

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique

Faculté des sciences et

Technologie

Département génie

Des procédés

جامعة غرداية



Université de Ghardaïa

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم هندسة الطرائق

Autorisation d'impression finale d'un mémoire de master

	Nom et prénom	Signature
Examineur 1	KhaZen Souad	
Examineur 1	Marrousi Phaled	
Encadrant	Daoud Djamel	
Co-encadrant	Benseddik Abdelouahab	

Soussigne M^{re} : Hellali Naïma

Président de jury des étudiant (s) : Hadj. Mahamed Zined et Chamkha Naïma

Filière : Génie des procédés ; Spécialité : Génie chimique

Thème: Etude expérimentale et modélisation des isothermes de sorption d'humidité et propriétés thermodynamique des variétés des maïs cultivées dans la région de Ghardaïa

Autorise le (s) étudiant (s) mentionné (s) ci-dessus à imprimer et déposer leur (s) manuscrit final au niveau du département.

Ghardaïa le: 10/07/2027

Président de jury

Le chef de département



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم هندسة الطرائق

Département de génie des procédés
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme
Master

Domaine : science et technologies
Filière : Génie des procédés
Spécialité : Génie chimique

Thème

Etude expérimentale et modélisation des isothermes de sorption d'humidité et propriétés thermodynamique des variétés des maïs cultivées dans la région de Ghardaïa

Présenté par :
HADJ MOHAMED Zineb
ChAMKHA Naima

Soutenue publiquement le 12/06/2025 Devant
le jury composé de :

HELLALI Naima	Maitre de conférences B	Univ. Ghardaia	Président
DAOUD Djamel	Directeur de recherche	Univ. Ghardaia	Encadrant
BENSEDDIK Abdelouahabe	Directeur de recherche	URAER. Ghardaia	Co-encadrant
MANSOURI Khaled	Maitre de conférences A	Univ. Ghardaia	Examinateur
KHAZEN Souad	Maitre-assistant A	Univ. Ghardaia	Examinateur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de « **Dr. Djamel DAOUD** » qui ne m'a pas ménagé son temps et ses efforts, et qui m'a offert soutien et inspiration pour atteindre mes objectifs académiques. Votre orientation éclairée a été une source d'inspiration tout au long des différentes étapes de la recherche.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Co-encadreur « **Dr. Abdelouahab BENSEDDIK** » qui n'a pas hésité à offrir son aide et ses conseils, et dont le soutien a eu un impact significatif sur l'achèvement de ce travail.*

*Enfin, je n'oublie pas de remercier l'ingénieure de laboratoire « **Khadija HADJ YUCEF** », qui nous a fourni un soutien technique et l'équipement nécessaire, et qui a contribué par son expertise à faciliter le bon déroulement des expériences.*

À l'Université de Ghardaïa, ce haut lieu du savoir qui m'a accompagné tout au long de mon parcours universitaire,

Au Département de Génie des Procédés, pour la qualité de l'enseignement, l'encadrement bienveillant et l'encouragement constant,

À tous les enseignants et membres du personnel qui ont contribué à ma formation,

Je dédie ce modeste travail en signe de gratitude et de reconnaissance.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenue de près ou de loin principalement à tous nos camarades de promos master 02 génie chimie

2024/2025

Zineb et Naima

Dédécas

À ceux qui ont semé en moi les graines de l'ambition,

À ceux dont les prières ont illuminé mon chemin,

À ceux dont les yeux ont veillé pour moi et dont les cœurs ont supporté la fatigue du parcours...

À la plus grande bénédiction que Dieu m'ait accordée : **mes chers parents,**

Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour, du sacrifice et du soutien inconditionnel
que vous m'avez offert.

Et à **mon petit frère**, compagnon de mon enfance et battement de mon cœur, tu occupes une place
spéciale dans mon âme. Cet accomplissement t'est aussi dédié.

À **mon époux bien-aimé**, compagnon de route, source de patience et refuge de mon cœur dans les
moments de faiblesse... Merci pour ton encouragement, ta patience et ton soutien constant à mes
côtés.

À **mes enfants qui grandissent en moi**, vous êtes la lumière d'où je puise ma force, et l'espoir que
je vois dans mon avenir... Je vous dédie le fruit de mes efforts, avec amour et dans l'attente de
vous rencontrer bientôt, si Dieu le veut.

À **ma seconde famille, ma belle-famille** (la famille de mon mari), pour l'amour, le respect et la
bienveillance dont vous m'avez entourée, je vous exprime toute ma gratitude et mes
remerciements les plus sincères.

À **mes amis fidèles et compagnons de route**, qui ont été un soutien dans les moments de fatigue et
une source de joie dans les instants difficiles, ma reconnaissance est infinie.

À **mes professeurs estimés**, phares du savoir et modèles de dévouement, merci pour vos efforts,
vos conseils et votre engagement à nous mener vers l'excellence.

À vous tous, je dédie le fruit de ce parcours,

En espérant avoir été à la hauteur de vos attentes.

Zineb

2025

Dédécas

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux

Louange à Allah par la grâce duquel les bonnes œuvres s'accomplissent, et que la paix et les bénédictions soient sur notre Prophète Mohammed, ainsi que sur sa famille et ses compagnons.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Allah, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la réussite et facilité l'accomplissement de ce travail.

*À mon encadrant, pour son accompagnement bienveillant et ses conseils précieux,
Et à mon co-encadrant, pour son soutien constant et ses remarques pertinentes,
Je vous exprime ma profonde gratitude.*

*À mon époux, qui m'a soutenue avec amour et constance,
À ma mère et à mon père, qui ont peiné à mes côtés et sacrifié tant pour que j'atteigne cette étape et réalise leur rêve,
À Rahaf, mon nourrisson et ma petite compagne de ce voyage,
À la famille de mon mari, pour leur bienveillance et leur respect,
À mes amis fidèles, compagnons d'effort et de joie,
Et à tous ceux qui ont partagé ce chemin avec moi au sein du département de Génie des Procédés,
Je dédie humblement ce travail, en témoignage de reconnaissance, d'affection et de fierté
À tous ceux qui croient au travail acharné et ne reculent pas face aux difficultés de la vie.*

Naima



Résumé :

Ce mémoire analyse les propriétés hygroscopiques et thermodynamiques de trois variétés de maïs (Colonia, Kalassioul, Oasis) cultivés dans la région de El Menia, en étudiant leurs isothermes de sorption pour optimiser le séchage et le stockage. L'objectif est de caractériser leur comportement à différentes températures (30 °C, 45 °C, 60 °C) et de déterminer les modèles mathématiques les plus adaptés pour prédire leurs propriétés de sorption. L'étude utilise une méthode gravimétrique avec des solutions d'acide sulfurique pour contrôler l'activité de l'eau (a_w). Les isothermes de sorption sont obtenus en mesurant les variations de masse jusqu'à l'équilibre, puis ajustés à des modèles (GAB, BET, etc.). La chaleur isostérique de sorption est aussi calculée pour analyser les interactions eau-matière. Les isothermes présentent une forme de type II, typique des produits céréaliers, avec trois zones distinctes : adsorption monomoléculaire ($a_w < 0,3$), multicouche ($0,3 < a_w < 0,7$) et capillaire ($a_w > 0,7$). Une hystérésis marquée est observée entre les courbes d'adsorption et de désorption, surtout pour $a_w > 0,6$, indiquant une rétention d'eau plus élevée après désorption. L'augmentation de la température réduit la teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}) pour une même a_w , reflétant une diminution de l'affinité eau-matière à haute température. Les modèles de Peleg et GAB se révèlent les plus performants pour décrire les isothermes, avec des coefficients de détermination (R^2) élevés ($> 0,99$) et de faibles erreurs (RMSE). Le modèle de Peleg est particulièrement adapté pour prédire les comportements complexes, tandis que le modèle GAB fournit des informations thermodynamiques clés, comme la teneur en eau de la monocouche (X_m). La chaleur isostérique de sorption est élevée aux faibles teneurs en eau, traduisant des interactions fortes entre l'eau et les sites actifs du maïs. Elle diminue avec l'augmentation de l'humidité, se rapprochant de la chaleur latente de vaporisation de l'eau pure, ce qui indique une adsorption moins énergétique dans les couches supérieures. Les résultats démontrent l'importance des isothermes de sorption pour optimiser les conditions de séchage et de stockage du maïs, notamment dans les régions arides comme le sud d'Algérie. Les modèles de Peleg et GAB offrent des outils précieux pour prédire le comportement hygroscopique et minimiser les risques de détérioration. Les analyses thermodynamiques soulignent l'énergie requise pour les premières étapes de la sorption, ce qui est crucial pour concevoir des procédés post-récolte efficaces.

Mots-clés : Maïs, isothermes de sorption, activité de l'eau, modélisation, chaleur isostérique, séchage, stockage.

Abstract:

This thesis analyzes the hygroscopic and thermodynamic properties of three maize varieties (Colonia, Kalassioul, Oasis) grown in the El Menia region, by studying their sorption isotherms to optimize drying and storage. The objective is to characterize their behavior at different temperatures (30 °C, 45 °C, 60 °C) and to determine the most suitable mathematical models to predict their sorption properties. The study uses a gravimetric method with sulfuric acid solutions to control water activity (a_w). Sorption isotherms are obtained by measuring mass variations until equilibrium, then fitted to models (GAB, BET, etc.). The isosteric heat of sorption is also calculated to analyze water-matter interactions. The isotherms exhibit a type II shape, typical of cereal products, with three distinct zones: monomolecular adsorption ($a_w < 0.3$), multilayer ($0.3 < a_w < 0.7$), and capillary ($a_w > 0.7$). A marked hysteresis is observed between the adsorption and desorption curves, especially for $a_w > 0.6$, indicating higher water retention after desorption. Increasing the temperature reduces the equilibrium water content (X_{eq}) for the same a_w , reflecting a decrease in water-matter affinity at high temperatures. The Peleg and GAB models are found to be the best performers in describing the isotherms, with high coefficients of determination (R^2) (> 0.99) and low errors (RMSE). The Peleg model is particularly suitable for predicting complex behaviors, while the GAB model provides key thermodynamic information, such as the monolayer water content (X_m). The isosteric heat of sorption is high at low water contents, reflecting strong interactions between water and the active sites of corn. It decreases with increasing humidity, approaching the latent heat of vaporization of pure water, indicating less energetic adsorption in the upper layers. The results demonstrate the importance of sorption isotherms for optimizing corn drying and storage conditions, particularly in arid regions such as southern Algeria. The Peleg and GAB models provide valuable tools for predicting hygroscopic behavior and minimizing spoilage risks. Thermodynamic analyses highlight the energy required for the early stages of sorption, which is crucial for designing efficient postharvest processes.

Keywords: Corn, sorption isotherms, water activity, modeling, isosteric heat, drying, storage.

المخلص:

تُحل هذه الرسالة الخواص الاسترطابية والحرارية الديناميكية لثلاثة أصناف من الذرة (كولونيا، كلاسبول، أواسيس) مزروعة في منطقة المنيا، وذلك من خلال دراسة تساوي درجة حرارة الامتصاص لتحسين عملية التجفيف والتخزين. يهدف البحث إلى توصيف سلوك هذه الأصناف عند درجات حرارة مختلفة (30 درجة مئوية، 45 درجة مئوية، 60 درجة مئوية)، وتحديد أنسب النماذج الرياضية للتنبؤ بخصائص الامتصاص. تستخدم الدراسة طريقة قياس الوزن باستخدام محاليل حمض الكبريتيك للتحكم في النشاط المائي (a_w). يتم الحصول على تساوي درجة حرارة الامتصاص بقياس تغيرات الكتلة حتى الوصول إلى حالة التوازن، ثم تطبيقها على نماذج (GAB، BET، إلخ). كما تُحسب الحرارة المتساوية للامتصاص لتحليل تفاعلات الماء والمادة. تُظهر خطوط تساوي الحرارة شكلاً من النوع الثاني، وهو نموذجي لمنتجات الحبوب، مع ثلاث مناطق مميزة: الامتزاز أحادي الجزيء ($a_w < 0.3$)، ومتعدد الطبقات ($0.3 < a_w < 0.7$)، والشعري ($a_w > 0.7$). يُلاحظ تباطؤ ملحوظ بين منحنيات الامتزاز والامتصاص، وخاصة بالنسبة لـ $a_w < 0.6$ ، مما يشير إلى احتباس أعلى للماء بعد الامتزاز. تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى تقليل محتوى الماء المتوازن (X_{eq}) لنفس a_w ، مما يعكس انخفاً أيضاً في تقارب الماء والمادة عند درجات الحرارة العالية. وُجد أن نموذجي Peleg و GAB هما الأفضل أداءً في وصف خطوط تساوي الحرارة، مع معاملات تحديد عالية ($R^2 > 0.99$) وأخطاء منخفضة (RMSE). يُعد نموذج Peleg مناسباً بشكل خاص للتنبؤ بالسلوكيات المعقدة، بينما يوفر نموذج GAB معلومات ديناميكية حرارية رئيسية، مثل محتوى الماء أحادي الطبقة (X_m). تكون حرارة الامتصاص المتساوية (isosteric heat) مرتفعة عند انخفاض محتوى الماء، مما يعكس تفاعلات قوية بين الماء والمواقع النشطة في الذرة. وتتنخفض هذه الحرارة مع زيادة الرطوبة، لتقترب من الحرارة الكامنة لتبخّر الماء النقي، مما يشير إلى انخفاض طاقة الامتصاص في الطبقات العليا. وتُظهر النتائج أهمية خطوط الامتصاص المتساوية (isosteric heat) في تحسين ظروف تجفيف وتخزين الذرة، لا سيما في المناطق القاحلة مثل جنوب الجزائر. ويوفر نموذجا Peleg و GAB أدوات قيمة للتنبؤ بالسلوك الاسترطابي وتقليل مخاطر التلف. وتُبرز التحليلات الديناميكية الحرارية الطاقة اللازمة للمراحل الأولى من الامتصاص، وهي ضرورية لتصميم عمليات فعالة لما بعد الحصاد.

الكلمات المفتاحية: الذرة، خطوط الامتصاص المتساوية (isosteric heat)، النشاط المائي، النمذجة، الحرارة المتساوية (heat isosteric)، التجفيف، التخزين.

Sommaire :

Les remerciements

Les résumés

La sommaire

Nomenclature

Liste de

Introduction générale.2

Chapitre I : Etude bibliographie

I. Introduction.....7

I.1. Généralité sur maïs.....7

I.1.1 Maïs..... 7

I. 1.2. Culture de maïs.....8

I.1.3. La production de maïs.....8

I.1.4. L'importance de maïs dans l'Algérie.....10

I.1.5. Les facteurs essentiels de la qualité.....10

I.1.6. Stockage.....11

I.1.7. Séchage.....12

I.2. Les grandeurs caractéristiques de l'air de séchage.....13

I.3. Activité de l'eau dans un produit.....13

I.4. Teneur en eau d'équilibre.....15

I.5. Isothermes de sorption.....15

I.5.1. Définition.....15

I.5.2. Forme générale des isothermes.....17

I.5.3. Les méthodes d'obtention des Isothermes de sorption.....18

I.5.4. Modélisation des isothermes de sorption.....20

I.5.5. Intérêt des Isothermes.....21

I.6. Chaleur isostérique de sorption.....21

I.7. Enthalpie et entropie différentielle de sorption.....22

I. Conclusion.....22

Référence.....23

Chapitre II : Revue de littérature

II.1 Introduction.....27

II.2 Études sur les isothermes de sorption du maïs.....27

II. Conclusion.....34

Référence.....35

Chapitre III : Matériel et méthodes

III.1. Introduction.....38

III.2. Description et choix des variétés.....38

III.3. Maïs utilisé.....39

III.4. Matériel et méthodes opération.....	39
Etape №1 : Calcul de la teneur en eau initiale.....	40
Etape №2 : Préparation de solution d'acide	43
III.5. Préparation des solutions.....	44
Etape № 3 : adsorption et désorption.....	45
III.6. Modèles de description des isothermes d'adsorption.....	46
III.7. Détermination de la chaleur isostérique de sorption.....	49
III. Conclusion.....	49
Référence.....	49
Chapitre IV : résultats et discussion.	
IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Isotherme de Sorption.....	52
IV.2. 1.Adsorption.....	52
IV.2. 2.Désorption.....	54
IV.3. Modélisation des isothermes de sorption.....	57
IV.3. 1.Adsorption.....	58
IV.3. 2.Désorption.....	65
IV.4. Détermination de la chaleur isostérique de sorption.....	73
IV.4.1. Adsorption.....	73
IV.4.2.Désorption.....	74
IV.5.Variation de la chaleur isostérique de sorption de trois variétés de maïs...76	
IV.5.1. Adsorption.....	76
IV.5.2.Désorption.....	77
IV. Conclusion.....	78
Référence.....	79
Conclusion générale.....	81

Nomenclature :

Symboles	Désignations	Unités
(aw)	Activité de l'eau.	%

Ms	Masse sèche du produit.	Kg
Mh.	Masse humide du produit	Kg
Me.	Masse du l'eau	Kg
Ma	Masse de l'air sèche.	Kg
Hr= φ	Humidité relative de l'air	%
Has.	Humidité absolue de saturation.	Kg d'eau /kg (as)
Ha	Humidité absolue.	Kg d'eau /kg (as)
R	Constante de gaz parfait	J/mol. °K
Pv	La pression partielle de la vapeur dans le mélange.	Atm
PS (T).	La pression de saturation dans le même mélange.	Atm
t	Temps	S

Liste du Figure :

Chapitre. I.	
Fig.I.1.	Agriculteur observant un épi de maïs et ses grains à maturité.....7
Fig.I.2.	La structure d'un pied de maïs.....8
Fig.I.3	culture de maïs.....8
Fig.I.4	production mondiale de maïs par pays.....9
Fig.I.5.	Production de maïs en Algérie par région.....9
Fig.I.6	Différentes manières de stockage du maïs : (a) en vrac, (b) en silos et (c) en sac.....10
Fig.I.7.	Représentation graphique de l'activité de l'eau.....14
Fig.I.8.	Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau.....15
Fig.I.9.	Comparaison entre adsorption/ désorption.....16
Fig.I.10.	Isothermes de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis.....17
Fig.I.11.	Forme générale des isothermes.....18
Chapitre. III.	
Fig. III.1.	Les types de maïs.....39

Fig. III.2.	Poids des échantillons.....	40
Fig. III.3.	Les échantillons de maïs dans l'étuve.....	41
Fig. III.4.	Préparation de l'expérience d'adsorption.....	42
Fig. III.5.	Séchage des échantillons pour l'isotherme d'adsorption.....	42
Fig.III.6.	Acide sulfurique 95-98 % utilisé dans les expériences.....	44
Fig. III.7.	Préparation des solutions.....	44
Fig III.8.	Préparation des paniers.....	45
Fig. III.9.	Les paniers d'échantillon dans les bocaux.....	45

Fig. III.10. Position des bocal dans l'étuve pour l'adsorption et désorption.....	46
Fig. III. 11. Appareil de mesure de l'humidité pour confirmer l'activité d'eau dans chaque bocal.....	47
Chapitre .IV.	
Fig. IV. 1. Les teneurs en eau d'équilibre de maïs Colonais, Kalassioul et Oasis en fonction de l'activité de l'eau à différentes températures d'adsorption.....	54
Fig. IV. 2. Les teneurs en eau d'équilibre de maïs Colonais, Kalassioul et Oasis en fonction de l'activité de l'eau à différentes températures de désorption.....	56
Fig.IV. 3. Isothermes d'adsorption de maïs (Colonais) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.....	61
Fig.IV. 4. Isothermes d'adsorption de la maïs (Kalassiaule) lissées par les modèles : GAB,Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.....	63
Fig. IV. 5. Isothermes d'adsorption de la maïs (Oasis) lissées par les modèles : GAB, BET, Henreson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.....	65
Fig. IV. 6. Isothermes de désorption de maïs (Colonais) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.....	69
Fig.IV. 7. Isothermes de désorption de la maïs (Kalassiaule) lissées par les modèles : GAB,Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures	70
Figure. IV. 8. Isothermes de désorption de la maïs (Oasis) lissées par les modèles : GAB, Smith, , Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.....	71
Fig. IV.9. Isoptères d'adsorption pour 3 variétés testés (Colonia, Kalassioul et Oasis).....	74
Fig. IV.10. Isoptères de Désorption pour 3 variétés testés (Colonia, Kalassioul et Oasis)....	75
Fig.. IV.11. Chaleur isostérique nette d'adsorption des 3 variétés testés (Colonia, Kalassioul et Oasis) en fonction de la teneur en eau	76
Fig. IV..12. Chaleur isostérique nette de désorption des 3 variétés testés (Colonia, Kalassioul et Oasis) en fonction de la teneur en eau d'équilibre.....	77

Liste des tableaux :

Chapitre. I.

Tableau I.1. Les principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption.....	16
---	----

Tableau I.2. Les modèles utilisés dans les isothermes de sorption	20
---	----

Chapitre. III.

Tableaux III.1. Composition de maïs.....	39
--	----

Tableau III.2. Les calculs de la teneur en eau initiale.....	41
--	----

Tableau III.3. Les valeurs de la teneur en eau initiale pour les 3 variétés.....	41
--	----

Tableau III.4. Les mesures des paniers.....	42
---	----

Tableau III.5. Les valeurs de la teneur en eau après le séchage pour les 3 variétés utilisés pour déterminer les isothermes d'adsorption.....	43
---	----

Tableau III.6. La densité concentration complète des solutions aqueuse d'acide sulfurique ...	43
---	----

Tableau III.7. Valeurs standards des activités d'eau (aw) données par différentes concentrations massiques de H ₂ SO ₄ dans l'eau en fonction de la température.....	43
--	----

Tableau III.8. Les masses et les volumes de H ₂ SO ₄ et H ₂ O.....	44
---	----

Tableau III.9. Les équations des modèles utilisés.....	47
--	----

Chapitre IV

Tableau IV.1. Valeurs des masses sèches et humides et les teneurs en eau d'équilibré de tous les échantillons de maïs à 30°C, 45 °C,60 °C d'adsorption.....	53
---	----

Tableau IV.2. Valeurs des masses sèches et humides et les teneurs en eau d'équilibré de tous les échantillons de maïs à 30°C, 45 °C,60 °C de désorption.....	55
--	----

Tableau IV.3. Paramètres d'isothermes d'adsorption de maïs (Colonais) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.....	58/59
---	-------

Tableau IV.4. :Paramètres d’isothermes d’adsorption de le maïs (Kalassioul) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.....59/60

Tableau IV.5 : Paramètres d’isothermes d’adsorption du maïs (Oasis) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.....60

Tableau IV.6. : Paramètres d’isothermes de désorption de maïs (Colonais) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes Températures.....65/66

Tableau IV. 7.. Paramètres d’isothermes de désorption du maïs (Kalassioul) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.....66/67

Tableau IV.8. : Paramètres d’isothermes de désorption du maïs (Oasis) lissées par les modèles : GAB , Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes Températures.....67/68

Introduction générale

Introduction générale

Le maïs (*Zea mays*), appartenant à la famille des Poacées, est l'une des céréales les plus cultivées et les plus polyvalentes au monde. Originaire des Amériques, il est aujourd'hui cultivé sur tous les continents et joue un rôle essentiel dans l'alimentation humaine, l'alimentation animale ainsi que dans les industries agroalimentaires. Les principales variétés de maïs comprennent le maïs denté, le maïs dur, le maïs sucré et le maïs à éclater, chacune présentant des usages spécifiques. En 2022, la production mondiale de maïs a atteint environ 1,2 milliard de tonnes, dominée par les États-Unis, la Chine, le Brésil et l'Argentine [1]. Le maïs constitue une source importante de glucides, de protéines, de fibres, de vitamines (notamment du groupe B) et de minéraux tels que le phosphore et le magnésium [2–5]. Sa culture est adaptable à une large gamme de climats, mais requiert des sols fertiles et une bonne gestion de l'eau. La récolte s'effectue généralement en automne, à l'aide de moissonneuses modernes permettant d'optimiser le rendement. Outre ses usages alimentaires, le maïs est également employé dans la production de biocarburants, d'amidons et de divers produits industriels. Son importance économique et nutritionnelle ne cesse de croître, notamment dans les pays en développement, où il constitue une base alimentaire fondamentale [1,6].

En Algérie, le maïs représente une culture de plus en plus stratégique, bien que moins dominante que celle du blé. La production annuelle varie entre 500 000 et 700 000 tonnes, en fonction des conditions climatiques et des politiques agricoles [7]. Les principales zones de culture se situent dans le nord du pays, où les précipitations sont plus abondantes, ainsi que dans certaines régions irriguées des Hauts Plateaux et du Sahara. Toutefois, comme pour le blé, la production nationale reste insuffisante pour couvrir la demande locale, obligeant ainsi l'Algérie à importer une part importante de son maïs, principalement d'Argentine et du Brésil. Cette dépendance aux importations souligne la nécessité d'améliorer les techniques culturales, les systèmes d'irrigation et la recherche variétale, en vue d'augmenter les rendements et de réduire les pertes post-récolte.

La conservation du maïs pendant le stockage est cruciale pour limiter les pertes causées par les contaminations fongiques et la production de mycotoxines, qui représentent des risques sanitaires et économiques majeurs [8]. Un outil fondamental pour relever ces défis est l'établissement des isothermes de sorption d'humidité, lesquels décrivent la relation entre la teneur en humidité à l'équilibre (X_{eq}) et l'activité de l'eau (a_w) à température et pression constantes [9]. Ces isothermes permettent de comprendre les propriétés hygroscopiques du maïs ainsi que les interactions entre les molécules d'eau et la matrice complexe du grain, composée principalement d'amidon, de protéines et de fibres [10].

Les isothermes de sorption sont indispensables pour optimiser les procédés de séchage, concevoir des systèmes de stockage, prédire la stabilité des produits pendant leur conservation et choisir des matériaux d'emballage adaptés [11]. Par exemple, le séchage permet de réduire la teneur en eau du produit, inhibant ainsi la croissance microbienne et l'activité enzymatique. Toutefois, un séchage excessif peut fragiliser les grains et altérer leur qualité. Il est donc essentiel de comprendre le comportement de sorption du maïs à différentes températures afin de définir des conditions de stockage optimales qui garantissent à la fois sa conservation et la préservation de sa qualité [12].

