opérations ont pour objet de préserver la valeur nutritive de ce fruit [1].

La sensibilité de la variété Deglet-Nour à l'altération et sa mauvaise conservation sur les lieux de production pose de gros problèmes aux opérateurs nationaux.

Lors du processus de séchage, l'élimination de l'eau est une étape importante et cruciale. Par conséquent, la première étape pour comprendre scientifiquement l'état de l'eau dans les aliments consiste à déterminer les isothermes de sorption [2].

En effet, ces méthodes offrent plusieurs avantages, notamment la capacité de prédire les variations de teneur en eau d'un produit pendant le processus de séchage. Elles permettent également de déterminer la température et la teneur en eau finale nécessaires pour assurer la stabilité physique, chimique et biologique du produit pendant le stockage [1].

Dans le même contexte, l'isotherme de sorption établit une relation entre la teneur en eau d'équilibre, pour une température donnée et l'humidité relative de l'environnement entourant le produit. Cette isotherme caractérise les nombreuses interactions solide-liquide à l'échelle microscopique, offrant ainsi des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique du produit [2].

L'isotherme de sorption est une représentation de la quantité d'eau en fonction de l'humidité à une température constante donnée. Toute altération de la qualité ou de la composition d'un matériau entraîne des modifications dans ses isothermes de sorption. En raison de la complexité des phénomènes de sorption, il n'est pas possible de prédire les isothermes de sorption à partir de la théorie, ils doivent donc être établis expérimentalement pour chaque produit [2].

L'objectif de cette étude est d'expérimenter la détermination des courbes de sorption de trois variétés de Deglet nour pour quatre valeurs de température. L'équilibre de sorption a été établi en utilisant la méthode de la solution de sel saturé.

Ce mémoire se compose de trois chapitres :

- Le premier chapitre est dédié à une étude bibliographique, qui représente les principales définitions et notions de base, relatives au séchage, ainsi que certaines des quantités qui évoluent pendant le processus de séchage et une recherche bibliographique sur l'isotherme de sorption des dattes.
- Le deuxième chapitre décrit les matériaux et les méthodes utilisés dans l'étude.
- Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus à partir de l'expérimentation, menée sur quatre variétés de dattes à quatre températures différentes (20°C, 30°C, 40°C et 50°C).

Chapitre I :
Etude bibliographique

I. 1. Introduction

Dans de nombreux pays, la commercialisation des produits agricoles est souvent limitée à des saisons et des régions spécifiques. Cependant, pour répondre à la demande tout au long de l'année et sur l'ensemble du territoire, diverses méthodes de conservation sont nécessaires, telles que la congélation, la culture sous serre et la conservation par séchage.

Les techniques de séchage, en tant que méthode de préservation des aliments, semblent offrir une solution satisfaisante dans la plupart des situations rencontrées dans les économies en développement [3].

Le développement agraire dans les régions du sud de l'Algérie est en progression, avec des rythmes plus ou moins rapides. Une proportion significative de la production agricole de ces régions, comprenant des produits tels que (les tomates, les dattes, le henné et la menthe) est idéalement adaptée à la conservation par séchage. Cette méthode permet de maintenir la disponibilité continue de ces produits et facilite leur transport à moindre coût [3].

Le séchage des produits agricoles, tels que les légumes et les fruits est une méthode ancienne de conservation des aliments largement utilisés par l'homme, en raison de son influence significative sur la qualité des produits séchés. L'objectif du processus de séchage est de réduire l'humidité des produits à un niveau permettant un stockage sûr sur une longue durée. Cette technique entraîne également une diminution du poids et du volume, ce qui réduit les coûts liés à l'emballage, au stockage et au transport [4].

Le séchage des fruits, des légumes et de la viande est un processus très énergivore dans l'industrie alimentaire, mais il offre la meilleure solution pour réduire les coûts et les pertes après la récolte. Depuis des siècles, le séchage au soleil en plein air est une pratique répandue dans le monde entier. De nombreux chercheurs se sont penchés sur la modélisation du séchage solaire des produits agricoles. Des études ont été réalisées pour simuler les performances des séchoirs solaires et comprendre le comportement de différents légumes et fruits, notamment en ce qui concerne la cinétique de séchage. Les bases conceptuelles, les différentes méthodes de séchage et les divers types de séchoirs ont été examinés par plusieurs auteurs [5].

I. 2. Généralités sur le séchage

I. 2. 1. Définition du séchage

C'est une opération unitaire utilisée pour éliminer un liquide, qui est présent dans un solide ou un autre liquide. Le terme "déshydratation" est plus spécifique et se réfère uniquement à l'élimination de l'eau dans un solide ou un liquide. Le processus de séchage vise à réduire l'activité du liquide, contenu dans un produit, en dessous du seuil auquel les réactions enzymatiques, l'oxydation et la croissance des microorganismes sont inhibées [6].

I. 2. 2. Historique

Le séchage est une méthode ancestrale, largement utilisée pour la préservation des produits agricoles et alimentaires tels que les céréales, les graines, les fourrages, les viandes et les poissons séchés, les jambons, les figues, les noix, le tabac, etc. Il est également utilisé dans la fabrication des matériaux, tels que les briques en terre séchée, les céramiques, la poterie avant cuisson, le bois, ainsi que dans l'industrie textile pour le lavage et la teinture des tissus et des peaux. Dans ces applications traditionnelles, le séchage par l'air ambiant, appelé "séchage naturel" est encore largement pratiqué. Le séchage "artificiel", qui utilise une source d'énergie supplémentaire est considéré comme une technique complémentaire, offrant une régularité accrue face aux variations climatiques ou fournissant de nouveaux services, tels que le lait en poudre ou le café instantané, les pâtes alimentaires sèches à longue conservation... etc [7].

I.2.3. But de séchage

L'utilisation du séchage dans les industries agroalimentaires présente divers objectifs :

- Prolonger la durée de conservation des produits, tels que la viande, le poisson, les fruits, les graines, les pâtes, les épices, le thé, les champignons...etc.
- Stabiliser les produits agricoles tels que le maïs, la luzerne, le riz, le lait, etc., atténuant ainsi le caractère saisonnier de certaines activités.
- Effectuer des transformations sur les produits grâce à des réactions biochimiques ou biologiques, par exemple pour la salaison des produits, le touraillage du malt...etc.
- Stabiliser des sous-produits industriels destinés à l'alimentation animale, tels que les pulpes issues de la sucrerie ou de l'amidonnerie, les drêches de brasserie, les farines de viande et de poisson, le lactosérum...etc.

- Produire des ingrédients ou des additifs destinés à une seconde transformation, également connus sous le nom de produits alimentaires intermédiaires (PAI). Il peut s'agir, par exemple, de légumes pour les potages, d'oignons pour la charcuterie, de fruits pour la pâtisserie, ainsi que d'épaississants, d'arômes et de colorants [8].

I. 2. 4. Principe de séchage

Pour procéder au séchage d'un produit, il est nécessaire de le ventiler avec de l'air chaud et sec. Cela entraîne un échange de chaleur et d'humidité entre l'air et le produit humide. L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit, ce qui crée une pression partielle en eau à la surface du produit supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression provoque un transfert de matière de la surface du produit vers l'air de séchage. Ainsi, deux facteurs importants doivent être contrôlés pour assurer le processus de séchage :

- Le transfert de chaleur, qui fournit la chaleur latente de vaporisation nécessaire.
- Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide, permettant de l'extraire du produit [9].

I. 2. 5. Domaines d'applications du séchage dans l'industrie agro-alimentaire

Une grande variété d'aliments que nous consommons subit un processus de séchage. Ce séchage peut être une étape nécessaire dans la production du produit ou jouer un rôle crucial dans sa conservation. Voici quelques exemples :

- Les pâtes alimentaires.
- La charcuterie, tels que le saucisson et le jambon.
- Les fromages, qui sont séchés dans des environnements contrôlés.
- Les légumes tels que les pois, ainsi que les fruits secs comme les pruneaux, les raisins et les abricots.
- Certains biscuits apéritifs qui sont produits par séchage à l'air chaud à partir d'une pâte de maïs.
- Le sel extrait des gisements miniers, qui est concassé, dissous, purifié, puis essoré et séché jusqu'à obtenir un sel raffiné.
- La conservation de nombreux types de grains et de végétaux, tels que le café, le cacao, le riz, les autres céréales, les feuilles de thé, les épices, etc.

- Certains produits comme le lait et le lactosérum.
- Les co-produits de l'industrie alimentaire, souvent destinés à l'alimentation du bétail ou à l'industrie chimique pour la production d'additifs. Parmi ces co-produits, on retrouve la pulpe de betterave, issue de la sucrerie, les tourteaux d'oléagineux provenant de l'huilerie, les drêches provenant de brasseries ou de la production de jus de pomme...etc [7].

I. 2. 6. Modes de séchage

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

I.2.6.1. Séchage par conduction

Dans le processus de séchage, le produit à sécher est en contact avec une paroi solide chauffée à une température élevée, que ce soit par des fumées, des vapeurs d'eau, ou autre. La chaleur se propage à travers la paroi et le matériau, ce qui entraîne une augmentation de la température du composé à sécher. Le liquide présent dans le produit se transforme alors en vapeur par évaporation ou par ébullition si sa température d'ébullition est atteinte [10].

Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation [11] :

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

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.

I.2.6.2. Séchage par convection

Ce mode de séchage est largement utilisé dans l'industrie chimique, où l'échange thermique s'effectue par un contact direct entre le solide humide et le gaz caloporteur [10]. Ce processus de séchage utilise l'équation suivante [11] :

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

Avec :

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

A : La surface d'échange (m^2)

α : Le coefficient d'échange par convection ($W/m^2 \cdot K$)

I.2.6.3. Séchage par rayonnement

Dans ce mode de séchage, l'énergie requise pour l'évaporation est transférée par rayonnement. Ce procédé de séchage est extrêmement efficace pour éliminer l'eau, en particulier lorsque le produit à sécher n'est pas sensible à la chaleur [12]. L'énergie est transmise aux produits à sécher à travers des ondes électromagnétiques, c'est-à-dire par le biais d'un émetteur infrarouge qui élève la température. La quantité de chaleur transmise au produit par unité de temps grâce à ce mode de transfert est déterminée par [11] :

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

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

Avec :

T_1 : Température de la source émettrice (K).

T_2 : Température du produit (K).

A_1 : Surface du corps 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.

I.2.6.4. Séchage par perte diélectrique

Le séchage par perte diélectrique repose sur le chauffage électrique des substances non conductrices, également appelées diélectriques. Lorsqu'un matériau isolant est exposé à un champ électrique, ses molécules se polarisent. Lorsque la polarité des électrodes est inversée [13].

I.2.6.5. Séchage par lyophilisation

La lyophilisation est un processus de séchage à basse température, utilisé pour éliminer l'eau présente dans un produit. Ce processus se décompose en trois étapes (Fig.I.1). La congélation du produit, sa sublimation, puis la désorption. Ce procédé est réalisé en maintenant le produit à une température basse sous vide. Le produit obtenu est appelé lyophilisat [14].

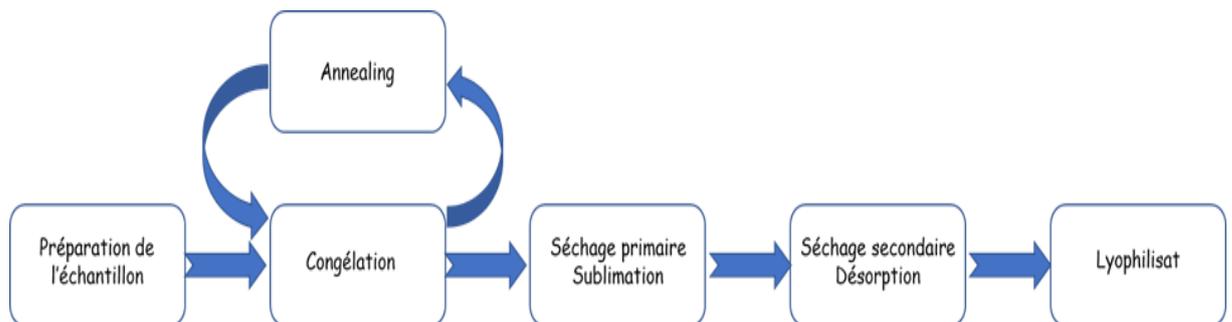


Fig. I.1. Le cycle de lyophilisation [14]

I. 2. 7. Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage

I. 2. 7. 1. Humidité

Ce terme fait référence au liquide présent dans un corps solide, liquide ou pâteux, et qui doit être éliminé lors du processus de séchage [15].

I. 2. 7. 2. L'humidité absolue H_a

Appelée aussi humidité spécifique, ou teneur en eau, représentant le rapport de la masse de la vapeur d'eau (M_{ve}) contenue dans un volume V de l'air humide sur la masse d'air sec (M_{as}) contenue dans ce même volume [16].

$$H_a = \frac{M_{ve}}{M_{as}} \quad (5)$$

I. 2. 7. 3. L'humidité relative (Hr)

L'humidité relative est le rapport entre la pression de vapeur d'eau dans l'air (P_v) sur la pression de saturation ($P_{s,\theta}$) de cette vapeur d'eau à la température θ [16]

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (6)$$

I. 2. 7. 4. Degré de saturation

Soit H_a la valeur de l'humidité d'un gaz à une certaine température et H_{as} la valeur d'humidité correspondant à l'état de saturation pour cette même température. On désigne par degré de saturation d'un gaz le rapport [17].

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (7)$$

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

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} = \frac{P_v}{P_s} \quad (8)$$

I. 2. 7. 5. Température caractéristique de l'air humide

La chaleur à transférer au milieu à sécher est apportée par un gaz vecteur chaud qui assure aussi le transport des vapeurs hors de l'enceinte de séchage. On distingue classiquement quatre températures remarquables [18].

I. 2. 7. 6. Température de bulbe sec :

La température de bulbe sec, également connue sous le nom de température séchée d'un gaz, fait référence à la température mesurée par une sonde placée dans le flux gazeux. Cela représente la température réelle du gaz dans le courant [17].

I. 2. 7. 7. Température de bulbe humide

La température de bulbe humide, également connue sous le nom de température humide, est la température mesurée par une sonde enveloppée d'une mèche et placée dans le courant gazeux. Cette mèche est constamment humidifiée avec de l'eau pure. Il est important de noter que la température humide est la température relevée lors de la phase de séchage par entraînement à vitesse constante d'un solide humide [17].

I. 2. 7. 8. Température de rosée T_r

La température de rosée correspond à la température à laquelle l'air devient saturé pour une pression de vapeur d'eau P_v donnée. La pression de vapeur d'eau P_v est utilisée dans le

calcul de l'humidité spécifique. Ainsi, la température de rosée (Fig.I.2) représente la température de saturation à une humidité spécifique constante [18].

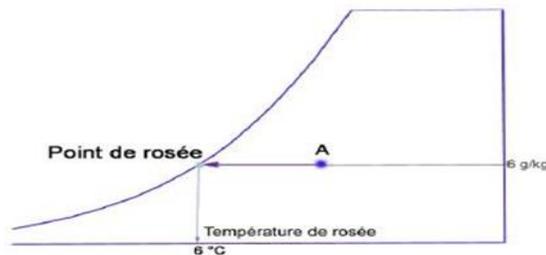


Fig. I. 2. Température de rosée [19]

Lorsque l'on se déplace d'un point A sur une courbe isohyète du diagramme, de droite à gauche, on atteint un point de la courbe de saturation, appelé point de rosée. La température correspondante, lue sur l'axe horizontal, est la température de rosée de A, notée t_r [19].

I. 2. 8. Caractéristiques des solides humides

I. 2. 8. 1. Humidité relative

L'humidité relative d'un solide, également appelée titre en eau ou teneur en eau à base humide, est exprimée en termes de la masse du liquide contenu dans le produit par rapport à sa masse humide [19].

$$X = \frac{(Mh - Ms)}{Mh} \quad (9)$$

I. 2. 8. 2. Humidité absolue

L'humidité absolue d'un solide, également connue sous le nom de teneur en eau à base sèche ou simplement humidité, est exprimée en termes de la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche [19] :

$$X = \frac{(Mh - Ms)}{Ms} \quad (10)$$

Où :

X : Humidité absolue d'un solide [kg/kg].

Mh : Masse humide de produit [kg].

Ms : Masse sèche de produit [kg].

I. 2. 8. 3. Taux d'humidité

Le taux d'humidité représente la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien que l'on fasse souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre [19].

I. 2. 8. 4. Etats de siccité

Un corps anhydre est un corps, qui ne contient aucun pourcentage d'eau. Après séchage, le produit obtenu est en parfaite compatibilité avec la matière. De plus, le taux d'humidité n'est pas nécessairement nul [20].

I. 2. 8. 5. Taux d'humidité à l'équilibre

Lorsqu'un corps humide est placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, son taux d'humidité se stabilise à une valeur dite d'équilibre. Cette valeur dépend de la nature de l'humidité et du produit imprégné, ainsi que de la pression partielle et de la température [20].

$$X_{eq} = \frac{M_e}{M_s} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad (11)$$

I. 2. 8. 6. Corps hygroscopique

Un produit est considéré comme hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de l'humidité pure à la même température que celle du produit [21].

I. 2. 9. Différentes méthodes de séchage

I.2.9.1. Séchage mécanique

La déshydratation mécanique est le processus d'élimination du liquide d'un matériau à l'aide de forces purement mécaniques telles que le pressage, la centrifugation, la compression, la décantation et la filtration [22].

I. 2. 9. 2. Séchage chimique

Le séchage chimique est un procédé qui repose sur l'utilisation de produits déshydratants (comme le chlorure de calcium) pour extraire l'eau d'un matériau [21].

I. 2. 9. 3. Séchage thermique

Le séchage thermique est principalement un transfert de masse, qui nécessite une « activation » de l'eau grâce à une quantité spécifique d'énergie apportée par un transfert de chaleur. Ces deux types de transfert se divisent en une phase externe et une phase interne, où l'eau est éliminée du matériau à sécher [21] :

- 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.

I. 3. Cinétique de séchage

La cinétique de séchage des différents produits est étudiée en utilisant des courbes, qui représentent l'évolution de la vitesse de séchage au fil du temps. Ces courbes sont généralement obtenues en variant les conditions expérimentales telles que la température, la vitesse de l'air de séchage et l'hygrométrie. Elles permettent de caractériser le comportement global du produit pendant le processus de séchage. Dans la (Fig I.3) nous présentons les variations de la vitesse de séchage ($-dx/dt$), en fonction de la teneur en eau (x). Les travaux de séchage montrent que les courbes de vitesse de séchage varient en fonction de la nature du produit. Cependant, de manière générale, on observe que le processus de séchage se divise en trois principales périodes [22].

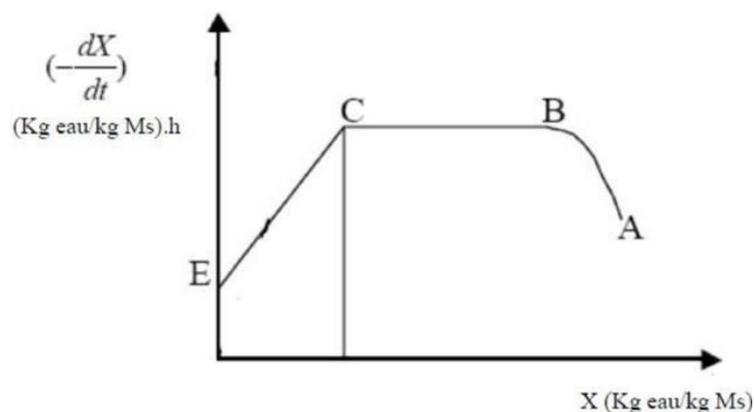


Fig. I. 3. Cinétique de Séchage [22]

I. 3. 1. Période de mise en température (Période 0)

Au cours de cette période, une légère différence d'humidité sera observée dans le produit, tandis que la température augmentera progressivement jusqu'à atteindre la température de bulbe humide correspondante de l'environnement de séchage (A - B).

- Cette phase est plus fréquente dans le cas de produits de grande taille.
- La durée de cette période est généralement courte.
- Elle survient lorsque la différence de température entre l'air et le produit est significative [22].

I. 3. 2. Période à vitesse constante (Période 1)

Durant cette phase, la vitesse de séchage reste relativement constante pour la plupart des produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide, principalement grâce aux forces capillaires. Un équilibre est établi entre la diffusion dans la couche limite (à l'interface air-matériau) et les mécanismes de transfert d'humidité internes au sein du produit, vers la surface. La température reste uniforme à l'intérieur du produit, car le flux de chaleur échangé avec l'air chaud est entièrement utilisé pour la vaporisation de l'eau à la surface. Cette période prend fin lorsque les forces capillaires ne peuvent plus maintenir la vaporisation de l'eau à la surface et elle couvre généralement une grande partie du temps total de séchage [23].