Cette étude vise à caractériser les propriétés hygroscopiques et thermodynamiques de trois variétés de maïs denté jaune (Colonia, Kalassioul, Oasis), cultivé dans la région d'El-Menia lors de la récolte 2024. L'approche méthodologique combine des analyses expérimentales et des modélisations mathématiques à trois températures clés (30 °C, 45 °C et 60 °C), représentatives des conditions typiques de séchage industriel et de stockage en milieu aride ou semi-aride. Plus précisément, nos objectifs sont les suivants :

1. Établir avec précision les isothermes d'adsorption et de désorption en déterminant la relation fondamentale entre l'activité de l'eau (a_w) et la teneur en humidité d'équilibre ;
2. Évaluer, par la méthode gravimétrique utilisant des solutions étalons d'acide sulfurique, le comportement hygroscopique du produit ;

3. Comparer les performances de huit modèles mathématiques de sorption (GAB, Oswin, Halsey, Henderson, Chung-Pfost, polynomial, etc.) pour prédire le comportement du maïs lors des phases de conservation ;
4. Quantifier la chaleur isostérique de sorption, paramètre énergétique essentiel pour optimiser les procédés de séchage et les conditions de stockage.

Cette approche multidimensionnelle permettra de poser des bases scientifiques solides pour une meilleure maîtrise des procédés post-récolte de cette variété de maïs.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** présente une recherche bibliographique introduisant les définitions et concepts fondamentaux liés au séchage et les phénomènes de sorption, ainsi que les paramètres clés évoluant au cours de cette étape.
- **Le deuxième chapitre** est consacré à l'état de l'art des travaux menés dans le domaine de la sorption appliquée au maïs.
- **Le troisième chapitre** décrit les matériaux et les méthodes utilisés au cours de l'étude.
- **Le quatrième chapitre** présente les résultats expérimentaux portant sur trois variétés, testées dans une gamme de températures allant de 30 °C à 60 °C. Les équations décrivant les isothermes de sorption à chaque température y sont définies et interprétées.

En conclusion, une synthèse globale résume les principales conclusions et ouvre sur des perspectives pour de futurs travaux.

Références Bibliographiques :

- [1]. FAO. (2023). FAOSTAT: Production of maize. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [2]. Bressani, A., Gómez-Brenes, R., & Scrimshaw, D. (1962). Nutritional value of maize. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 10, 430–435.
- [3]. Rooney, L. W., & Serna-Saldivar, S. O. (2003). Maize: Chemistry and technology. American Association of Cereal Chemists.
- [4]. Vázquez-Carrillo, M. G., Salinas-Moreno, Y., & Castillo-González, F. (2005). Nutritional quality of maize protein. *Agrociencia*, 39, 303–315.
- [5]. Ribaut, J. M., & Bänziger, M. (2006). Drought adaptation in cereals. Food Products Press.
- [6]. FAO. (2021). The state of food security and nutrition in the world. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [7]. Ministère de l'Agriculture, Algérie. (2023). Rapport annuel sur la production agricole.
- [8]. Marín, S., Ramos, A. J., Cano-Sancho, G., & Sanchis, V. (2004). Mycotoxins: Occurrence, toxicology, and exposure assessment. *Food and Chemical Toxicology*, 42, 211–220.
- [9]. Labuza, T. P. (1984). Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use. AACC International.
- [10]. Van den Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems. In L. B. Rockland (Ed.), *Water activity: Influences on food quality* (pp. 147–177). Academic Press.
- [11]. Gal, S. (1987). The need for, and practical applications of, sorption data. In R. Jowitt et al. (Eds.), *Physical properties of foods* (pp. 13–25). Elsevier.
- [12]. Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2004). Water sorption isotherms of starch powders: Part 1. *Journal of Food Engineering*, 61, 297–307.

Chapitre 1 :
Etude bibliographie

Introduction

Les isothermes de sorption jouent un rôle fondamental dans la compréhension des interactions entre l'eau et les produits agroalimentaires. Ces courbes, qui décrivent la relation entre la teneur en eau d'un produit et l'humidité relative de l'air à une température donnée, sont essentielles pour évaluer la stabilité, la qualité et les conditions optimales de conservation des denrées. Elles permettent également de prédire les phénomènes de déshydratation ou d'hydratation, ainsi que les risques microbiologiques ou chimiques liés à l'activité de l'eau. Dans ce chapitre, nous explorerons les principes théoriques, les méthodes expérimentales et les modèles mathématiques associés aux isothermes de sorption, en mettant en lumière leur importance dans le domaine agroalimentaire

I.1. Généralité sur maïs :

I.1.1. Maïs :

Le maïs est la céréale la plus cultivée au monde, devant le blé et le riz. Il s'adapte à divers climats (tropical à tempéré) et altitudes (0 à 3 000 m). Utilisé aussi bien dans une agriculture vivrière (Afrique subsaharienne) qu'intensive (États-Unis), il est présent sur tous les continents. Originaire du Mexique, le maïs est un aliment de base depuis l'Antiquité. Riche en vitamines et minéraux, il contribue à prévenir certaines maladies, notamment digestives. À maturité, ses grains sont jaunes [1,2]



Fig. I.1. Agriculteur observant un épi de maïs et ses grains à maturité [2]

Le maïs est une plante annuelle de la famille des graminées (Poacées), avec une tige unique, pleine et lignifiée, composée de plusieurs entre-nœuds. Ses feuilles sont alternes et disposées en deux rangées opposées. Il existe sept types de maïs, classés selon les caractéristiques de leurs grains. Contrairement à d'autres graminées, le maïs se distingue par sa tige robuste et non creuse [3].

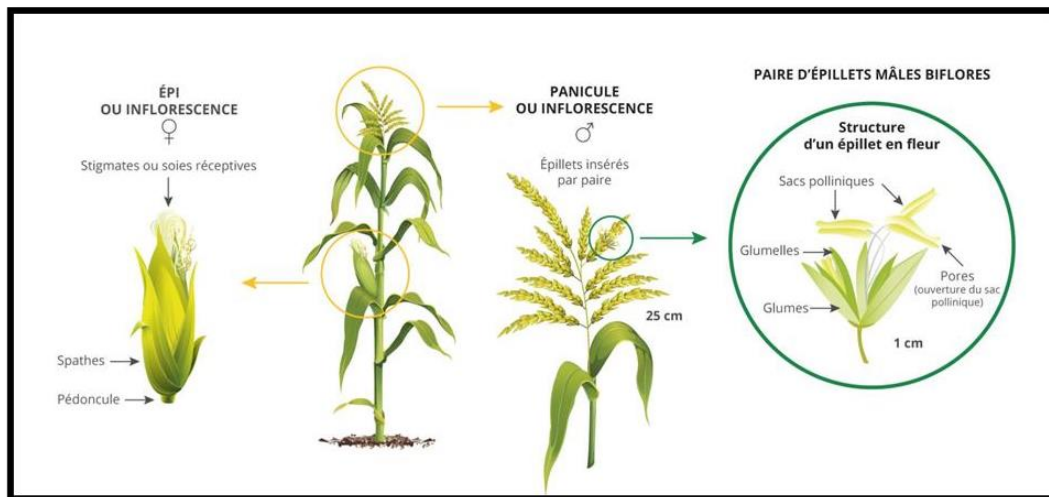


Fig.I.2. La structure d'un pied de maïs [4].

I.1.2. Culture du maïs :

Le maïs, qu'il soit destiné à l'ensilage ou à la production de grains, est une culture de printemps exigeante, nécessitant un suivi attentif du semis à la récolte. La phase de sevrage, transition clé entre l'alimentation par les graines et l'autonomie racinaire, est déterminante pour assurer des rendements élevés et énergétiques. Peu importe la variété ou les conditions locales (sol, climat), un bon développement racinaire est essentiel. Durant la formation des racines primaires, les jeunes plants doivent absorber rapidement les nutriments pour soutenir leur croissance [5].



Fig. I.3. Culture de maïs. [5]

I.1.3. La production de maïs

Le maïs, l'une des cultures les plus importantes au monde, est utilisé pour l'alimentation humaine et animale ainsi que dans des industries comme les biocarburants. Avec une production mondiale estimée à environ 1,2 milliard de tonnes par an (2023), sa culture est dominée par les États-Unis (35 % de la production mondiale), suivis de la Chine, du Brésil, de l'Argentine, de l'Ukraine (grand exportateur), ainsi que de l'Inde, du Mexique et de l'Afrique du Sud [6].

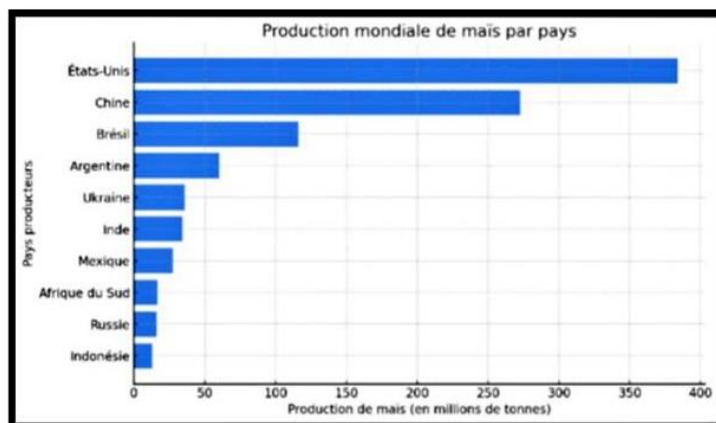


Fig.I.4. Production mondiale de maïs par pays.[6]

La production de maïs en Algérie a connu une évolution notable ces dernières années, avec un accent mis sur l'augmentation de la production locale afin de réduire la dépendance aux importations. Voici quelques chiffres clés sur la production de maïs en Algérie :

- ✓ Wilaya de El Menia : Plus de 7 000 hectares ont été consacrés à la culture du maïs fourrager jaune pour la campagne agricole 2022/2023, avec une production attendue de plus de 3,5 millions de quintaux.
- ✓ Wilaya de Ghardaïa : En 2019, environ 700 000 quintaux de maïs ont été récoltés sur une superficie de 2 150 hectares.
- ✓ Wilaya d'Adrar : Une superficie de 7 500 hectares a été consacrée à la culture du maïs jaune pour la campagne agricole 2023/2024.
- ✓ Wilaya de Ghardaïa (régions de Mansoura et Sebseb) : Une production d'environ 156 000 quintaux de maïs fourrager est attendue pour la campagne de récolte commencée en novembre 2022, sur une superficie totale de 390 hectares. [7]

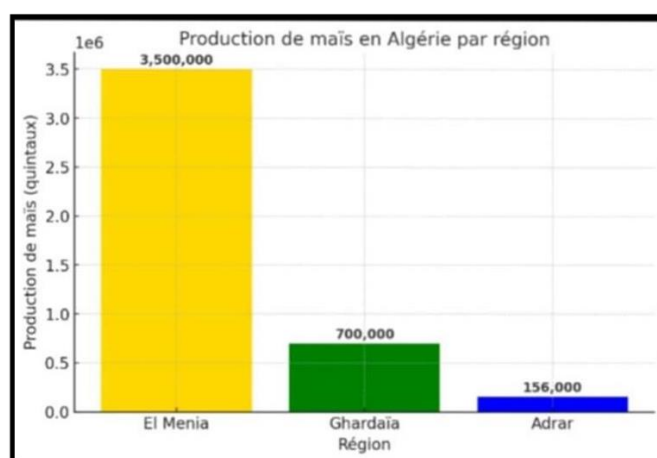


Fig. I.5. Production de maïs en Algérie par région.[7]

En mars 2024, l'Office National des Aliments du Bétail a lancé un appel d'offres international pour l'achat de 120 000 tonnes de maïs fourrager. En novembre 2024, l'Algérie a lancé un appel d'offres pour l'achat de 240 000 tonnes de maïs en provenance d'Argentine et du Brésil [7,8].

I.1.4. L'importance de maïs dans l'Algérie :

Le maïs est une culture stratégique en Algérie en raison de son importance économique et alimentaire. Il joue un rôle clé dans plusieurs domaines [9,10]

- Sécurité alimentaire : Le maïs est un ingrédient essentiel dans l'alimentation humaine, utilisé pour produire de la farine, des huiles végétales et divers produits alimentaires.
- Alimentation du bétail : Il constitue une source majeure d'aliments pour l'élevage, notamment pour les bovins et la volaille, contribuant ainsi à soutenir la production animale et à réduire la dépendance aux importations de fourrage.
- Industrie agroalimentaire : Le maïs est utilisé dans la fabrication d'amidon, d'huiles et de nombreux autres produits alimentaires, ce qui renforce la valeur ajoutée du secteur industriel.
- Soutien à l'économie nationale : Développer la production locale de maïs permet de réduire la facture des importations et d'atteindre une certaine autonomie en matière d'aliments pour animaux et d'huiles végétales.
- Durabilité agricole : La culture du maïs améliore la fertilité des sols lorsqu'elle est intégrée dans la rotation des cultures. Elle contribue également à la diversification des cultures et à la sécurité alimentaire.

I.1.5. Les facteurs essentiels de la qualité :

- ✓ Teneur en eau 15,5 % maximum Une faible teneur en eau ainsi qu'un Séchage rapide empêchent le Développement des moisissures et des Mycotoxines. Une teneur moindre en Eau peut être exigée pour certaines Destinations, compte tenu du climat, des Durées de transport et de stockage.
- ✓ Souillures : impuretés d'origine Animale (y compris les insectes morts) : 0,1 % maximum.
- ✓ Graines toxiques ou nocives : pas De graines toxiques ou nocives Reconnues dangereuses pour la santé.
- ✓ Les composants organiques autres Que des graines de céréales Comestibles (graines d'autres plantes, Tiges, etc...) ne doivent pas dépasser 1,5 %.

- ✓ Les matières inorganiques (pierres, Poussières, etc...) ne doivent pas Dépasser 0,5% [11].

I.1.6. Stockage :

Les principaux objectifs du stockage sont de permettre une utilisation différée des produits agricoles et de garantir l'approvisionnement régulier et continu des industries de transformation, mais aussi d'équilibrer, sur le plan commercial, l'offre et la demande de produits agricoles, stabilisant ainsi les prix sur le marché [12].

La plupart du temps, le maïs sont stockés dans des sacs pour le transport et pour la vente. Cependant, dans les grands centres de Collecte, dans les ports ou les grands sites de Transformation, le maïs sont stockés en vrac dans des Dépôts ou dans des silos ; ces grandes installations peuvent Contenir jusqu'à 15 000 mètres cubes de grains, soit l'équivalent De 5 piscines olympiques. Elles nécessitent une ventilation pour Maintenir une température adaptée et surtout un niveau D'humidité faible. Cela peut représenter un coût énergétique non Négligeable : le stockage de 15 000 tonnes de grains en silos Consomme environ 160 000 kW par ans [13].

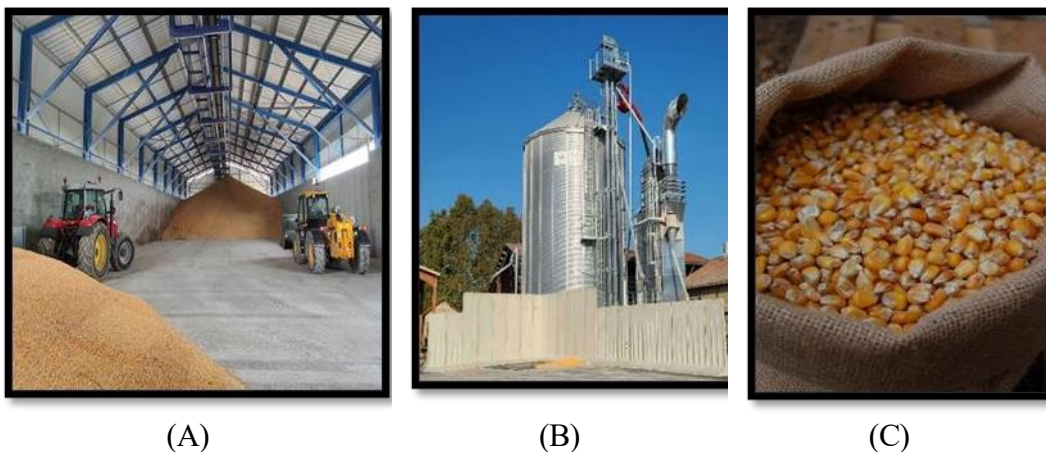


Fig. I.6. Différentes manières de stockage du maïs : (a) en vrac, (b) en silos et (c) en sac.

Pour des raisons pratiques ou économiques, il peut être intéressant de Stocker le maïs à la ferme pendant plus d'une année pour faire la jointure avec la récolte de l'automne suivant. En conséquence, le stock est soumis à l'élévation des températures estivales. En maîtrisant bien la température de la Masse des grains correctement séchés, Leurs qualités commerciales, Technologiques et sanitaires ne sont pas altérées [14].

- ✓ Humidité : Le taux d'humidité du maïs doit être contrôlé. Pour un stockage à long terme, il est généralement recommandé de ne pas dépasser 14% d'humidité. Un taux d'humidité trop élevé peut favoriser la croissance de moisissures et autres agents pathogènes.

- ✓ **Température** : Une température fraîche est idéale pour le stockage. Idéalement, le maïs devrait être stocké à des températures inférieures à 15 °C. Dans des conditions plus chaudes, le risque de détérioration augmente.
- ✓ **Ventilation** : Une bonne circulation de l'air est essentielle pour éviter l'accumulation d'humidité et de chaleur. Les silos doivent être conçus pour permettre une bonne ventilation.
- ✓ **Propreté** : Avant de stocker le maïs, il est important de s'assurer que les silos, bacs ou sacs de stockage sont propres et exempts de résidus de cultures précédentes qui pourraient transmettre des maladies ou des insectes.
- ✓ **Contrôle des nuisibles** : Des mesures doivent être prises pour prévenir les infestations d'insectes et de rongeurs. Cela peut inclure l'utilisation de pièges, de traitements appropriés et des surveillances régulières.
- ✓ **Silo hermétique** : Le stockage dans des conditions hermétiques peut aider à conserver le maïs plus longtemps en limitant l'entrée d'air et d'humidité.
- ✓ **Surveillance** : Il est important de surveiller régulièrement les conditions de stockage et de vérifier l'état du maïs pour détecter tout signe de détérioration.

I.1.7. Séchage

Après la récolte et le battage, les grains de maïs ont généralement une teneur en eau élevée, qui favorise le développement de moisissures ou de bactéries. Il faut donc les sécher. Cette étape est aussi appelée dessiccation.

Il existe plusieurs méthodes de séchage du maïs : le séchage naturel sur pied, le séchage en épis et le séchage en grain.

- ✓ **Le séchage naturel sur pied** : consiste à laisser sécher le maïs sur pied, c'est-à-dire avant la récolte, plusieurs semaines après qu'il a atteint sa maturité. Cette méthode simple a des inconvénients majeurs : le maïs reste dans les champs, ce qui retarde la préparation du sol pour une autre culture, et les épis risquent d'être attaqués par les rongeurs, les oiseaux et les insectes.
- ✓ **Pour éviter ces inconvénients, la technique de séchage du maïs en épis se fait après la récolte.** Les épis sont suspendus dans un milieu aéré. Il est fréquent que la ventilation naturelle ne suffise pas, surtout dans les régions humides, ce qui nécessite l'utilisation d'une ventilation artificielle.

- ✓ Le séchage du maïs en grain : se fait après l'égrenage, souvent Avec des séchoirs artificiels, parce que le maïs grain humide se Détérioré très rapidement s'il n'est pas séché. Cette méthode Permet de faire sécher de grandes quantités de maïs dans des Délais assez courts [15].

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

- ✓ **Humidité** : L'humidité est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans l'air ou dans une substance Dans l'air elle peut se mesurer grâce à un hygromètre à cheveu ou numérique et s'exprime en pourcentage le plus souvent [16].
- ✓ **Humidité relative (Hr)** : Le rapport entre la pression de la vapeur d'eau dans l'air (P_v) et la pression de saturation de la vapeur d'eau à la température θ est connu sous le nom d'humidité relative [17]

$$Hr = \frac{P_v}{P_s} \quad (I.1)$$

- ✓ **Humidité absolue (Ha)** : Le rapport de la masse de vapeur d'eau (M_{ve}) contenue dans un volume (V) d'air humide Par rapport à la masse d'air sec (M_{as}), contenue dans le même volume est appelé humidité Spécifique, également appelée teneur en eau [18].

$$Ha = \frac{M_{ve}}{M_{as}} \quad (I.2)$$

- ✓ **Degré de saturation** : La valeur d'humidité d'un gaz est H_a à une certaine température et la valeur d'humidité d'un gaz est H_{as} à la même température. Le rapport d'un gaz est exprimé par son degré de saturation [19].

$$\psi = \frac{H_a}{H_{as}} \quad (I.3)$$

- ✓ **Température caractéristique de l'air humide** : Aussi appelé température humide, ces deux termes désignent un indice qui prend en compte à la fois la chaleur et l'humidité. Ainsi, une température humide élevée correspond à un air très chargé en humidité [19].

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

Si le produit est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure, l'activité de l'eau AW est identique à l'humidité relative d'équilibre $AW = HRE$). Elle est définie comme suit [20]:

$$Aw = P_v/P_s = (HR)\% / 100 \quad (I.4)$$

Avec :

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

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

Hr : Humidité relative de l'air (%).

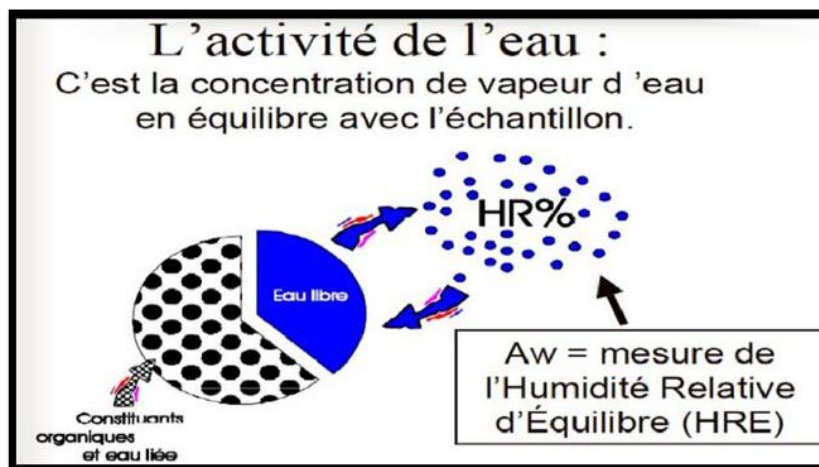


Fig. I.7. Représentation graphique de l'activité de l'eau [21].

L'activité de l'eau (AW) est la mesure du degré de liberté de l'eau retenue dans diverses façons dans un produit hygroscopique. L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, Chimiques et microbiologiques d'un matériau hygroscopique. La figure illustre l'importance de cette notion d'activité de l'eau dans un produit pour la conservation des denrées alimentaires [21].

- ✓ Pour $AW < 0,9$, la plupart des bactéries nocives cessent de croître dans le produit donné
- ✓ Pour $AW < 0,8$, beaucoup d'enzymes sont inactives
- ✓ Pour $AW < 0,75$, la prolifération des bactéries halophiles est arrêtée
- ✓ Pour $0,8 < AW < 0,7$, 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 d'eau (Aw) comprises entre 0,25 et 0,35 [22].

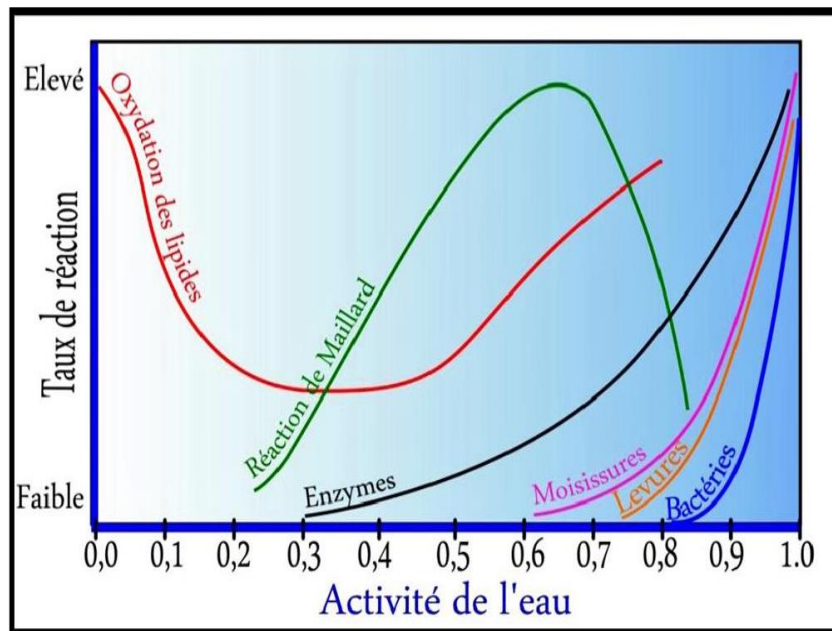


Fig. I.8. Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau [22].

I.4. Teneur en eau d'équilibre :

La teneur en eau d'équilibre d'un matériau hygroscopique où l'humidité absolue est définie par la masse quantité d'eau contenue dans un produit, exprimée en pourcentage de la masse sèche de ce produit. Cette valeur est importante pour tous les produits vendus au poids [23].

$$X_{eq} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (I.5)$$

Avec :

- X_{eq} : Teneur en eau d'équilibre (%)
- M_s : Masse sèche (kg)
- M_h : Masse humide (kg).

I.5. Isothermes de sorption :

I.5.1. Définition :

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

La courbe représentant pour une température donnée la teneur en eau X d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau AW ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HRE est appelée [24] :

- **Isothermes d'adsorption** si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec. Il existe deux types de processus d'adsorption : adsorption physique ou physisorption et adsorption chimique ou chimisorption.

Tableau I.1. Les principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique [24].

Propriété	Adsorption physique	Adsorption chimique
Type de liaison	Liaison de Van Der Waals	Liaison chimique
Température de processus	Relativement faible comparé à la température d'ébullition de l'adsorbat	Plus élevée que la température d'ébullition de l'adsorbat
Individualité des molécules	L'individualité des molécules est conservée	Destruction de l'individualité des molécules
Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide, indépendante de la température	Très lente
Chaleur d'adsorption	Inférieur à 10 Kcal/mole	Supérieur à 10 Kcal/mole
Energies mises en jeu	Faibles	Elevées
Types de formation	Formation en multicouches et monocouche	Formation en monocouche

- **Isothermes de désorption** si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un Produit saturé en eau. La figure (**Fig. I.10**) montre que les deux courbes sont en général différentes car le séchage D'un produit (passage de $AW = 1$ à $AW < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de Porosité. Il y a un phénomène d'hystérésis.

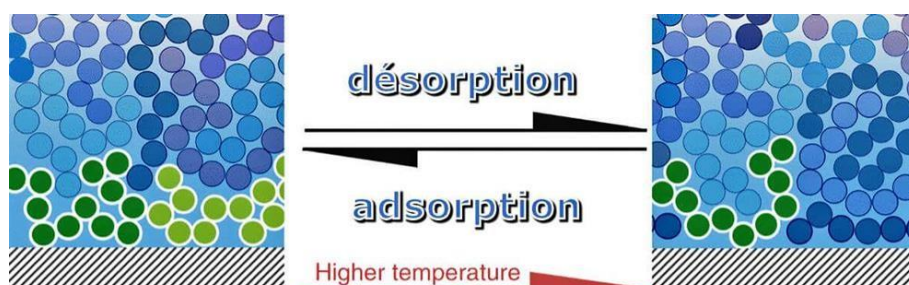


Fig. I.9. Figure de comparaison entre adsorption/désorption [24].

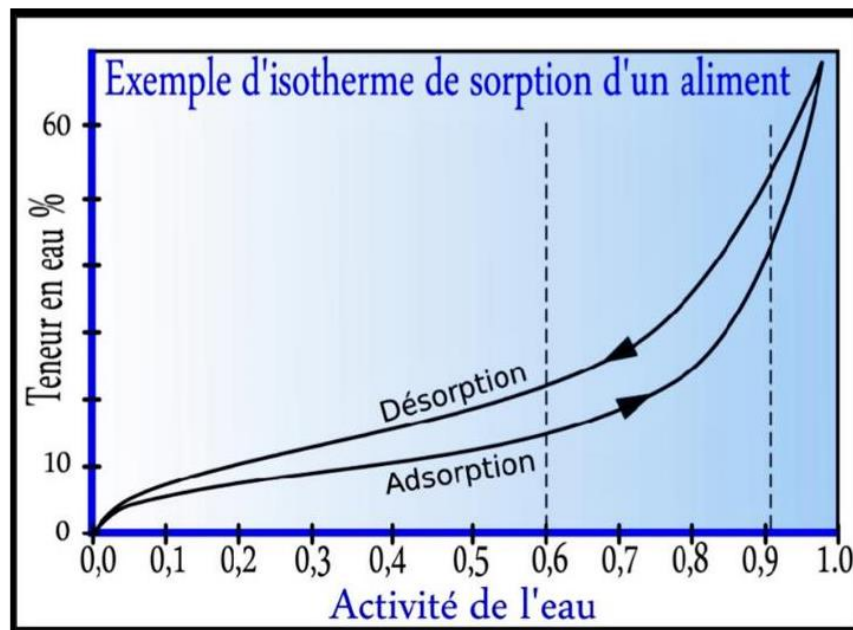


Fig. I.10. Isothermes de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis [24].

I.5.2. Forme générale des isothermes :

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones (**Fig. I.11**) chaque zone correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit :

- ❖ Zone 1 : Constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit. Elle est caractéristique de l'action des forces de Van Der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe et les surfaces des pores du produit. L'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.
- ❖ Zone 2 : Adsorption des molécules sur la monocouche initiale. L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.
- ❖ Zone 3 : L'eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les Pores du matériau. L'eau micro capillaire constitue une phase continue [25]

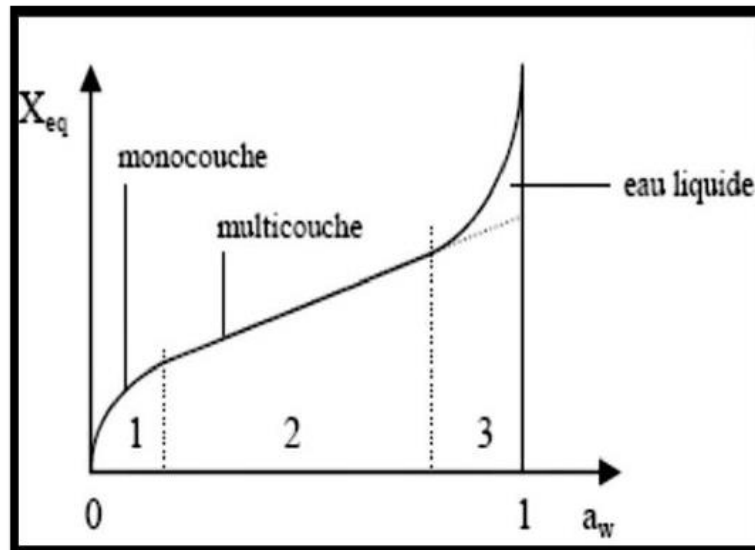


Fig. I.11. Forme générale des isothermes [25].

I.5.3. Les méthodes d'obtention des Isothermes de sorption :

Les procédures d'obtention des isothermes de sorption de l'eau des produits Agroalimentaire sont décrites différemment en détail par plusieurs auteurs, et cela en Fonction de leur entendement (Ahouannouetal., 2010). Parmi ces procédures, on utilise soit Des méthodes manométriques, soit hygrométriques ou encore gravimétriques (dynamique Et statique) (Nkouam, 2007). D'autres méthodes utilisent les humidificateurs mécaniques et Des dessiccateurs [26].

➤ Les méthodes manométriques :

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

Cette méthode présente les inconvénients des gradients de température, des Changements de valeur de l'Aw par vaporisation et l'incompatibilité avec les aliments Volatiles ou en processus de respiration [26].

➤ Les méthodes hygrométriques :

On retrouve : les mesures du point de rosée et de dépression du bulbe humide à l'aide Des hygromètres à cheveux et électriques permettant de mesurer l'activité de l'eau. Pour ce qui est de la

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

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

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

Quant aux hygromètres à cheveux, après calibrage, donne une indication de l'humidité Relative du milieu ambiant. Cette mesure indirecte de l'Aw est peu précise, surtout à des Humidités relatives élevées [26].

➤ **Les méthodes gravimétriques :**

Pour Jannot (2008), ce sont des méthodes quantitatives qui sont basées sur des mesures de masse d'un composé. Le principe d'obtention d'un point de l'isotherme est le suivant :

On place un échantillon du produit dans une enceinte maintenue à température T et à humidité relative d'équilibre HRE de l'air constante. L'échantillon est pesé à intervalle régulier jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, il est alors en équilibre avec l'air à (T, HRE) . Connaissant sa masse humide, il suffit alors de déterminer sa masse sèche pour en Dédire sa teneur en eau X_{eq} , le couple (HR, X_{eq}) , ce qui fournit un point de l'isotherme D'adsorption ou de désorption. On distingue les méthodes gravimétriques statique et dynamique.

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

La température est maintenue constante en plaçant les récipients dans une enceinte thermostatée. Et on utilise autant de sels ou de concentration d'acides différents (et donc de récipients) que l'on veut obtenir des points sur l'isotherme. Toutefois, cette méthode est très longue car l'équilibre air/produit n'est parfois atteint qu'après plusieurs semaines [26].

Dans les méthodes gravimétriques dynamiques, un courant gazeux est conditionné par un Dispositif humidificateur avant d'atteindre l'échantillon. L'appareil est principalement Constitué d'un cylindre calibré dans lequel évolue un piston et d'une éprouvette dans Laquelle on place l'échantillon dont on veut mesurer la courbe de sorption. On rencontre Egalement dans cette catégorie des appareils comportant une balance électronique Incorporée, qui donnent en continu les mesures de la masse de l'échantillon.

I.5.4. Modélisation des isothermes de sorption :

Plusieurs modèles mathématiques, relations empiriques reposant sur des bases plus ou Moins physiques, décrivent la relation entre la teneur en eau d'équilibre, l'humidité Relative d'équilibre et la température. Huit modèles différents trouvés dans la littérature Peuvent être étudié : Henderson modifié, Chung-Pfost modifié, Oswin modifié, Halsey Modifié, GAB, Peleg, Langmuir, et BET modifié. Le but est de déterminer le ou les modèles Les plus adéquats pour la description des isothermes de sorption de notre produit [27].

Tableau I.2. : Les modèles utilisés dans les isothermes de sorption [27].

Auteurs	Équation de modèle	Référence	Domain de validité les courbes
Henderson Modifié	$1 - a_w = \exp [-k. (T + n). X_{eq}^c]$	[28]	Complète
Chung-pfost Modifié	$a_w = \exp \left[\frac{-A}{T + B} \exp (-C. X_{eq}) \right]$	[29]	Complète
Oswin modifié	$X_{eq} = (A + BT) \left[\frac{a_w^c}{1 - a_w} \right]$	[28]	Complète
Halsey modifié	$a_w = \exp \left[\frac{-\exp (A + BT)}{X_{eq}^c} \right]$	[30]	Complète
GAB	$X_{eq} = \exp \left[\frac{A. B. C. a_w}{[1 - B. a_w][1 - B. a_w + B. C. a_w]} \right]$	[31]	Complète
Peleg	$X_{eq} = A. a_w^{k1} + B. a_w^{k2}$	[32]	Complète
Langmuir	$X_{eq} = \frac{1}{[A + B. a_w^{c-1}]}$	[33]	Complète
BET modifié	$X_{eq} = \frac{(A + BT)C. a_w}{[1 - a_w][1 - a_w + C. a_w]}$	[34]	Zone1

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

I.5.5. Intérêt des Isothermes :

Les isothermes ont comme intérêt de :

- ✓ Prévoir l'activité de l'eau AW en fonction de la teneur en eau.
- ✓ Prévoir l'évolution de l'activité de l'eau AW en fonction de la modification de la Teneur en eau (hydratation, déshydratation) ou du passage, pour les denrées sucrées (confiserie), du sucre de l'état amorphe à l'état cristallisé.
- ✓ Prévoir l'activité de l'eau AW à l'équilibre dans le cas de mélanges complexes de Produits plus ou moins complètement déshydratés (préparations pour potages, soupes, Ketchup).
- ✓ Décider du mode de conditionnement emballage pour une denrée en fonction de L'humidité relative de l'atmosphère dans laquelle elle est maintenue.
- ✓ Donner les conditions (température, HRE) qui protège le mieux les produits alimentaires lors de la conservation.
- ✓ Prédire et prévenir les phénomènes de dégradation lors du stockage de l'aliment. Cependant, de par la complexité des phénomènes de sorption, les isothermes de Sorption ne peuvent pas être prédites par la théorie mais doivent être établies Expérimentalement pour un produit quelconque.[27]

I.6. isostérique de sorption

Chaleur L'idée de VantHoff, selon le Chatelier, à une concentration en eau constante, la pression De vapeur saturante diminue à mesure que la température augmente. Ainsi, il est envisageable De déterminer la chaleur isostérique, qui correspond à l'énergie nécessaire pour fixer l'eau au Substrat. Ainsi, il est nécessaire de fournir une chaleur supplémentaire à la chaleur de Vaporisation de l'eau pure afin de déshydrater le produit. Les courbes de sorption obtenues à Différentes températures et l'équation de Clausius-Clapeyron peuvent être utilisées pour calculer Q_{st} [27].

$$\partial \ln(a_w) / \partial (T) = Q_{st} / RT^2 \quad (I.6)$$

En prenant en compte l'équation (1), on trouve :

$$\ln(a_w) = -(Q_{st}/R)1/T + K \quad (I.7)$$

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

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

Selon C. T. Kiranoudis et al. (1993), la valeur de Q_{st} (kJ/mol) augmente habituellement à mesure que le degré de déshydratation augmente.

I.7. Enthalpie et entropie différentielle de sorption :

La différence entre l'énergie totale requise pour extraire de l'eau du produit alimentaire (Q_{st}) et l'énergie totale requise pour vaporiser l'eau normale (ΔH_V) est connue sous le nom d'enthalpie différentielle ou chaleur nette isostérique de sorption (ΔH_{is}) : [35]

$$\Delta H_{is} = Q_{st} - \Delta H_V \quad (I.8)$$

Les isothermes de sorption à différentes températures peuvent être déduites de la chaleur [35,36]

$$\Delta H_{is} = -R \left(\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (T-1)} \right) \quad (I.9)$$

Les résultats de cette équation sont exacts uniquement pour les aspects qualitatifs des Propriétés thermodynamiques, car elles peuvent être très erronées en raison des manipulations Graphiques et des données expérimentales.

En prenant en compte l'équation et en supposant que la chaleur nette isostérique de sorption ΔH_{is} est indépendante de la température, on obtient : [36]

$$\ln(a_w) = - (\Delta H_{is} / R) 1/T + \text{cst} \quad (I.10)$$

L'augmentation de la teneur en humidité entraîne une diminution significative de la Chaleur nette isostérique de sorption. Afin d'illustrer la corrélation empirique exponentielle Entre la chaleur nette isostérique de sorption et la teneur en eau d'équilibre, on peut observer la Corrélation suivante [36,37] :

$$\Delta H_{is} = q_0 \cdot \exp(-X/X_0) \quad (I.11)$$

Conclusion :

En conclusion, les isothermes de sorption constituent un outil indispensable pour maîtriser les propriétés hygroscopiques des produits agroalimentaires. Elles offrent des informations précieuses sur le comportement de l'eau dans ces produits, permettant d'optimiser leur séchage, leur stockage et leur conservation. Les modèles mathématiques, bien que variés et parfois complexes, facilitent l'analyse et la prédiction des phénomènes de sorption. Ainsi, une compréhension approfondie de ces isothermes contribue à améliorer la qualité et la durabilité des denrées alimentaires, tout en réduisant les pertes post-récolte.

Références bibliographiques

- [1]. Bizot, H., Riou, N., & Multan, J.-L. (1987). Guide pratique pour la détermination des isothermes de sorption et de l'activité de l'eau. Sciences des Aliments, (numéro hors-série).
- [2]. Kalengi, H. (2014). Détermination des isothermes de sorption (adsorption-désorption) : Cas de L'aubergine (*Solanum melongena* L.). Thèse de doctorat, Université de Kinshasa.
- [3]. Touati, B. (2008). Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*). Thèse de doctorat, Département de Physique, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen.
- [4]. Boughali, S. (2010). Étude et optimisation du séchage solaire des produits agroalimentaires dans les zones arides et désertiques. Thèse de doctorat, Université de Batna 2.
- [5]. Heldman, R., Lund, D. B., & Sabliov, C. (2006). Handbook of food engineering. CRC Press.
- [6]. Bonazzi, C., Dumoulin, E., & Bimbenet, J. J. (2008). Le séchage des produits alimentaires. Industrie Alimentaire Agricole, 125, 12–22.
- [7]. Souheyla, K. (2018). 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.
- [8]. Chouicha, S. (2010). Etude expérimentale du séchage solaire des maïs humides et impact sur la qualité (Mémoire de Master). Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [9]. Hamadi, A., & Hamzaoui, Z. (2021). L'étude de séchage solaire d'une plante médicinale de la région d'Adrar (Mémoire de Master). Université Ahmed Draia, Adrar.
- [10]. Lahachami, Benabdelkrim, & Bahmmaoui. (2023). Etude de la qualité fongique du maïs tendre stocké traditionnellement dans la région de Tidikelt «Aoulef».
- [11]. Ben Djelloul, W. (2019). 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
- [12]. Aviara, A. A. (2020). Moisture sorption isotherms and isotherm model performance evaluation for food and agricultural products. IntechOpen.
- [13]. Afrique Verte. (2004). Module de formation sur les techniques de stockage et de conservation des céréales.

- [14]. Syamaladevi, R. M., Sablani, S. S., Tang, J., Powers, J., & Swanson, B. G. (2002). State diagram and water adsorption isotherm of raspberry (*Rubus idaeus*). *Journal of Food*.
- [15]. Nouha, C., & Gagui, M. (2017). Modélisation de séchage solaire de pomme de terre et amélioration de rendement thermique (Mémoire de Master). Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [16]. Ben Ammar, R., & Gouri, K. (2018). Séchage solaire des produits agricoles. Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [17]. Houhou, H. (2012). Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agroalimentaires (Mémoire). Université Mohamed Khider, Biskra.
- [18]. Benalia, E. (2014). Exploitation de la source thermique de l'eau Albien dans le séchage solaire des produits agro-alimentaires (Mémoire de Master). Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [19]. Benbahi, M., & Morakchi, B. (2020). Bilan thermique d'un sécheur de tomate de type à tambour rotatif. Mémoire de Master. Université Belhadj Bouchaïb, Aïn Témouchent.
- [20]. Touati, B. (2008). Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte.
- [21]. Rizvi, S. H. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In M. A. Rao & S. S. H. Rizvi (Eds.), *Engineering properties of food* (pp. 140–164). Marcel Dekker.
- [22]. Marín, S., Ramos, A. J., Cano-Sancho, G., & Sanchis, V. (2004). Mycotoxins: Occurrence, toxicology, and exposure assessment. *Food and Chemical Toxicology*, 42(2), 211–220.
- [23]. [23]: Rao, M. A., & Rizvi, S. S. H. (Eds.). (1994). *Engineering properties of food*. Marcel Dekker.
- [24]. Cheftel, J. C., Cheftel, H., & Besançon, P. (1983). Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments (Vol. 2, pp. 167–198, 201–204, 210). Techniques et Documentation – Lavoisier.
- [25]. Jannot, Y. (2008). Isothermes de sorption : Modèles et détermination. Consulté le 24 décembre 2020, à partir de [URL].
- [26]. Williams, G. (2007). Conservation des fruits du karité (*Vitellaria paradoxa* Gaertn.) et de l'aiété (*Canarium schweinfurthii* Engl.) : Isothermes de sorption d'eau et extraction des matières grasses des fruits stockés (Thèse de doctorat). Université de Ngaoundéré.

- [27]. Mbwalala, K. (2014). Détermination des isothermes de sorption (adsorption-désorption) : Cas de l'aubergine (*Solanum melongena* L.) [Mémoire d'ingénieur agronome, Université de Kinshasa].
- [28]. Quirijns, E. J., van Boxtel, A. J. B., van Loon, W. K. P., & van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(11), 1805–1814.
- [29]. Iglesias, H. A., & Chirife, J. (1976). On the local isotherm concept and modes of moisture binding in food products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 24(1), 24–77.
- [30]. Oswin, C. R. (1946). The kinetics of package life. III. Isotherm. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 65(12), 419–421.
- [31]. Thompson, T. L., Peart, R. M., & Foster, G. H. (1968). Mathematical simulation of corn drying: A new model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 11(4), 582–586.
- [32]. Pfost, H. B., Mourer, S. G., Chung, D. S., & Milliken, G. A. (1976). Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains (Paper No. 76-3520). American Society of Agricultural Engineers.
- [33]. Langmuir, I. (1916). The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I: Solids. *Journal of the American Chemical Society*, 38(11), 2221–2295.
- [34]. Peleg, M. (1993). Assessment of semi-empirical four parameters general model for sigmoid sorption isotherm. *Journal of Food Processing Engineering*, 16 (1), 21–37.
- [35]. Van den Berg, C. (1984). Description of water activity for food engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In B. M. McKenna (Ed.), *Engineering and foods* (pp. xx–xx). Elsevier.
- [36]. Hunter, A. J. (1991). On the basic equation of sorption and the isosteric heat. *Wood Science and Technology*, 25(2), 99–111.
- [37]. Tsami, E., Maroulis, Z. B., Morunos-Kouris, D., & Saravacos, G. D. (1990). Heat of sorption of water in dried fruits. *International Journal of Food Science & Technology*, 25 (4), 350–359.

Chapitre II :
Revue de littérature

II.1 Introduction

Ce chapitre présente une synthèse des études récentes portant sur les isothermes de sorption du maïs et de ses dérivés, un aspect crucial pour comprendre leur comportement hygroscopique et optimiser leurs conditions de stockage et de transformation. Les recherches analysées explorent les propriétés thermodynamiques, les modèles mathématiques utilisés pour décrire ces phénomènes, ainsi que l'impact des méthodes de séchage et des enrichissements nutritionnels. Ces travaux fournissent des données essentielles pour améliorer la conservation des produits à base de maïs, tout en mettant en lumière les avancées méthodologiques, comme l'utilisation des réseaux de neurones artificiels.

II.2 Études sur les isothermes de sorption du maïs

L'étude menée par **O.A. Oladeji et al. (2024)** [1] présente les propriétés de sorption d'humidité ainsi que les fonctions thermodynamiques d'un produit alimentaire traditionnel, l'ogi de maïs blanc enrichi en graines de *Moringa oleifera*, ont été analysées afin d'évaluer son comportement au cours du stockage. L'étude a porté sur des isothermes de sorption déterminées à trois températures (28 ± 2 °C, 35 °C et 40 °C) pour des activités de l'eau comprises entre 0,1 et 0,8, en utilisant la méthode gravimétrique. Quatre modèles mathématiques (GAB, BET, Hasley et Oswin) ont été appliqués pour modéliser les données expérimentales, parmi lesquels les modèles de GAB et d'Oswin ont fourni les meilleurs ajustements statistiques ($r^2 > 0,97$; $E < 10$ %). Les isothermes obtenues étaient de type II, caractéristiques des produits alimentaires hygroscopiques, et ont montré une humidité d'équilibre décroissante avec l'augmentation de la température à activité de l'eau constante. Par ailleurs, l'enrichissement en graines de *Moringa*, notamment fermentées, a eu un impact significatif sur les propriétés hygroscopiques de l'ogi, augmentant notamment la teneur en humidité monomoléculaire (Mo) et l'énergie requise pour désorber l'eau liée. L'analyse thermodynamique, fondée sur l'équation de Clausius-Clapeyron, a permis de mieux comprendre l'interaction eau-matière et les exigences énergétiques du processus de séchage. Ces résultats offrent des données essentielles pour la conception et l'optimisation des conditions de stockage et de transformation de ce produit enrichi.

L'étude intitulé 'Sorption behavior and isosteric heat of maize-millet based protein enriched extruded product' présenté par **R.K. Gupta et ses collaborateurs (2023)** [2] vise à

comprendre le comportement hygroscopique et énergétique d'un produit extrudé formulé à partir de maïs, de millet et enrichi en protéines, destiné à améliorer la valeur nutritionnelle des aliments transformés. Les auteurs ont analysé les isothermes de sorption à trois températures (25, 35 et 45 °C) en utilisant des méthodes statiques de sorption d'humidité et ont modélisé les données à l'aide de différents modèles empiriques et semi-théoriques, tels que GAB, Peleg, Caurie, Smith, et Oswin. Les résultats indiquent que les isothermes obtenues sont de type II (sigmoïde), typique des produits alimentaires contenant des hydrates de carbone et des protéines. Cela signifie que le produit a une forte capacité d'adsorption d'eau à faible humidité relative, puis une augmentation plus progressive à des humidités plus élevées. Le modèle de GAB s'est avéré le plus approprié pour représenter le comportement de sorption sur toute la plage d'activité de l'eau. Par ailleurs, l'énergie isostérique nette de sorption, calculée par la relation de Clausius-Clapeyron, a montré une diminution avec l'augmentation de la teneur en humidité, ce qui suggère que les sites à haute énergie d'adsorption sont occupés en premier. Ces résultats sont cruciaux pour le développement de stratégies de conditionnement, de stockage et de durée de conservation, car la maîtrise des propriétés de sorption permet de minimiser les risques d'altération du produit, notamment par croissance microbienne ou pertes de texture. De plus, l'enrichissement en protéines et la formulation à base de céréales locales comme le millet en font un produit alimentaire fonctionnel intéressant pour les populations en zones rurales ou dans les contextes de malnutrition.

D. Choque-Quispe et al. (2021) [3] ont étudié les propriétés thermodynamiques et les conditions de stockage optimales pour le maïs violet de la variété Canterio, en analysant les isothermes d'adsorption à 18, 25 et 30 °C pour des humidités relatives d'équilibre (ERH) comprises entre 0,065 et 0,95. Les isothermes présentent un croisement autour de 75 % d'ERH et 17 % d'humidité d'équilibre (X_e), indiquant des conditions de stockage adéquates à ces valeurs. Les modèles GAB et Halsey, avec des coefficients de détermination (R^2) supérieurs à 97 %, une erreur absolue moyenne (MAE) inférieure à 10 % et une dispersion aléatoire des résidus, s'ajustent mieux aux données expérimentales. Les paramètres thermodynamiques révèlent que la chaleur isostérique d'adsorption (q_{st}) diminue avec l'augmentation de X_e (de 7,7022 à 0,0165 kJ/g), tandis que l'énergie libre de Gibbs (ΔG) montre un comportement endergonique non spontané, corrélé linéairement à l'entropie différentielle (ΔS), confirmant la théorie isocinétique. L'énergie d'activation (E_a) indique que davantage d'énergie est nécessaire pour éliminer les molécules d'eau des couches supérieures liées à la monocouche. Ces résultats mettent en évidence la stabilité

structurale des grains de maïs violet pendant le stockage et fournissent des informations essentielles pour la conception d'équipements de séchage et de conservation.

A. Ali et al. (2021) [4] ont étudié les caractéristiques de sorption d'humidité et les propriétés thermodynamiques de mélanges à base de maïs et de millet, dans le but de mieux comprendre leur comportement hygroscopique en fonction des conditions de stockage. Les isothermes d'adsorption ont été établies à différentes températures (20, 30 et 40 °C) et pour des activités de l'eau variant de 0,113 à 0,898, en utilisant la méthode gravimétrique statique. Les résultats ont montré des isothermes de type II selon la classification de Brunauer, typiques des matériaux alimentaires hygroscopiques. L'humidité d'équilibre a diminué avec l'augmentation de la température, traduisant un comportement endothermique du processus d'adsorption. Plusieurs modèles mathématiques, dont ceux de GAB, Peleg, Henderson et Oswin, ont été utilisés pour modéliser les données expérimentales. Parmi eux, le modèle de GAB s'est révélé le plus performant, avec des coefficients de détermination élevés ($r^2 > 0,98$) et des erreurs relatives faibles. Sur le plan thermodynamique, les enthalpies nettes isostériques de sorption ont été déterminées par la méthode de Clausius-Clapeyron, montrant une diminution avec l'augmentation de l'humidité d'équilibre, ce qui indique une liaison plus forte de l'eau à faibles humidités. Ces résultats soulignent l'importance de la compréhension fine du comportement hygroscopique des mélanges céréaliers pour optimiser les procédés de séchage, d'emballage et de stockage des produits alimentaires.

L'étude de K.N. Kouassi et al. (2020) [5] présente une analyse approfondie des propriétés de sorption des sous-produits du maïs, en fonction des différentes méthodes de séchage utilisées. Les chercheurs ont utilisé plusieurs techniques expérimentales pour évaluer l'absorption d'humidité de ces sous-produits, notamment en mesurant l'équilibre hygroscopique et en appliquant des modèles mathématiques pour décrire le comportement de sorption. Les sous-produits du maïs, tels que les tiges, les feuilles et les épis, ont été séchés en utilisant diverses méthodes, comme le séchage à l'air, au four, et par des procédés plus modernes comme le séchage par micro-ondes. Chaque méthode de séchage a un impact spécifique sur les caractéristiques physiques et chimiques des sous-produits, et par conséquent sur leur capacité à adsorber l'humidité. Les résultats ont montré que les différentes méthodes influencent significativement la courbe de sorption, qui est cruciale pour les applications de stockage et de gestion de ces matériaux. Les

modèles de sorption utilisés dans l'étude sont basés sur des équations mathématiques qui tentent de décrire la relation entre la température, l'humidité relative et la capacité d'adsorption des sous-produits. Parmi les modèles appliqués, les auteurs ont mentionné des modèles classiques tels que le modèle de BET (Brunauer-Emmett-Teller), ainsi que d'autres approches adaptées aux conditions spécifiques des sous-produits du maïs. Les résultats de l'étude sont pertinents pour l'industrie agroalimentaire et les secteurs de la gestion des ressources agricoles, notamment en ce qui concerne l'optimisation du séchage des sous-produits pour leur conservation, leur transformation ou leur utilisation dans des processus comme la fabrication d'aliments pour animaux ou comme biomasse pour la production d'énergie. L'étude souligne aussi l'importance de choisir la méthode de séchage la plus appropriée pour maximiser l'efficacité de la conservation et la qualité des sous-produits du maïs.