I. 3. 3. Période de ralentissement (Période 2)

Cette phase succède à la période de vitesse constante et débute à partir du point critique atteint à la fin de la période précédente. Pendant cette phase, la surface du produit à sécher n'est plus saturée en eau. Un front d'évaporation se forme progressivement et se déplace vers l'intérieur du produit (Fig. I.4). L'énergie fournie par la source de chaleur (l'air chauffé) n'est plus exclusivement utilisée pour l'évaporation de l'eau du produit, mais également pour augmenter sa température. Le potentiel d'échange (c'est-à-dire la vitesse de séchage) diminue progressivement tandis que la température du produit continue à augmenter [23].

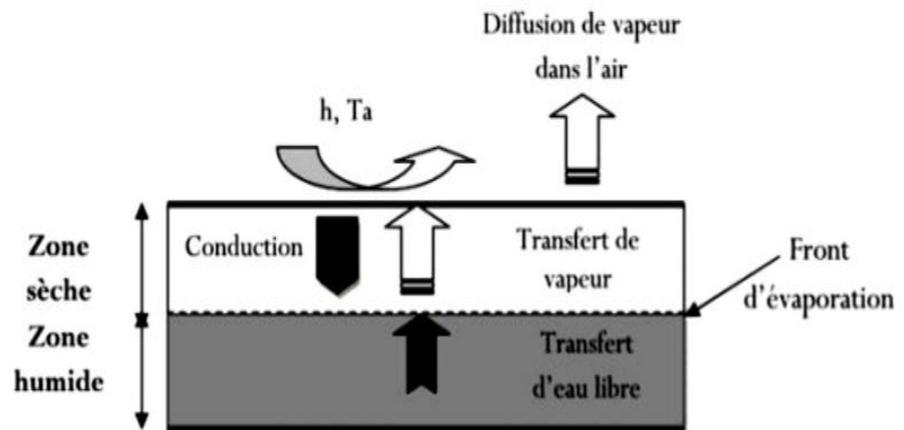


Figure I.4. Schématisation des transferts pendant la phase de ralentissement [23]

L'allure du processus de séchage pendant cette période dépend de plusieurs facteurs, tels que la disparition de l'eau libre en surface du produit, l'épaisseur du produit, la diffusivité de l'eau dans le matériau, la résistance mécanique des parois cellulaires et la formation d'une croûte.

Dans le cas de matériaux hygroscopiques, il peut y avoir une phase supplémentaire où l'ensemble du produit se trouve dans le domaine hygroscopique. Pendant cette phase, il ne reste que de l'eau liée, ce qui entraîne une nouvelle diminution de la vitesse de séchage jusqu'à ce que la teneur en eau finale équilibrée soit atteinte, comme indiqué par l'isotherme de sorption [23].

I. 4. Effet des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

I. 4. 1. Influence de la température de l'air

La température de l'air asséchant joue un rôle significatif dans la vitesse de séchage.

Cela s'explique par l'apport de chaleur au produit, qui augmente avec la température de l'air. De plus, la température du produit est également importante et augmente avec la température de l'air. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau à travers le produit augmentent avec la température [17].

I. 4. 2. Influence de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air a un effet positif sur la cinétique de séchage, en particulier au début du processus. Cependant, pour les 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 négligeable [17].

I. 4. 3. Influence de l'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air joue un rôle important dans le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. Tout comme pour la vitesse de l'air, cette influence est plus prononcée au début du processus de séchage et diminue à mesure que la température de l'air augmente [17].

I. 5. Vitesse de séchage

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la quantité d'eau évaporée du solide séché par unité de temps et de masse de solide sec, ou tout simplement comme la limite du quotient de la différence de teneur "Am" par l'intervalle de temps "At". C'est une mesure qui caractérise l'allure du transfert d'humidité. La vitesse de séchage dépend de nombreux paramètres, parmi lesquels les plus importants sont [24] :

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

$$V_s = \frac{-dM_v}{S_s \cdot dt} = \frac{M_s \cdot dx}{S_s \cdot dt} \quad (12)$$

$$M_v = M_s \cdot dx \quad (13)$$

$$dx = X_e - X_s \quad (14)$$

M_v : La masse d'eau évaporée.

M_s : La masse de produit sec.

dX : La variation de la teneur en eau du produit à sécher.

S_s : La surface de séchage.

X_e : Teneur en eau du produit à l'entrée.

X_s : Teneur en eau du produit à la sortie.

I. 6. Modélisation mathématique de la cinétique du séchage

L'approche empirique des courbes de séchage en couche mince est largement utilisée en raison de sa facilité de mise en œuvre et de sa fiabilité pour décrire le processus de séchage des produits agricoles, ainsi que des plantes aromatiques et médicinales [23].

En complément, plusieurs modèles mathématiques semi-empiriques et empiriques ont été utilisés pour décrire la cinétique de séchage (Tableau I.1).

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

Modèle	Équation
Newton	$X_r = \exp(-Kt)$
Page	$X_r = \exp(-Kt^n)$
Henderson and Pabis	$X_r = a \cdot \exp(-Kt)$
Logarithmic	$X_r = a \cdot \exp(-Kt) + c$
Wang and Singh	$X_r = 1 + at + bt^2$
Tow-Term Exponentiel	$X_r = a \cdot \exp(-Kt) + (1 - a)$
Page modifié	$X_r = \exp(-(Kt)^n)$
Approche Diffusionnelle.	$X_r = a \cdot \exp(-Kt) + (1 - a) \cdot \exp(-Ktb)$

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

$$X_r = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} \quad (15)$$

Où :

X : La teneur en eau au temps t (kg eau/kg ms)

X₀ : La teneur initiale en eau (kg eau/kg ms)

X_e : La teneur en eau à l'équilibre (kg eau/ kg ms)

I. 7. Différents types de séchoirs solaires

I. 7. 1. Les séchoirs naturels

Les séchoirs naturels exploitent directement l'énergie solaire et l'air ambiant, où les produits sont répartis sur des claies, des nattes, des cribs ou même directement au sol. Le

principe de séchage à l'air libre est simple : le rayonnement solaire atteint la surface des produits et une partie de l'énergie est réfléchi vers l'environnement (Fig.I.5).

Ces séchoirs sont économiques, mais nécessitent une intervention humaine régulière, tels que la protection ou la collecte des produits en cas de pluie, un brassage fréquent pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et l'homogénéisation du produit afin de permettre le séchage uniforme de la couche inférieure.

Ce type de séchoir est souvent utilisé de manière traditionnelle dans les communautés rurales pour assurer la conservation temporaire des produits en attendant leur vente ou leur consommation. Cependant, il présente certains inconvénients, tels que des pertes de produits mal séchés ou endommagés lors du brassage, une dégradation des vitamines A et C due à l'exposition directe au soleil, ainsi que des risques de détérioration, causés par les intempéries et les nuisibles tels que les insectes, les rats et les poussières [22].

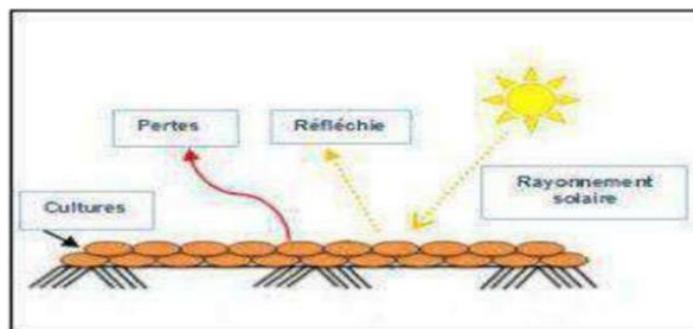


Fig. I. 5. Les séchoirs solaires directs [22]

I.7.2. Les séchoirs solaires directs

Les séchoirs solaires directs sont des dispositifs simples à utiliser et à construire (Fig.I.6). Ils offrent de larges possibilités de conception, allant du séchoir coffre à plateau adapté à la petite production, jusqu'au séchoir cabane qui permet de traiter de grandes quantités [22].

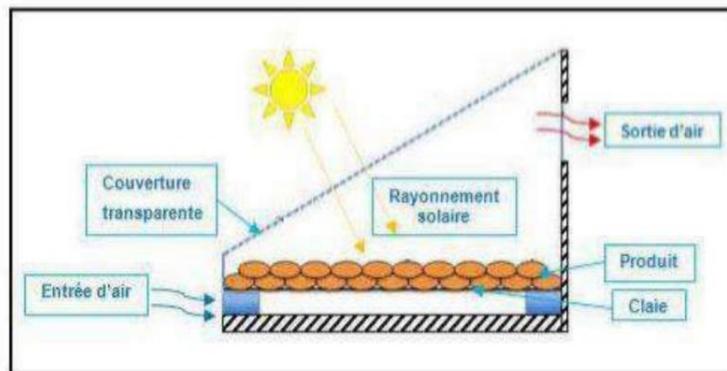


Fig. I. 6. Le principe du séchoir solaire direct [26]

I. 7. 3. Les séchoirs solaires indirects

Ces systèmes sont plus efficaces que les séchoirs solaires directs, offrant l'avantage de préserver davantage les caractéristiques des aliments tels que leur couleur, leur apparence et leur valeur nutritive. Par conséquent, ils sont particulièrement adaptés au séchage des produits alimentaires (Fig. I.7) [22].

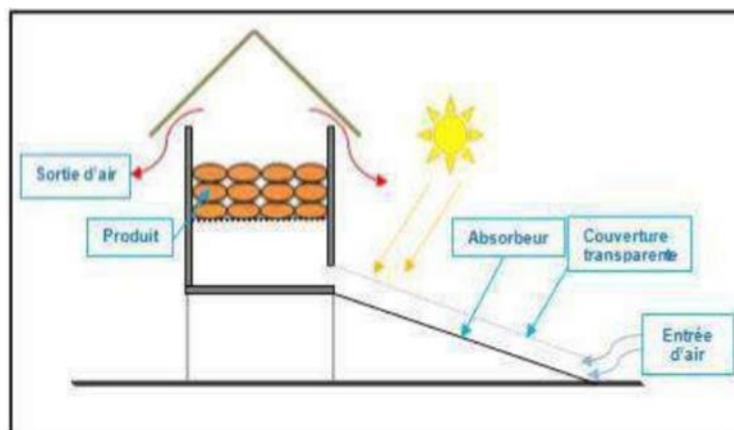


Figure. I. 7. Le principe de séchoir solaire indirect [26]

I.7.4. Les séchoirs hybrides

Les recherches se sont tournées vers les séchoirs hybrides, qui utilisent une source d'énergie supplémentaire telle que le fuel, l'électricité, le bois ou le gaz (Fig.I.8). L'apport d'énergie supplémentaire peut se faire à deux endroits différents du séchoir [22] :

- Maintenir une température constante à l'intérieur du séchoir à l'aide d'un brûleur à gaz, d'une résistance électrique ou d'un feu de bois. Dans ce cas, l'énergie solaire devient secondaire et sert simplement à préchauffer l'air.
- Augmenter la circulation de l'air à l'aide de ventilateurs électriques. Dans cette configuration, l'énergie solaire reste la source de chaleur principale, mais le séchoir bénéficie d'une meilleure ventilation, ce qui permet une capacité d'évaporation plus élevée.

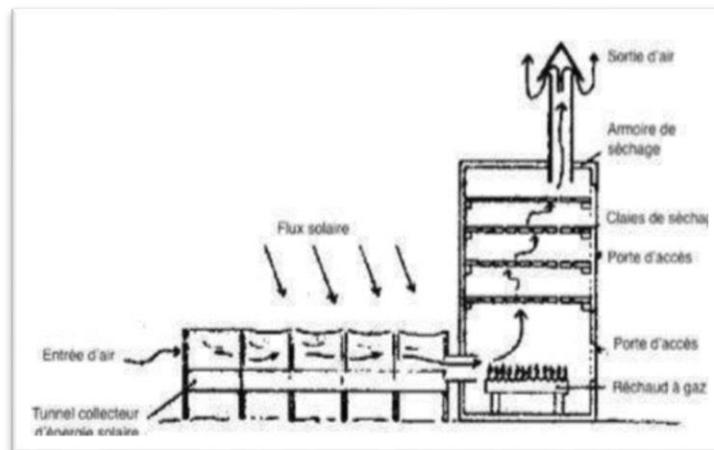


Fig. I. 8. Le principe de séchoir hybride [25]

I.7.5. Les séchoirs mixtes

Ces séchoirs combinent les éléments des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, le rayonnement solaire direct agit sur le produit à sécher tandis que le capteur solaire fournit la chaleur nécessaire au processus de séchage. Un exemple de séchoir mixte à circulation naturelle est illustré dans la (Fig.I.9). Ce séchoir présente les mêmes composants structuraux qu'un séchoir indirect (capteur solaire, chambre de séchage et cheminée), mais ses parois sont équipées de plaques de verre permettant au rayonnement solaire d'atteindre directement le produit, comme dans un séchoir direct [22].

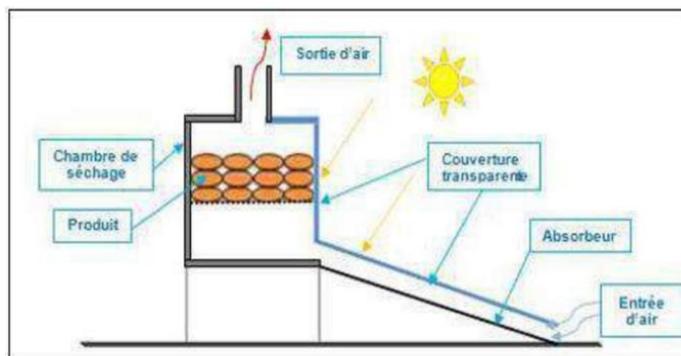


Fig. I. 9. Le principe de séchoir mixte [26]

I. 7. 6. Avantages et inconvénients des séchoirs solaires

Tableau. I. 2. Les avantages et les inconvénients des séchoirs solaires

Type	Les avantages	Les inconvénients
Direct [11]	<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 risques de Moisissure.
	<ul style="list-style-type: none"> -Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C). 	<ul style="list-style-type: none"> -Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.

Indirect [22]	-Possibilité de construire ce type des séchoirs localement, avec un coût réduit. -Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossile	-Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement
Hybride [22]	-Affranchissement par rapport aux conditions climatiques. -Meilleur contrôle du séchage. -Forte augmentation de la production par rapport aux autres types des séchoirs, car le dispositif peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.	-Coût de production et d'investissement élevé. -Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, pièce de rechange. -Personnel qualifié pour la maintenance
Mixte [11]	Meilleur contrôle du séchage. Cela peut être utilisé même en l'absence d'énergie solaire, ce qui réduit les risques d'endommagement du produit.	Coût de production d'investissement élevé. Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz. Personnel qualifié pou

I. 8. Séchage par entraînement

Lorsque nous plaçons un produit humide devant un courant d'air chaud, des différences de température et de concentration de la substance humide se manifestent.

- La chaleur est transférée de l'air vers le produit en raison de cette différence de température.
- Parallèlement, l'eau se déplace en sens inverse en raison de la différence de concentration d'eau dans l'air.
- Les concentrations d'humidité dans l'air sont exprimées en termes de pressions partielles d'eau ($P_a = \text{Pascal}$).

Le processus de séchage est considéré comme équilibré lorsque l'énergie nécessaire pour évaporer l'eau est égale à l'énergie fournie par l'air chaud. Il est important de souligner que l'air joue un double rôle en agissant à la fois comme moyen de chauffage et comme gaz vecteur pour les matériaux humides [27].

I. 9. Activité de l'eau dans un produit

Lorsque le produit est en équilibre hygroscopique avec l'air ambiant, l'activité de l'eau (A_w) est équivalente à l'humidité relative d'équilibre ($A_w = HRE$). Elle est définie comme suit [3] :

$$A_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} = \frac{HR(\%)}{100} \quad (16)$$

Avec :

P_{vp} : Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)

P_{vs} : Pression partielle de vapeur saturante (Pa)

HR : Humidité relative de l'air (%)

L'activité de l'eau (A_w) est une mesure de la disponibilité de l'eau retenue de différentes manières dans un matériau hygroscopique. Elle joue un rôle essentiel dans la détermination des propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques d'un tel matériau [3].

La Fig (I.10) met en évidence l'importance de la notion d'activité de l'eau dans la conservation des denrées alimentaires. Voici un résumé des principales conclusions tirées de leurs travaux :

Pour $A_w > 0,9$: la plupart des bactéries nocives cessent de croître dans le produit donné.

Pour $A_w < 0,8$: beaucoup d'enzymes sont inactives.

Pour $A_w < 0,75$: la prolifération des bactéries halophiles est arrêtée.

Pour $0,8 < A_w < 0,7$: les réactions de Maillard (brunissement non enzymatique des sucres en présence de groupements aminés) présentent un maximum.

La zone optimale de conservation des produits, sans additif ni réfrigération, correspond à des valeurs d'activité A_w comprises entre 0,25 et 0,35 [3].

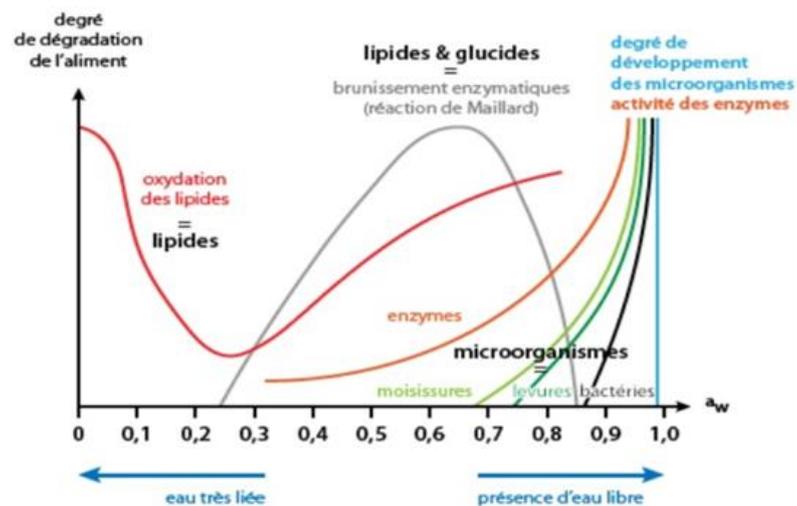


Fig. I. 10. Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau [3]

I. 10. Isotherme de sorption

I. 10. 1. Définition

La relation entre l'activité de l'eau (a_w) et la teneur en eau, à une température constante est généralement décrite par l'isotherme de sorption de la vapeur d'eau, à la fois dans ses aspects pratiques et théoriques.

Cette relation est représentée par une courbe qui montre la teneur en eau (X) d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau (a_w) ou de l'humidité relative de l'air en équilibre (HRE) à une température donnée (Fig. I.11). Cette courbe est communément appelée [23] :

- **Isotherme d'adsorption** : lorsqu'elle est déterminée expérimentalement à partir d'un produit sec (lors d'un processus d'humidification).
- **Isotherme de désorption** : lorsqu'elle est déterminée expérimentalement à partir d'un produit saturé en eau (lors d'un processus de séchage) [23].

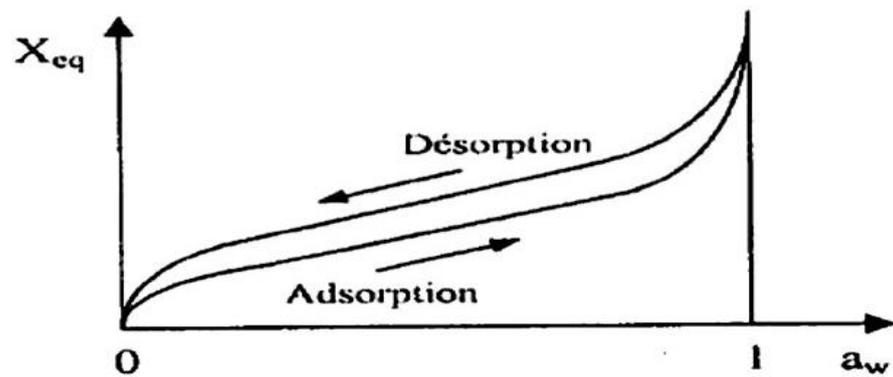


Fig. I. 11. Allure générale des isothermes de sorption [23]

Les isothermes d'adsorption désorption présentent en général trois zones (Fig.I.12), chaque zone correspondant à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit [28] :

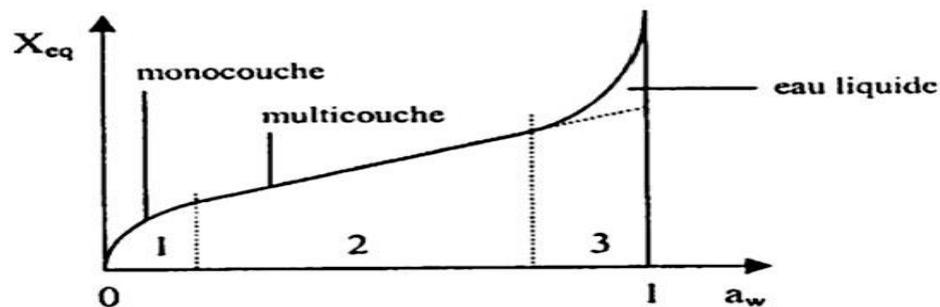


Fig. I. 12. Différentes zones des isothermes de sorption [29]

- **Zone 1 ($a_w < 0.3$)** : Formation d'une monocouche moléculaire à la surface du produit, caractérisée par les forces de Van der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau. L'adsorption progressive des molécules d'eau aboutit à la formation d'une monocouche qui recouvre toute la surface externe et les pores du produit. L'eau se trouve dans un état rigide en raison des forces de liaison entre les molécules d'eau et la surface. La transition vers la zone suivante se produit lorsque toute la surface est saturée.
- **Zone 2 ($0.3 < a_w < 0.7$)** : Adsorption des molécules sur la monocouche initiale. L'isotherme présente une relation linéaire dans cette zone et l'eau se trouve dans un état intermédiaire entre solide et liquide.
- **Zone 3 ($a_w > 0.7$)** : Présence d'eau à l'état liquide dans les pores du matériau. L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour permettre à l'eau d'être présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau capillaire constitue une phase continue.