Dans son étude, **A. Talla (2014)** [6] s'est intéressé à la prédiction des isothermes de sorption ainsi qu'à la détermination des chaleurs isostériques nettes de sorption pour les grains de maïs. Les expériences ont été conduites à des températures de 20, 30, 40 et 50 °C et pour des activités de l'eau comprises entre 0,10 et 0,90, en appliquant la méthode gravimétrique statique. Les résultats ont montré des isothermes d'adsorption de type II, caractéristiques des produits alimentaires hygroscopiques, avec une humidité d'équilibre diminuant à mesure que la température augmente. Cinq modèles mathématiques ont été évalués (GAB, BET, Henderson, Halsey et Oswin), parmi lesquels le modèle de GAB a présenté le meilleur ajustement, offrant les coefficients de détermination les plus élevés ($r^2 > 0,99$) et les plus faibles erreurs relatives. L'étude a également porté sur l'évaluation des propriétés thermodynamiques par le biais de l'équation de Clausius-Clapeyron, permettant de calculer la chaleur isostérique nette de sorption. Cette dernière a montré une diminution avec l'augmentation de l'humidité d'équilibre, traduisant une interaction plus forte entre l'eau et les sites de sorption à faible teneur en eau. Ces résultats sont cruciaux pour la modélisation des procédés de séchage, la conception d'emballages adaptés et la garantie de la stabilité des grains de maïs durant le stockage.

Dans le cadre de l'optimisation des conditions de stockage et de séchage du maïs, **M. Aghbashlo et ses collaborateurs (2010)** [7] ont mené une étude approfondie sur les isothermes de sorption d'humidité et les propriétés thermodynamiques du maïs en grains. Les expériences ont été réalisées pour des températures de 25, 35, 45 et 55 °C et pour des activités de l'eau comprises

entre 0,112 et 0,898, en utilisant la méthode gravimétrique statique. Les isothermes obtenues étaient de type II selon la classification de Brunauer, reflétant le caractère hygroscopique du produit. Cinq modèles empiriques et semi-empiriques (GAB, Henderson, Peleg, Smith et Oswin) ont été utilisés pour ajuster les données expérimentales. Le modèle de GAB a montré les meilleures performances statistiques, avec un coefficient de détermination élevé ($r^2 > 0,99$) et une faible erreur quadratique moyenne, confirmant sa pertinence pour modéliser le comportement hygroscopique du maïs. Par ailleurs, l'analyse thermodynamique basée sur l'équation de Clausius-Clapeyron a permis de calculer l'enthalpie isostérique nette de sorption, laquelle a diminué avec l'augmentation de l'humidité d'équilibre, indiquant que les interactions eau-matière sont plus fortes à faible humidité. Ces résultats sont essentiels pour la conception de procédés de séchage contrôlés, la prédiction de la durée de conservation et la gestion de la qualité des grains de maïs pendant le stockage.

L'étude de **R.A. Chayjan, M. Esna-Ashari (2010)** [8] se concentre sur la modélisation des propriétés thermodynamiques de sorption du maïs hybride, en particulier la chaleur isostérique nette et l'entropie associée à l'adsorption d'humidité. Les auteurs ont conduit des expérimentations pour déterminer les isothermes de sorption à différentes températures (30, 40, 50 et 60 °C), puis ont analysé les données à l'aide de la relation de Clausius-Clapeyron afin de calculer les paramètres thermodynamiques. Ces paramètres sont essentiels pour comprendre l'énergie requise pour retirer ou adsorber l'eau dans les grains de maïs pendant les processus de séchage et de stockage. La nouveauté de cette recherche réside dans l'application de réseaux de neurones artificiels (ANN, Artificial Neural Networks) pour modéliser les relations complexes entre la teneur en humidité, la température, la chaleur isostérique et l'entropie. Les résultats ont été comparés à des modèles traditionnels pour valider la précision des prédictions. Le modèle ANN a montré une meilleure performance, avec une capacité à capturer les non-linéarités du système et à fournir des estimations fiables, même en dehors des plages expérimentales. Les auteurs concluent que les réseaux de neurones sont des outils prometteurs pour la modélisation des systèmes complexes en ingénierie agricole, en particulier pour optimiser les conditions de séchage et de stockage des grains. Une compréhension approfondie des propriétés thermodynamiques permet d'améliorer l'efficacité énergétique et de minimiser les pertes de qualité pendant la post-récolte.

L'article "*Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (Zea mays L.)*" par **Oliveira et al. (2010)** [9] étudie les propriétés de désorption et les paramètres thermodynamiques de deux cultivars de maïs doux (BR-402, classique, et BR-400, Supersweet) afin d'optimiser leur séchage et leur stockage. Les isothermes de désorption, déterminées par une méthode dynamique à différentes températures (30–60 °C) et humidités relatives (30–60 %), présentent une forme sigmoïdale typique des matériaux riches en composés hydrophiles, avec une teneur en humidité d'équilibre (X_{eq}) diminuant lorsque la température augmente. Les données expérimentales sont modélisées à l'aide de l'équation GAB (Guggenheim–Anderson–de Boer) et d'un réseau de neurones artificiels (ANN), ce dernier offrant une prédiction unifiée pour les deux cultivars ($R^2=99,19\%$ $R^2=99,19\%$). Le modèle GAB révèle que la teneur en humidité monocouche (X_m), critique pour la stabilité du produit, diminue avec la température (5,16–7,23 % base sèche) et est plus élevée pour le maïs classique, en raison de sa teneur en sucre plus faible. Les propriétés thermodynamiques, incluant la chaleur isostérique de désorption (ΔH_{is}), l'entropie différentielle (ΔS_{is}), l'énergie d'activation (E_a) et l'énergie libre de Gibbs (ΔG), montrent que ΔH et ΔS diminuent avec l'augmentation de l'humidité, tandis que ΔG décroît exponentiellement, indiquant un processus de désorption non spontané. Le cultivar Supersweet, plus riche en sucre, présente une ΔH et une E_a plus élevées, reflétant une liaison plus forte de l'eau nécessitant plus d'énergie pour son élimination. Ces résultats fournissent des bases essentielles pour concevoir des équipements de séchage efficaces et définir des conditions de stockage optimales, limitant les risques de détérioration microbiologique tout en minimisant la consommation énergétique. L'étude souligne également l'importance de la composition chimique, notamment en sucres, dans le comportement hygroscopique des produits agricoles.

L'étude menée par **O.J. Oyelade et al. (2008)** [10], intitulée 'Modelling moisture sorption isotherms for maize flour', se concentre sur la modélisation des isothermes de sorption de l'humidité de la farine de maïs. Ces isothermes décrivent la relation entre l'humidité relative et la quantité d'eau adsorbée ou désorbée par la farine de maïs à différentes températures et humidités relatives. L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle mathématique capable de prédire ces comportements de sorption, ce qui est essentiel pour comprendre et contrôler les conditions de stockage des produits alimentaires comme la farine de maïs, afin de prolonger leur durée de conservation et prévenir leur détérioration. Les chercheurs ont utilisé des expériences de sorption pour mesurer la quantité d'eau absorbée par la farine de maïs dans un environnement

contrôlé, avec des ajustements des variables telles que l'humidité relative et la température. Plusieurs modèles, dont le modèle de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), ont été testés pour évaluer leur précision dans la représentation des données expérimentales. Les résultats ont montré que le modèle de GAB fournissait les meilleures prévisions pour la farine de maïs, ce qui signifie qu'il est particulièrement adapté à la modélisation des isothermes de sorption pour ce produit spécifique. Cette recherche a des applications pratiques importantes pour l'industrie alimentaire, notamment en ce qui concerne la gestion de l'humidité lors du stockage de la farine, afin d'éviter des problèmes tels que la moisissure, la perte de qualité ou la dégradation nutritionnelle. Les auteurs recommandent également que d'autres facteurs comme la température soient pris en compte pour obtenir des prévisions encore plus précises dans des conditions de stockage variées.

La recherche de **P.A. Sopade et al. (2007)** [11] porte principalement sur la modélisation des isothermes de sorption d'humidité pour la farine de maïs., en particulier pour les applications en ingénierie alimentaire, où comprendre l'interaction entre l'humidité et les produits alimentaires est crucial pour leur conservation et leur qualité. Les auteurs ont effectué des expérimentations sur la farine de maïs pour obtenir des données sur l'adsorption et la désorption de l'humidité à différentes températures (25, 35, 45 et 55 °C). Ces données ont été utilisées pour évaluer plusieurs modèles de sorption d'humidité, dont les modèles de GAB (Guggenheim, Anderson et de Boer), BET (Brunauer, Emmett et Teller) et Oswin. Le modèle de GAB a montré les meilleures performances pour décrire les données expérimentales, en particulier à des niveaux d'humidité élevés. Ce modèle prend en compte la formation de plusieurs couches d'adsorption d'humidité, ce qui en fait un modèle adapté pour les matériaux alimentaires hygroscopiques tels que la farine de maïs. En revanche, les modèles BET et Oswin se sont avérés moins précis, bien qu'ils puissent encore être utilisés dans certaines conditions spécifiques. Les résultats ont également montré que l'humidité de l'équilibre augmente avec la température, ce qui est cohérent avec les principes généraux de l'adsorption d'humidité. Cela signifie que la farine de maïs, à température élevée, a une plus grande capacité à retenir l'humidité, ce qui peut avoir des implications pour son stockage. Les auteurs ont souligné l'importance de comprendre ces isothermes pour concevoir des méthodes de stockage plus efficaces, afin de minimiser le risque de détérioration et de prolonger la durée de conservation des produits alimentaires. L'étude a des implications directes pour l'industrie alimentaire, notamment pour la gestion du stockage et du traitement des matières premières, en contribuant à optimiser les conditions de stockage de la farine de maïs et à prévenir les effets indésirables liés à

l'humidité excessive ou insuffisante. En outre, les résultats peuvent être appliqués à d'autres céréales et produits en poudre, fournissant un cadre pour l'optimisation de leur gestion post-récolte.

L'article intitulé "*Sorption Isotherms of Corn—Study of Mathematical Models*" par **G. Boente et al.** (1996) [12] examine les propriétés de sorption d'eau de six variétés autochtones de maïs argentin (Perlita, Capia, Dulce, Dentado Blanco, Pisingallo et Colorado) dans le but d'établir des modèles mathématiques pour prédire leur teneur en humidité en fonction de l'activité de l'eau (a_w), un paramètre crucial pour prévenir la croissance microbienne et la production de mycotoxines pendant le stockage. Les expériences, menées à 25 °C en utilisant la méthode isopiétique avec des solutions salines saturées (a_w variant de 0,60 à 0,90), ont révélé des différences significatives entre les variétés, avec des écarts de teneur en humidité atteignant 20 %. Une analyse statistique approfondie (ANOVA) a permis de regrouper les variétés en fonction de leurs similarités, notamment Pisingallo et Colorado qui présentent des comportements comparables. Parmi les 19 modèles mathématiques testés (dont ceux de Bradley, Hailwood & Horrobin, Chen, Halsey et Oswin), les équations de Hailwood & Horrobin, Chen et polynomiale se sont avérées les plus précises pour décrire la relation entre a_w et l'humidité, indépendamment des critères d'évaluation (SS, PP ou EE). Ces résultats offrent des outils fiables pour optimiser les conditions de stockage du maïs, en particulier dans les régions où ces variétés autochtones constituent une base alimentaire essentielle, tout en minimisant les risques de détérioration microbiologique. L'étude souligne également l'importance du choix des critères statistiques pour l'ajustement des modèles, mettant en évidence la robustesse des approches sélectionnées pour des applications pratiques en ingénierie alimentaire.

Conclusion

Les études examinées dans ce chapitre soulignent l'importance des isothermes de sorption pour maîtriser la stabilité et la qualité du maïs et de ses produits dérivés. Le modèle de GAB s'est révélé particulièrement efficace pour décrire ces comportements, tandis que les analyses thermodynamiques ont permis de mieux appréhender les interactions eau-matière. Ces connaissances sont déterminantes pour concevoir des procédés de séchage, d'emballage et de stockage optimisés, réduisant ainsi les risques de détérioration. Les perspectives futures pourraient intégrer davantage d'outils innovants, comme l'intelligence artificielle, pour affiner ces modèles et étendre leurs applications.

Références bibliographiques :

- [1]. Oladeji, O. A., Taiwo, K. A., & Akanbi, C. T. (2024). Moisture sorption isotherm modelling and thermodynamic functions of white maize ogi enriched with drumstick (*Moringa oleifera*) seeds. *Asia Pacific Journal of Sustainable Agriculture, Food and Energy*, 12, 61–69.
- [2]. Gupta, R. K., Dubey, S., & Raghavendra, S. N. (2023). Sorption behavior and isosteric heat of maize-millet based protein enriched extruded product. *LWT – Food Science and Technology*, 188, 115397.
- [3]. Choque-Quispe, D., Ramos-Pacheco, B. S., Choque-Quispe, Y., Aguilar-Salazar, R. F., Mojo-Quisani, A., Calla-Florez, M., Solano-Reynoso, A. M., Zamalloa-Puma, M. M., Palomino-Malpartida, Y. G., & Alcarraz-Alfaro, T. (2022). Storage conditions and adsorption thermodynamic properties for purple corn. *Foods*, 11(6), 828.
- [4]. Ali, A., Zhang, T., & Liu, H. (2021). Sorption characteristics and thermodynamic properties of maize–millet blends. *Food Science & Nutrition*, 9(3), 1325–1334.
- [5]. Kouassi, K. N., Kouassi, K. C., Kouadio, L. P., & Kouadio, K. K. (2020). Modeling sorption properties of maize by-products obtained using different drying methods. *Heliyon*, 6(10), e05287.
- [6]. Talla, A. (2014). Predicting sorption isotherms and net isosteric heats of sorption of maize grains at different temperatures. *International Journal of Food Engineering*, 10, 393–401.
- [7]. Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Samimi-Akhijahani, H. (2010). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of corn. *Research in Agricultural Engineering*, 56(2), 67–74.
- [8]. Chayjan, R. A., & Esna-Ashari, M. (2010). Modeling of heat and entropy sorption of maize (cv. Sc704): Neural network method. *Research in Agricultural Engineering*, 56, 69–76.
- [9]. De Oliveira, G. H. H., Corrêa, P. C., Araújo, E. F., Valente, D. S. M., & Botelho, F. M. (2010). Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). *International Journal of Food Science & Technology*, 45(3), 546–554.

- [10]. Oyelade, O. J., Tunde-Akintunde, T. Y., Igbeka, J. C., Oke, M. O., & Raji, O. Y. (2008). Modelling moisture sorption isotherms for maize flour. *Journal of Stored Products Research*, 44(2), 179–185.
- [11]. Sopade, P. A., Ajisegiri, E. S. A., & Abass, A. B. (2007). Modelling moisture sorption isotherms for maize flour. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 92–99.
- [12]. Boente, G., González, H. H. L., Martinez, E., Pollio, M. L., & Resnik, S. L. (1996). Sorption isotherms of corn—Study of mathematical models. *Journal of Food Engineering*, 29, 115–128.

Chapitre III

Matériel et méthodes

III.1. Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale adoptée pour déterminer les isothermes de sorption du maïs, en mettant l'accent sur les techniques gravimétriques et l'utilisation de solutions d'acide sulfurique pour contrôler l'activité de l'eau. Trois variétés de maïs (Colonia, Kalassioul et Oasis) ont été étudiées à différentes températures (30, 45 et 60 °C) afin d'analyser leur comportement hygroscopique. Les protocoles détaillés incluent la préparation des échantillons, la mesure des teneurs en eau initiales et après séchage, ainsi que la modélisation des isothermes à l'aide d'équations telles que GAB, BET et Halsey. L'objectif est d'identifier les modèles les plus adaptés pour prédire les conditions optimales de séchage et de stockage.

III.2. Description et choix des variétés

Le maïs En Algérie, il est considéré comme un élément alimentaire important et largement utilisé. La culture du maïs est concentrée dans le sud du pays, notamment dans la région de Ghardaïa. Cette culture est principalement destinée à l'alimentation humaine et animale [1,2].

Le maïs (*Zea mays*) est une plante monocotylédone annuelle diploïde ($2n = 20$), appartenant à la famille des Poaceae (ou graminées). Il en existe de nombreuses variétés, regroupées en sept types principaux, selon les caractéristiques morphologiques des grains. Contrairement à la plupart des autres graminées, le maïs se distingue par une tige pleine, lignifiée, de fort diamètre, constituée de plusieurs entre-nœuds d'environ vingt centimètres, séparés par des nœuds bien marqués. Les feuilles, quant à elles, sont alternes et disposées en deux rangées opposées le long de la tige [3].

La taille moyenne des granules d'amidon de maïs varie entre 1 et 7 μm pour les petits granules, et entre 15 et 20 μm pour les grands granules. Les amidons de maïs présentent un motif typique de type A, dans lequel les doubles hélices formant les cristallites sont densément empaquetées. L'amidon de maïs sucré possède une cristallinité plus faible, tandis que l'amidon de maïs cireux présente une cristallinité plus élevée comparativement aux amidons de maïs normaux [4].

Tableaux III.1 : Composition de maïs [5].

Type d'hybride	Protéines totales (%)	Teneur en amidon (%)	Teneur en saccharose (%)	Fraction protéique dominante	Particularités
Sucré (ZP 504su, ZP 531su)	Élevée (maximale)	Faible (~55 %)	> 4 %	Faible en α -zéine	Très digeste (>91 %) ; riche en fibres et sucres
Cireux (ZP 704wx)	Modérée	Élevée	3 – 4 %	α -zéine dominante	Viscosité de pic élevée
Denté jaune (ZP 434)	Modérée	Élevée	3 – 4 %	α -zéine dominante	Standard
Semi-denté jaune (ZP 633)	Modérée	Élevée	3 – 4 %	α -zéine dominante	-
Rouge (ZP Rumenska)	Élevée	Moyenne	> 4 %	α -zéine dominante	Teneur élevée en saccharose
Blanc (ZP 74b)	Modérée	Moyenne	2 – 3 %	α -zéine dominante	-
À éclater (ZP 611k)	Modérée	Moyenne	2 – 3 %	α -zéine dominante	-

III.3. Maïs utilisé

- Les échantillons utilisés :

Les échantillons utilisés : nous avons utilisé 3 variétés différents d'échantillons du maïs.

A: Colonia.

B: Kalassioul.

C: Oasis



Figure III.1. Les types de maïs.

III.4. Matériel et méthodes opération

- Deux approches sont disponibles pour établir expérimentalement les isothermes de sorption et les propriétés thermodynamiques : la méthode des solutions salines saturées et celle de la solution d'acide sulfurique. Dans le cadre de cette étude, nous avons opté pour la méthode gravimétrique, car elle s'avère plus économique et facilement

accessible en laboratoire. Nous avons ainsi utilisé différentes températures pour modéliser et analyser le comportement hygroscopique.

- Les solutions sont élaborées dans des conteneurs hermétiques et conservées dans un environnement à température régulée.
- L'échantillon est suspendu au-dessus des solutions dans le récipient, ce qui crée une ambiance à température et hygrométrie stabilisées. L'expérience est réalisée à Températures connues.
- Le suivi des variations de masse pour les gains de masse lors de l'adsorption est assuré A 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 [6].

➤ **Etape N°1 : Calcul de la teneur en eau initiale :**

A. La teneur en eau initiale :

Afin de déterminer la teneur en eau des céréales des Maïs, nous Avons suivi les étapes suivantes :

Nous avons pesé trois échantillons de chaque type de grain.



Figure III.2 : Poids des échantillons.

Afin de déterminer leurs masses sèches, les échantillons ont été insérés dans une Etuve universelle (Memmert UNB500) à une température de 140 °C, et nous avons les pesés toutes quelque jour.



Figure III.3. Les échantillons de maïs dans l'étuve.

Une fois les masses avant et après le séchage des échantillons prélevés obtenues, la Teneur en eau de chaque type de maïs est calculée en utilisant la relation suivante.

$$\text{La teneur en eau initiale } W_0 = \frac{m_e}{m_s} = \frac{(m_h - m_s)}{m_h} \quad (\text{III.1})$$

Tableau III.2 : les calculs de la teneur en eau initiale

	M(vide)	M (avec produits)	Mh (produit net)	M (produit sèche)	M (produit sèche net)
Colonia éch.01	1,635	15,7964	14,1614	13,9454	12,3104
Colonia éch.02	1,576	15,2711	13,6951	13,4886	11,9126
Colonia éch.03	1,6013	16,3204	14,7191	14,39356	12,7943
Kalassioul éch.01	1,3974	16,0663	14,6688	14,2157	12.8183
Kalassioul éch.02	1,3798	15,6270	14,2472	13,8394	12.4596
Kalassioul éch.03	1,6958	15,3895	13,6937	13,6649	11.9691
Oasis éch.01	1,6626	10,3073	8,6411	9,007	7.5381
Oasis éch.02	1,5705	10,0381	8,4676	8,9519	6.6814
Oasis éch.03	1,4619	10,3646	8,902	9,2153	7.7534

Nous prenons la valeur moyenne :

Tableau III.3: Les valeurs de la teneur en eau initiale pour les 3 variétés.

Échantillon	W ₀ %
Colonia	13,07
Kalassioul	12,60
Oasis	12,85

B. Calcule la teneur d'eau après séchage :

Les échantillons qui seront destinés pour le processus d'isotherme d'adsorption sont préalablement séchés dans un panier dans l'étuve à une température de 100 °C. Comme indiqué dans Les figures.



Figure III.4. Préparation de l'expérience d'adsorption



Figure III.5 : Séchage des échantillons pour l'isotherme d'adsorption.

Après avoir mesuré les paniers, nous obtenons les résultats suivants :

Tableau III.4 : les mesures des paniers.

Les échantillons :	Les paniers vide	Panier+ produit	Panier+ produit après chauffage
Colonia	15,0350 g	153,8367g	141,4507g
Kalassioul	29,7194 g	166,6130g	150,7486g
Oasis	28,6276	179,2489g	161,5545g

Tableau III.4 Les valeurs de la teneur en eau après le séchage pour les 3 variétés utilisés pour déterminer les isothermes d'adsorption

Échantillon	W%
Colonia	4,5527
Kalassioul	1,143
Oasis	1,249

Etape N°2 : Préparation de solution d'acide sulfurique :

Nous avons préparé des solutions de H_2SO_4 à des concentrations différentes, qui permettent d'obtenir des valeurs d'activité d'eau progressifs [7].

Tableau III.6: la densité concentration complète des solutions aqueuse d'acide sulfurique

Wt %	5	16	24	32	38	46	52	58	64	85
	1,032	1,109	1,171	1,2191	1,2855	1,3570	1,4149	1,477	1,542	1,778

Tableau III.7: Valeurs standards des activités d'eau (a_w) données par différentes concentrations massiques de H_2SO_4 dans l'eau en fonction de la température [8].

a_w					
Concentration massique [%] ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$)	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
5	0,9862	0,9864	0,9866	0,9867	0,9869
16	0,9184	0,9203	0,9221	0,9237	0,9252
24	0,8306	0,8350	0,8390	0,8428	0,8463
32	0,7083	0,7157	0,7227	0,7292	0,7353
38	0,5963	0,6060	0,6152	0,6238	0,6320
46	0,4304	0,4422	0,4535	0,4643	0,4745
52	0,3055	0,3176	0,3291	0,3403	0,3510
58	0,1933	0,2040	0,2144	0,2246	0,2345
64	0,1047	0,1127	0,1207	0,1286	0,1365
85	0,0012	0,0015	0,0018	0,0021	0,0025

Tableau III,8 : Les masses et les volumes de H_2SO_4 et H_2O

Wt %	5	16	24	32	38	46	52	58	64	85
V(H_2O) ml	122,5	116,48	111,28	103,01	99,62	91,59	84,89	77,54	69,39	33,34
V(H_2SO_4) ml	2,45	8,51	13,71	21,99	25,37	33,40	40,10	47,46	55,60	91,66

III.5. Préparation des solutions

Nous avons préparé les solutions selon les étapes suivantes :

- Nettoyons bien les bocaux et les plaçons dans un four chaud pendant 24 heures pour la Stérilisation.
- Les solutions sont préparées dans des conteneurs étanches et conservées dans les bocaux à température régulée [9].

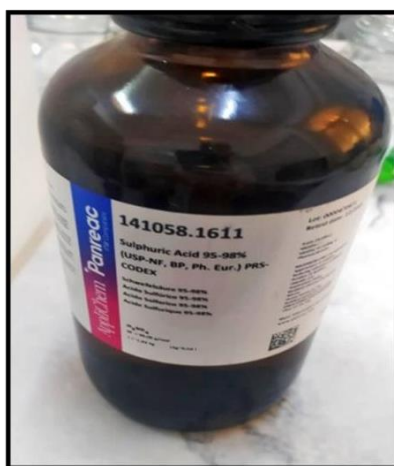


Figure III.6 : acide sulfurique 95-98 % utilisé dans les expériences.



Figure III.7. Préparation des solutions.

➤ **Etape N° 3 : adsorption et désorption :**

D'après le nettoyage bien des bocaux et les plaçons dans un four chaud pendant 24 heures pour la Stérilisation

- ✓ Nous préparons les paniers et plaçons sur les bocaux.
- ✓ Nous mesurons les paniers vide et pleins de maïs.

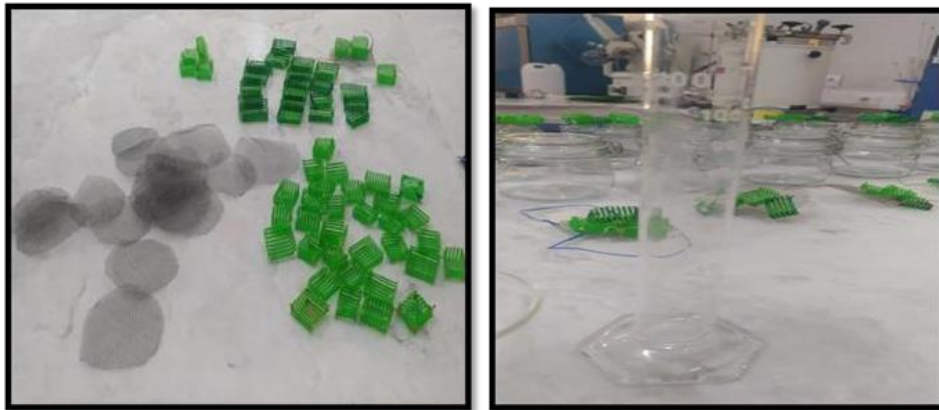


Figure III.8 : préparation des paniers.

- Nous avons scellé le support à l'intérieur d'un bocal à l'aide de supports en plastique, y plaçons les trois échantillons et le fermons hermétiquement pour créer l'humidité à l'intérieur ; dans tous les bocaux.
- Puis les échantillons sont introduits dans les bocaux et pesés à chaque température tous les jours jusqu'à ce que la variation de masse entre deux mesures successives devienne presque même.

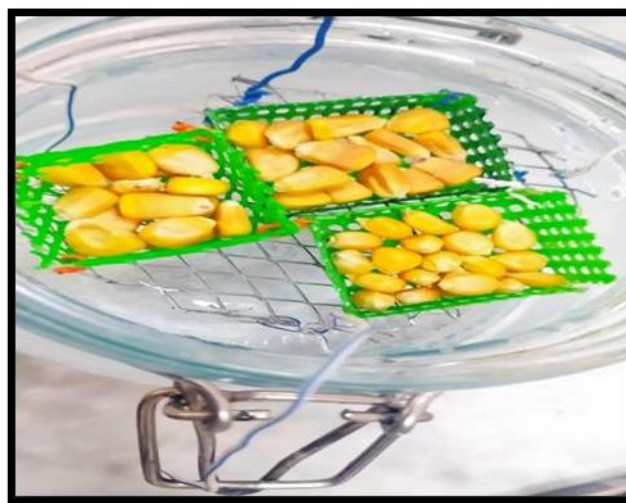


Figure III.9 : Les paniers d'échantillon dans les bocaux.

La Figure III. 12. Expose les photos du dispositif expérimental utilisé. Il se compose de 10 bocaux contenant chacun une solution de H_2SO_4 de concentration différente de l'autre dans une étuve réglée à une température souhaitée.

Les manipulations d'adsorption et de désorption ont été réalisées à trois températures différentes : 30, 45 et 60 °C et à 10 valeurs d'activité de l'eau. Les échantillons frais destinés au processus d'adsorption ont approximativement les mêmes masses (2-3 g).

Les échantillons qui seront destinés pour le processus d'isotherme d'adsorption sont préalablement séchés dans une étuve à une température de 105 °C. Comme indiqué dans la figure III.7.



Figure III.10 : Position des bocaux dans l'étuve pour l'adsorption et désorption.

III.6. Modèles de description des isothermes d'adsorption

Dans la littérature scientifique, différents modèles mathématiques sont utilisés pour décrire la corrélation entre la teneur en eau d'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la température. Ces modèles reposent sur des règles physiques et incluent également des liens empiriques. Pour notre recherche, nous avons étudié divers modèles isothermes de sorption, issus de la littérature scientifique afin de décrire les isothermes de sorption de notre produit. Il s'agit du modèle de Henderson modifié, du modèle de Smith modifié, du modèle d'Oswin modifié, du modèle de Halsey modifié, du modèle de GAB modifié, du modèle de Peleg modifié, du modèle d'Igesias modifié, du modèle de BET modifié et du modèle de Caurie modifié. Le tableau expose les spécificités des modèles. Notre recherche vise à identifier les modèles les plus adaptés pour décrire les isothermes de sorption de notre produit.

- ✓ Nous vérifions l'activité d'eau dans tous les bocaux à l'aide d'un appareil de mesure de l'humidité présenté dans la Figure III. 11

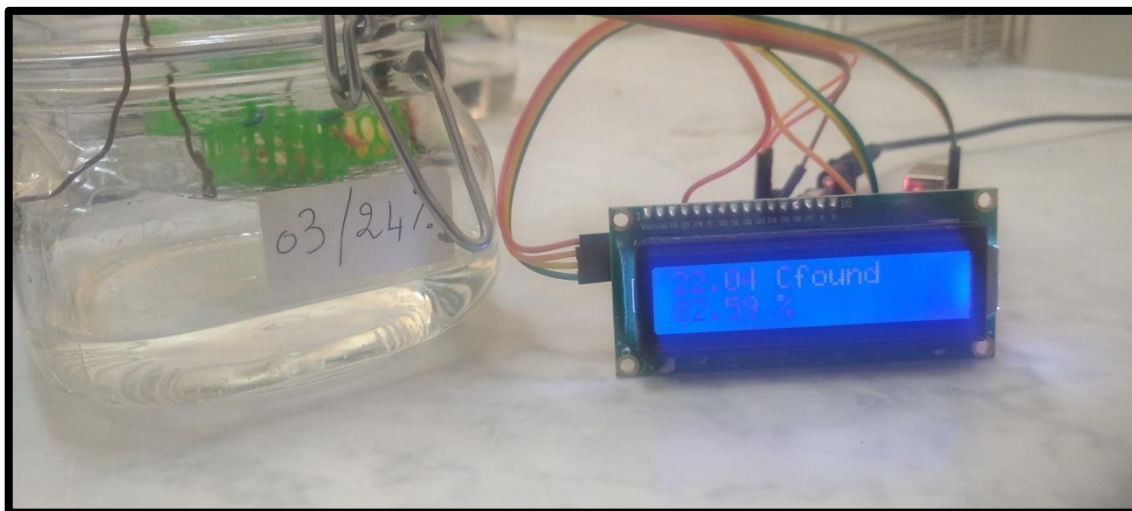


Figure III. 11. Appareil de mesure de l'humidité pour confirmer l'activité d'eau dans chaque bocal.

- ✓ Une fois les masses à l'équilibre et les masses sèches de toutes les prises d'essais obtenues, on calcule les teneurs en eau d'équilibre en utilisant la relation.

$$X_{eq} = \frac{M_g}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (III.2)$$

Tableau III.7 : Les équations des modèles utilisés. [10]

Nom de l'équation	Equation	
GAB	$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{[(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)]}$	(III.3)
BET	$X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{[(1 - a_w)(1 - a_w + C a_w)]}$	(III.4)
Halsey	$X = \left[\frac{A}{\ln \left(\frac{1}{a_w} \right)} \right]^{\frac{1}{B}}$	(III.5)
Halsey	$X = \left[-\frac{\ln(1 - a_w)}{A} \right]^{\frac{1}{B}}$	(III.6)
Iglesias-Chirife	$X = A + B(a_w/(1 - a_w))$	(III.7)

$$\text{Oswin} \quad X = A(a_w/(1 - a_w))^c \quad (\text{III.8})$$

$$\text{Caurie} \quad X = \exp(a + ba_w) \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Smith} \quad X = C_1 - C_2 \ln(1 - a_w) \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Peleg} \quad X = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2} \quad (\text{III.11})$$

Il est crucial d'évaluer l'erreur lors de la modification des données expérimentales afin d'évaluer la conformité de l'équation d'isotherme de sorption. Dans cette étude, tous les modèles d'isothermes de sorption ont été étudiés en utilisant le coefficient de détermination (R^2) et le test De chi-carré réduit (χ^2).

Le test de chi-carré (χ^2) présente l'avantage de pouvoir comparer toutes les isothermes de sorption à la même échelle, tant en abscisse qu'en ordonnée.

Le test de chi-carré réduit (χ^2) est principalement 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. En mathématiques, on peut le formuler de la manière suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{MR}_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{MR}_{exp,i} - \bar{MR})^2} \quad (\text{III.12})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pré,i})^2}{N-n} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$$\bar{X}_{eq_{exp}} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{eq_{exp},i}}{N} \quad (\text{III.14})$$

Où $X_{eq_{exp}}$ est la teneur en eau d'équilibre expérimentale,

$C_{pré}$ est la teneur en eau d'équilibre prédite,

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 et la valeur la plus élevée de R^2 a été identifiée comme le modèle le plus approprié pour décrire les isothermes de sorption des céréales testés.

III.7. Détermination de la chaleur isostérique de sorption

Il est possible de calculer la chaleur d'adsorption nette isostérique en utilisant la pente de la courbe représentant $\ln(a_w)$ en fonction de $1/T$ à une teneur en eau constante X . Il est Essentiel d'avoir des valeurs de a_w à différentes températures afin de créer cette figure, avec une Teneur en eau constante. Les mesures de sorption n'ont cependant pas été effectuées à une teneur En eau constante. Ainsi, la méthode suivante a été mise en œuvre.

Autant que possible, les données expérimentales de sorption disponibles ont été exploitées, en commençant par les données les plus essentielles. Puisque nous n'avions qu'un Seul point de données pour la teneur en eau constante à une seule température, nous avons obtenu Les données pour d'autres températures en appliquant les paramètres du modèle de GAB à la Forme transformée, c'est-à-dire $a_w = f(X, T)$.

$$\ln(a_w) = - \left(\frac{\Delta H_{is}}{R} \right) \frac{1}{T} + CST \quad (III.15)$$

$$a_w = \frac{[2 + (\frac{X_m}{X_{eq}-1})C - (\frac{X_m}{X_{eq}-1})C^2 - 4(1-C)^{\frac{1}{2}}]}{[2K(1-C)]} \quad (III.16)$$

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 OriginPro9.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de mettre en œuvre une approche expérimentale rigoureuse pour caractériser les isothermes de sorption du maïs. Les résultats obtenus, couplés aux modèles mathématiques testés, fournissent des données essentielles pour optimiser les procédés de séchage et de conservation. Les analyses statistiques (coefficient de détermination R^2 et test du chi-carré) ont validé la pertinence des modèles retenus. Ces travaux ouvrent des perspectives pour améliorer la gestion post-récolte du maïs, en particulier dans des contextes climatiques variés. Les résultats détaillés seront présentés dans le chapitre suivant.

Référence :

- [1]. [1]: Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? Journal of Food Engineering, 48(1), 19–31.

- [2]. Gay, J.-P., & Le Guyader, H. (2017). Maïs, mythes et réalités. *Pour la Science*, (480), 92–95.
- [3]. Koné, I. (2022). Caractérisations physiologiques et biochimiques de quatre nouvelles lignées (S116, S138, S143, S148) de maïs rouge (*Zea mays* L.) à Daloa (Côte d’Ivoire) [Mémoire de master, Université Jean Lorougnon Guédé].
- [4]. Singh, N., Kaur, A., & Shevkani, K. (2013). Maize: grain structure, composition, milling, and starch characteristics. In *Maize: Nutrition dynamics and novel uses* (pp. 65–76). Springer India.
- [5]. Žilić, S., Milasinovic, M., Terzic, D., Barac, M., & Ignjatovic-Micic, D. (2011). Grain characteristics and composition of maize specialty hybrids. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(1), 230–241.
- [6]. Benhamouda, A. (2024). Détermination expérimentale et modélisation mathématique des isothermes de sorption des céréales maïs, blé et l’orge : application à la conservation et au séchage [Mémoire de master, Université de Ghardaïa].
- [7]. Djidel, A. (2007). 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].
- [8]. Zhang, L., Grace, P. M., & Sun, D. W. J. D. T. (2022). An accurate water activity model for sulfuric acid solutions and its implementation on moisture sorption isotherm determination. *Drying Technology*, 40, 2540–2549.
- [9]. Lamharrar, A., Cheikh, S. E. K., Idlimam, A., Akkad, S., Mohammed, K., Mimet, A., & Ahachad, M. (2007). Détermination expérimentale des isothermes de sorption et de la chaleur isostérique des feuilles d’absinthe et de menthe pouliot. 13èmes Journées Internationales de Thermique (JITH 2007), France. HAL-00167248.
- [10]. Maati, N., & Meghazi, K. (2023). Détermination expérimentale et mathématique des isothermes de sorption des dattes variété Deglet Nour [Mémoire de master, Université de Ghardaïa].

Chapitre IV :
Résultats et Discussion

IV.1. Introduction :

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire biomasse au niveau de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER) à Ghardaïa. Ce chapitre présente les résultats expérimentaux et les analyses détaillées des isothermes de sorption (adsorption et désorption) pour trois variétés de maïs (Colonia, Kalassioul et Oasis) étudiées à différentes températures (30 °C, 45 °C et 60 °C). L'objectif est de caractériser leurs propriétés thermophysiques, d'évaluer les conditions optimales de séchage et de stockage, et de modéliser leur comportement hygroscopique à l'aide de modèles mathématiques tels que GAB et Peleg. Les données recueillies permettent également de déterminer la chaleur isostérique de sorption, un paramètre clé pour comprendre les interactions eau-matière et optimiser les procédés de conservation.

IV2 Isotherme de Sorption :

Lorsqu'un produit hygroscopique sensible entre en contact avec un milieu humide, il adsorbe la vapeur d'eau jusqu'à ce qu'il se stabilise avec l'air ambiant. Quand il est dans une Atmosphère sèche, il produit de la vapeur jusqu'à ce qu'il atteigne l'équilibre, c'est-à-dire dans le Cas de la désorption.

La détermination des isothermes de sorption est une étape cruciale dans le Processus de séchage et de conservation de maïs. Ces graphiques donnent Des informations supplémentaires sur leur stabilité, la nature des interactions entre l'eau et le maïs, ainsi que sur l'équilibre hygroscopique de maïs. Après plusieurs semaines D'adsorption et de désorption, on atteint cet objectif. Pour définir les conditions optimales pour Le séchage et le stockage de diverses céréales.

Dans le cas des variétés de céréales étudiées, les isothermes d'adsorption et de désorption Jouent un rôle essentiel dans l'évaluation des conditions de stockage optimales et dans la Détermination de la teneur en eau d'équilibre pendant le stockage, avec une valeur déterminée D'humidité relative, pour deux températures (30 °C, 45 °C, 60 °C).

IV2.1. Adsorption

Les valeurs Teneurs d'eau à l'équilibre de tous les échantillons des maïs, sont reportées, pour 30 °C, 45 °C, 60 °C dans le tableau :

Tableau IV.1. Valeurs des masses sèches et humides et les teneurs en eau d'équilibré de tous les échantillons de maïs à 30°C, 45 °C, 60 °C d'adsorption :

Variété	Ms	Aw (30 °C)	Mh (30 °C)	Xeq (30 °C)	Aw (45 °C)	Mh (45 °C)	Xeq (45 °C)	Aw (60 °C)	Mh (60 °C)	Xeq (60 °C)
Colonia	3.796428	0.9203	5.1829	0.365204	0.9221	5.06315	0.333661	0.9252	4.9526	0.304542
	5.528464	0.835	7.0112	0.2682	0.839	6.9453	0.25628	0.8463	6.8794	0.24436
	2.721948	0.7157	3.3259	0.221882	0.7227	3.274	0.202815	0.7353	3.2221	0.183748
	3.657453	0.606	4.342	0.187165	0.6152	4.2985	0.175271	0.632	4.255	0.163378
	3.225924	0.4422	3.701	0.147268	0.4535	3.67235	0.138387	0.4745	3.6437	0.129506
	4.269097	0.3176	4.7682	0.116911	0.3291	4.77065	0.117485	0.351	4.7731	0.118059
	2.805944	0.204	3.0966	0.103586	0.2144	3.0856	0.099666	0.2345	3.0747	0.095781
	2.113931	0.1127	2.2882	0.082438	0.1207	2.2877	0.082202	0.1365	2.2872	0.081965
	1.700824	0.0015	1.7537	0.031089	0.0018	1.7647	0.037556	0.0025	1.7457	0.026385
Kalassioul	3.151759	0.9203	3.8869	0.233248	0.9221	3.8653	0.226395	0.9252	3.8437	0.219541
	4.462603	0.835	5.3181	0.191704	0.839	5.2965	0.186863	0.8463	5.2616	0.179043
	2.597468	0.7157	3.0446	0.172142	0.7227	3.023	0.163826	0.7353	2.9771	0.146155
	2.904518	0.606	3.3369	0.148866	0.6152	3.3153	0.141429	0.632	3.2648	0.124042
	2.006599	0.4422	2.2245	0.108592	0.4535	2.2029	0.097828	0.4745	2.1949	0.093841
	2.399457	0.3176	2.6198	0.09183	0.3291	2.5982	0.082828	0.351	2.587	0.078161
	2.437715	0.204	2.6082	0.069936	0.2144	2.6022	0.067475	0.2345	2.5897	0.062347
	2.47795	0.1127	2.6089	0.052846	0.1207	2.6173	0.056236	0.1365	2.6193	0.057043
	2.135015	0.0015	2.2092	0.034747	0.0018	2.1946	0.027909	0.0025	2.1816	0.02182
Oasis	5.320506	0.9203	6.4967	0.221068	0.9221	6.441	0.210599	0.9252	6.3853	0.20013
	2.578092	0.835	3.115	0.208258	0.839	3.0889	0.198134	0.8463	3.0628	0.18801
	1.719057	0.7157	1.9883	0.156622	0.7227	1.9701	0.146035	0.7353	1.952	0.135506
	2.516472	0.606	2.839	0.128167	0.6152	2.8158	0.118948	0.632	2.7926	0.109728
	3.095943	0.4422	3.411	0.101765	0.4535	3.383	0.092721	0.4745	3.355	0.083676
	3.521263	0.3176	3.8023	0.079811	0.3291	3.7811	0.073791	0.351	3.76	0.067799
	2.890343	0.204	3.0478	0.054477	0.2144	3.0461	0.053889	0.2345	3.0445	0.053335
	2.852719	0.1127	2.9511	0.034487	0.1207	2.957	0.036555	0.1365	2.9629	0.038623
	2.060933	0.0015	2.1207	0.029	0.0018	2.099	0.018471	0.0025	2.0864	0.012357

Les teneurs en eau d'équilibre de maïs Colonais, Kalassioul et Oasis en fonction de l'activité de l'eau à différentes températures sont présentées dans la **Figure. IV. 1**.

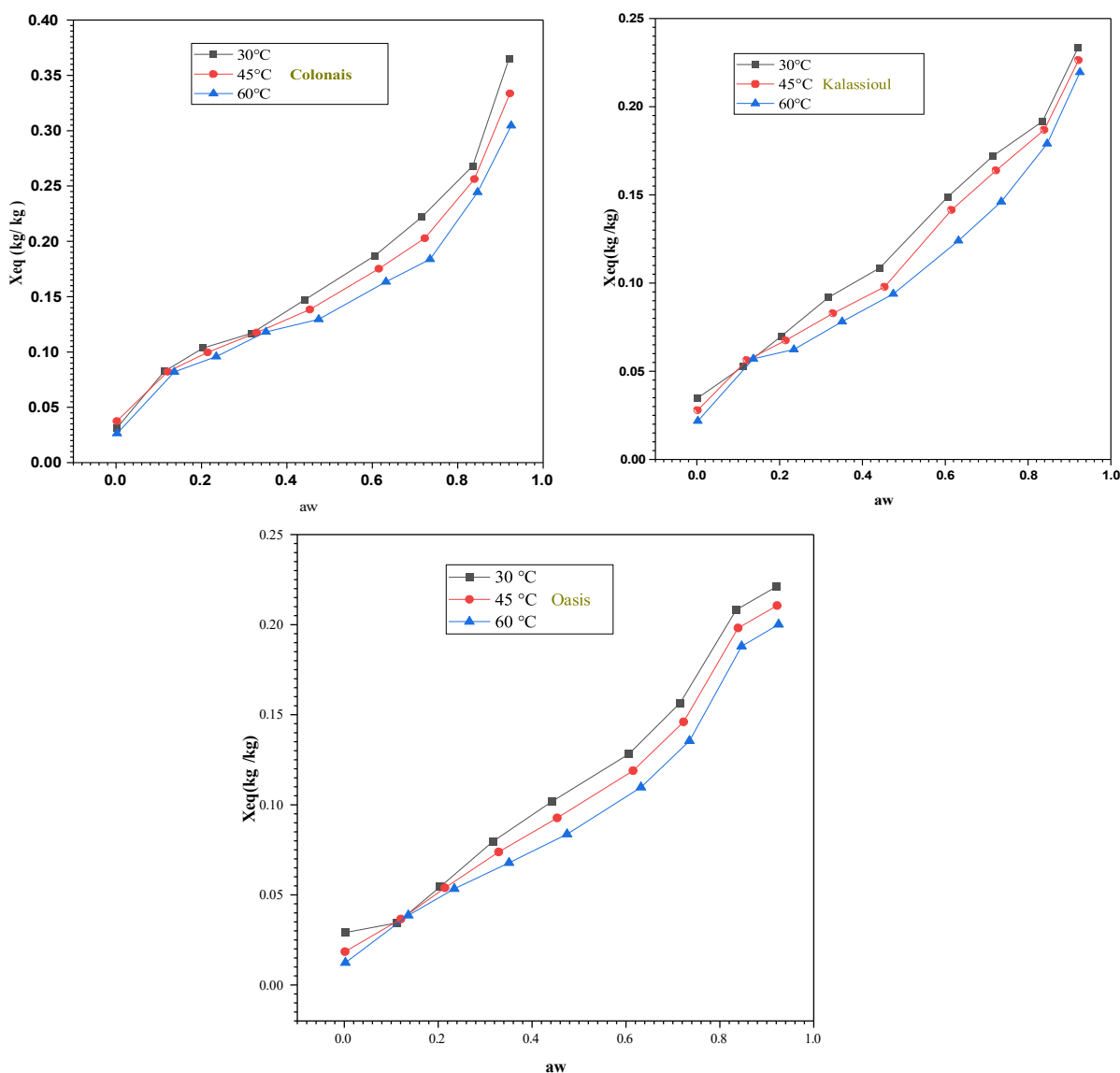


Figure. IV. 1. Les teneurs en eau d'équilibre de maïs Colonais, Kalassioul et Oasis en fonction de l'activité de l'eau à différentes températures d'adsorption.

IV22 Désorption

Les valeurs Teneurs d'eau à l'équilibre de tous les échantillons des maïs, sont reportées, pour 30 °C, 45 °C, 60 °C dans le tableau :

Tableau IV.2. Valeurs des masses sèches et humides et les teneurs en eau d'équilibré de tous les échantillons de maïs à 30°C, 45 °C, 60 °C de désorption.

Variété	Ms	aw (30 °C)	Mh (30 °C)	Xeq (30 °C)	aw (45°C)	Mh (45 °C)	Xeq (45°C)	aw (60°C)	Mh (60 °C)	Xeq (60 °C)
Colonia	5.604725	0.9203	7.2701	0.297138	0.9221	7.2622	0.295728	0.9252	7.2543	0.294319
	5.316987	0.835	6.8314	0.284826	0.839	6.8235	0.28334	0.8463	6.7042	0.260902
	3.778499	0.7157	4.6331	0.226175	0.7227	4.6252	0.224084	0.7353	4.4822	0.186238
	3.153647	0.606	3.7967	0.203908	0.6152	3.7888	0.201403	0.632	3.7	0.173245
	3.300558	0.4422	3.9211	0.188011	0.4535	3.9132	0.185618	0.4745	3.8101	0.15438
	3.641758	0.3176	4.1933	0.151449	0.3291	4.1854	0.14928	0.351	4.0937	0.1241
	3.687136	0.204	4.156	0.127162	0.2144	4.1939	0.137441	0.2345	4.1151	0.11607
	3.835612	0.1127	4.2848	0.11711	0.1207	4.2769	0.11505	0.1365	4.2074	0.09693
	2.319466	0.0015	2.4851	0.07141	0.0018	2.4772	0.068004	0.0025	2.4167	0.041921
Kalassiou	0.9203	0.9203	5.826	0.30544	0.9221	5.8149	0.302952	0.9252	5.8038	0.300465
	0.835	0.835	4.6221	0.287473	0.839	4.6113	0.284464	0.8463	4.5633	0.271094
	0.7157	0.7157	3.6739	0.230079	0.7227	3.6628	0.226363	0.7353	3.558	0.191274
	0.606	0.606	3.1885	0.208108	0.6152	3.1774	0.203902	0.632	3.1045	0.176281
	0.4422	0.4422	3.3608	0.191921	0.4535	3.3197	0.177344	0.4745	3.2695	0.159541
	0.3176	0.3176	3.7717	0.154364	0.3291	3.7306	0.141785	0.351	3.6861	0.128165
	0.204	0.204	2.5893	0.130249	0.2144	2.5782	0.125403	0.2345	2.5567	0.116018
	0.1127	0.1127	2.99203	0.121435	0.1207	2.97063	0.113414	0.1365	2.93493	0.100034
	0.0015	0.0015	2.5589	0.066314	0.0018	2.5478	0.061688	0.0025	2.4893	0.037311
Oasis	6.277589	0.9203	8.0792	0.286991	0.9252	8.0328	0.2796	0.9252	7.9864	0.272208
	3.490968	0.835	4.4117	0.263747	0.8463	4.3653	0.250456	0.8463	4.3395	0.243065
	3.106636	0.7157	3.7606	0.210505	0.7353	3.7142	0.19557	0.7353	3.6864	0.186621
	2.576241	0.606	3.0734	0.192978	0.632	3.027	0.174968	0.632	3.0242	0.173881
	2.302154	0.4422	2.7103	0.177289	0.4745	2.6639	0.157134	0.4745	2.6617	0.156178
	3.088073	0.3176	3.5341	0.144435	0.351	3.4877	0.12941	0.351	3.4798	0.126852
	3.27806	0.204	3.7291	0.137594	0.2345	3.6827	0.123439	0.2345	3.6596	0.116392
	2.792112	0.1127	3.1256	0.119439	0.1365	3.0792	0.102821	0.1365	3.0791	0.102785
	2.128464	0.0015	2.2997	0.08045	0.0025	2.2533	0.058651	0.0025	2.2491	0.056677

Les teneurs en eau d'équilibre de maïs Colonais, Kalassioul et Oasis en fonction de l'activité de l'eau à différentes températures sont présentées dans la **Figure. IV. 2.**

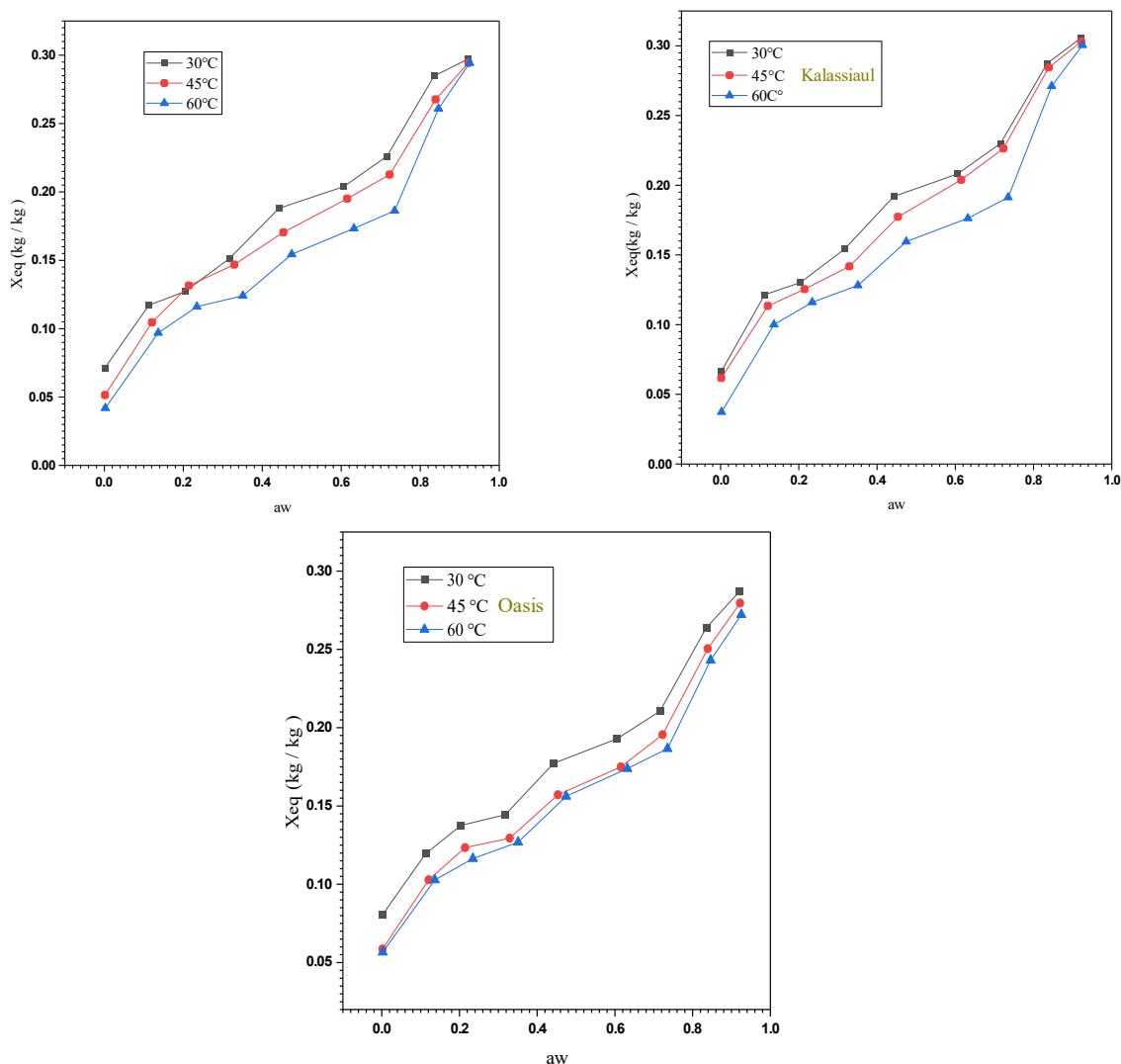


Figure. IV. 2. Les teneurs en eau d'équilibre de maïs Colonais, Kalassioul et Oasis en fonction de l'activité de l'eau à différentes températures de désorption.