I. 10. 2. Classification de l'I.U.P.A.C :

Selon la classification de l'I.U.P.A.C, les isothermes d'adsorption-désorption peuvent être regroupées selon six types (Fig. I. 13).

Type I

Correspond à une isotherme d'équilibre d'adsorption de type I, qui est caractéristique d'un adsorbant avec un volume microporeux, particulièrement élevé. La saturation des sites d'adsorption se fait progressivement dès les faibles concentrations et la forme de l'isotherme est caractérisée par un long plateau, indiquant une faible formation de multicouches. Cette forme est similaire au modèle mathématique de Langmuir, dans lequel les sites d'adsorption sont considérés comme équivalents [30].

Type II

Correspond à une isotherme de type II, observée dans le cas d'adsorbants ayant un volume macroporeux important avec un diamètre supérieur à 500 Å. L'adsorption se produit d'abord en monocouche, puis en multicouches jusqu'à la condensation capillaire, ce qui traduit l'existence d'interactions intermoléculaires fortes par rapport aux interactions entre les molécules d'adsorbat et le solide [30].

Type III

Indique la formation de couches poly-moléculaires dès le début de l'adsorption, avant que la surface ne soit complètement recouverte par une couche mono-moléculaire. L'adsorption additionnelle est facilitée par l'interaction plus importante de l'adsorbât avec la couche déjà formée par rapport à l'interaction entre l'adsorbat et l'adsorbant [30].

Type IV

Correspond à une isotherme d'équilibre d'adsorption de type IV, qui est associée à des adsorbants plutôt mésoporeux. La présence de deux paliers peut résulter de la formation de deux couches successives d'adsorbat à la surface du solide. Lorsque les interactions entre les molécules d'adsorbat et la surface de l'adsorbant sont plus fortes que celles entre les molécules d'adsorbat elles-mêmes, les sites d'adsorption de la deuxième couche ne commencent à être occupés que lorsque la première couche est totalement saturée [30].

Type V

Correspond aux isothermes d'équilibre d'adsorption de type V, qui sont caractéristiques d'adsorbants microporeux avec formation de multicouches dès les faibles concentrations. Tout comme l'isotherme de type III, ce comportement témoigne d'interactions plus fortes entre les molécules d'adsorbat qu'entre les molécules d'adsorbat et celles de l'adsorbant [30].

Type VI

Est associé à une isotherme de type VI, qui se manifeste par une adsorption couche par couche sur une surface hautement uniforme [30].

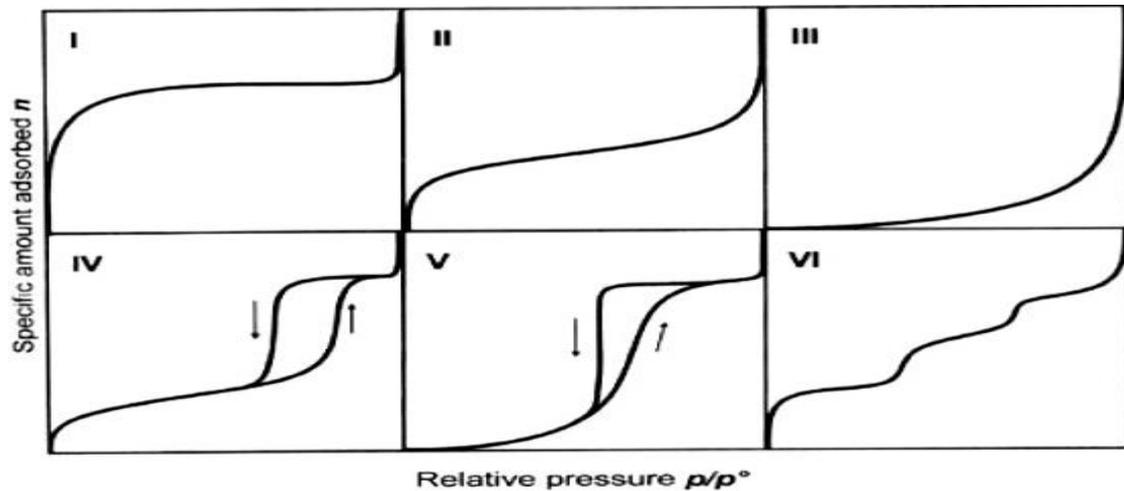


Fig. I.13. Classification de l'I.U.P.A.C [30]

I.10.3 Modèles de représentation des courbes de sorption et désorption.

De nombreux chercheurs ont proposé différents modèles empiriques, semi-empiriques ou théoriques (Tab.I.3) pour décrire le comportement expérimentalement déterminé des courbes de sorption/désorption.

Cependant, deux modèles en particulier sont largement utilisés : le modèle de BET (Brunauer-Emmett-Teller), qui est particulièrement intéressant pour étudier la partie des courbes correspondant à de faibles teneurs en eau et le modèle de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), qui représente les courbes de sorption/désorption jusqu'à une activité de 0,80 à 0,85 [12].

Tableau I. 3. Modèles des courbes de sorption, désorption [31]

Auteurs	Equation du modèle	Paramè- -res	Domaine de validité de courbe	Références
Brunauer Emmett Teller (BET)	$X_{eq} = (A+BT) (C a_w) / (1-a_w) (1-aw+C.a_w)$	A, B, C	Zone 1	Iglesias & Cherifie [32]
Oswin	$X_{eq} = (A+BT) (a_w / 1-a_w) C$	A, B, C	Courbe Complète	Oswin [33]

Halsey	$X_{eq} = \exp [-\exp(A+BT) / X_{eq}^C]$	A, B, C	Courbe Complète	Iglesias & Cherif [32]
Henderson	$1 - a_w = \exp [-K \cdot (T+n) \cdot X_{eq}^C]$	K N C	Courbe Complète	Thompson [34]
Chung-Pfost	$a_w = \exp [(-A/(T+B)) \exp(-CX_{eq})]$	A, B, C	Courbe Complète	Pfost [35]
Langmuir	$X_{eq} = 1/[A+B \cdot a_w^{C-1}]$	A, B, C	Courbe Complète	Langmuir [36]
Peleg	$X_{eq} = A \cdot a_w^{k1} + B \cdot a_w^{k2}$	A, B k1, k2	Courbe Complète	Peleg [37]
Guggenheim Anderson-de Boer (G.A.B)	$X_{eq} = A \cdot B \cdot C \cdot a_w / [1 - B \cdot a_w] [1 - B \cdot a_w + B \cdot C \cdot a_w]$	A, B, C	Courbe Complète	Van den Berg [38]

I. 10. 4. Méthodes d'obtention des isothermes de sorption

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

I.10.4.1. Méthode gravimétrique (Eau)

Le principe de cette méthode consiste à placer un échantillon du produit dans une enceinte maintenue à une température T et une humidité relative HR constantes. L'échantillon est régulièrement pesé jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, ce qui indique qu'il a atteint l'équilibre avec l'air à (T, HR). En connaissant sa masse humide, il est alors possible de déterminer sa masse sèche, ce qui permet de calculer sa teneur en eau X. Le couple (HR, X) fournit un point sur l'isotherme de sorption ou de désorption. L'échantillon est placé dans un récipient hermétique à l'intérieur duquel une solution maintient une humidité relative constante (Fig.I.14). Cette solution peut être une solution saline saturée en sel ou une solution d'acide sulfurique de concentration fixe. La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatique. On utilise autant de récipients contenant des sels ou des concentrations différentes que l'on souhaite obtenir de points sur l'isotherme [29].

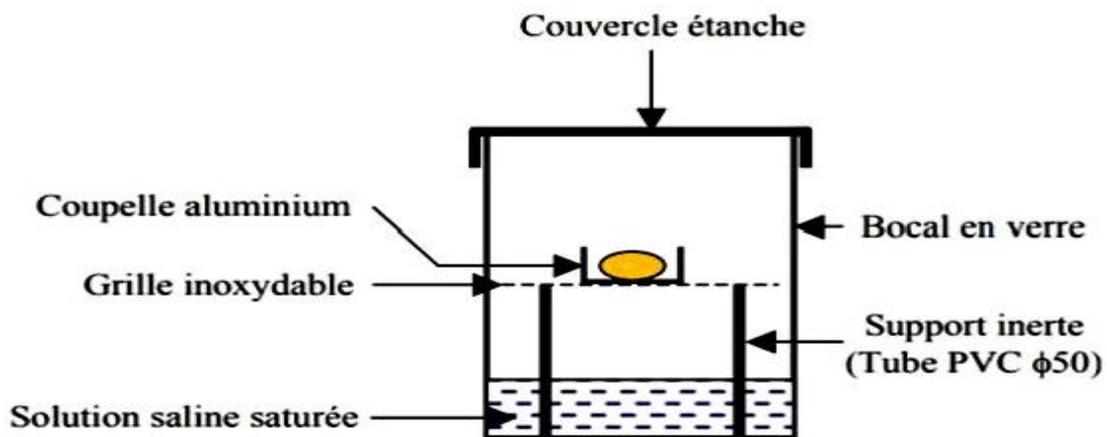


Fig. I.14. Schéma d'un montage expérimental pour la méthode des solutions salines [29]

I. 10. 4. 2. Méthode dynamique (Azote) :

La méthode dynamique utilisant l'azote se compose principalement d'un cylindre calibré avec un piston mobile et d'une éprouvette contenant l'échantillon, dont la courbe de sorption doit être mesurée. Deux types d'isothermes peuvent être déterminés [29] :

a. Adsorption : Un échantillon sec de masse connue est placé dans l'éprouvette, puis un volume connu de vapeur d'eau est injecté à une température et une pression contrôlée sont connues. On attend ensuite l'établissement de l'équilibre avant de relever la pression P_e dans l'éprouvette.

b. Désorption : L'échantillon étant saturé, un volume connu de vapeur d'eau est prélevé dans l'éprouvette, puis 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 les éléments suivants :

- La variation totale de masse d'eau dans le système entre deux injections ou prélèvements de volumes.
- La variation de masse de vapeur d'eau dans l'éprouvette, ce qui permet de déduire la variation de la masse d'eau contenue dans l'échantillon et ainsi d'obtenir la variation de sa teneur en eau. Les (Fig. I.15) et (Fig. I.16) illustrent le principe de la méthode.

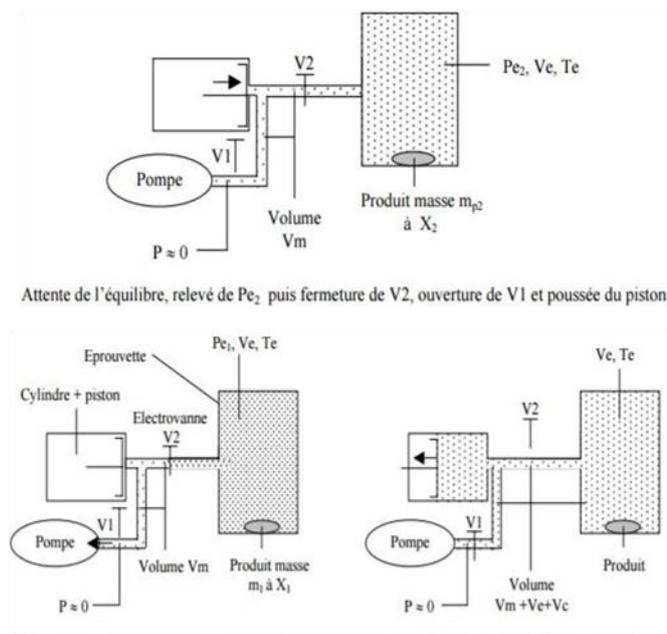


Fig. I. 15. Schématisation de la phase de désorption [29]

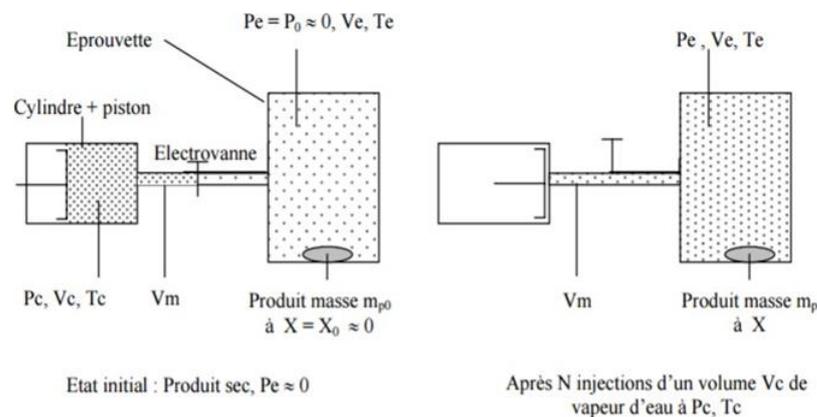


Figure. I.16. Schématisation de la phase d'adsorption [29]

I. 10. 5. Chaleur isostérique de sorption

Le principe de Vant Hoff-Le Chatelier prédit que, à une teneur en eau constante, la pression de vapeur saturante diminue à mesure que la température augmente. Par conséquent, il est possible de déterminer la chaleur isostérique Q_{st} , qui représente l'énergie nécessaire pour fixer l'eau sur le substrat, ainsi que la chaleur supplémentaire requise par rapport à la chaleur de vaporisation de l'eau pure pour déshydrater le produit. Q_{st} peut être calculée en utilisant les

courbes de sorption obtenues à différentes températures, ainsi que l'équation de Clausius-Clapeyron [39] :

$$\frac{\partial \ln(A_w)}{\partial(T)} = \frac{Q_{st}}{RT^2} \quad (17)$$

En intégrant l'équation (17), on obtient :

$$\ln(A_w) = -\left(\frac{Q_{st}}{R}\right) \frac{1}{T} + K \quad (18)$$

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

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

La valeur de Q_{st} (kJ/mol) augmente généralement à mesure que le degré de déshydratation augmente [39].

I. 11. Etude review sur l'isotherme de sorption des dattes

Dans cette partie, nous présentons une recherche bibliographique sur les travaux déjà faits sur l'isotherme de sorption des dattes :

Belarbi et al. Ont mené une étude sur les isothermes de désorption de la vapeur d'eau de onze variétés différentes de dattes (*Phoenix dactylifera*) récoltées à divers endroits. Les dattes ont été récoltées à pleine maturité et comprenaient Mech-Degla, Deglet-Nour et Haloua d'Algérie, Barhi, Fardd, Khadrawi, Khalass, Madjol et Rizaz d'Arabie Saoudite ; Madjhoul d'Israël; et Kentichi de Tunisie. Les isothermes de désorption de la vapeur d'eau ont été mesurées à 25°C en utilisant la méthode gravimétrique statique, suivant les recommandations de COST 90. Cette méthode consiste à suivre les changements de poids des échantillons lorsqu'ils s'équilibrent avec différentes activités de l'eau. Les chercheurs ont découvert que la forme des courbes isothermes de désorption, représentant la teneur en eau en fonction de l'activité de l'eau, était typique des matériaux riches en sucre.

Les données expérimentales obtenues à partir des mesures ont été analysées à l'aide de deux modèles : le modèle Guggenheim-Anderson-Brunauer (GAB) et le modèle Brunauer-Emmett-Teller (BET). Les modèles GAB et BET ont été appliqués directement aux données expérimentales sans aucune transformation de données. Les deux modèles ont pu s'adapter à toute la gamme de données, couvrant une plage d'activité de l'eau de 0,11 à 0,90. Cependant, le modèle BET a été préféré au modèle GAB car ses valeurs de paramètres étaient considérées

comme plus réalistes. Dans l'ensemble, cette étude a fourni des informations sur le comportement de désorption de la vapeur d'eau de différentes variétés de dattes. Les résultats peuvent être utiles pour comprendre les caractéristiques de sorption d'humidité des dattes et optimiser les conditions de stockage afin de maintenir leur qualité et leur durée de conservation [40].

N. Kechaou et M. Maalej ont mené une étude sur les isothermes de désorption d'une variété tunisienne de dattes (tamaras) à différentes températures. Leur objectif était de déterminer la teneur en humidité d'équilibre des dattes, qui est une caractéristique importante pour la plupart des produits agricoles déshydratés. Les chercheurs ont utilisé une méthode gravimétrique dynamique avec enregistrement discontinu des poids des échantillons pour obtenir les isothermes de désorption. Cette méthode consiste à mesurer en continu le poids des échantillons à mesure qu'ils perdent leur humidité. Les résultats expérimentaux obtenus ont ensuite été ajustés au modèle de Guggenheim, Anderson et de Boer (GAB). Le modèle GAB est couramment utilisé pour décrire les isothermes de sorption des produits agricoles. Il fournit des équations mathématiques qui peuvent représenter la relation entre la teneur en humidité et l'activité de l'eau. Les chercheurs ont déterminé la teneur en humidité de la monocouche à l'aide du modèle GAB. La teneur en humidité de la monocouche représente la quantité d'humidité adsorbée dans la monocouche de l'isotherme de désorption. Les valeurs de teneur en humidité de la monocouche variaient de 0,026 à 0,153 kg d'eau/kg de solides secs, selon la température.

En résumé, Kechaou et Maalej ont mené des expériences pour déterminer les isothermes de désorption d'une variété tunisienne de dattes à différentes températures. Ils ont utilisé une méthode gravimétrique dynamique et ajusté les données expérimentales au modèle GAB pour déterminer la teneur en humidité de la monocouche [41].

A. Ferradji et al ont cherché à déterminer les isothermes de sorption de la variété de dattes « Deglet-Nour » à différentes températures (25, 30 et 40 °C). Ils ont utilisé la méthode d'équilibrage dans des atmosphères à humidité relative fixe fournies par des solutions réduites d'acide sulfurique. L'objectif principal était d'estimer la teneur en humidité de la monocouche (X_m) à l'aide de deux modèles théoriques différents, à savoir le modèle G.A.B et le modèle B.E.T. Ces modèles fournissent des informations sur la quantité d'eau adsorbée à saturation par unité de masse du matériau. De plus, les chercheurs ont également étudié la chaleur de sorption de la monocouche et de la multicouche. La chaleur de sorption est une mesure de l'énergie dégagée ou absorbée lors de l'adsorption d'eau à la surface de la datte. De plus, l'équation de

Clausius-Clapeyron a été utilisée pour déterminer la chaleur de sorption de la datte « Deglet-Nour ». Cette équation est basée sur la variation de la pression avec la température au cours d'un processus d'adsorption.

En résumé, cette étude visait à caractériser les isothermes de sorption de la datte « Deglet-Nour » à différentes températures à l'aide de modèles théoriques et à estimer la chaleur de sorption associée. Ces résultats sont précieux pour comprendre le comportement d'adsorption d'eau des dattes et peuvent avoir des implications pratiques dans les pratiques de stockage et de conservation des dattes [42].

Bellagha et al ont mené une étude sur les isothermes de sorption de trois cultivars de dattes tunisiens, à savoir Allig, Kentichi et Deglet Nour, à trois températures différentes : 40 °C, 60 °C et 80 °C. Les isothermes de sorption décrivent la relation entre la teneur en eau et l'activité de l'eau. La méthode gravimétrique statique, suivant les recommandations de COST 90, a été employée pour obtenir les isothermes de sorption. Cette méthode consiste à mesurer les changements de poids des échantillons lorsqu'ils atteignent l'équilibre avec différentes activités de l'eau. Les chercheurs ont observé que la forme globale des courbes isothermes de sorption, représentant la teneur en eau en fonction de l'activité de l'eau, était typique des matériaux riches en sucre. Ils ont également trouvé des variations dans les isothermes de sorption parmi les différents cultivars de dattes, indiquant des différences dans leur comportement de séchage et leurs caractéristiques de sorption d'humidité [43].

Pour analyser les données de sorption, plusieurs modèles isothermes ont été comparés. Les chercheurs ont découvert que l'équation de Guggenheim-Anderson-Brunauer (GAB) et l'équation de Brunauer-Emmett-Teller (BET) représentaient adéquatement les données de sorption jusqu'à environ 0,9 d'humidité relative. À l'aide de l'équation BET, les chercheurs ont calculé la teneur en humidité de la monocouche pour la région de l'isotherme correspondant à l'adsorption monomoléculaire. De plus, ils ont déterminé la chaleur isostérique de sorption en appliquant l'équation de Clausius-Clapeyron aux données de sorption.

Dans l'ensemble, cette étude a fourni des informations sur le comportement de sorption de trois cultivars de dattes tunisiens et a comparé différents modèles isothermes pour leur capacité à représenter les données de sorption. Les résultats peuvent contribuer à comprendre le comportement de séchage et les caractéristiques de sorption d'humidité des dattes, ce qui est important pour les applications de stockage et de transformation [43].

M. Sadeghi et al se sont concentrés sur les propriétés de sorption de l'eau et la température de transition vitreuse (T_g) de la poudre de datte Istameran. Ils ont utilisé la méthode gravimétrique statique pour obtenir l'isotherme de sorption d'eau de la poudre de datte, couvrant une gamme d'activités de l'eau. Le modèle Guggenheim, Anderson et de Boer (GAB) a été utilisé pour ajuster les données de sorption d'eau, et les paramètres du modèle ont été estimés dans une fourchette raisonnable. Les teneurs en humidité de la monocouche pour deux modèles différents, à savoir le modèle Brunauer, Emmett et Teller (BET) et le modèle GAB, ont été déterminées à 3,97g eau/g de solides secs et 0,147g eau/g de solides secs, respectivement. Ces valeurs représentent la teneur en humidité à laquelle la poudre est en équilibre avec une humidité relative spécifique.

De plus, les chercheurs ont cherché à modéliser la température de transition vitreuse (T_g) de la poudre de datte. Ils ont utilisé divers systèmes modèles, notamment l'eau, le fructose et le glucose, qui sont les principaux sucres présents dans la variété Istameran. Parmi les modèles testés, celui proposé par Brostow et al, basé sur la fraction pondérale de glucose et de fructose (WFG) avec un rapport pair présentait la meilleure prédiction pour la T_g . De plus, les chercheurs ont examiné la relation entre la T_g et l'activité de l'eau (A_w). Ils ont utilisé le modèle de Roos pour ajuster T_g en fonction de A_w et ont trouvé qu'il fournissait un ajustement acceptable. Les résultats ont indiqué qu'avec une augmentation de la fraction massique d'eau de 0,006 à 0,214, la T_g de la poudre de datte diminuait linéairement de 21,5 à -65,7 °C.

Globalement, cette étude visait à déterminer l'isotherme de sorption d'eau de la poudre de dattes et à modéliser la T_g en fonction de la fraction massique d'eau et de l' A_w . L'utilisation de mélanges à plusieurs composants et de procédures de modélisation a fourni une approche rationnelle pour déterminer théoriquement la T_g de la poudre de datte [44].

Farahnaky et al visaient à produire de la poudre de sirop de datte à l'aide d'un séchoir à double tambour et à améliorer ses propriétés de séchage en ajoutant de la maltodextrine comme agent anti-agglomérant. Ils ont étudié diverses propriétés physicochimiques des poudres résultantes et les ont comparées. Les chercheurs ont ajouté de la maltodextrine avec un équivalent de dextrose de 19 sirops de datte à différentes concentrations (30 %, 40 %, 50 % et 60 % en fonction du poids sec du sirop de datte). Par la suite, ils ont examiné et comparé plusieurs propriétés de la poudre, notamment le degré d'agglomération, la densité, la couleur, la température de transition vitreuse et les isothermes de sorption.

Les résultats ont démontré que la densité, la légèreté et la température de transition vitreuse de la poudre augmentaient avec des niveaux plus élevés de maltodextrine. Inversement, la valeur de couleur "a" (représentant la composante de rougeur) et le degré d'agglomération ont diminué à mesure que la concentration de maltodextrine augmentait. Cela suggère que la maltodextrine a agi comme un agent anti-agglomérant, réduisant la tendance de la poudre à s'agglomérer. Les chercheurs ont également obtenu des isothermes de sorption d'humidité des poudres à des températures allant de 5 à 60 °C. Ils ont appliqué divers modèles mathématiques, notamment les modèles BET, GAB et Peleg, pour ajuster les données de sorption. Les résultats ont indiqué que les modèles GAB et Peleg convenaient pour décrire le comportement de sorption d'humidité des poudres. De plus, ils ont calculé la teneur en humidité de la monocouche à l'aide des modèles BET et GAB, qui représentent la teneur en humidité à laquelle la poudre est en équilibre avec une humidité relative spécifique. La teneur en humidité de la monocouche a diminué lorsque la concentration de maltodextrine a augmenté de 0 % à 60 %.

Enfin, il a été observé que toutes les poudres de sirop de datte présentaient des isothermes de sorption de type III, que l'on trouve couramment dans les aliments riches en sucre. En résumé, les chercheurs ont réussi à produire de la poudre de sirop de datte avec des propriétés de séchage améliorées en ajoutant de la maltodextrine. L'ajout de maltodextrine réduit l'agglutination, augmente la densité et la légèreté et élève la température de transition vitreuse de la poudre. Le comportement de sorption d'humidité des poudres a été bien décrit par les modèles GAB et Peleg, et la teneur en humidité de la monocouche a diminué avec des niveaux plus élevés de maltodextrine [45].

Nabily et al ont mené une étude portant sur les dattes Deglet Nour (*Phoenix dactylifera* L.) dans le but de déterminer les conditions de stockage appropriées, de prédire la durée de conservation et d'évaluer les changements de qualité pendant le stockage. Les dattes ont été triées selon la norme UNECE DDP-08 relative à la commercialisation et au contrôle qualité des dattes. Les isothermes de désorption ont été obtenues à trois températures différentes : 25°C, 30°C et 40°C. Le modèle de sorption Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) a été utilisé pour analyser les données isothermes et estimer les conditions de stockage appropriées pour les dattes. Dans un premier temps, des analyses physico-chimiques, sensorielles (organoleptiques) et microbiologiques ont été réalisées sur des dattes fraîches et des dattes stockées à 18% d'humidité (sur matière sèche) dans des emballages en film polyéthylène à 5°C et 85% d'humidité relative (HR).

Les chercheurs ont prédit qu'une teneur en humidité de 17,44 % (sur la base de la matière sèche) entraînerait la plus longue période de stockage avec une perte de qualité minimale. La chaleur totale de désorption nécessaire au séchage des fruits a été calculée à 16,48 Kcal.mol⁻¹. L'analyse microbiologique a indiqué que le fruit est resté microbiologiquement stable après une période de stockage de 154 jours. L'analyse sensorielle, qui a évalué la couleur, l'odeur et le goût, n'a montré aucun changement significatif pendant le stockage. La teneur en humidité critique prévue à 26,5 % (sur une base sèche) était inférieure à la teneur en humidité autorisée par le codex UNECE DDP-08 pour les dattes entières commerciales (30 % sur une base sèche).

Globalement, cette étude s'est concentrée sur les dattes Deglet Nour et a consisté à les trier selon la norme UNECE DDP-08. Les isothermes de désorption et le modèle de sorption GAB ont été utilisés pour déterminer les conditions de stockage appropriées et prédire la durée de conservation. Les chercheurs ont également effectué des analyses physico-chimiques, organoleptiques et microbiologiques pour évaluer les changements de qualité pendant le stockage [46].

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les différentes notions de base et des définitions du séchage solaire et ces outils complémentaires, aussi une vision explicative et déterminative des isothermes et de la méthode gravimétrique qui était effectuée. Le choix des modèles mathématiques et les informations qui peuvent être extraites des courbes. Une recherche bibliographique sur les travaux réalisés font la dernière partie dans de ce chapitre.

Chapitre II :

Matériels et méthodes

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on a déterminé expérimentalement les isothermes de sorption de Deglet noir (Ouargla. Grara. Hassi Lfhal) pour différentes températures et pour ce faire, on a opté pour une méthode statique « méthode des solutions d'acide sulfurique ». Les courbes de sorption expérimentales obtenues sont comparées à neuf modèles différents en vue de dégager l'équation la plus adéquate.

II.2. Matière végétale

II.2. 1. Description et choix des variétés

Le matériau végétal utilisé dans notre étude est constitué d'une variété spécifique de dattes, à savoir les dattes Deglet Nour, choisies en raison de leur texture semi-molle.

Les dattes Deglet Nour ont été sélectionnées pour cette recherche en raison de leur consommation répandue en Algérie et de leur disponibilité sur le marché. Elles représentent 47% de la production totale de dattes dans la région. Deglet Nour a été récoltée au mois d'octobre 2022.

Les dattes Deglet Nour sont réputées pour leur goût exquis et sont très appréciées tant sur le marché national qu'international, grâce à leur aspect attrayant, leur saveur distincte et leur texture onctueuse [47].

À pleine maturité, la datte présente une couleur brun ambré avec un épicarpe lisse légèrement plissé et brillant, tandis que le mésocarpe présente une texture fine légèrement fibreuse [48].

II.2. 2. Caractères morphologiques de la variété Deglet noir

Les dattes de la variété Deglet Nour qui veut dire « doigts de lumière » ont été ramenées en Algérie vers le 8ème siècle. C'est un fruit très énergétique. Ces Dattes (fig.II.1) sont légendaires pour la perfection qu'on lui connaît. Elles sont qualifiées de « la reine des dattes » et l'un des produits appréciables de l'agriculture algérienne. Elles ont un goût très doux, elles sont quasi transparentes.

Les dattes de la variété Deglet Nour sont des dattes demies molles. Elles se caractérisent par :

- Poids moyen de 12 g environ ;
- Longueur moyenne de 6 cm ;

- Diamètre moyen de 1,8 cm ;
- Son graine est lisse, de petite taille 0,8-3cm, pointu aux deux extrémités. Il présente une rainure ventrale peu profonde et un micropyle central. La dattes Deglet-Nour est de forme fuselée, ovoïde, légèrement aplatie du coté périlanthe.



Fig. II.1. Les dattes de variété Deglet Nour utilisées.

II.2.3. Composition de la pulpe de dattes fraîches Deglet-Nour :

Les dattes de variété Deglet Nour se compose essentiellement de plusieurs éléments, importants pour la santé de l'être humain (voir la fig.II.2) :

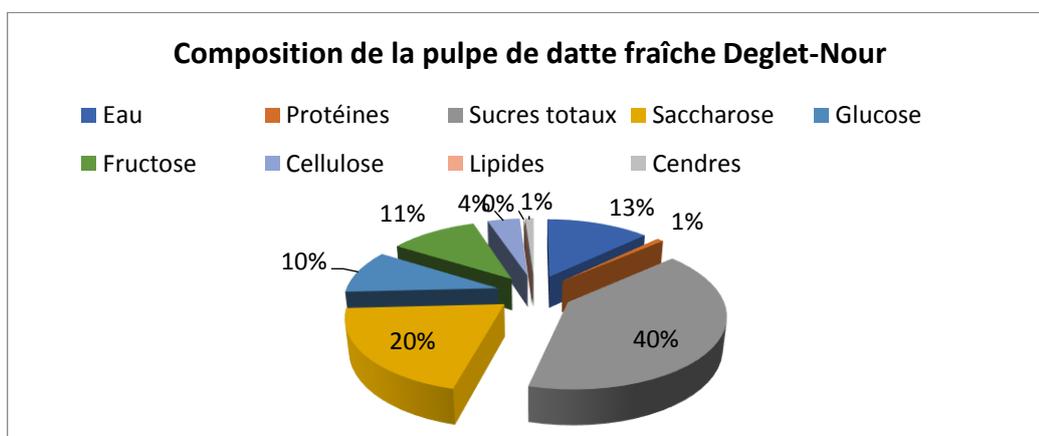


Fig. II.2. Composition de la pulpe de dattes fraîches Deglet-Nour [10]

II. 3. Matériels et mode opératoire

Il existe deux méthodes pour déterminer expérimentalement les isothermes de sorption et les propriétés thermodynamiques, à savoir la méthode des solutions salines saturées et la méthode de la solution d'acide sulfurique. Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode gravimétrique, car elle est plus économique et facilement disponible au laboratoire, en utilisant différentes températures pour modéliser et déterminer le comportement hygroscopique.

Les solutions sont préparées dans des récipients hermétiques et maintenues dans une enceinte à température contrôlée.

L'échantillon est suspendu au-dessus des sels dans le récipient, ce qui crée une ambiance à température et hygrométrie stabilisées. L'expérience est réalisée à quatre températures différentes, à savoir 20°C, 30°C, 40°C et 50 °C.

La masse de l'échantillon utilisé pour l'adsorption est de $2,000 \pm 1,000$ g.

Le suivi des variations de masse pour les gains de masse lors de l'adsorption est assuré à l'aide d'une balance de précision avec une précision de $\pm 0,001$ g. L'équilibre hygroscopique est atteint lorsque l'échange entre le produit et l'air ambiant est complet.

Avant l'adsorption, le produit est soumis à un pré-séchage afin de permettre le phénomène d'adsorption.

Ce pré-séchage est réalisé dans une enceinte maintenue à une température de 60 °C jusqu'à ce que le produit atteigne une déshydratation maximale [51].

II. 3.1. Préparation des solutions d'acide sulfurique

La densité des solutions d'acide sulfurique utilisées à 20°C sont selon le tableau suivant :

Tableau. II .1. La densité-concentration complète des solutions aqueuses d'acide sulfurique [52]

Wt%	10	20	30	40	50	60	70	80	90
<i>d</i> (20°)	1.0661	1.1394	1.2185	1.3028	1.3951	1.4983	1.6105	1.7272	1.8144

On a calculé les masses et les volumes de H₂SO₄ selon la méthode suivante :

$$\begin{array}{l}
 1\text{L} \longrightarrow 1066.1 \qquad m=106.61\text{g} \\
 0.1 \longrightarrow m \\
 106.61 \longrightarrow 1\text{L} \\
 m \longrightarrow 0.125
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} 1\text{L} \\ 0.1 \\ 106.61 \\ m \end{array}} \right\} m=13.32\text{g}$$

on a ρ de H_2SO_4 est $1.84\text{g}/\text{cm}^3$.

$$\rho = \frac{m}{v} \longrightarrow v = \frac{m}{\rho} \longrightarrow v = \frac{13.32}{1.84} = 7.24 \text{ ml}$$

Et le volume de H_2O est :

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 125 - V_{\text{H}_2\text{SO}_4} \longrightarrow 125 - 7.24 = 117.76 \text{ ml}$$

Les volumes des solutions d'acide sulfurique utilisées sont préparés selon (Tab. II.2) :

Tableau II. 2. Les masses et les volumes de H_2SO_4 et H_2O

Wt%	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$m_{\text{H}_2\text{SO}_4}$	13.32	28.485	45.69	65.14	87.19	112.37	140.91	172.72	204.12
$V_{\text{H}_2\text{SO}_4}$	7.24	15.48	24.83	35.40	47.38	61.07	76.58	93.86	110.93
$V_{\text{H}_2\text{O}}$	117.76	109.52	100.17	89.6	77.62	63.93	48.42	31.14	14.07

Tableau II. 3. Aw de solution H_2SO_4 sur une plage de températures de 0°C à 100°C et concentration H_2SO_4 de 5% à 85 % (par poids) [53]

Wt (%)	Température ($^\circ\text{C}$)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	0.9859	0.9861	0.9862	0.9864	0.9866	0.9867	0.9869	0.9870	0.9871	0.9872	0.9873
8	0.9722	0.9727	0.9732	0.9737	0.9741	0.9745	0.9748	0.9752	0.9755	0.9758	0.9761
10	0.9608	0.9616	0.9624	0.9631	0.9638	0.9644	0.9649	0.9655	0.9660	0.9664	0.9669
12	0.9473	0.9486	0.9497	0.9507	0.9517	0.9526	0.9534	0.9542	0.9549	0.9556	0.9562
16	0.9141	0.9164	0.9184	0.9203	0.9221	0.9237	0.9252	0.9266	0.9280	0.9292	0.9304
18	0.8942	0.8971	0.8997	0.9021	0.9044	0.9064	0.9084	0.9102	0.9119	0.9135	0.9150
20	0.8721	0.8756	0.8789	0.8819	0.8847	0.8872	0.8897	0.8919	0.8940	0.8960	0.8979
22	0.8476	0.8519	0.8558	0.8595	0.8629	0.8660	0.8690	0.8717	0.8743	0.8767	0.8790

Chapitre II : Matériels et méthodes

24	0.8209	0.8260	0.8306	0.8350	0.8390	0.8428	0.8463	0.8495	0.8526	0.8555	0.8582
28	0.7606	0.7674	0.7737	0.7795	0.7850	0.7900	0.7948	0.7993	0.8034	0.8074	0.8111
30	0.7272	0.7349	0.7420	0.7486	0.7548	0.7606	0.7660	0.7711	0.7759	0.7804	0.7847
32	0.6917	0.7003	0.7083	0.7157	0.7227	0.7292	0.7353	0.7410	0.7464	0.7515	0.7563
34	0.6543	0.6638	0.6726	0.6809	0.6886	0.6958	0.7026	0.7090	0.7151	0.7208	0.7261
38	0.5748	0.5859	0.5963	0.6060	0.6152	0.6238	0.6320	0.6397	0.6469	0.6538	0.6603
40	0.5331	0.5449	0.5560	0.5664	0.5763	0.5855	0.5943	0.6026	0.6104	0.6179	0.6250
42	0.4906	0.5030	0.5147	0.5257	0.5361	0.5460	0.5553	0.5642	0.5726	0.5805	0.5881
46	0.4047	0.4179	0.4304	0.4422	0.4535	0.4643	0.4745	0.4842	0.4935	0.5024	0.5108
48	0.3621	0.3754	0.3881	0.4002	0.4117	0.4227	0.4332	0.4433	0.4529	0.4621	0.4709
50	0.3204	0.3336	0.3463	0.3585	0.3701	0.3813	0.3920	0.4022	0.4120	0.4214	0.4305
52	0.2800	0.2930	0.3055	0.3176	0.3291	0.3403	0.3510	0.3613	0.3712	0.3808	0.3900
56	0.2050	0.2169	0.2286	0.2399	0.2509	0.2615	0.2718	0.2819	0.2916	0.3010	0.3101
58	0.1712	0.1824	0.1933	0.2040	0.2144	0.2246	0.2345	0.2442	0.2536	0.2627	0.2716
60	0.1404	0.1506	0.1607	0.1706	0.1804	0.1899	0.1992	0.2084	0.2173	0.2261	0.2346
62	0.1129	0.1220	0.1311	0.1401	0.1490	0.1578	0.1665	0.1750	0.1833	0.1916	0.1996
64	0.0887	0.0967	0.1047	0.1127	0.1207	0.1286	0.1365	0.1442	0.1519	0.1595	0.1670
66	0.0680	0.0748	0.0817	0.0887	0.0956	0.1026	0.1096	0.1165	0.1234	0.1302	0.1370
68	0.0507	0.0564	0.0621	0.0680	0.0739	0.0799	0.0859	0.0920	0.0980	0.1041	0.1101
70	0.0367	0.0412	0.0459	0.0507	0.0556	0.0606	0.0657	0.0708	0.0759	0.0811	0.0863
72	0.0256	0.0291	0.0328	0.0366	0.0406	0.0446	0.0487	0.0529	0.0572	0.0616	0.0659
76	0.0111	0.0130	0.0150	0.0171	0.0194	0.0217	0.0242	0.0268	0.0294	0.0321	0.0350
78	0.0068	0.0081	0.0095	0.0109	0.0125	0.0142	0.0160	0.0179	0.0199	0.0219	0.0241
80	0.0039	0.0048	0.0057	0.0067	0.0077	0.0089	0.0101	0.0114	0.0128	0.0143	0.0158
82	0.0022	0.0026	0.0032	0.0038	0.0045	0.0052	0.0061	0.0069	0.0079	0.0089	0.0099
84	0.0011	0.0014	0.0017	0.0020	0.0025	0.0029	0.0034	0.0039	0.0045	0.0052	0.0058
85	0.0008	0.0010	0.0012	0.0015	0.0018	0.0021	0.0025	0.0029	0.0034	0.0038	0.0044

II. 3.2. Préparation des solutions

Nous avons préparé des solutions d'acide sulfurique et l'avons mise dans neuf bocaux en verre.