Les isothermes d'adsorption et de désorption obtenues pour les trois variétés de maïs (Colonia, Kalassioul et Oasis) présentent une forme de type II, typique des produits céréaliers, traduisant un comportement hygroscopique structuré. On y distingue trois zones : adsorption

monomoléculaire ($a_w < 0,3$), adsorption multicouche ($0,3 < a_w < 0,7$) et adsorption capillaire rapide ($a_w > 0,7$), avec une hausse nette de la teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}) dans cette dernière.

L'élévation de la température réduit X_{eq} pour une même valeur de a_w , comme observé pour Kalassioul à $a_w = 0,835$: X_{eq} passe de 0,1917 à 30 °C à 0,1790 à 60 °C. Ce comportement est cohérent avec la diminution de l'affinité eau-matière à haute température. [1]

Une **hystérésis** marquée est observée entre les isothermes d'adsorption et de désorption, surtout pour $a_w > 0,6$. Les valeurs de X_{eq} sont systématiquement plus élevées en désorption. Ce phénomène, dû à la rétention capillaire ou à des interactions structurales, a été particulièrement visible chez la variété Oasis à $a_w = 0,7157$ et 30 °C, avec un écart de 34 % entre adsorption (0,1566) et désorption (0,2105). [2]

En se concentrant sur la plage critique de a_w entre 0,2 et 0,4 – considérée comme optimale pour le stockage – on note que :

- Pour **Colonais**, X_{eq} est de 0,1036 à 0,1369 en adsorption et 0,1072 à 0,1614 en désorption.
- Pour **Kalassioul**, 0,0699 à 0,0918 en adsorption, 0,1160 à 0,1644 désorption.
- Pour **Oasis**, 0,0545 à 0,0798 en adsorption, 0,1164 à 0,1544 désorption.

Ces écarts traduisent une rétention plus forte d'eau après désorption, soulignant un **risque de détérioration** même à faible humidité relative, si les conditions de stockage ne sont pas rigoureusement contrôlées.

En conclusion, la modélisation précise de ces isothermes à l'aide des modèles de **Peleg** (pour la prédiction) et **GAB** (pour l'analyse thermodynamique) permet de mieux comprendre le comportement hygroscopique différentiel et d'orienter efficacement les stratégies de séchage et de conservation. [3]

IV3. Modélisation des isothermes de sorption

Dans la littérature scientifique, de nombreux modèles mathématiques ont été développés afin de décrire la relation entre la teneur en eau à l'équilibre, l'humidité relative d'équilibre et la

température. Ces modèles reposent à la fois sur des principes physiques fondamentaux et sur des relations empiriques. Dans le cadre de la présente étude, neuf modèles issus de la littérature ont été sélectionnés pour modéliser les isothermes d'adsorption du produit étudié.

Les modèles considérés sont les suivants : le modèle de Henderson modifié, le modèle de Smith modifié, le modèle d'Oswin modifié, le modèle GAB, le modèle de Peleg, le modèle d'Iglesias et le modèle de Caurie modifié. Les formulations mathématiques de ces modèles ainsi que leurs paramètres sont présentées dans le tableau IV.3.

IV.3.1. Adsorption

L'objectif principal de cette analyse est d'identifier le ou les modèles les plus adéquats pour représenter les isothermes d'adsorption de la variété de maïs. À cet effet, les données expérimentales de la teneur en eau à l'équilibre, obtenues à trois températures 30°C, 45 °C, 60 °C, ont été ajustées aux six modèles susmentionnés (cf. tableaux IV.3, IV.4 et IV.5). L'estimation des paramètres des modèles a été réalisée par régression non linéaire, en utilisant le logiciel **Origin Pro 9**.

Tableau IV.3. Paramètres d'isothermes d'adsorption de maïs (Colonais) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

Modèle	Paramètre	Adsorption		
		T=30 °C	T=45 °C	T=60 °C
<i>GAB</i>	Xm	0.08937	0.08483	0.07351
	C	403.63443	528.43048	1.63139E45
	K	0.81818	0.80715	0.82299
	R ²	0.99282	0.99658	0.95411
	R MSE	0.01011	0.00625	0.02113
<i>Smith</i>	C1	0.06499	0.0656	0.06072
	C2	0.11982	0.10673	0.09669
	R ²	0.97885	0.98354	0.97028
	R MSE	0.01607	0.01269	0.01574
<i>Igesias</i>	A	-2.82905	-2.84447	-2.92844
	B	1.91542	1.83337	1.82536
	R ²	0.97142	0.97552	0.96341

	R MSE	0.01868	0.01547	0.01747
<i>Oswin</i>	A	0.16055	0.15129	0.1392
	C	0.3318	0.31702	0.3116
	R ²	0.9965	0.99508	0.99672
	R MSE	0.00653	0.00694	0.00523
<i>Caurie</i>	a	-2.82905	-2.84447	-2.92844
	b	1.91542	1.83337	1.82536
	R ²	0.97142	0.97552	0.96341
	R MSE	0.01868	0.01547	0.01747
<i>Peleg</i>	K1	0.27162	0.1519	0.16031
	K2	0.17865	0.25246	0.22384
	n1	4.69821	0.25046	0.32479
	n2	0.32661	4.20845	5.32894
	R ²	0.99233	0.99529	0.99823
	R MSE	0.01145	0.00803	0.99823

Tableau IV.4. : Paramètres d'isothermes d'adsorption du maïs (Kalassioul) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

Modèle	Paramètre	Adsorption		
		T= 30 °C	T= 45 °C	T= 60 °C
<i>GAB</i>	Xm	0,07044	0,06544	0,0581
	C	775,32477	476,95672	272,44155
	K	0,76676	0,77897	0,79884
	R ²	0,96359	0,9759	0,9938
	RMSE	0,01492	0,0119	0,00578
<i>Smith</i>	C1	0,05536	0,0496	0,04258
	C2	0,0773	0,07563	0,07226
	R ²	0,94937	0,95896	0,97695
	R MSE	0,01628	0,01438	0,01033
<i>Igesias</i>	A	-3.00064	-3.11374	-3.27532
	B	1.68176	1.76566	1.87572
	R ²	0.9829	0.98611	0.98616
	R MSE	0.00946	0.00836	0.008
<i>Oswin</i>	A	0,12003	0,11213	0,10103
	c	0,28597	0,29894	0,31779
	R ²	0,96991	0,97734	0,99235
	R MSE	0,01255	0,01068	0,00595

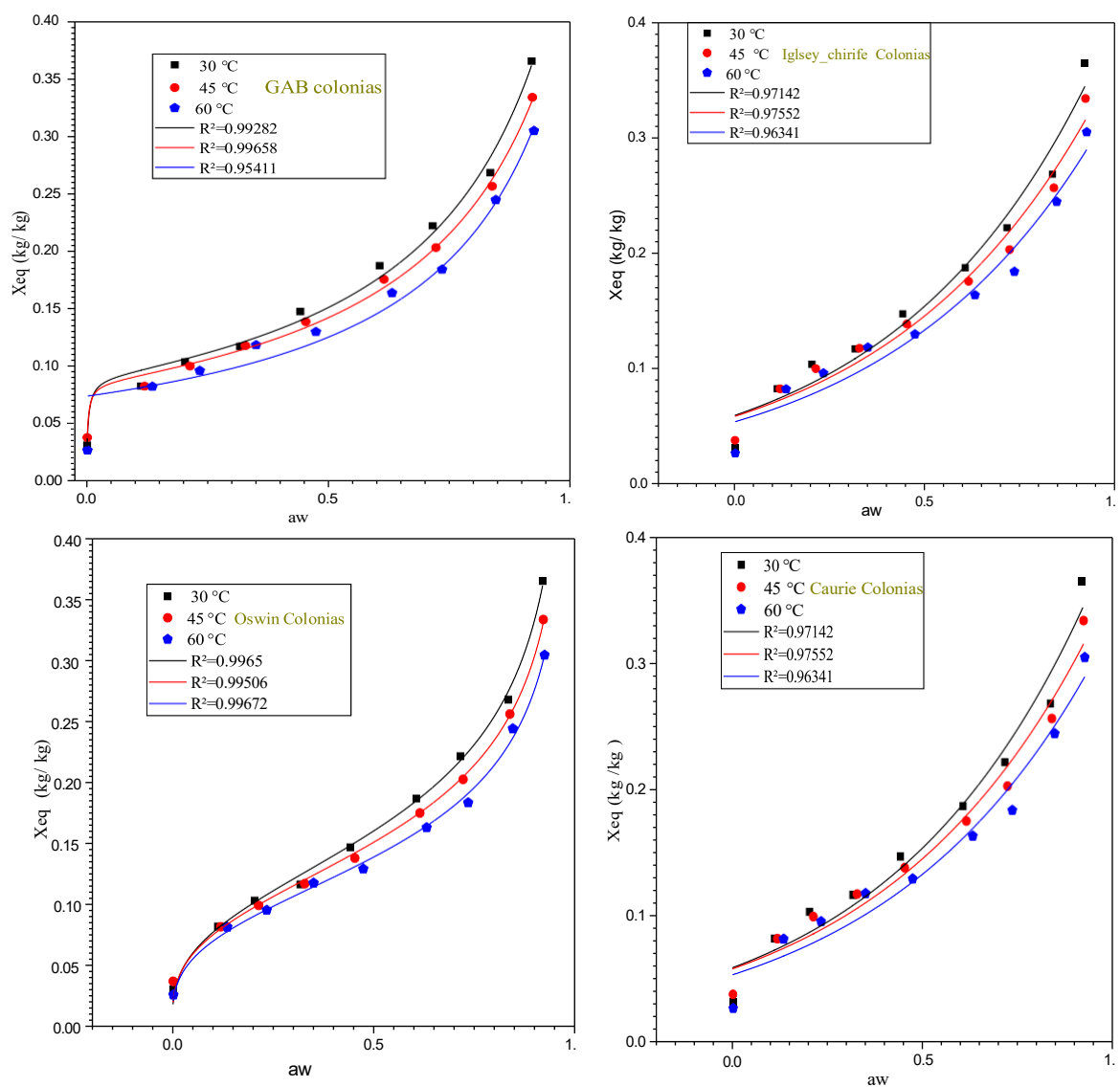
<i>Caurie</i>	a	-3,00064	-3,11374	-3,27532
	b	1,68176	1,76566	1,87572
	R ²	0,9829	0,98611	0,98616
	R MSE	0,00946	0,00836	0,008
<i>Peleg</i>	K1	0,18971	0,17375	0,16095
	K2	0,05838	0,07504	0,09126
	n1	1,49038	1,99269	3,07008
	n2	0,08193	0,15669	0,24394
	R ²	0,994	0,9957	0,99805
	R MSE	0.00663	0.00551	0.00355

Tableau IV.5: Paramètres d'isothermes d'adsorption du maïs (Oasis) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

Modèle	Paramètre	Adsorption		
		T= 30 °C	T= 45 °C	T= 60 °C
<i>GAB</i>	Xm	0,10551	0,08662	0,06996
	C	5,59082	6,50104	7,80523
	K	0,63826	0,68772	0,7373
	R ²	0,97955	0,98399	0,98635
	R MSE	0,01235	0,01002	0,0088
<i>Smith</i>	C1	0,03357	0,03624	0,03115
	C2	0,08552	0,07795	0,07347
	R ²	0,93366	0,95489	0,96079
	R MSE	0.0208	0,01557	0,01381
<i>Igesias</i>	A	-3.35922	-3.37431	-3.5249
	B	2.08097	2.02101	2.11316
	R ²	0.9553	0.9804	0.98006
	R MSE	0.0161	0,0096	0,00921
<i>Oswin</i>	A	0 10755	0,09916	0,08998
	c	0,32917	0,33853	0,34979
	R ²	0,95027	0,96291	0,96828
	R MSE	0,01702	0,01412	0,01242
<i>Caurie</i>	a	-3,35922	-3,37431	-3,5249
	b	2,08097	2,02101	2,11316
	R ²	0,96027	0,98285	0,98255
	R MSE	0,0161	0,0096	0,00921
<i>Peleg</i>	K1	0.03301	0,17375	0,16095
	K2	0,05838	0,07504	0,09126
	n1	1,49038	1,99269	3,07008
	n2	0,08193	0,15669	0,24394
	R ²	0,994	0 9957	0,99805
	R MSE	0,00663	0,00551	0,00355

Les isothermes d'adsorption des 3 variétés de maïs mesurées et calculées pour les six modèles pour les quatre températures 30 °C, 45 °C et 60 °C sont présentées respectivement dans les figures

Figure. IV. 3. Figure. IV.4 et Figure. IV. 5. Ces isothermes sont en accord avec l'analyse des valeurs R^2 , $RMSE$ et $RMSE$



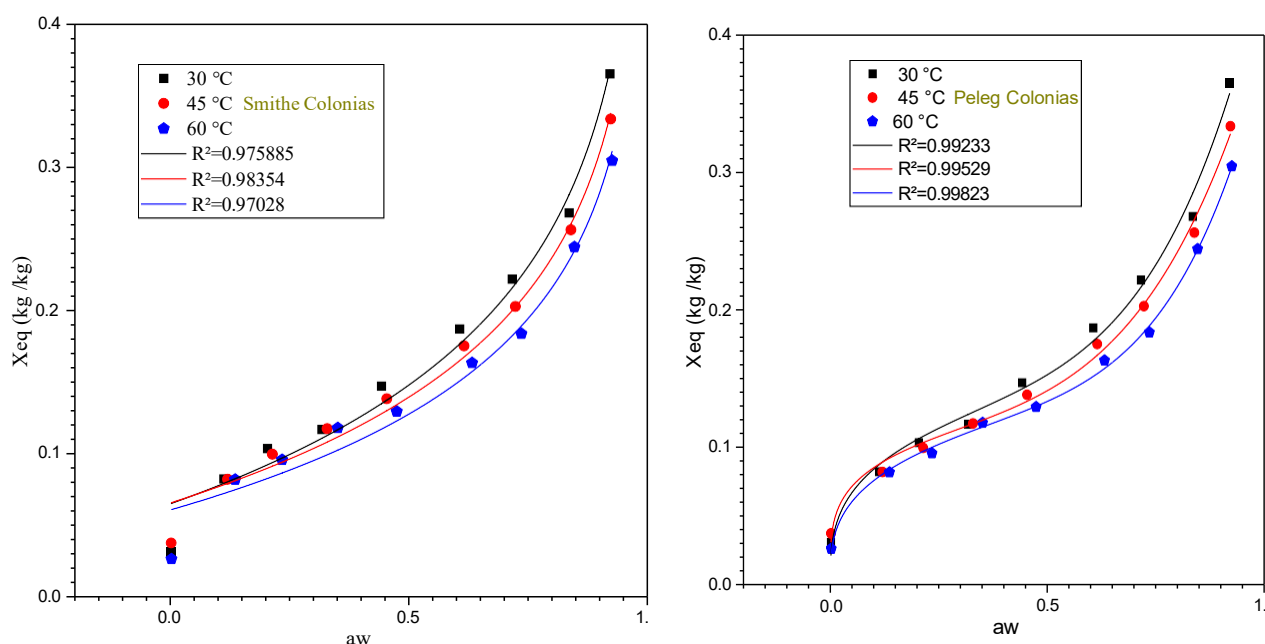
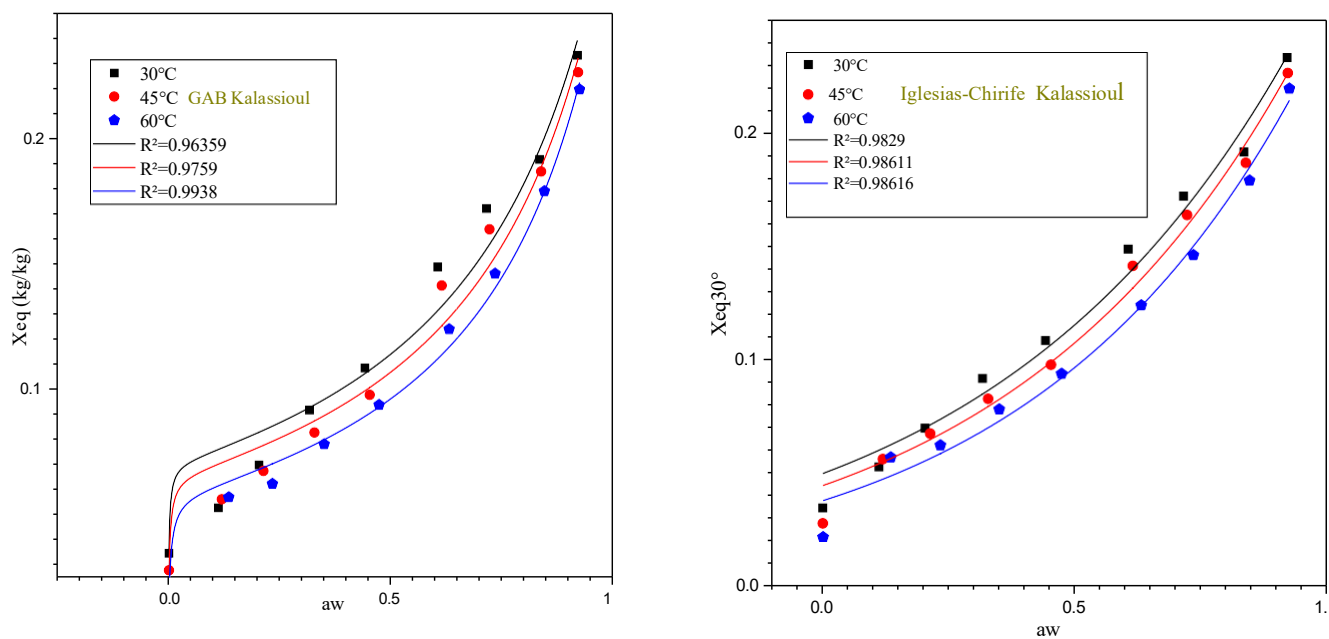


Figure. IV. 3. Isothermes d'adsorption de maïs (Colonais) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.



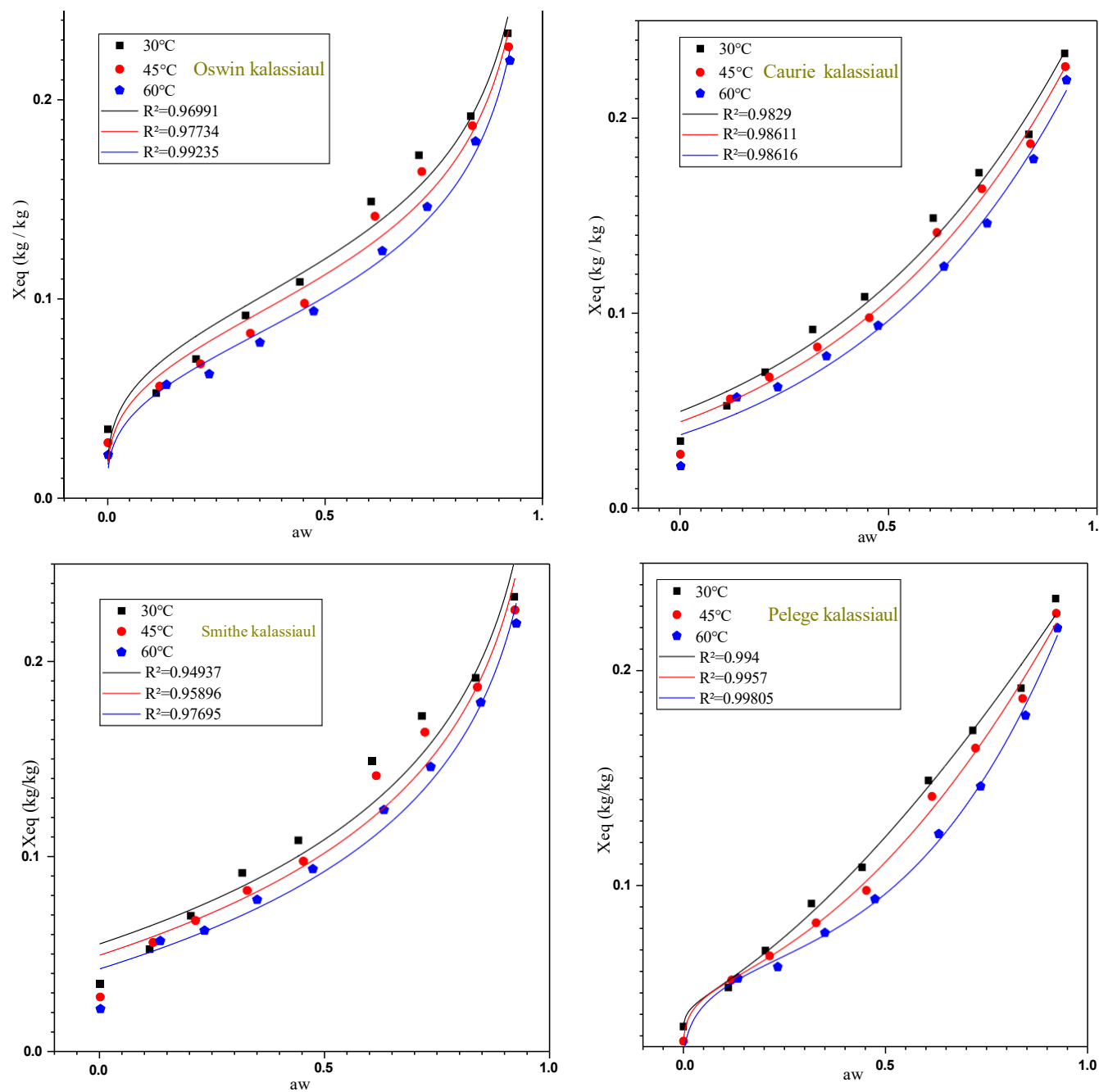
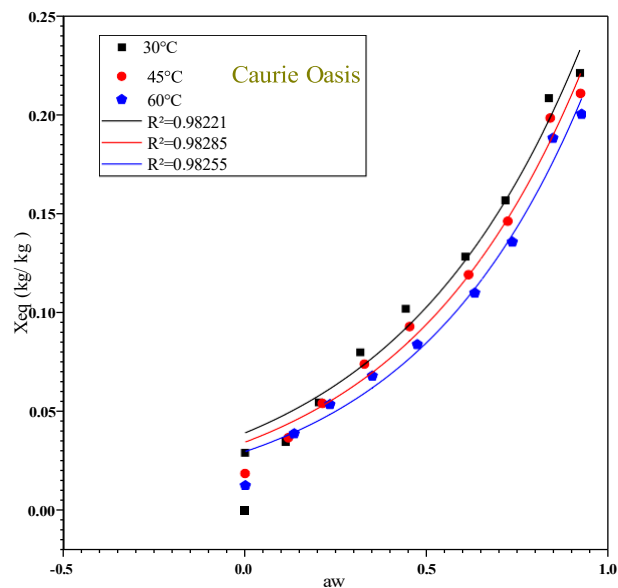
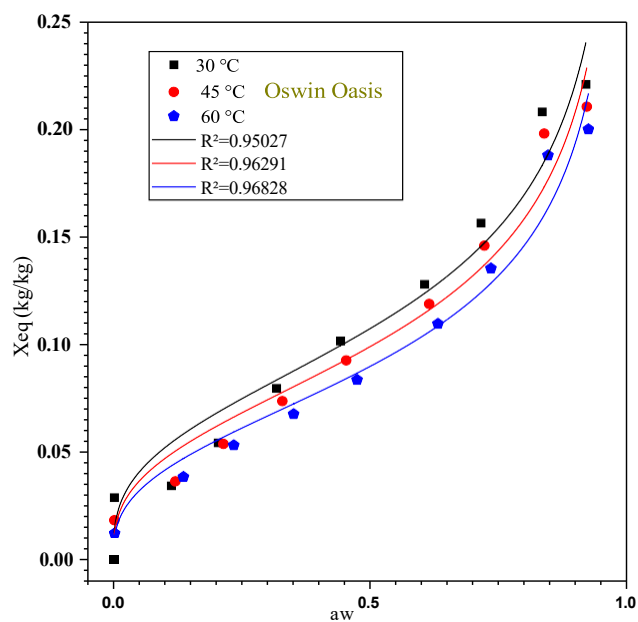
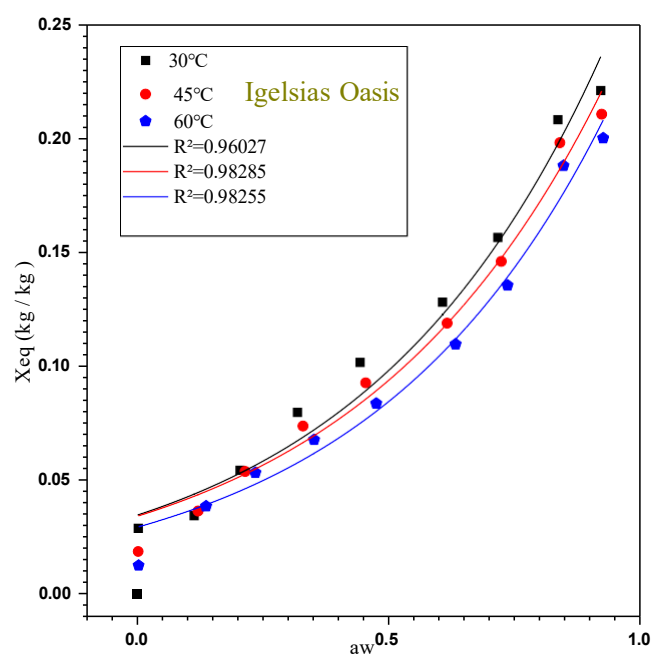
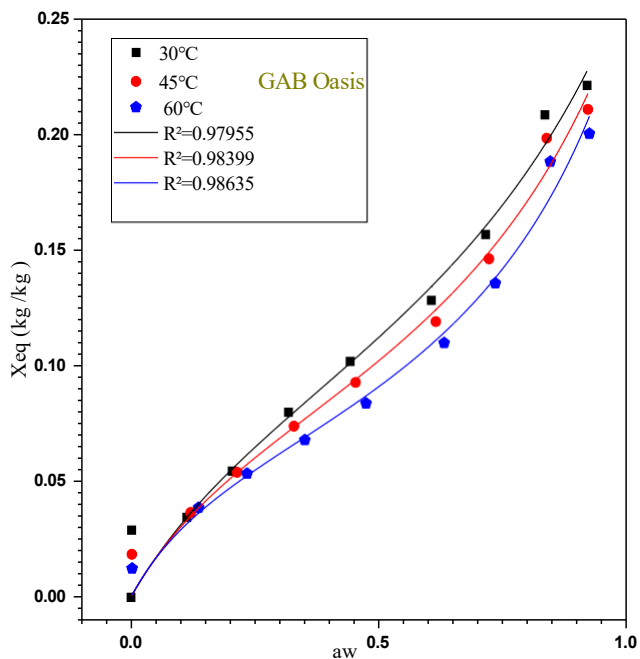


Figure. IV. 4. Isothermes d'adsorption de la maïs (Kalassiaul) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.