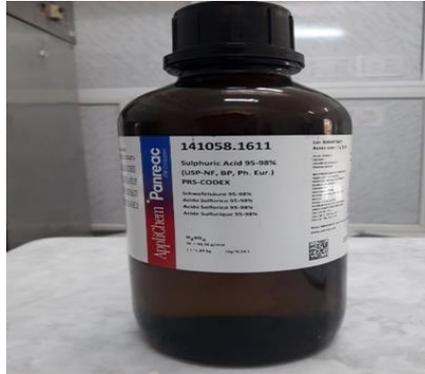


Fig. II.3. Acide sulfurique utilisé



Fig. II.4. Préparation des solutions et mise dans les bocaux

II. 3.3. Préparation des échantillons

- Nous avons pris 5 grammes de Deglet Nour de 3 régions différentes.

(Ouargla. Hassi LfhaL. El Guerrara).



Fig. II.5. Préparation des échantillons

- Les échantillons ont été placés dans une étuve à 85 °C pendant 72 heures pour les sécher.



Fig. II. 6. Les échantillons à l'étuve de séchage

- Les échantillons séchés ont été placés dans un dessiccateur pour les refroidir, puis nous avons pesé et déterminé la valeur de teneur en eau de chaque variété.



Fig. II.7. Les échantillons dans un dessiccateur après l'étuvage à 85 °C

- Deux grammes de chaque échantillon sec ont été divisés et placés dans des boucaux en verre, contenant la solution que nous avons préalablement préparée.



Fig. II.8. La disposition des boucaux dans l'étuve

- Nous avons pesé la masse humide à 4 températures différentes (20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C)

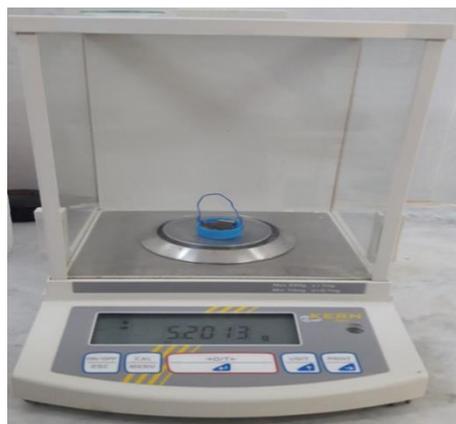


Fig. II.9. Balance de précision

II. 4. Teneur en eau à l'équilibre des échantillons des dattes

Une fois les masses humides et sèches de toutes les échantillons prélevés obtenues, les teneurs en eau d'équilibre sont calculées en utilisant la relation suivante :

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

II. 5. Modèles de description des isothermes d'adsorption

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés dans la littérature scientifique pour décrire la relation entre la teneur en eau d'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la température. Ces modèles sont basés sur des principes physiques et comprennent également des relations empiriques. Dans le cadre de notre étude, nous avons examiné neuf modèles différents provenant de la littérature scientifique pour décrire les isothermes de sorption de notre produit. Ces modèles comprennent le modèle de Henderson modifié, le modèle de Smith modifié, le modèle d'Oswin modifié, le modèle de Halsey modifié, le modèle de GAB, le modèle de Peleg, le modèle de Iglesias, le modèle de BET modifié et le modèle de Caurie modifié. Les détails des modèles sont présentés dans le Tableau (II.4). L'objectif de notre étude est de déterminer le ou les modèles les plus appropriés pour décrire les isothermes de sorption de notre produit.

Tableau II. 4. Les équations des Modèles sélectionnés [37].

Nom de l'équation	Equation	
GAB	$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{[(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)]}$	(2)
BET	$X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{[(1 - a_w)(1 - a_w + C a_w)]}$	(3)
Halsey	$X = \left[\frac{A}{\ln\left(\frac{1}{a_w}\right)} \right]^{\frac{1}{B}}$	(4)
Halsey	$X = \left[-\frac{\ln(1 - a_w)}{A} \right]^{\frac{1}{B}}$	(5)
Iglesias–Chirife	$X = A + B(a_w / (1 - a_w))$	(6)
Oswin	$X = A(a_w / (1 - a_w))^C$	(7)
Caurie	$X = \exp(a + b a_w)$	(8)
Smith	$X = C_1 - C_2 \ln(1 - a_w)$	(9)
Peleg	$X = K_1 a_w^{n1} + K_2 a_w^{n2}$	(10)

L'évaluation de l'erreur est essentielle lors de l'ajustement des données expérimentales pour évaluer l'adéquation de l'équation d'isotherme de sorption. Dans cette étude, le coefficient de détermination (R^2) et le test du chi-carré réduit (χ^2) ont été utilisés pour tous les modèles

d'isothermes de sorption. L'avantage d'utiliser le test du chi-carré (χ^2) est de comparer toutes les isothermes de sorption à la même échelle en abscisse et en ordonnée.

La statistique du test du chi-carré réduit (χ^2) correspond essentiellement à la somme des carrés des différences entre les données expérimentales et les données calculées à partir des modèles, chaque différence au carré étant divisée par les données calculées correspondantes provenant des modèles. Mathématiquement, cela peut être exprimé comme suit :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{eq_{exp}}^i - X_{eq_{pre}}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_{eq_{exp}}^i - X_{eq_{pre}}^i)^2} \quad (11)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{eq_{exp}}^i - X_{eq_{pre}}^i)^2}{N-n} \quad (12)$$

Avec :

$$\overline{X_{eq_{exp}}} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{eq_{exp}}^i}{N} \quad (13)$$

Où $X_{eq_{exp}}$ est la teneur en eau d'équilibre expérimentale, N le nombre de points expérimentaux.

Les valeurs $\chi^2 = 0$ et $R^2 = 1$ correspondent à un ajustement parfait et le modèle avec la valeur la plus faible de χ^2 est la valeur la plus élevée de R^2 a été identifié comme le modèle le plus approprié pour décrire les isothermes de sorption de Deglet nour [37].

II.6. Détermination de la chaleur isostérique de sorption

Selon l'équation (22), la chaleur d'adsorption nette isostérique peut être déterminée à partir de la pente de la courbe représentant $\ln(a_w)$ en fonction de $1/T$ à une teneur en eau constante X . Pour construire cette figure, il est nécessaire d'avoir des valeurs de a_w à différentes températures pour une teneur en eau constante. Cependant, les données de sorption n'ont pas été mesurées à une teneur en eau constante. Par conséquent, la procédure suivante a été utilisée.

Les données expérimentales de sorption disponibles ont été utilisées autant que possible, en commençant par les données les plus fondamentales. Étant donné qu'un seul point de données était disponible pour la teneur en eau constante à une seule température, les données à d'autres températures ont été obtenues en appliquant les paramètres du modèle GAB à la forme transformée du modèle GAB, c'est-à-dire $a_w = (X, T)$.

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{\Delta H_{is}}{R}\right)\frac{1}{T} + cst \quad (14)$$

$$a_w = [2 + (X_m/X_{eq} - 1)C - \{(X_m/X_{eq} - 1)C\}^2 - 4(1 - C)^{\frac{1}{2}}]/[2K(1 - C)] \quad (15)$$

Une analyse des moindres carrés est réalisée pour obtenir la pente de la courbe (a_w) en fonction de $1/T$ à une teneur en eau X constante en utilisant le programme Origin Pro 9.

II.7. Conclusion

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

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

Chapitre III :

Résultats et discussion

III.1. Introduction

Ce travail a été effectué dans le laboratoire biomasse de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER) à Ghardaïa. Le but de ce chapitre est de se concentrer sur les caractéristiques thermophysiques de trois variétés de Datte Deglet Nour (Ouargla, El Guerrara, Hassi Lfhal). L'analyse de leurs isothermes d'adsorption à différentes températures (20 °C, 30 °C, 40 °C et 50 °C) est présentée en premier. Vient ensuite le calcul de la chaleur isotherme d'adsorption.

III.2. Isothermes de sorption

Une isotherme de sorption décrit la quantité d'eau retenue par un produit en fonction de l'humidité relative du milieu dans lequel il est placé à l'équilibre et pour une température donnée. L'adsorption se produit lorsqu'un produit hygroscopique sensible entre en contact avec un environnement humide et fixe la vapeur d'eau jusqu'à ce qu'il atteigne l'équilibre avec l'air ambiant. Lorsqu'il se trouve dans une atmosphère sèche, il libère de la vapeur jusqu'à ce qu'il atteigne l'équilibre, c'est-à-dire lorsque la désorption se produit. Une étape essentielle dans le séchage et la conservation des opérations de Datte Deglet Nour est la détermination des isothermes de sorption. Ces courbes apportent des précisions sur le domaine de leur stabilité, la nature des interactions eau-Datte, et l'équilibre hygroscopique des Dattes Deglet Nour, qui est atteint après plusieurs jours d'adsorption. Afin d'établir les conditions idéales de séchage et de stockage de différentes variétés de Datte Deglet Nour,

Pour les variétés de Dattes examinées expérimentalement, les isothermes d'adsorption sont cruciales pour évaluer les meilleures conditions de stockage et identifier la teneur en eau d'équilibre pendant le stockage à une intervalle d'humidité relative comprise entre 0,05 % et 96,44% et pour quatre températures (20 °C, 30 °C, 40 °C et 50 °C).

Les valeurs des teneurs d'eau à l'équilibre de tous les échantillons des Dattes Deglet Nour sont reportées, pour 20 °C, 30 °C dans Tab. III.1 et pour 40 °C, 50 °C dans Tab. III.2.

Tab. III.1. Valeurs des masses sèches et humides et les teneurs en eau d'équilibre de tous les échantillons des dattes Deglet Nour à 20 °C, 30 °C :

Variété	C _{H2SO4} (% en masse)	T= 20 °C				T= 30 °C			
		a _w (%)	Ms (g)	Mh (g)	X _{eq}	a _w (%)	Ms (g)	Mh (g)	X _{eq}

Ouargla	10	96,24	2.0030	2.0128	0.00489	96.31	2.0030	2.0089	0.0029
	20	87,89	2.0947	2.1021	0.00353	88.19	2.0947	2.0968	0.0010
	30	74,20	2.2881	2.2905	0.00105	74.86	2.2881	2.2901	0.0080
	40	55,60	2.2260	2.2312	0.00234	56.64	2.2260	2.2350	0.0040
	50	34,63	2.2757	2.3947	0.05229	35.85	2.2757	2.3261	0.0222
	60	16,07	1.9828	2.0931	0.05563	17.06	1.9828	2.1222	0.0703
	70	04,59	2.2971	2.6882	0.17026	5.07	2.2971	2.7438	0.1945
	80	0,57	1.9982	3.1007	0.55175	0.67	1.9982	3.3414	0.6722
	90	0,06	2.1659	4.1236	0.90387	0.07	2.1659	4.3017	0.9861
El Guerrara	10	96,24	2.0823	2.0828	0.00020	96.31	2.0753	2.0784	0.0015
	20	87,89	2.2786	2.3769	0.04314	88.19	2.2786	2.3572	0.0345
	30	74,20	2.1364	2.1382	0.00080	74.86	2.1364	2.1369	0.0002
	40	55,60	2.1730	2.1790	0.00276	56.64	2.1730	2.1908	0.0082
	50	34,63	2.2692	2.3389	0.03072	35.85	2.2692	2.3442	0.0082
	60	16,07	2.0877	2.1744	0.04153	17.06	2.0877	2.1882	0.04814
	70	04,59	2.0195	2.3198	0.14870	5.07	2.0195	2.4142	0.19544
	80	0,57	2.039	3.2634	0.60049	0.67	2.0390	3.5248	0.72869
	90	0,06	1.9892	3.9783	0.99995	0.07	1.9892	4.1997	1.11125
Hassi Lfhal	10	96,24	2.0515	2.0583	0.00331	96.31	2.0515	2.0615	0.00487
	20	87,89	2.0107	2.1604	0.07445	88.19	2.0107	2.1533	0.07092
	30	74,20	2.2022	2.2069	0.00213	74.86	2.2022	2.2042	0.00090
	40	55,60	2.2153	2.2255	0.00460	56.64	2.2153	2.2275	0.00551
	50	34,63	2.1212	2.1586	0.01763	35.85	2.1212	2.1661	0.02117
	60	16,07	2.1500	2.2519	0.04740	17.06	2.1500	2.2564	0.04949
	70	04,59	2.2114	2.4803	0.12160	5.07	2.2114	2.5834	0.04949
	80	0,57	2.2232	3.4580	0.55542	0.67	2.2232	3.7885	0.70408

	90	0,06	2.2951	4.3810	0.90885	0.07	2.2951	4.7767	1.08126
--	----	------	--------	--------	---------	------	--------	--------	---------

Tab. III. 2. Valeurs des masses sèches et humides et les teneurs en eau d'équilibre de tous les échantillons des dattes Deglet Nour à 40 °C, 50 °C :

Variété	C _{H2SO4} (% en masse)	T= 40 °C				T= 50 °C			
		a _w (%)	M _s (g)	M _h (g)	X _{eq}	a _w	M _s (g)	M _h (g)	X _{eq}
Ouargla	10	96,38	2.0030	2.0115	0.00424	96,44	2.0030	2.0048	0.00080
	20	88,47	2.0947	2.0955	0.00030	88,72	2.0947	2.0950	0.00010
	30	75,48	2.2881	2.2925	0.00192	76,06	2.2881	2.2914	0.00144
	40	57,63	2.226	2.2392	0.00593	58,55	2.2260	2.2419	0.00714
	50	37,01	2.2753	2.3360	0.02668	38,13	2.2753	2.3307	0.02435
	60	18,04	1.9828	2.1278	0.07313	18,99	1.9828	2.1294	0.07394
	70	05.56	2.2971	2.8393	0.23604	6,06	2.2971	2.9434	0.28135
	80	0,77	1.9982	3.4953	0.74922	0,89	1.9982	3.5559	0.77955
	90	0.09	2.1659	4.4717	1.06459	0.11	2.1659	4.4813	1.06902
El Guerrara	10	96,38	2.0853	2.0861	0.00030	96,44	2.0853	2.0881	0.00134
	20	88,47	2.2786	2.3436	0.02853	88,72	2.2786	2.3386	0.02633
	30	75,48	2.1364	2.1370	0.00020	76,06	2.1364	2.1370	0.00020
	40	57,63	2.1730	2.1868	0.00635	58,55	2.1730	2.1895	0.00759
	50	37,01	2.2692	2.3695	0.0442	38,13	2.2692	2.3576	0.03896
	60	18,04	2.0877	2.1924	0.05015	18,99	2.0877	2.2683	0.08651
	70	05.56	2.0195	2.5544	0.26487	6,06	2.0195	2.6512	0.31280
	80	0,77	2.039	3.6142	0.77254	0,89	2.0390	3.6549	0.79250
	90	0.09	1.9892	4.4501	1.23713	0.11	1.9892	4.4622	1.24321

Hassi Lfhal	10	96,38	2.0515	2.0704	0.00921	96,44	2.0515	2.0564	0.00239
	20	88,47	2.0107	2.0111	1.9E-4	88,72	2.0107	2.1530	0.07077
	30	75,48	2.2022	2.2041	8.6E-4	76,06	2.2022	2.2079	0.00259
	40	57,63	2.2153	2.2309	0.00704	58,55	2.2153	2.2334	0.00817
	50	37,01	2.1212	2.2881	0.07868	38,13	2.1212	2.2396	0.05582
	60	18,04	2.1500	2.2629	0.05251	18,99	2.1500	2.2676	0.05470
	70	05.56	2.2114	2.7896	0.26146	6,06	2.2114	2.9376	0.32839
	80	0,77	2.2232	3.9581	0.78036	0,89	2.2232	3.9905	0.79494
	90	0.09	2.2951	4.8987	1.13442	0.11	2.2951	4.9077	1.13834

Les teneurs en eau d'équilibre de datte de El Guerrara, Hassi Lfhal et Ouargla en fonction de l'activité de l'eau à différentes températures sont présentées dans la **Fig. III. 1**.

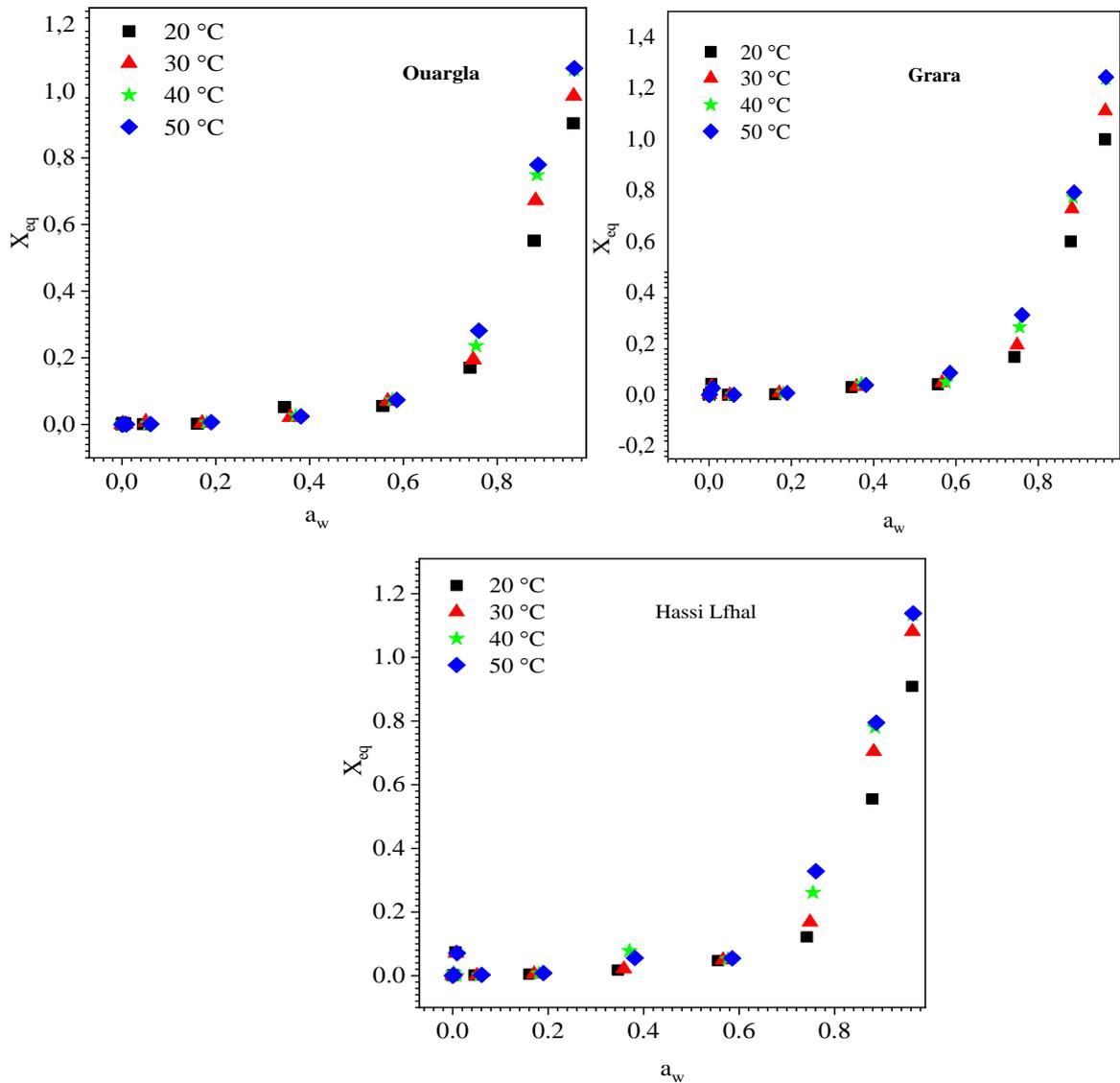


Fig. III. 1. Les teneurs en eau d'équilibre de Datte Ouargla, El Guerrara et Hassi Lfhal en fonction de l'activité de l'eau à différentes températures

Pour les valeurs d'activité de l'eau inférieures à 0,70, la variation de la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'activité de l'eau est faible, ainsi stable avec la température. Cela signifie que les changements dans la teneur en eau d'équilibre dans cette zone n'affectent pas de manière significative le niveau d'équilibre de l'eau. La Datte ne retienne que peu d'eau dans cette zone qui correspond à la zone stable.

En revanche, à partir de 0,7, la courbe d'équilibre prend une forme de droite verticale et la teneur en eau augmente rapidement lorsque l'activité de l'eau est élevée. Ainsi, la valeur de l'activité de l'eau de 0,7 est considérée comme essentielle à la stabilité des variétés de datte. Cette tendance visible dans les isothermes d'adsorption est typique de tous les produits alimentaires riches en sucre.

Aux fortes activités de l'eau, la dissolution des sucres devient plus importante, entraînant une augmentation de la teneur en eau à l'équilibre pour les trois variétés de Datte. Par contre, dans la zone où l'activité de l'eau est faible ou bien moyenne, l'eau est essentiellement fixée par adsorption physique sur les composés polymères.

Les courbes expérimentales, montrent que la teneur en eau à l'équilibre augmente en fonction de la température dans les fortes valeurs d'activité de l'eau. En effet, pour une valeur d'activité de l'eau de 0,75 (75 %), la teneur en eau est de 0,170 kg/kg MS à 20 °C, 0,194 kg/kg MS à 30 °C, 0,236 kg/kg MS à 40 °C et 0,281 kg/kg MS à 50 °C pour la variété de Ouargla. La teneur en eau est de 0,149 kg/kg MS à 20 °C, 0,195 kg/kg MS à 30 °C, 0,2265 kg/kg MS à 40 °C et 0,313 kg/kg MS à 50 °C pour la variété de El Guerrara. En fin, pour la variété de Hassi Lfhal, la teneur en eau en équilibre est de 0,122 kg/kg MS à 20 °C, 0,168 kg/kg MS à 30 °C, 0,262 kg/kg MS à 40 °C et 0,328 kg/kg MS à 50 °C.

L'état d'excitation des molécules d'eau pourrait expliquer ce comportement. L'état d'excitation des molécules est plus élevé à des températures élevées, ce qui entraîne une diminution des forces d'attraction des molécules d'eau entre elles. L'effet de la température sur la solubilité et l'état physico-chimique des sucres peut également être attribué sur la teneur en eau d'équilibre.

III. 3. Modèles de description des isothermes d'adsorption

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés dans la littérature scientifique pour décrire la relation entre la teneur en eau d'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la température. Ces modèles sont basés sur des principes physiques et comprennent également des relations empiriques.

Dans le cadre de notre étude, nous avons examiné neuf modèles différents provenant de la littérature scientifique pour décrire les isothermes de sorption de notre produit. Ces modèles comprennent le modèle de Henderson modifié, le modèle de Smith modifié, le modèle d'Oswin modifié, le modèle de Halsey modifié, le modèle de GAB, le modèle de Peleg, le

modèle de Igesias, le modèle de BET modifié et le modèle de Caurie modifié. Les détails des modèles sont présentés dans le Tableau II. 4 L'objectif de notre étude est de déterminer le ou les modèles les plus appropriés pour décrire les isothermes de sorption de notre produit.

Les résultats expérimentaux de la teneur en eau d'équilibre X_{eq} de Deglet Nour, pour quatre températures, 20°C, 30°C, 40°C et 50°C ont été analysés par neuf modèles d'isothermes d'adsorption (Tab. III.3, III.4 et III.5). La régression non linéaire a été employée pour évaluer les paramètres de ces modèles avec l'utilisation du programme Origin Pro-9.

Tab. III.3. Paramètres d'isothermes d'adsorption de la Datte (Ouargla) par les modèles : GAB, BET, Smith, Henreson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

Modèles	Paramètres	Adsorption			
		20	30	40	50
GAB	Xm	54.1066	12.96553	10.9557	15.4530
	C	0.00111	0.00585	0.00791	0.00629
	K	0.80577	0.79257	0.78694	0.77392
	χ^2	0.00105	0.00253	0.00314	0.00326
	R ²	0.99137	0.98363	0.98297	0.98291
	R MSE	0.03240	0.05032	0.05601	0.05709
BET	Xm	0.03699	0.04031	0.04303	0.04294
	C	18.1835	18.80444	19.2414	22.1733
	χ^2	0.00883	0.01578	0.02074	0.02431
	R ²	0.91705	0.88340	0.87129	0.85436
	R MSE	0.09397	0.12564	0.14401	0.15590
Smith	C1	-0.0454	-0.05366	-0.05905	-0.0594
	C2	0.26781	0.29938	0.32493	0.32964
	χ^2	0.00618	0.00845	0.00971	0.00928
	R ²	0.94196	0.93760	0.93975	0.94437
	R MSE	0.07860	0.09191	0.09853	0.09635
Henderson	A	3.43916	3.23880	3.08300	3.06902
	B	0.63449	0.65964	0.67387	0.69835
	χ^2	0.00182	0.00401	0.00511	0.00559
	R ²	0.98292	0.97039	0.96829	0.96648

	R MSE	0.04264	0.06331	0.07148	0.0748
Halsey	A	0.03533	0.03990	0.04409	0.04427
	B	1.37512	1.41749	1.44480	1.48514
	χ^2	0.00515	0.00977	0.01256	0.01418
	R ²	0.95165	0.92785	0.92204	0.91502
	R MSE	0.07174	0.09883	0.11208	0.11908
Igesias	A	-6.59121	0.04191	0.04840	-5.72436
	B	6.75548	0.03987	0.04236	6.04045
	χ^2	0.000485	0.01647	0.02149	0.0015
	R ²	0.99544	0.87832	0.86662	0.99099
	R MSE	0.02204	0.12834	0.14660	0.03877
Oswin	A	0.11348	0.13300	0.14856	0.15810
	c	0.65123	0.62976	0.61708	0.59821
	χ^2	0.00392	0.00780	0.01001	0.01121
	R ²	0.96314	0.94236	0.93786	0.93282
	R MSE	0.06264	0.08833	0.10007	0.10588
Caurie	a	-6.59121	-6.19254	-5.98523	-5.72436
	b	6.75548	6.44325	6.30655	6.04045
	χ^2	0.00485	0.00120	0.00147	0.00150
	R ²	0.99544	0.99115	0.99086	0.99099
	R MSE	0.02204	0.03461	0.03837	0.03877
Peleg	K1	0.04407	0.61946	0.46573	0.57598
	K2	1.11536	0.61947	0.86325	0.74377
	n 1	0.57269	5.52940	5.38916	5.11047
	n 2	6.46983	5.52914	5.38937	5.11109
	χ^2	0.000435	0.00118	0.00136	0.00120
	R ²	0.99693	0.99347	0.99369	0.99461
	R MSE	0.02086	0.03433	0.03682	0.03465

Tab.III. 4. Paramètres d'isothermes d'adsorption de la Datte (El Guerrara) par les modèles : GAB, BET, Smith, Henderson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

Modèles	Paramètres	Adsorption			
		20	30	40	50
GAB	Xm	11.4673	-4.54505	9.58782	12.1499
	C	0.00478	-0.01614	0.00804	0.00724
	K	0.82617	0.80061	0.81369	0.79962
	χ^2	0.00222	0.00352	0.00232	0.00147
	R ²	0.98502	0.98162	0.99002	0.99376
	R MSE	0.04713	0.05936	0.04812	0.03837
BET	Xm	0.04062	0.04498	0.04894	0.04875
	C	11.1336	15.71219	16.40905	23.9558
	χ^2	0.01044	0.01757	0.01849	0.02350
	R ²	0.91954	0.89524	0.90897	0.89596
	R MSE	0.10218	0.13255	0.13597	0.15331
Smith	C1	-0.0528	-0.05985	-0.06782	-0.0648
	C2	0.29176	0.33074	0.36387	0.36749
	χ^2	0.01076	0.01282	0.01319	0.01058
	R ²	0.91706	0.92357	0.93506	0.94875
	R MSE	0.10374	0.11322	0.11484	0.10286
Henderson	A	3.22424	3.01498	2.84928	2.83239
	B	0.59004	0.62473	0.62346	0.65568
	χ^2	0.00314	0.00516	0.00403	0.00372
	R ²	0.97581	0.96921	0.98017	0.98354
	R MSE	0.05602	0.07187	0.06346	0.06098
Halsey	A	0.04038	0.04655	0.05257	0.05298
	B	1.31345	1.37264	1.37219	1.42427
	χ^2	0.00713	0.01153	0.01123	0.01105
	R ²	0.94502	0.93123	0.94469	0.94649
	R MSE	0.08446	0.10740	0.10598	0.10511
Igesias	A	0.03331	0.04316	0.04793	0.05691
	B	0.04066	0.04471	0.04860	0.04794
	χ^2	0.01086	0.01820	0.01932	0.02127

	R ²	0.9163	0.89150	0.90486	0.89697
	R MSE	0.10421	0.13490	0.13900	0.14584
Oswin	A	0.11039	0.13653	0.14934	0.16265
	c	0.69085	0.65693	0.65678	0.62961
	χ^2	0.00595	0.00958	0.00887	0.00833
	R ²	0.95415	0.9429	0.95631	0.95964
	R MSE	0.07714	0.09786	0.0942	0.09128
Caurie	a	-7.06896	-6.51021	-6.4522	-6.05894
	b	7.36249	6.89533	6.93041	6.51931
	χ^2	0.000977	0.00162	0.000748	0.00034
	R ²	0.99153	0.99034	0.99631	0.99833
	R MSE	0.03127	0.04026	0.02736	0.01855
Peleg	K1	0.64752	0.70889	0.77795	1.51789
	K2	0.64754	0.70994	0.77797	0.02054
	n1	6.42659	5.97061	5.99694	5.82302
	n2	6.4262	5.97061	5.99649	0.16061
	χ^2	0.001	0.00155	0.00064	0.00022
	R ²	0.99421	0.99308	0.99764	0.99919
	R MSE	0.03165	0.03933	0.0253	0.01496

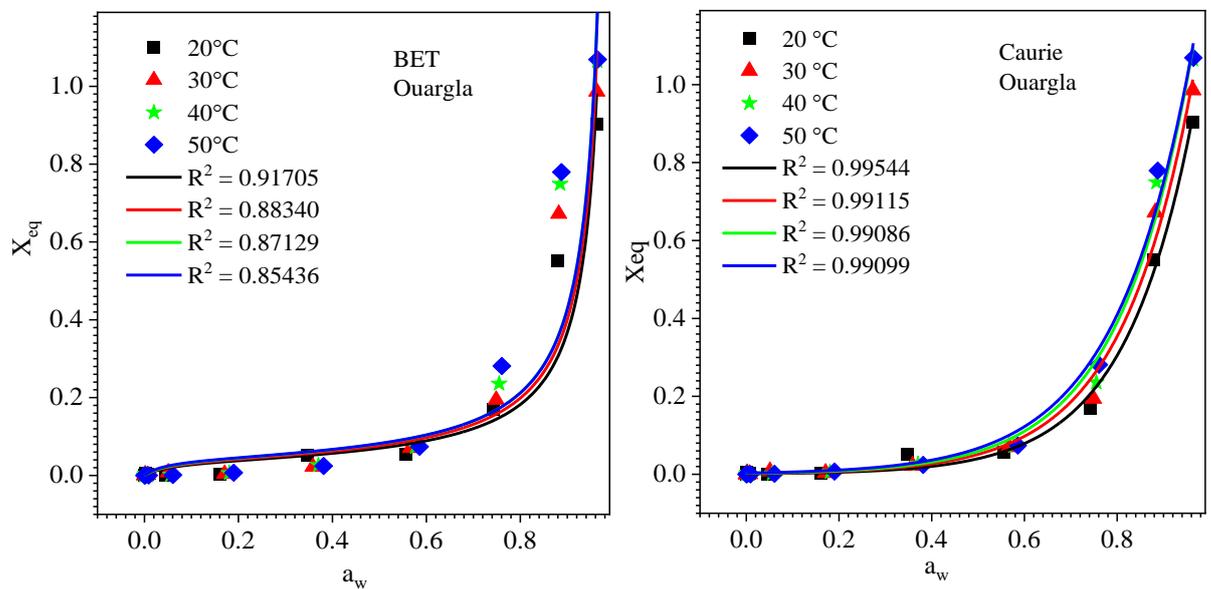
Tab. III.5. Paramètres d'isothermes d'adsorption de la Datte (Hassi Lfhal) par les modèles : GAB, BET, Smith, Henreson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

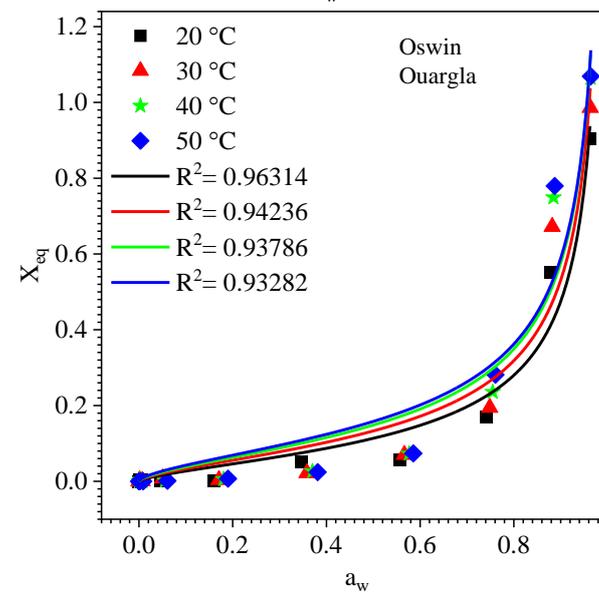
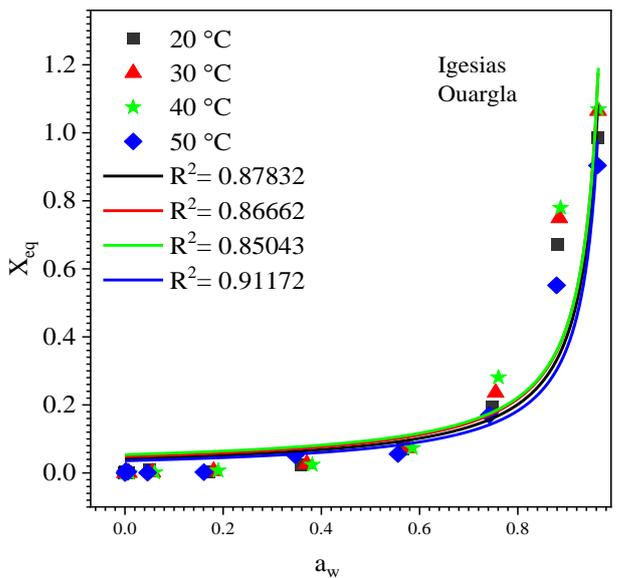
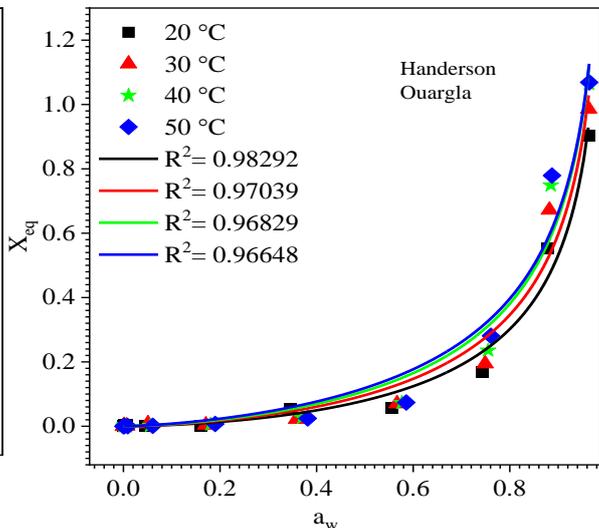
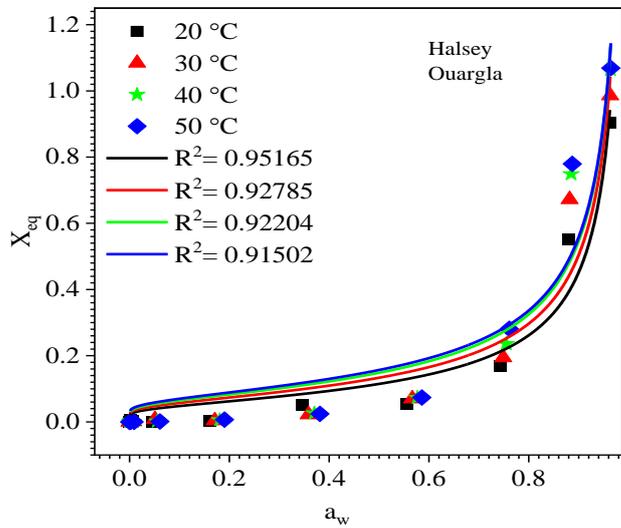
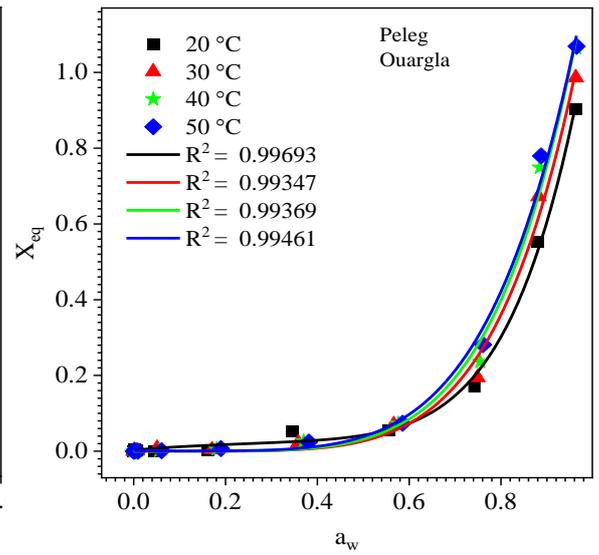
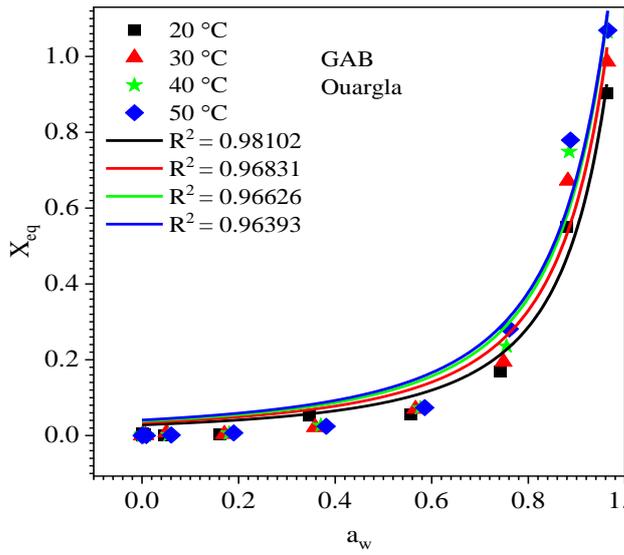
Modèles	Paramètres	Adsorption			
		20	30	40	50
GAB	Xm	7.30231	16.15351	13.71682	13.5414
	C	0.00683	0.00407	0.00661	0.00752
	K	0.82705	0.81590	0.78805	0.77525
	χ^2	0.00281	0.00501	0.00335	0.00405
	R ²	0.97702	0.97510	0.98362	0.98236
	R MSE	0.05302	0.07081	0.05791	0.06362
BET	Xm	0.03693	0.04360	0.04571	0.04537

	C	13.3943	15.98912	24.03927	400.73387
	χ^2	0.00970	0.01908	0.02204	0.02873
	R ²	0.90934	0.88945	0.87696	0.85388
	R MSE	0.09851	0.13813	0.14845	0.16951
Smith	C1	-0.04244	-0.05441	-0.0578	-0.0577
	C2	0.26298	0.31767	0.34266	0.34628
	χ^2	0.01035	0.01427	0.01071	0.01195
	R ²	0.90329	0.90920	0.94022	0.93925
	R MSE	0.10174	0.11946	0.10348	0.10929
Henderson	A	3.40678	3.07244	2.96308	2.95237
	B	0.58913	0.60956	0.67439	0.69897
	χ^2	0.00353	0.00571	0.00536	0.00647
	R ²	0.96700	0.96365	0.97005	0.96710
	R MSE	0.05943	0.07559	0.07324	0.08043
Halsey	A	0.03533	0.03990	0.04409	0.04427
	B	1.37512	1.41749	1.44480	1.48514
	χ^2	0.00515	0.00977	0.01256	0.01418
	R ²	0.95165	0.92785	0.92204	0.91502
	R MSE	0.07174	0.09883	0.11208	0.11908
Igesias	A	0.03468	0.04314	-5.94813	0.07757
	B	0.03678	0.04331	6.32904	0.04344
	χ^2	0.00976	0.01692	0.00173	0.02784
	R ²	0.90885	0.89236	0.99035	0.85842
	R MSE	0.09877	0.13007	0.04158	0.16686
Oswin	A	0.10058	0.1274	0.15906	0.16910
	c	0.69052	0.66945	0.61434	0.59469
	χ^2	0.00595	0.00986	0.01021	0.01271
	R ²	0.94444	0.93729	0.94298	0.93537
	R MSE	0.07711	0.09928	0.10106	0.11273
Caurie	A	-7.17877	-6.742	-5.94813	-5.6260
	b	7.38028	7.10857	6.32904	5.99295

	χ^2	0.00156	0.00224	0.00173	0.00199
	R^2	0.98538	0.98573	0.99035	0.98988
	R MSE	0.03956	0.04735	0.04158	0.04461
Peleg	K1	0.01008	-41.88492	0.70739	0.01230
	K2	1.17883	43.26104	0.70726	1.38638
	n1	-0.15964	4.50799	5.45517	-0.13288
	n2	6.63432	4.55114	5.45492	5.24466
	χ^2	0.00145	0.00224	0.00186	0.00170
	R^2	0.98985	0.98931	0.99223	0.99382
	R MSE	0.03806	0.04732	0.04307	0.04124

Les isothermes d'adsorption des trois variétés de Deglet Nour, mesurés et calculés pour les neuf modèles à quatre températures 20°C, 30°C, 40°C et 50°C sont présentées respectivement dans les figures Fig. III.2, Fig. III.3 et Fig. III.4. Ces isothermes sont en accord avec l'analyse des valeurs χ^2 , R^2 et RMSE.