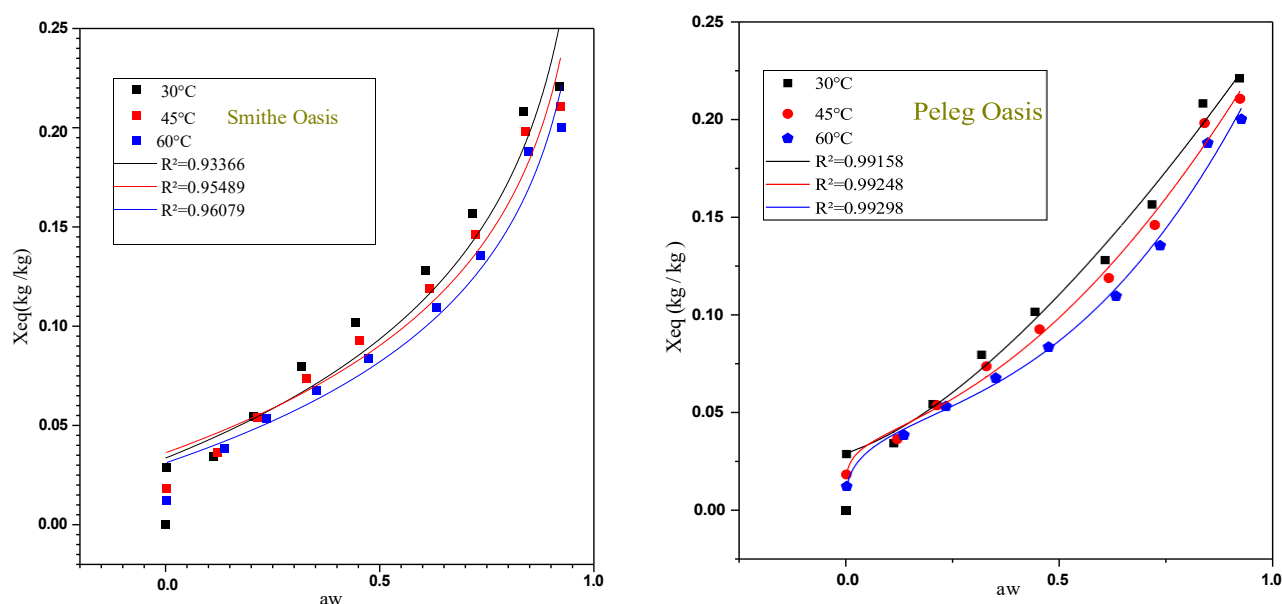


Figure. IV. 5. Isothermes d'adsorption de la maïs (Oasis) lissées par les modèles : GAB, BET, Smith, Henreson, Halsey, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

IV32 Désorption

L'objectif principal de cette analyse est d'identifier le ou les modèles les plus appropriés pour représenter les isothermes de désorption de la variété de dattes *maise*. À cet effet, les données expérimentales de la teneur en eau à l'équilibre, obtenues à trois températures (30 °C, 45 °C et 60 °C), ont été ajustées aux six modèles présentés précédemment (cf. tableaux IV 6 IV.7 et IV.8). L'ajustement des courbes expérimentales et l'estimation des paramètres des modèles ont été réalisés au moyen d'une régression non linéaire, en utilisant le logiciel **Origin Pro 9**.

Tableau IV.6. Paramètres d'isothermes de désorption de maïs (Colonais) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures

Modèle	Paramètres	Adsorption		
		T= 30 °C	T= 45 °C	T= 60 °C
<i>GAB</i>	Xm	0,12072	0,11218	0,09308
	C	1427,67019	671,54275	438,21286
	K	0,66188	0,67794	0,7413
	R ²	0,97901	0,99005	0,98742
	RMSE	0,01277	0,00888	0,01026
<i>Smith</i>	C1	0,11075	0,09863	0,07924
	C2	0,08556	0,08596	0,08869

	R ²	0,91556	0,91748	0,94858
	RMSE	0,02371	0,02369	0,01921
<i>Oswin</i>	A	0,18827	0,17542	0,15463
	c	0,20198	0,22007	0,26058
<i>Caurie</i>	R ²	0,96588	0,99031	0,98336
	R MSE	0 01507	0,00812	0,01093
	a	-2,32835	-2,4454	-2,67806
	b	1,23938	1,32858	1,54255
	R ²	0,96933	0,95715	0,95426
	RMSE	0,01429	0,01707	0,01812
<i>Peleg</i>	K1	0,1806	0,1571	0,19591
	K2	0,14565	0,17574	0,16307
	n1	1,81751	3,05706	4,5079
	n2	0,11088	0,20568	0,23797
	R ²	0,98778	0,99378	0,9893
	RMSE	0,01067	0,0077	0,01037
<i>Igesias</i>	A	-2,32835	-2,4454	-2,67806
	B	1,23938	1,32858	1,54255
	R ²	0,96933	0,95715	0,95426
	R MSE	0,01429	0,01707	0,01812

Tableau IV. 7. Paramètres d'isothermes de désorption du maïs (Kalassioul) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

Modèle	Paramètre	Désorption		
		T= 30 °C	T= 45 °C	T= 60 °C
<i>GAB</i>	Xm	0.12339	0.11428	0.09572
	C	1146.85715	921.51897	341.05294
	K	0.66091	0.68964	0.74091
	R ²	0.9833	0.9874	0.98603
	R MSE	0.01175	0.01041	0.01129
<i>Smith</i>	C1	0,1127	0,09271	0,08897
	C2	0,07647	0,07979	0,0765
	C ²	0,9409	0,94833	0,94938
	RMSE	0,01748	0,01711	0,01643
<i>Oswin</i>	A	0,18283	0,16333	0,15621
	c	0,18451	0,22004	0,22308
	R ²	0,96512	0,98094	0,98214
	RMSE	0,01343	0,01039	0,00976

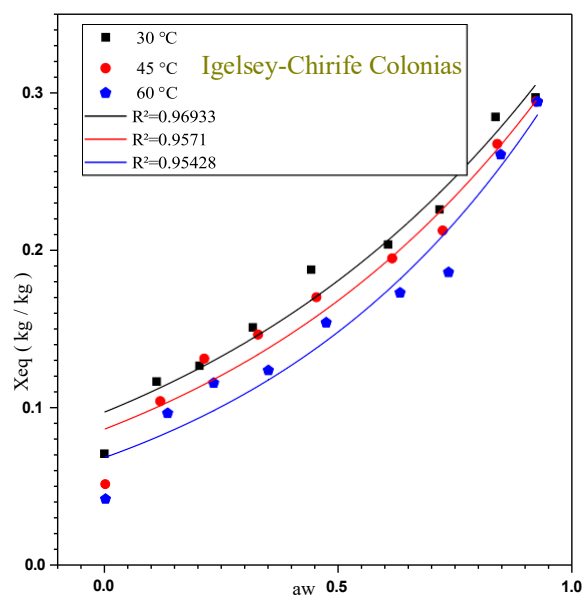
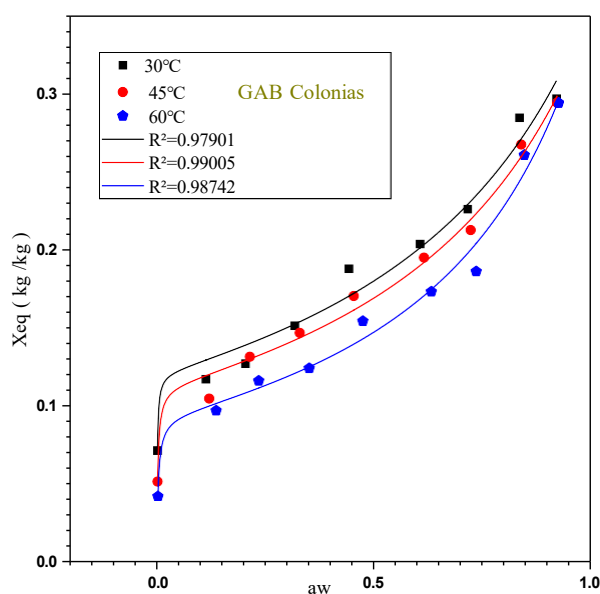
<i>Caurie</i>	a	-2,30629	-2,51188	-2,56192
	b	1,14083	1,32364	1,33706
	R ²	0,97243	0,96801	0,96655
	RMSE	0,01194	0,01347	0,01336
<i>Peleg</i>	K1	0,1628	0,15218	0,14952
	K2	0,15695	0,17031	0,16364
	n1	2,52948	0,1566	0,16836
	n2	0,10564	3,25629	3,45644
	R ²	0,98959	0,99322	0,99052
	RMSE	0,00868	0,00733	0,00842
<i>Igesias</i>	A	-2.31838	-2.41872	-2.67025
	B	1.2516	1.34874	1.56645
	R ²	0.96311	0.97562	0.94935
	RMSE	0.01617	0.0134	0.0199

Tableau IV.8. Paramètres d'isothermes de désorption du maïs (Oasis) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

Modele	Parametre	Desorption		
		T= 30 °C	T= 45 °C	T= 60 °C
<i>GAB</i>	Xm	0,12339	0,11428	0,09572
	C	1146,85715	921,51897	341,05294
	K	0,66091	0,68964	0,74091
	R ²	0,9833	0,9874	0,98603
	R MSE	0,01175	0,01041	0,01129
<i>Smith</i>	C1	0,11169	0,10189	0,07966
	C2	0,08808	0,09013	0,09211
	R ²	0,91155	0,93055	0,93935
	R MSE	0,02503	0,02263	0,02178
<i>Oswin</i>	A	0,19149	0,18185	0,15805
	c	0,2047	0,22229	0,2637
	R ²	0,97598	0,97589	0,98239
	R MSE	0,01304	0,01333	0,01173
<i>Caurie</i>	a	-2,31838	-2,41872	-2,67025
	b	1,2516	1,34874	1,56645
	R ²	0,96311	0,97562	0,94935
	R MSE	0,01617	0,0134	0,0199
<i>Peleg</i>	K1	0,17412	0,18823	0,17209
	K2	0,16176	0,14958	0,19609
	n1	2,05004	2,15896	0,26333

<i>Igesias</i>	n2	0,13885	0,14069	4,59329
	R ²	0,98952	0,99409	0,988
	R MSE	0,01019	0,00781	0,01146
	A	-2.30629	-2.51188	-2.56192
	B	1.14083	1.32364	1.33706
	R ²	0.97243	0.96801	0.96655
	R MSE	0.01194	0.01347	0.01336

Les isothermes de désorption des trois variétés de maïs, déterminés expérimentalement et ajustés à l'aide de six modèles mathématiques, ont été obtenus pour trois températures : 30 °C, 45 °C et 60 °C. Ils sont représentés respectivement dans les **Figure. IV. 6.**, **IV. 7** et **IV. 8**. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les données expérimentales et les valeurs modélisées, comme en témoignent les coefficients de détermination R², les coefficients de corrélation R, ainsi que les valeurs de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).



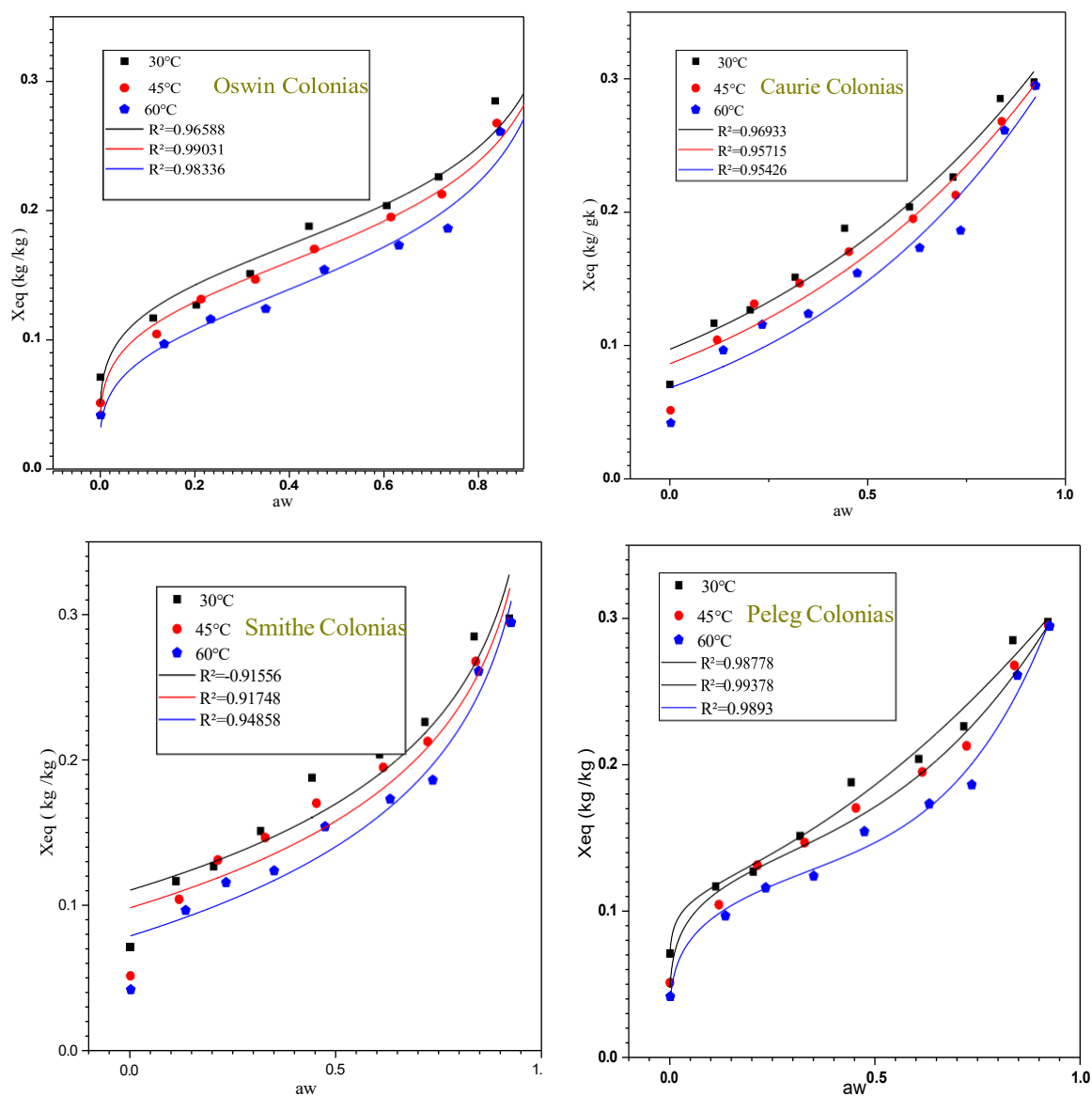


Figure. IV. 6. Isothermes de désorption de maïs (Colonais) lissées par les modèles : GAB, Smith, Iglesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures

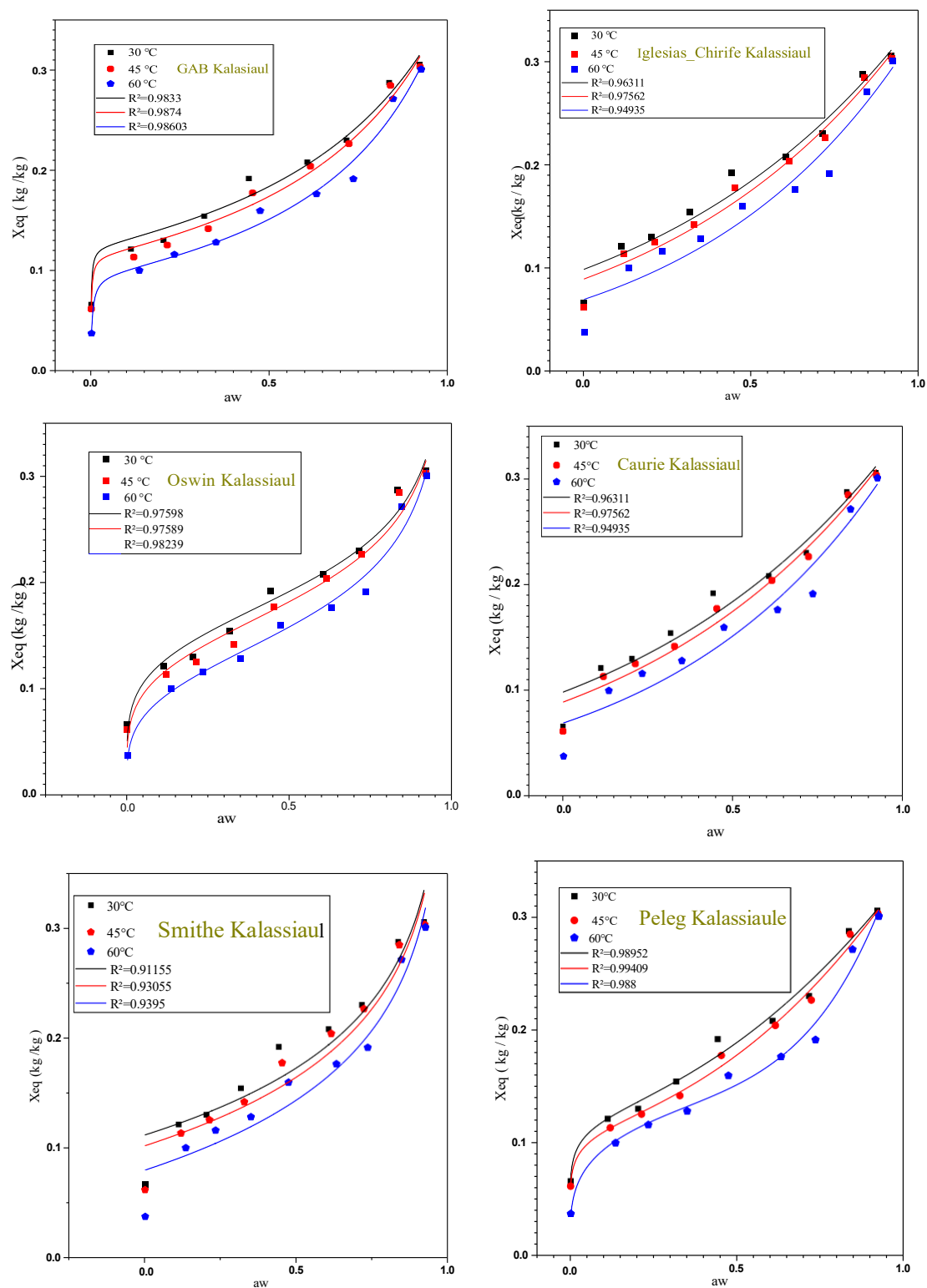


Figure. IV. 7. Isothermes de désorption de la maïs (Kalassiaule) lissées par les modèles : GAB, Smith, Igesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

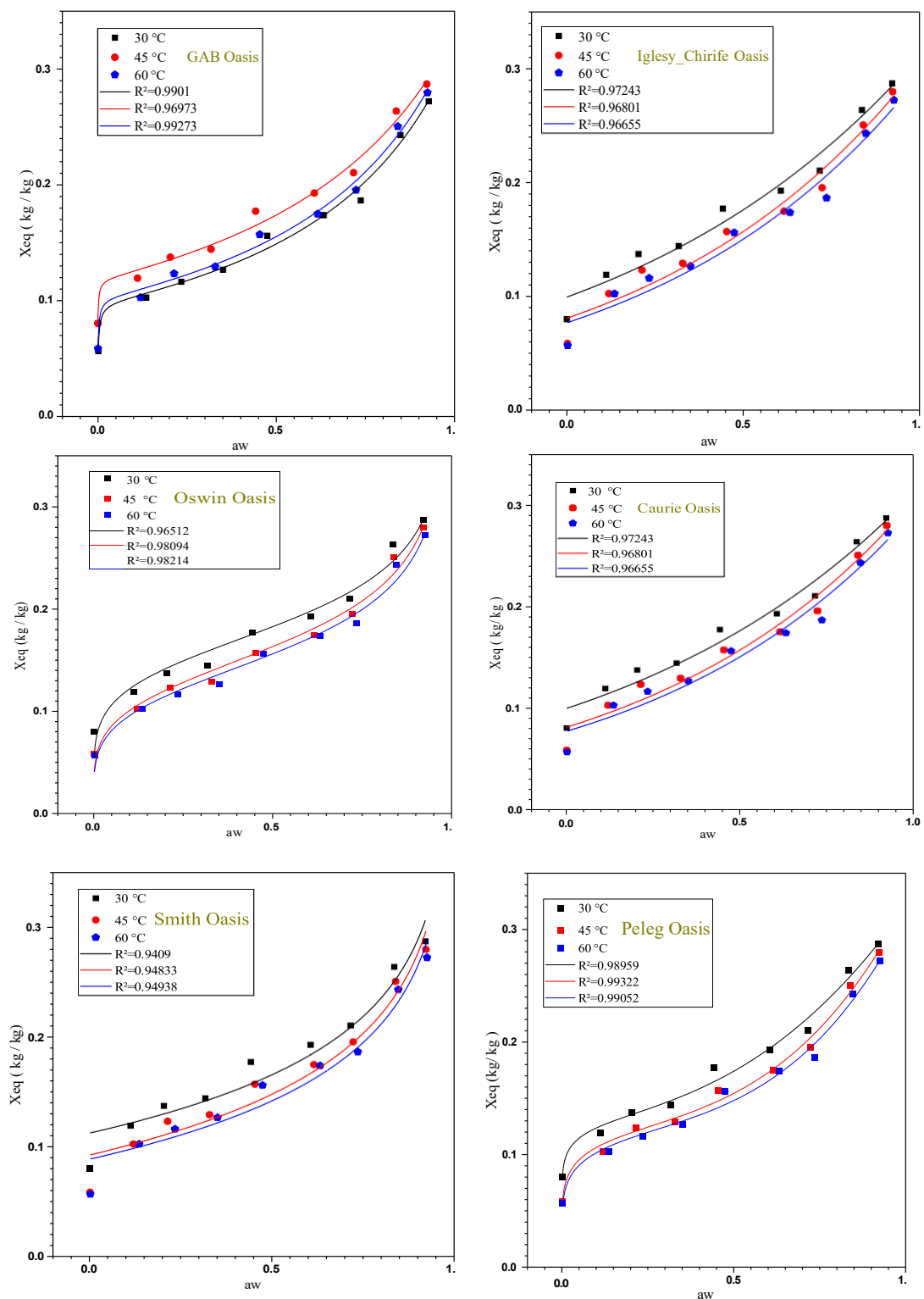


Figure. IV. 8. Isothermes de désorption de la maïs (Oasis) lissées par les modèles : GAB, Smith, , Iglesias, Oswin, Caurie et Peleg à différentes températures.