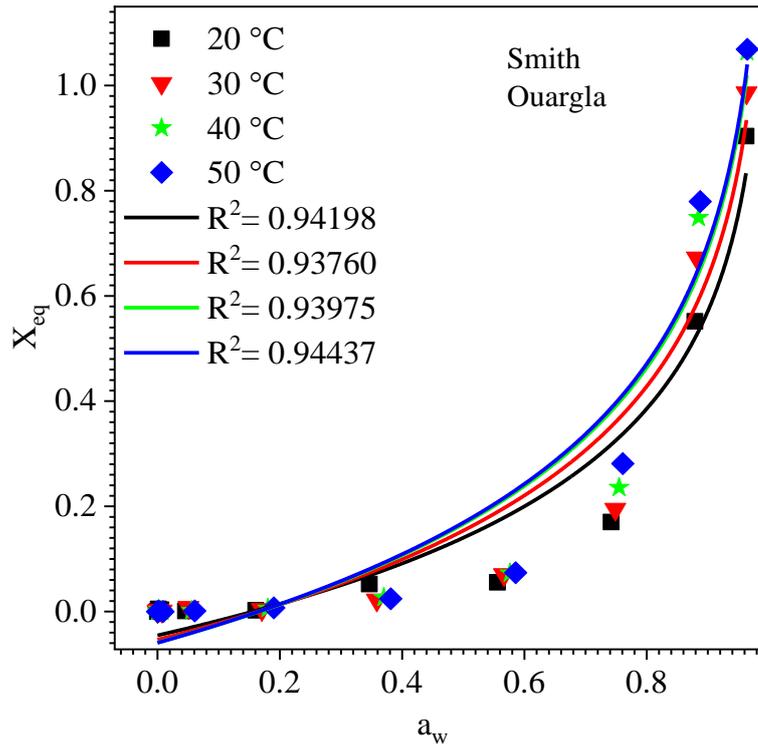
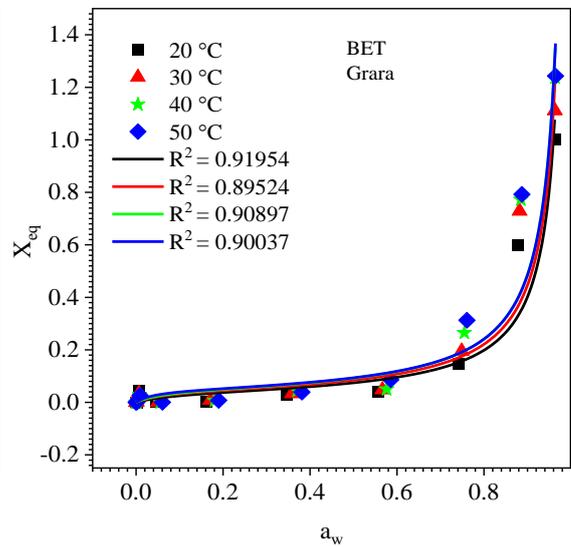
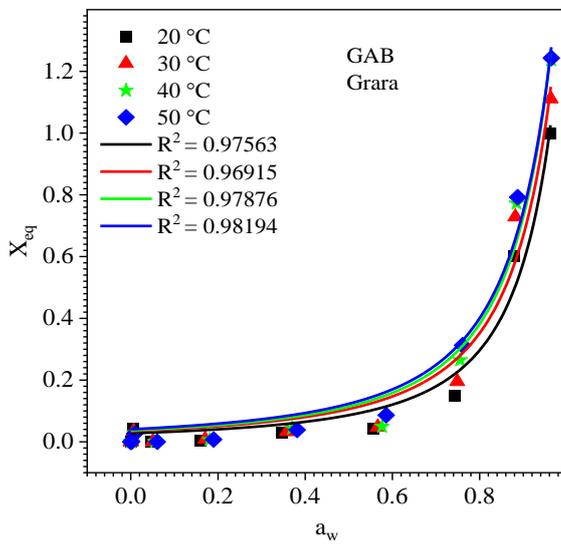
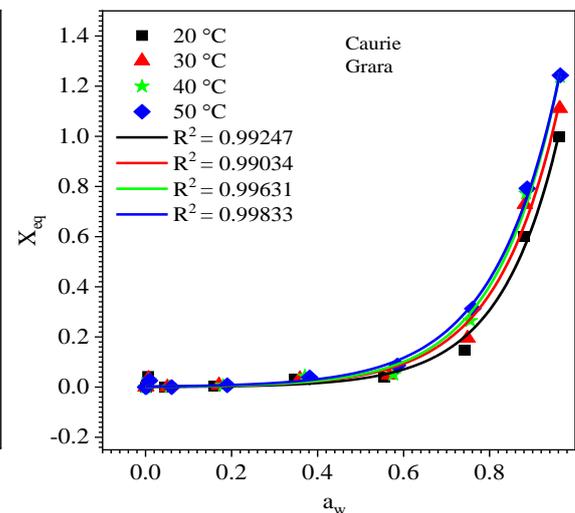
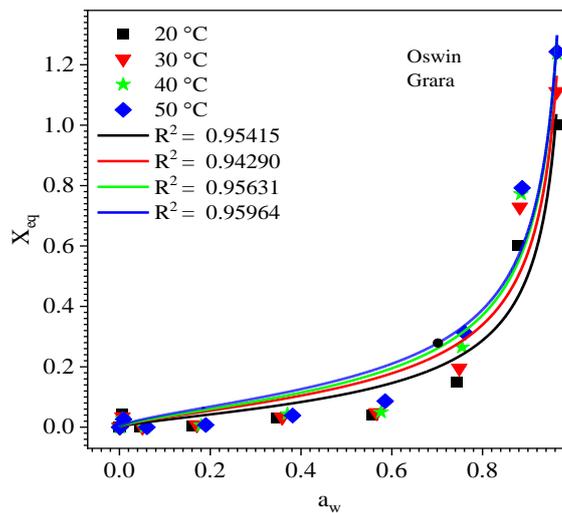
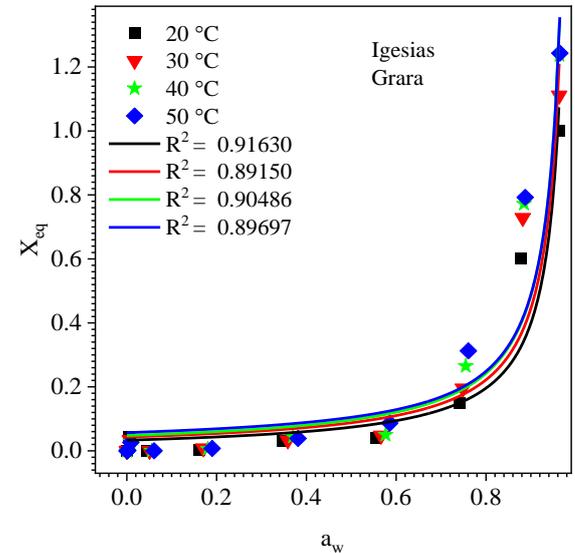
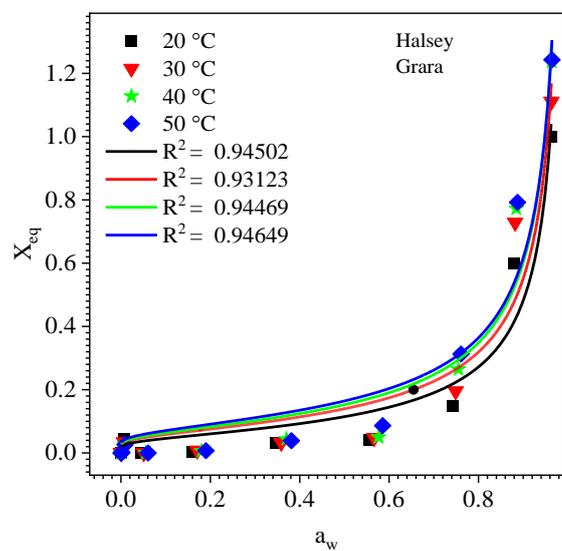
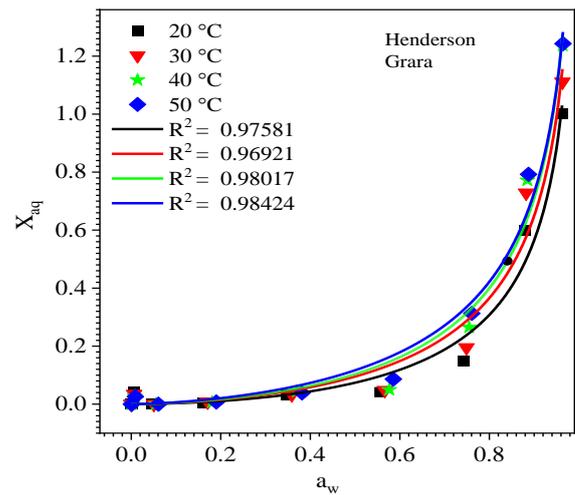
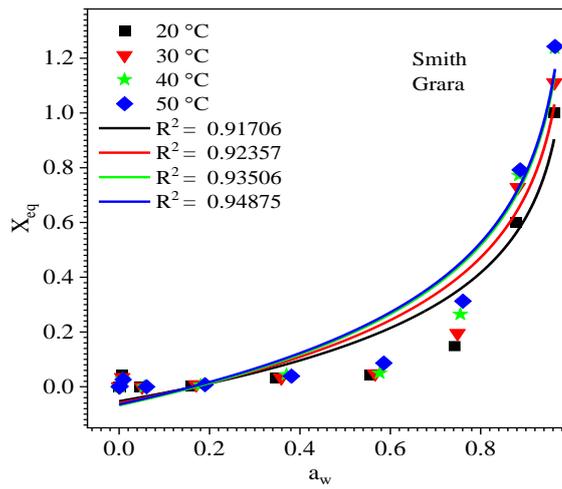


Fig. III. 2. Isothermes d'adsorption de la Datte (Ouargla) lissées par les modèles : GAB, BET, Smith, Henreson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.





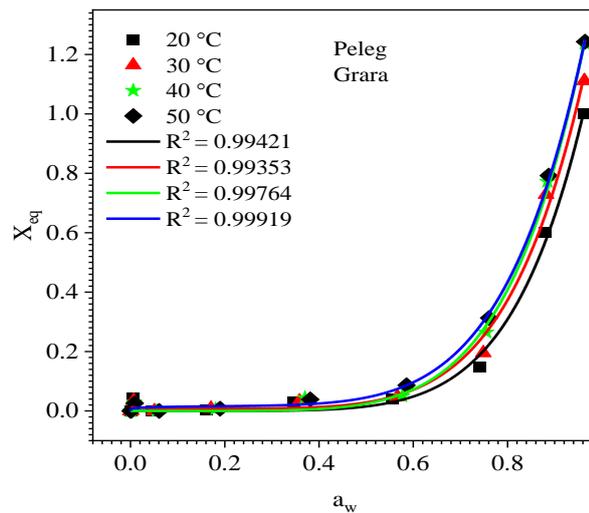
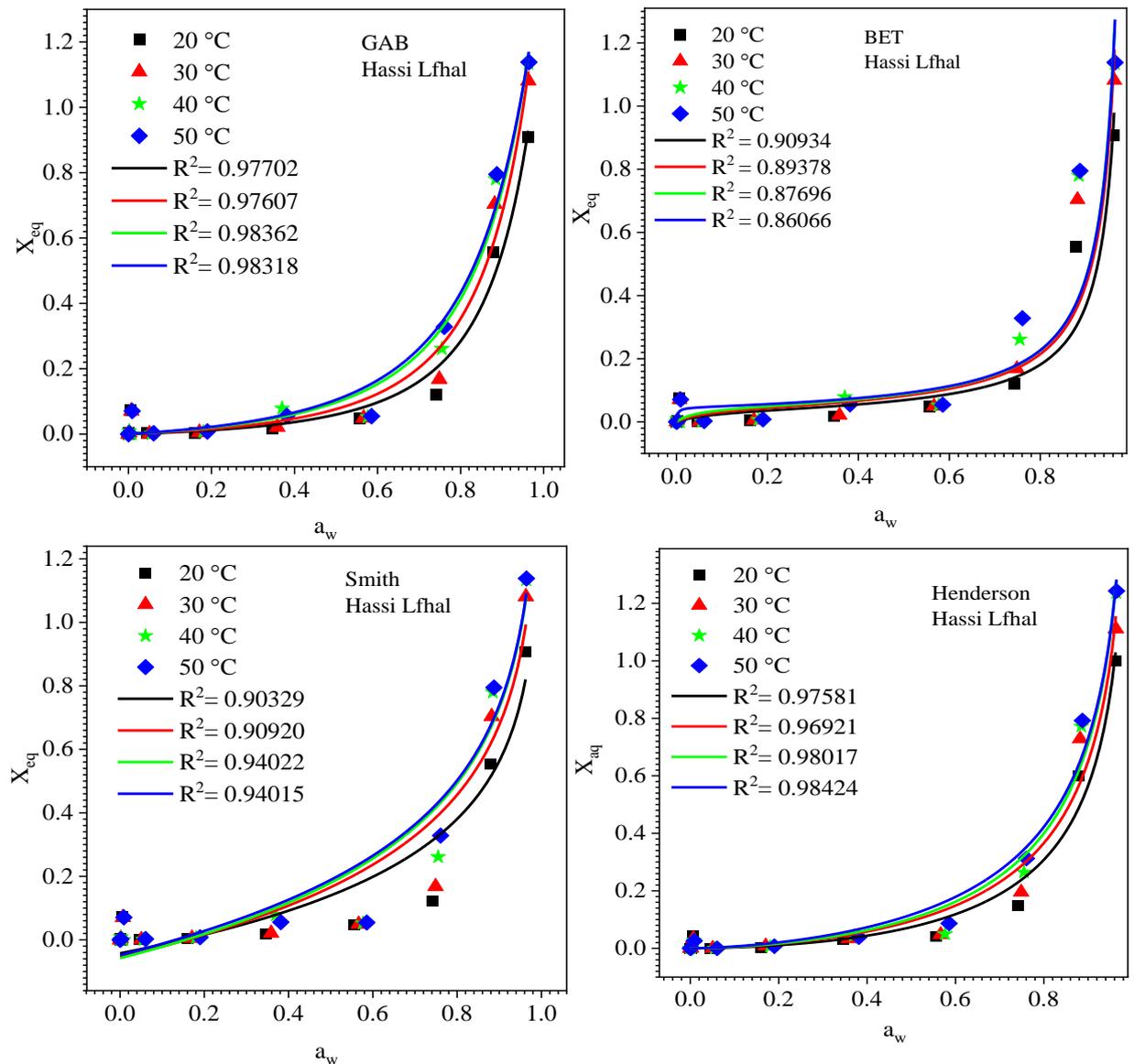


Fig. III. 3. Isothermes d'adsorption de la Datte (El Guerrara) lissées par les modèles : GAB, BET, Smith, Henderson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.



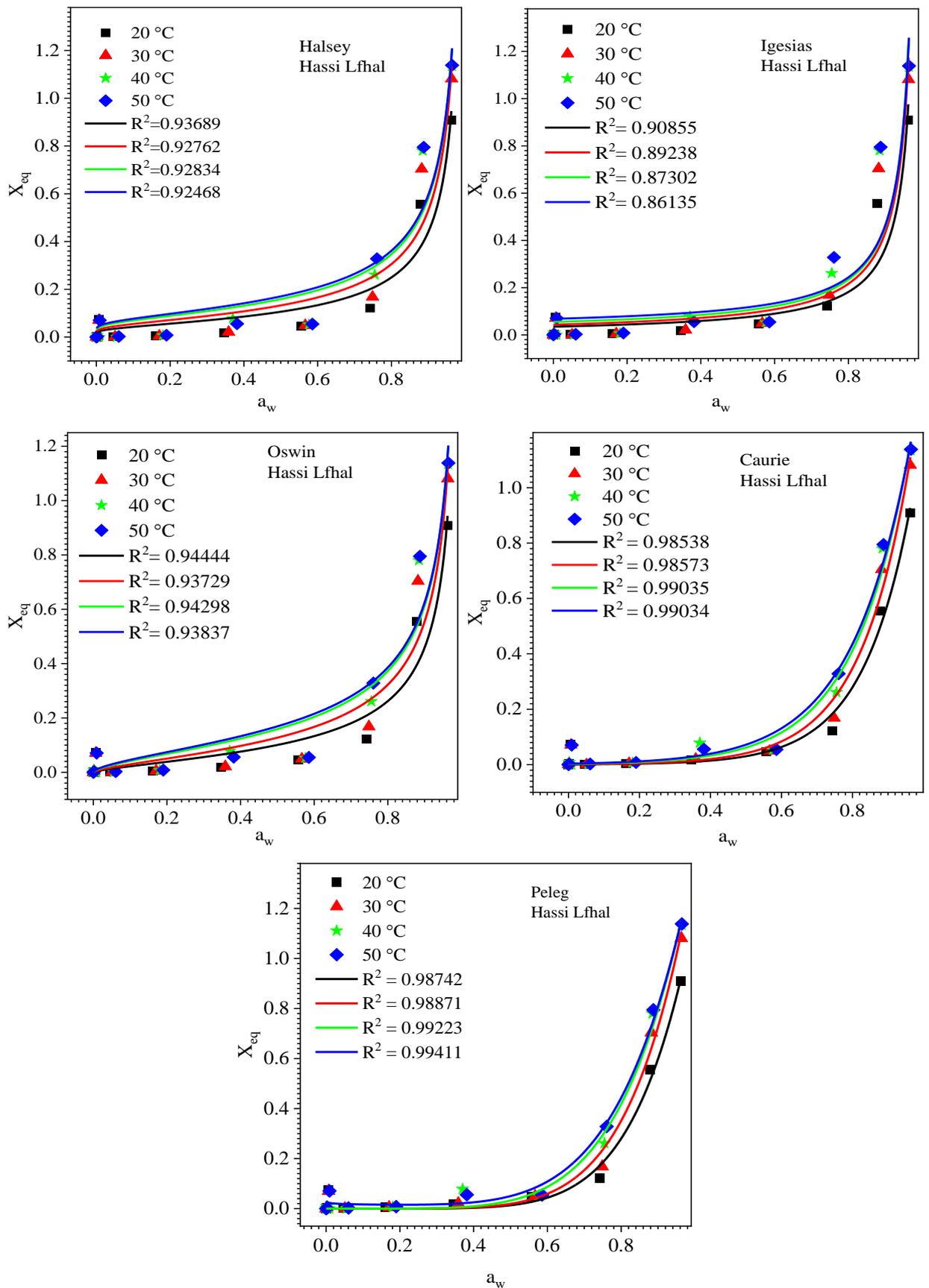


Fig. III. 4. Isothermes d'adsorption de la Datte (Hassi Lfhal) lissées par les modèles : GAB, BET, Smith, Henderson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

D'après les Fig. III.2, III.3 et III.4 et les Tab. Tab. III.3, III.4 et III.5, le modèle de GAB et Peleg sont les meilleurs modèles pour décrire l'ensemble des isothermes de l'adsorption des dattes Deglet noir :

- Pour la variété de Ouargla dans les quatre températures 20 °C, 30 °C, 40 °C et 50 °C, on a des valeurs de R^2 (0.99137), (0.98363), (0.98297), (0.98291), respectivement, et χ^2 (0.00105), (0.00253), (0.00314), (0.00326) pour le modèle de GAB. Pour le modèle de Peleg R^2 est de (0.99693), (0.99347), (0.99369), (0.99461) et χ^2 (0.000435), (0.00118), (0.00136) (0.0012) pour les humidités relatives comprises entre 0 et 0.96.
- Pour la variété de El Guerrara dans les quatre températures 20 °C, 30 °C, 40 °C et 50 °C, on a des valeurs de R^2 (0.98502), (0.98162), (0.99002), (0.99376), respectivement et χ^2 (0.00222), (0.00352), (0.00232), (0.00147) pour le modèle de GAB. Pour le modèle de Peleg R^2 est de (0.99421), (0.99308), (0.99764), (0.99919) et χ^2 (0.001), (0.00155), (0.00064), (0.00022) pour les humidités relatives comprises entre 0 et 0.96.
- Pour la variété de Hassi Lfhal dans les quatre températures 20 °C, 30 °C, 40 °C et 50 °C on a des valeurs de R^2 (0.97702), (0.9751), (0.98362), (0.98236) et χ^2 (0.00281), (0.00501), (0.00335), (0.00405) pour le modèle de GAB. Pour le modèle de Peleg R^2 est de (0.98985), (0.98931), (0.99223), (0.99382) et χ^2 (0.00145), (0.00224), (0.00186), (0.0017), respectivement.
- Donc, pour les températures testées, deux modèles représentent la meilleure régression possible et l'erreur standard χ^2 la plus basse, mais le modèle de Peleg est le meilleur modèle décrivant le phénomène d'adsorption des dattes Deglet Nour pour les trois variétés dans une gamme de l'activité de l'eau de 0,007-0,96 et de température de 20-50 °C. Ce modèle est utilisé pour lisser les isothermes d'adsorption de différentes variétés de dattes. Il donne une bonne représentation des isothermes de type sigmoïde et non sigmoïde.
- Les modèles GAB et Peleg permettent ainsi de prédire la teneur en eau à l'équilibre pour une activité de l'eau et une température donnée dans les gammes étudiées. Le modèle GAB permet aussi de prédire la teneur en eau de la monocouche.

III.4. Détermination de la chaleur isostérique de sorption

La chaleur isostérique d'adsorption des trois variétés de dattes obtenues pour différentes teneurs en eau à l'équilibre ont été déterminées à partir de la pente des isostères : droites obtenues en traçant $-\ln(a_w)$ en fonction de $1/T$ pour une teneur en eau constante (Fig. III.5).

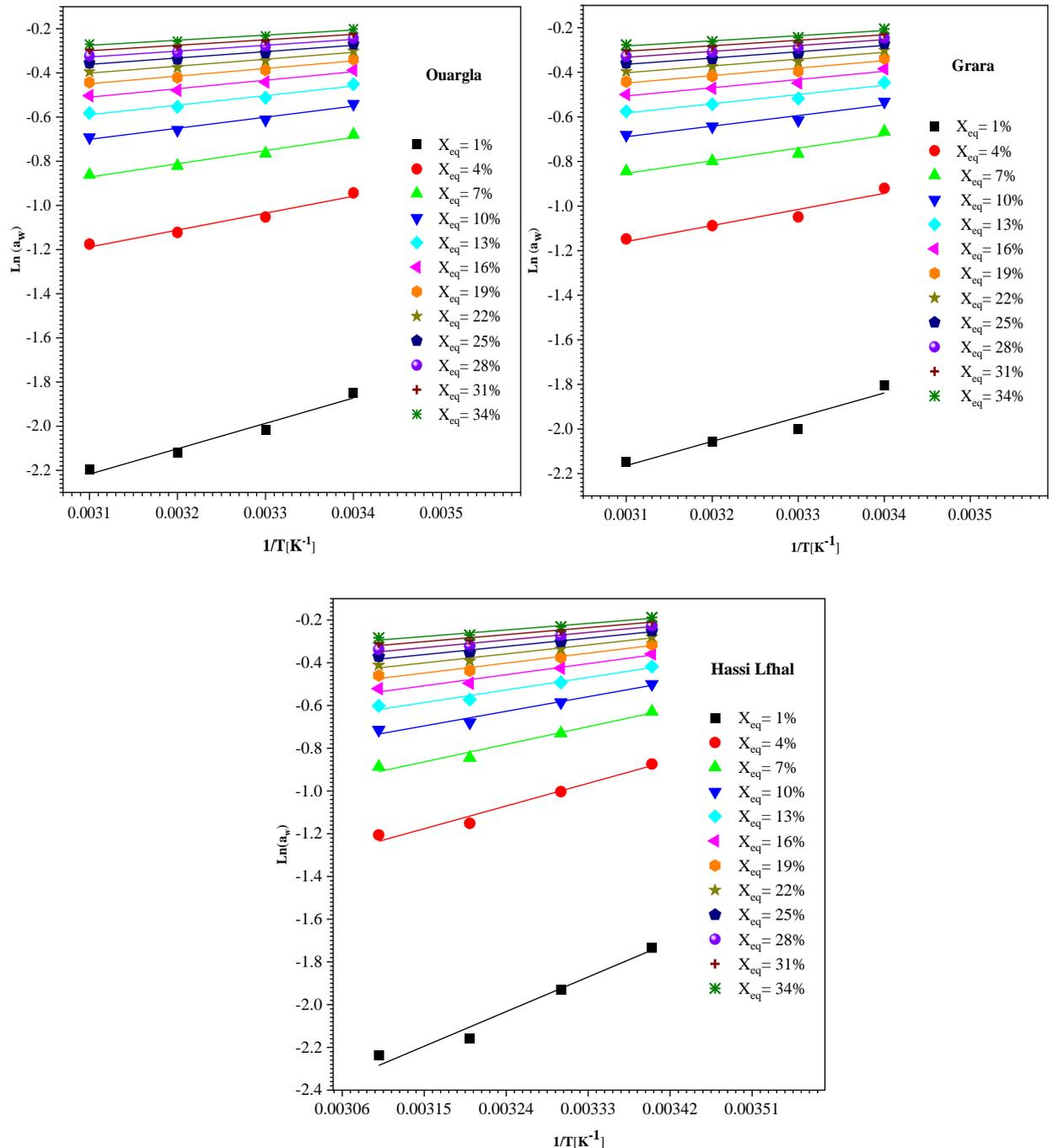


Fig. III.5. Isoptères d'adsorption pour les dattes du (Ouargla, El Guerrara et Hassi Lfhal)

Ces courbes montrent que la chaleur isostérique est plus importante pour les faibles valeurs de la teneur en eau, ce qui illustre la forte de 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 d'adsorption de l'eau de Deglet Nour ont été corrélées avec la teneur en eau d'équilibre du produit.

III.5. Variation de la chaleur isostérique de sorption de trois variétés de dattes

La chaleur isostérique d'adsorption pour plusieurs teneurs en eau est illustrée dans la **Fig. III.6**.

La **Fig. III.6** montre que la chaleur isostérique d'adsorption est élevée, à faible teneur en eau d'équilibre. La chaleur isostérique de sorption diminue lorsque la teneur en eau augmente. La pente d'évolution est forte pour les faibles teneurs en eau. Les chaleurs isostériques sont supérieures à celles requises pour les teneurs en eau.

Les valeurs élevées des chaleurs de sorption à faible teneur en eau montrent que les forces d'attractions entre les composants adsorbants des trois variétés de dattes et l'eau est importante. Quand la teneur en eau augmente, les sites de sorption disponibles diminuent entraînant ainsi une diminution des valeurs des chaleurs de sorption

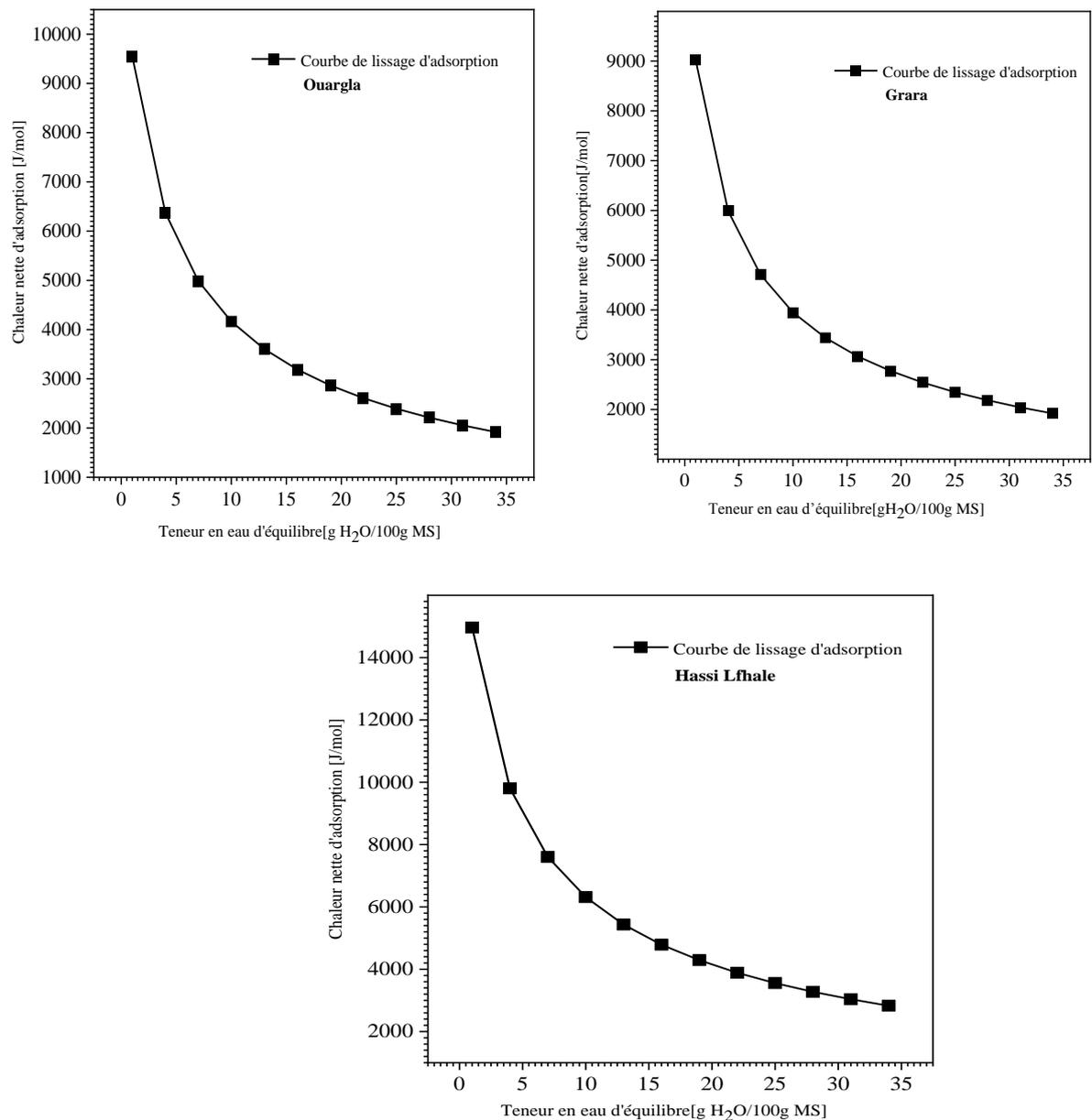


Fig. III.6. Chaleur isostérique nette de sorption des dattes de (Ouargla, El Guerrara et Hassi Lfhale) en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

III.6. Conclusion

Les courbes expérimentales d'isotherme sont déterminées aux températures 20 °C, 30 °C 40 °C, et 50 °C, elles ont une forme sigmoïdale comme tous les produits agroalimentaires. Le lissage par des modèles mathématiques permet de déterminer le modèle le plus adéquat pour ces courbes qui est le modèle de Peleg.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre étude a porté sur l'analyse théorique et expérimentale des isothermes d'adsorption des dattes Deglet Nour à trois niveaux de maturité et à quatre températures différentes.

Sur le plan expérimental, nous avons utilisé la méthode gravimétrique statique pour établir les isothermes d'adsorption des dattes à quatre températures (20°C, 30°C, 40°C et 50°C). Les résultats expérimentaux montrent que les isothermes d'adsorption des dattes Deglet Nour présentent une forme sigmoïdale caractéristique des produits agroalimentaires. Neuf modèles mathématiques ont été utilisés pour ajuster ces courbes d'adsorption. L'analyse des paramètres statistiques tels que R^2 , x^2 et les résidus a permis de déterminer que le modèle de Peleg est le plus adapté pour décrire l'ensemble des isothermes d'adsorption des dattes.

En conclusion, notre étude démontre que les isothermes de sorption fournissent des informations précieuses pour l'industrie agroalimentaire. En effet, pour déterminer les paramètres de stockage de Deglet Nour à une température spécifique, il suffit de se référer aux courbes de sorption, qui fournissent les valeurs d'équilibre de la teneur en eau du produit et de l'humidité relative de l'environnement, pour une température de travail donnée.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] A. A. Aviara, Moisture Sorption Isotherms and Isotherm Model Performance Evaluation for Food and Agricultural Products, Open Access Peer-Reviewed Chapter, *Sorption in the 2020*. IntechOpen (2020).
- [2] H. Kalengi, Détermination des isothermes de sorption (adsorption-désorption) [cas de l'aubergine (*solanum melongena* L.)], thèse de doctorat, Université de Kinshasa (2014).
- [3] B. Touati, Etude Théorique Et Expérimentale Du Séchage Solaire Des Feuilles De La Menthe Verte (*Mentha Viridis*), Thèse De Doctorat. Département De Physique. Université Abou-bekrBelkaid. Tlemcen, (2008).
- [4] R. Heldman, D.B. Lund, C. Sabliov, Handbook of food engineering, CRC press, (2006).
- [5] N. Lahmari, D. Fahloul, I. Azani, Influence des méthodes de séchage sur la qualité des tomates séchées (variété Zahra), *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°2 (2012) 285 – 295.
- [6] S. Boughali, Etude et optimisation du séchage solaire des produits agroalimentaires dans les zones Arides et désertiques. Thèse de doctorat. Université de Batna 2, (2010).
- [7] A. Benseddik, Modélisation et simulation du séchage de la figure par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée ; mémoire de magister, université Abou-Beker Belkaid-Tlemcen, (2011).
- [8] C. Bonazzi, E. Dumoulin, J.J Bimbenet, Le séchage des produits alimentaires, *Industrie Alimentaire Agricole* 125 (2008)12-22.
- [9] K. Souheyla, 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, (2018).
- [10] S. Chouicha, Etude expérimentale du séchage solaire Des dattes humides et impact sur la qualité. Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, (2010).
- [11] A. Hamadi, Z. Hamzaoui, L'étude de séchage solaire d'une plante médicinale de la région d'Adrar, Mémoire de Master, Université Ahmed Draia -Adrar, (2021).

- [12] W. Harma, L'étude d'un capteur solaire thermique à air (Théorique et expérimentale) ; Mémoire de Master, Université Ahmed Draia, Adrar (2020).
- [13] A. Khenblouche, Etude et réalisation d'un nouveau procédé de séchage couplé à un système de chauffe-eau solaire. Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah. Ouargla (2014).
- [12] S. Boughali, 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).
- [14] Biopharma Technologies France, <https://www.biopharmatech.fr/>.
- [15] C. Nouha et M. Gagui, Modélisation de séchage solaire de pomme de terre et amélioration de rendement thermique, Mémoire Master, université Kasdi Merbah, Ouargla (2017).
- [16] R. Benammar, K. GOURI ; Séchage solaire des produits agricoles. Université Kasdi Merbah Ouargla, (2018).
- [17] H. Houhou, Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaire ; université Mohamed Khider-Biskra, (2012).
- [18] E. BENALIA, Exploitation de la source thermique de l'eau Albien dans le séchage solaire des produits agro-alimentaires. Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, (2014).
- [19] M. Benbahi, B. Morakchi, Bilan thermique d'un sécheur de tomate de type à tambour rotatif, Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent, (2020).
- [20] H. Ben cheikh, M. Ould Sidimed, Y. Draoui, Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif. Mémoire de l'ingénieur d'état. Université Kasdi Merbah - Ouargla, (2011).
- [21] A. Boussalia Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles Locaux. Mémoire de magister. Université Mentouri – constantine, (2010).
- [22] B. Temacini, Etude expérimentale du séchage solaire des produits agro- alimentaires de la région d'el-oued, Mémoire de fin d'étude, Université Echahid Hamma Lakhdar. El-Oued, (2018).

- [23] M. Saddaoui, 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).
- [24] B. SAID, Modélisation mathématique de séchage solaire indirect des dattes Deglet-Nour réhumidifiées, Mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah. Ouargla, (2015).
- [25] S. Ben Mariem, S. Ben Mabrouk, Cinétique de séchage et Courbe caractéristique de séchage d'une couche mince de tomate, Conference: International Congress on Thermal Processes / Journée Internationale de Thermique- JITH2017 /At: Monastir- Tunisie.
- [26] W. Ben Djelloul, Réalisation et expérimentation d'un prototype séchoir solaire de type serre avec systèmes de stockage thermique, par chaleur latente et sensible, Mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah. Ouargla, (2019).
- [27] J.J. Bimbonet, Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires.
- [28] N. Nadir, Approche théorique et expérimentale du séchage solaire des produit agroalimentaires, Thèse de Doctorat ; Université Kasdi Merbah, Ouargla, (2021).
- [29] Yves J, Isotherme de sorption : modèles et détermination, Juillet 2008, <https://www.thermique55.com/principal/sorption.pdf>
- [30] F. Medjdoub, Adsorption du Paracétamol par l'utilisation des différents types d'adsorbants naturels. Thèse Doctorat, Université M'hamed bougara, Boumerdes, (2018).
- [31] A. Benseddik, H. Bensaha, D. Lalmi, D. Benahmed, A.A. Adiba. Analyse thermodynamique des isothermes de sorptions des figues, *Revue des Energies Renouvelables*, 24 (2021)75–104.
- [32] H.A. Iglesias, J. Chirife, On the local isotherm concept and modes of moisture binding in food products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 24 (1976) 24-77.
- [33] C.R. Oswin, The kinetics of package life. III. Isotherm. *Journal of Society of Chemical Industry*, 65 (1946) 419-421.
- [34] T. L. Thompson, R. M. Peart, G. H. Foster, Mathematical simulation of corn drying a new model. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 11 (1986) 582-586.

- [35] H.B. Pfost, S.G. Mourer, D.S. Chung, G.A. Milliken, Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. *Society of Agricultural Engineers*, (1976) 76-3520.
- [36] Langmuir I, *Journal of American Chemical Society*, 46 (1916)1361-1362.
- [37] M. Peleg, Assessment of semi-empirical four parameters general model for sigmoid sorption isotherm. *Journal of Food Processing Engineering*. 16 (1993) 21-37.
- [38] C. Van den Berg, 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).
- [39] T. Boumediene, 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)
- [40] A. Belarbi, Ch. Aymard, J.M. Meot, A. Themelin, M. Reynes, Water desorption isotherms for eleven varieties of dates, *Journal of Food Engineering* 43 (2000) 103-107
- [41] N. Kechaou, M.J.D.T. Maalej, A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves, *Drying Technology*, 18 (2000) 1109-1125.
- [42] A. Ferradji, M.A.A. Matallah, A. Malek, Conservation des dattes ‘deglet noir’ isothermes d’adsorption à 25, 30 et 40 C, *Revue des Energies Renouvelables SMSTS’08 Alger* (2008) 207 – 219.
- [43] R.M. Syamaladevi, S.S. Sablani, J.Tang, J.Powers, B.G. Swanson, State diagram and water adsorption isotherm of raspberry (*Rubus idaeus*), *Journal of Food Engineering*, 91 (2009) 460–467.
- [44] M. Sadeghi, E. Mehryar, J. Razavi, S.A. Mireei, Moisture sorption isotherm and glass transition temperature of date powder in terms of various model systems. *Journal of Food Process Engineering*, 39 (2016) 61-68.
- [45] A. Farahnaky, N. Mansoori, M. Majzoobi, F.Badii, Physicochemical and sorption isotherm properties of date syrup powder: Antiplasticizing effect of maltodextrin, *Food and Bioproducts Processing*, 98 (2016) 133-141.

- [46] M. Nabily, A. Nabili, A. Namsi, H. Majdoub, A. Azzouna, Shelf Life Prediction and Storage Stability of Deglet Nour Dates (*Phoenix dactylifera* L.) : Microbiological and Organoleptic Properties, *Chemistry Africa*, 3 (2020)189-197.
- [47] A. Djidel, Production d'acide lactique par *Lactobacillus casei* subsp. *Rhamnosus* sur jus de datte : cinétique et optimisation en cultures discontinues, semi-continues et continues. Thèse de doctorat. Nancy-Université. INPL (2007).
- [48] M. Belguedj, Les ressources génétique du palmier dattier : caractéristiques des cultivars de dattier dans les palmeraies du sud-est algérien. Revue annuelle de l'Inraa Alger, N1.28-289 (2002).
- [49] A. Bennamia, B. Messaoudi, Contribution à étude de la composition des dattes « Deglet Nour » et « Ghars » dans le pédocapage de la cuvette d'Ourgla. Thèse diplôme d'étude supérieure ; (2006).
- [50] S. Bezghouche, Y. SELATNIA, Contribution à l'étude de quelques caractéristiques physicochimiques et organoleptiques de quelques variétés de dattes Algériennes. Mémoire de Master Spécialité Biochimie Microbiologie Appliquée. Université 8 Mai 1945 Gulma (2013).
- [51] A. Lamharrar, S.E.K. Cheikh, A. Idlimam, S. Akkad, K. Mohammed, A. Mimet, M. Ahachad, Détermination expérimentale des isothermes de sorption et de la chaleur isostérique des feuilles d'absinthe et de menthe pouliot, 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique. JITH 2007, France. hal-00167248.
- [52] solutions for technicians, <https://www.handymath.com/cgi-bin/sulfurictble11.cgi?submit=Entry>.
- [53] L. Zhang, P.M. Grace, D.W.J.D.T. Sun, An accurate water activity model for sulfuric acid solutions and its implementation on moisture sorption isotherm determination, *Drying Technology*, 40 (2022) 2540-2549.