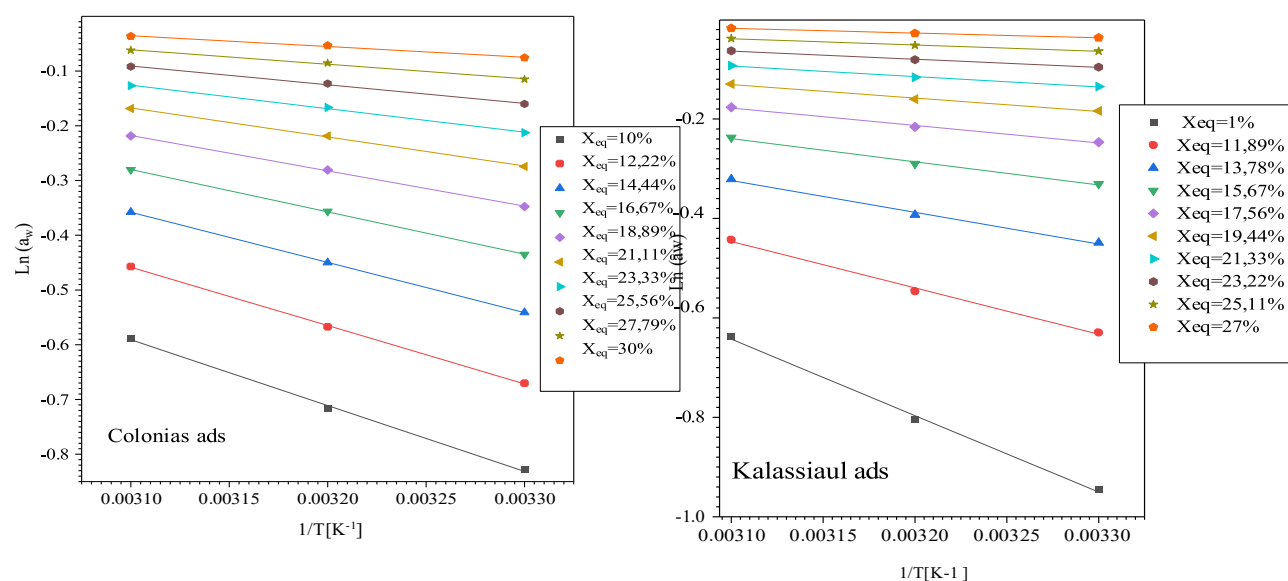
D'après les figures IV.3, IV.4 et IV.5 et les tableaux IV.3, IV.4 et IV.5, les modèles de GAB et de Peleg ont été identifiés comme les plus performants pour décrire l'ensemble des isothermes De sorption [4][5] du maïs pour les trois variétés étudiées : Colonia, Kalassioul et Oasis, aux températures de 30 °C, 45 °C et 60 °C. Cette conclusion repose sur les valeurs élevées du coefficient de détermination (R^2) et les faibles valeurs de la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) obtenues lors des ajustements aux données expérimentales. Pour la variété Colonia, les valeurs de R^2 obtenues avec le modèle GAB à 30, 45 et 60 °C sont respectivement de 0.99282, 0.99658 et 0.95411, avec des RMSE de 0.01011, 0.00625 et 0.02113. Le modèle de Peleg affiche quant à lui des R^2 encore plus élevés (0.99233, 0.99529, 0.99823) et des RMSE inférieurs (0.01145, 0.00803, 0.00355), ce qui confirme son aptitude supérieure à décrire les courbes d'adsorption même dans les zones de forte humidité. Pour Kalassioul, les modèles de GAB et de Peleg fournissent également de très bons ajustements, bien que Peleg se distingue par des R^2 de 0.994, 0.9957 et 0.99805 avec des erreurs minimales, renforçant sa capacité à modéliser les comportements hygroscopiques complexes. De même, pour la variété Oasis, le modèle Peleg surpasse GAB avec des R^2 atteignant jusqu'à 0.99805, et des RMSE inférieurs à 0.00663 pour toutes les températures étudiées. Concernant la désorption, les mêmes tendances ont été observées. Le modèle de Peleg a montré une excellente capacité à modéliser les isothermes de désorption des trois variétés avec des R^2 souvent supérieurs à 0.99 et des RMSE faibles, même dans les plages où le phénomène d'hystérésis est prononcé. Le modèle GAB, bien qu'un peu moins précis globalement, conserve un rôle fondamental pour la prédiction de la teneur en eau de la monocouche (X_m), paramètre clé pour évaluer la stabilité microbiologique du produit et orienter les stratégies de conservation. Une comparaison entre les courbes d'adsorption et de désorption révèle une hystérésis marquée, en particulier aux faibles et moyennes valeurs de l'activité de l'eau, ce qui est typique des produits alimentaires contenant des matrices complexes. Les teneurs en eau à l'équilibre sont systématiquement plus élevées en désorption qu'en adsorption, pour une même activité de l'eau. Cela peut s'expliquer par des mécanismes physiques comme la capillarité ou la rétention d'eau piégée dans les structures cellulaires du maïs après hydratation. Le modèle Peleg s'adapte bien à cette différence grâce à sa flexibilité, tandis que le modèle GAB reste limité dans les zones où l'hystérésis est accentuée. En conclusion, pour la gamme de température testée (30–60 °C) et l'activité de l'eau allant jusqu'à 0.9252, deux modèles se distinguent : Peleg, qui présente

la meilleure régression statistique, et GAB, qui reste pertinent pour l'analyse thermodynamique. [7] Ces modèles constituent des outils précieux pour prédire la teneur en eau à l'équilibre, optimiser les conditions de séchage et améliorer la stabilité du maïs pendant le stockage, tout en tenant compte de l'asymétrie entre adsorption et désorption.

IV.4 Détermination de la chaleur isostérique de sorption

La chaleur isostérique d'adsorption des trois variétés de maïs a été déterminée pour différentes teneurs en eau à l'équilibre à partir des pentes des isostères, obtenues par la représentation de $\ln(a_w)$ en fonction de l'inverse de la température ($1/T$), pour une teneur en eau constante.

IV.4.1 Adsorption



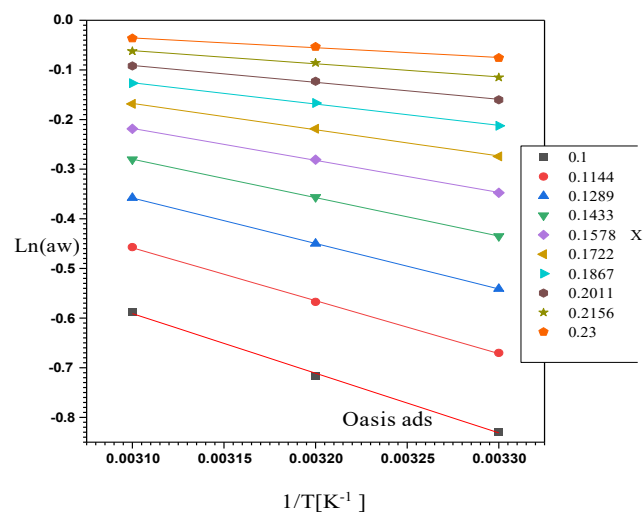
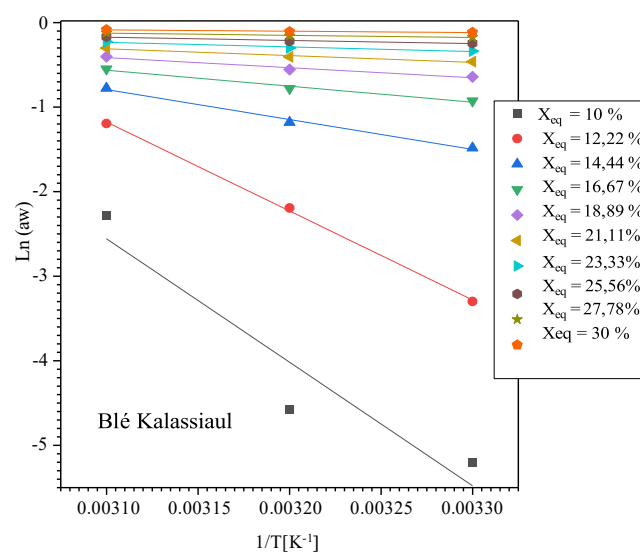
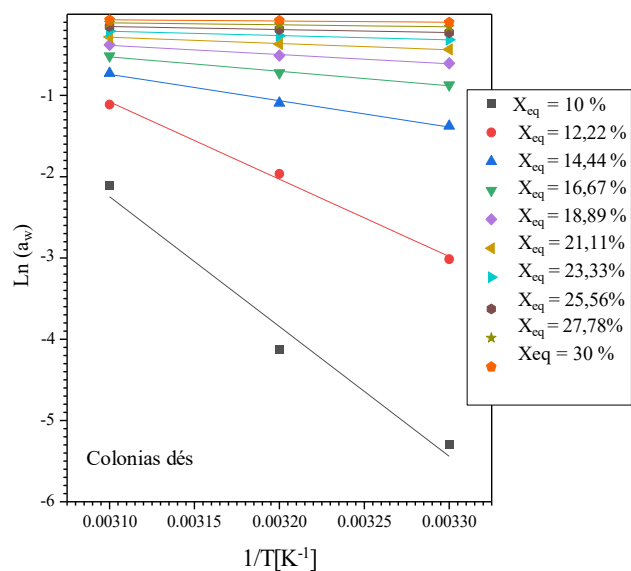


Figure. IV.9. Isoptères d'adsorption pour 3 variétés testés (Colonia, Kalassioul et Oasis).

IV.42 Désorption



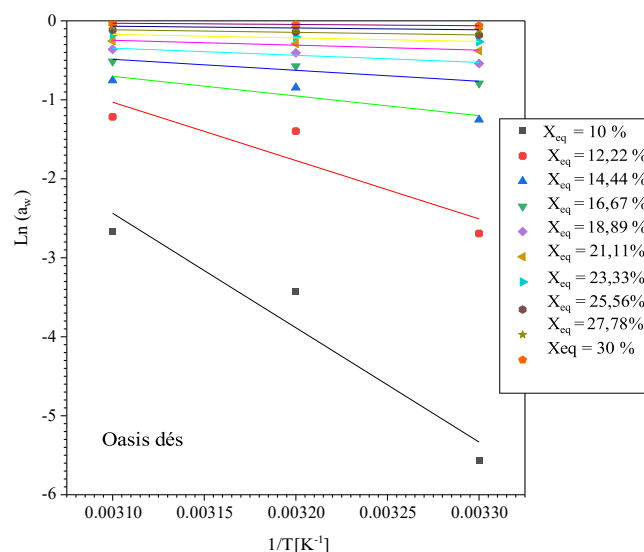


Figure. IV.10. Isothermes de Désorption pour 3 variétés testées (Colonia, Kalassioul et Oasis).

Les courbes obtenues montrent que la chaleur isostérique de sorption est significativement élevée aux faibles teneurs en eau, traduisant une forte liaison entre les molécules d'eau et les sites actifs du substrat solide. Cette énergie devient progressivement négligeable à mesure que l'humidité augmente, se rapprochant alors de la chaleur latente de vaporisation de l'eau pure, ce qui indique une sorption moins énergétiquement contraignante.

Selon les observations de E. Tsami (1991) [6], cette diminution rapide aux faibles humidités est attribuée à la présence de sites polaires à forte énergie dans la matrice du produit, qui sont les premiers à être occupés par les molécules d'eau. Ces molécules forment ainsi une monocouche stable, fortement liée au substrat.

Dans le cas du maïs, les chaleurs isostériques nettes d'adsorption ont été corrélées à la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) pour chaque variété. Les résultats obtenus confirment cette tendance : plus la teneur en eau diminue, plus la chaleur de sorption augmente, en raison de la rareté des sites de fixation disponibles et de leur forte affinité avec l'eau.

Cette relation entre la chaleur isostérique et X_{eq} est essentielle pour comprendre les mécanismes thermodynamiques du transfert d'humidité, et elle permet également de prédire

l'efficacité énergétique des procédés de séchage et de stockage, notamment dans les zones critiques de faible humidité

IV.5 Variation de la chaleur isostérique de sorption de trois variétés de maïs

IV.5.1 Adsorption

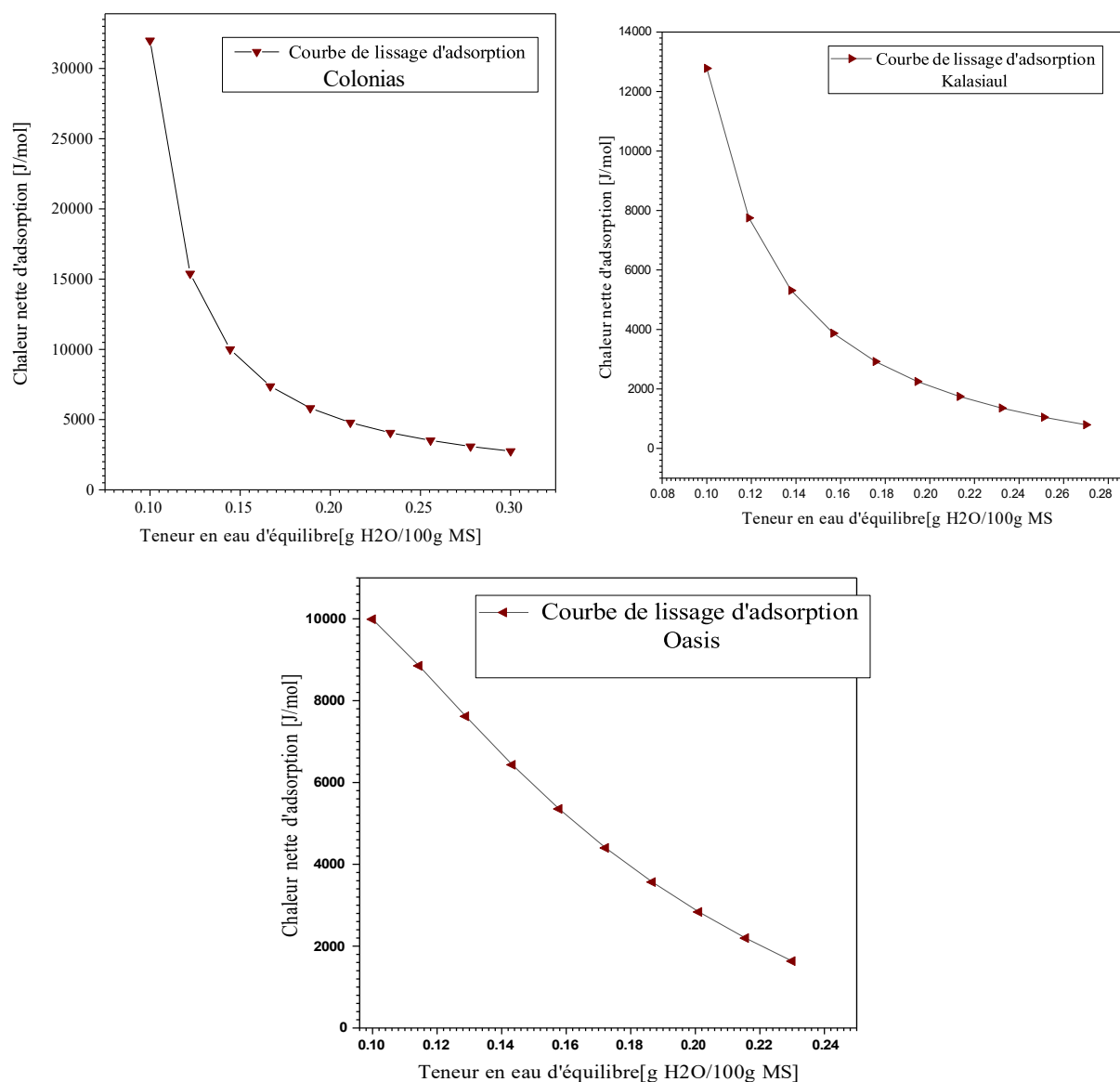


Figure. IV.11. Chaleur isostérique nette d'adsorption des 3 variétés testées (Colonias, Kalassiou et Oasis) en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

IV.52 Désorption

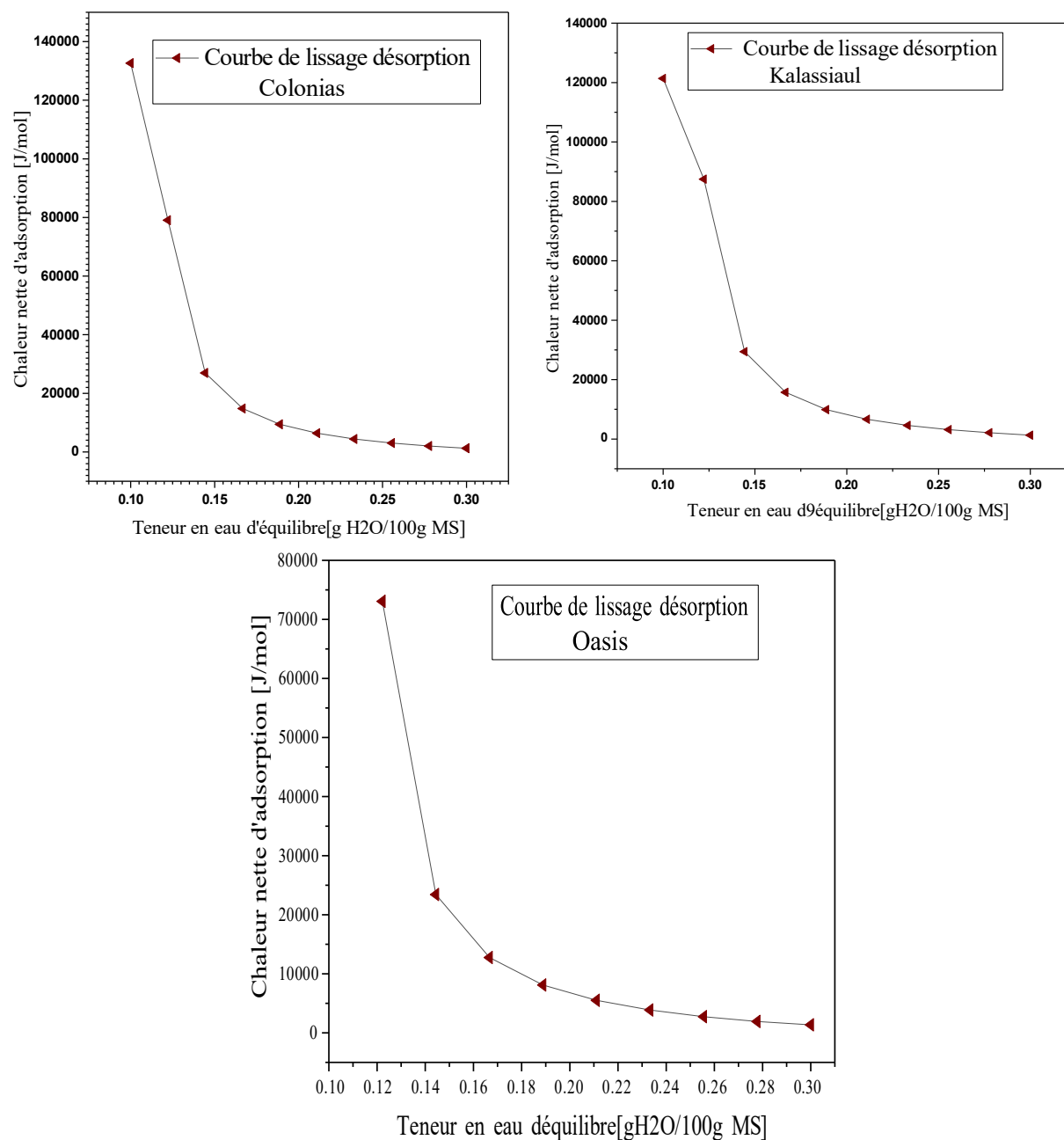


Figure. IV..12. Chaleur isostérique nette de désorption des 3 variétés testés (Colonias, Kalassiaul et Oasis) en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

La variation de la chaleur isostérique de sorption en fonction de la teneur en eau à l'équilibre (X_{eq}) pour les trois variétés de maïs (Colonias, Kalassioul et Oasis) est illustrée dans la figure IV.6. Il ressort de cette analyse que la chaleur isostérique est plus élevée aux faibles teneurs en eau, ce qui indique une forte interaction entre les molécules d'eau et les sites actifs des composants solides du maïs.

Lorsque la teneur en eau augmente, les sites de sorption à haute énergie deviennent saturés, entraînant une diminution progressive de la chaleur isostérique, notamment au fur et à mesure que l'eau s'adsorbe sur des sites moins énergétiques. Cette baisse est particulièrement marquée dans la zone des faibles humidités, traduisant une sorption plus exigeante en énergie dans les premières couches d'eau.

Les fortes valeurs de chaleur observées à faible humidité relative soulignent l'importance des forces d'adsorption physique et chimique dans cette phase initiale, tandis qu'à humidité plus élevée, la sorption devient plus lâche, typique d'une adsorption multicouche ou capillaire.

Ces résultats s'appliquent aussi bien à l'adsorption qu'à la désorption, bien que de légères différences puissent apparaître en raison du phénomène d'hystérésis. Cela reflète les variations d'énergie nécessaires selon la direction du transfert d'humidité.

En conclusion, la compréhension de l'évolution de la chaleur isostérique au cours du processus de sorption est essentielle pour optimiser les conditions de séchage, de conservation et de stabilité du maïs, en particulier dans les plages critiques de teneur en eau.

IV6.Conclusion

Les résultats de cette étude mettent en évidence les comportements distincts des trois variétés de maïs lors des processus d'adsorption et de désorption, avec une hystérésis marquée et une influence significative de la température sur la teneur en eau à l'équilibre. Les modèles de Peleg et GAB se sont révélés les plus adaptés pour décrire ces isothermes, offrant des outils précieux pour prédire les propriétés hygroscopiques et optimiser les conditions de conservation. L'analyse de la chaleur isostérique a permis de mieux comprendre les mécanismes thermodynamiques impliqués, soulignant l'importance des interactions eau-matière aux faibles humidités. Ces conclusions ouvrent des perspectives pour des applications pratiques dans le séchage et le stockage du maïs, tout en fournissant une base solide pour de futures recherches.

Référence :

- [1] Iglesias, H. A., & Chirife, J. (1982). **Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components**. Academic Press.
- [2] Kaymak-Ertekin, F., & Gedik, A. (2004). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 37*(4), 429–438.
- [3] Rizvi, S. S. H. (2005). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In **Engineering Properties of Foods** (3rd ed., pp. 239–326). CRC Press.
- [4] Samapundo, S., Devlieghere, F., De Meulenaer, B., & Debevere, J. (2007). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering*, 79*(1), 168–175.
- [5] Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? **Journal of Food Engineering*, 48*(1), 19–31.
- [6] Tsami, E. (1991). Net isosteric heat of sorption in dried fruits. **Journal of Food Engineering*, 14*(4), 327–335.
- [7] van den Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems: Theoretical aspects. In L. B. Rockland & G. F. Stewart (Eds.), **Water activity: Influences on food quality** (pp. 1–61). Academic Press.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le maïs constitue une culture céréalière stratégique à l'échelle mondiale, servant à la fois d'aliment de base et de matière première agro-industrielle. Il est la céréale la plus cultivée dans le monde, et sa production revêt d'importants enjeux socio-économiques. Dans ce contexte, la maîtrise de la conservation post-récolte est cruciale : un séchage et un stockage inadéquats entraînent des pertes physiques et des détériorations sévères (moisissures, toxines ...etc.)

Pour étudier le comportement hygroscopique des variétés Colonia, Kalassioul et Oasis, nous avons réalisé des mesures gravimétriques des isothermes de sorption. Des solutions H_2SO_4 à différentes concentrations ont été préparées pour générer des ambiances contrôlées (a_w fixées), aux trois températures de 30, 45 et 60 °C. Chaque isotherme expérimentale a ainsi été obtenu en suivant l'évolution de la teneur en eau d'équilibre de chaque grain (X_{eq}) pour chaque valeur de l'activité d'eau. Les données recueillies ont été ajustées à divers modèles (BET, GAB, Peleg, etc.) afin de caractériser les paramètres de sorption.

Les isothermes d'adsorption des trois variétés ont toutes présenté une forme sigmoïdale type II, caractéristique des aliments riches en amidon. On a observé l'augmentation de X_{eq} du grain avec l'augmentation de l'activité de l'eau ambiante, et pour une même a_w , X_{eq} diminue lorsque la température augmente

L'application de l'équation de Clausius-Clapeyron a permis d'estimer la chaleur isostérique nette de sorption : celle-ci décroît clairement avec l'augmentation de la teneur en eau (les molécules d'eau étant plus faiblement liées à taux d'humidité élevé)

Tous les modèles testés ont apporté un ajustement satisfaisant, mais les modèles de Peleg et GAB ont fourni les meilleurs compromis entre simplicité et précision. En particulier, la forme modifiée du modèle GAB a donné un coefficient de corrélation $R^2 \approx 0,99$ et des erreurs de prédiction très faibles, permettant de décrire correctement l'ensemble de l'isotherme. Ces modèles ont donc été retenus pour extraire les paramètres clés (humidité monomoléculaire, énergies d'interaction, etc.).

La connaissance précise des isothermes hygroscopiques permet d'optimiser les procédés de séchage et les conditions de stockage du maïs : on peut fixer des cibles d'humidité sûres et adapter les installations afin de minimiser les pertes. Par exemple, sécher le grain jusqu'à environ 10–12 % d'humidité (couche de maïs suspendue au-dessus d'une source de chaleur) permet de réduire quasiment à zéro les pertes quantitatives et qualitatives liées aux insectes et à la détérioration. Le maintien d'une faible humidité dans les silos prévient la germination et la prolifération microbienne. Les données expérimentales obtenues constituent également des références pour calibrer des capteurs d'humidité et automatiser le séchage industriel.

Perspectives

- ✓ Appliquer la même méthodologie sur d'autres produits céréaliers (blé, riz, sorgho, etc.) ou d'autres variétés de maïs pour comparer les comportements hygroscopiques et valider la généralité des conclusions.
- ✓ Intégrer des études complémentaires (mesures calorimétriques, analyses entropiques) pour mieux comprendre les mécanismes moléculaires de sorption, notamment en étudiant l'influence de la composition et la structure du grain sur les énergies de sorption
- ✓ Développer des autres modèles (régressions non linéaires multivariées, apprentissage automatique, réseaux de neurones) pour prédire les isothermes à partir de caractéristiques du grain et des conditions environnementales. De telles approches peuvent exploiter les données expérimentales existantes pour simuler en temps réel le comportement d'un lot de céréales en fonction de la température et de l'humidité, améliorant ainsi la gestion du stockage.

En somme, cette étude expérimentale et de modélisation met en évidence l'importance des isothermes de sorption pour le maïs et propose des bases solides pour optimiser le séchage et le stockage. Les résultats obtenus contribuent à la réduction des pertes post-récolte et ouvrent la voie à des applications étendues et à des modèles prédictifs intégrés dans des stratégies de conservation agroalimentaire.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique
Faculté des sciences et Technologie
Département génie Des procédés
جامعة غرداية
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق



Université de Ghardaïa

Autorisation d'impression finale d'un mémoire de master

	Nom et prénom	Signature
Examineur 1	KhaZen Souad	
Examineur 1	Marrrouni Khalel	
Encadrant	Daoud Djamel	
Co-encadrant	Benseddik Abdelouahab	

Soussigne M^{re} : Hellali Naïma

Président de jury des étudiant (s) : Hadj. Mahamed. Zineddine et Chamkha Naïma

Filière : Génie des procédés ; Spécialité : Génie chimique

Thème: Etude expérimentale et modélisation des isothermes de sorption d'humidité et propriétés thermodynamique des variétés des maïs cultivées dans la région de Ghardaïa

Autorise le (s) étudiant (s) mentionné (s) ci-dessus à imprimer et déposer leur (s) manuscrit final au niveau du département.

Ghardaïa le: 10/07/2027

Président de jury

Le chef de département

