



Le 5<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 5<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 24 et 25 Octobre 2018



## Isothermes de Sorption des Figues : champs d'iso-sorption et chaleur isostérique nette de sorption

A. BENSEDDIK<sup>\*1</sup>, A. AZZI<sup>2</sup>, H. BENSABA<sup>1</sup>, D. LALMI<sup>1</sup> et K. ALLAF<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER,

Centre de Développement des Energies

Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algérie

<sup>2</sup>Unité de Recherche des Matériaux et Energie Renouvelables, (URMER), Tlemcen, Algérie

<sup>3</sup>Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement : LaSIE FRE 3474 CNRS - Université de La Rochelle, La Rochelle, France

\* (auteur correspondant : [a\\_benseddik2008@yahoo.fr](mailto:a_benseddik2008@yahoo.fr) / [a\\_benseddik@uraer.fr](mailto:a_benseddik@uraer.fr))

**Résumé** - Les isothermes de sorption constituent une source d'information importante pour établir la stabilité des produits alimentaires et ses conditions de conservation. Ce travail vise la connaissance fine de l'influence de la température sur le processus de sorption, et la prédiction du comportement hygroscopique lors du stockage ou du séchage des figues. Nous avons utilisé le modèle de GAB (Guggenheim - Anderson - de Boer). La simulation des isothermes de sorption a été faite dans une plage de température comprise entre 15 et 60 °C. La régression non linéaire directe a été employée pour évaluer les cinq paramètres de modèle de GAB ( $X_m$ ,  $C_0$ ,  $\Delta H_C$ ,  $K_0$  et  $\Delta H_K$ ) avec le procédé de Levenberg-Marquardt. La relation thermodynamique sur laquelle l'estimation d'isostères de sorption est basée sur l'équation de Clausius-Clayperon. Nous avons introduit une nouvelle notion que nous avons appelé champ d'iso-sorption.

**Mots clés:** Séchage - Modélisation - Simulation - Isothermes de sorption - Modèle de GAB - effet de température - Chaleur isostérique nette de sorption.

### I. INTRODUCTION

L'Algérie est considérée comme un grand producteur de figue, elle occupe la troisième place avec environ une production de 150000 tonnes en 2011[1]. La figue sèche est potentiellement un produit à forte valeur ajoutée qui devrait être explorée pour deux raisons: la production extensive de figues fraîches et la valeur nutritionnelle. Les conditions climatiques de l'Algérie sont favorables à une application de l'énergie solaire au séchage des produits agricoles, le potentiel énergétique peut atteindre les 7 kWh/m<sup>2</sup>.jour [2]. Le but du développement du séchage solaire est d'arriver à une

meilleure qualité de produit séché avec une longue durée de conservation.

Comme toute étude sur le séchage d'un produit alimentaire, l'étape incontournable consiste à évaluer son caractère hygroscopique, caractère qui indique l'affinité que peut avoir le produit alimentaire avec son milieu environnant. Les isothermes de sorption représentent la relation entre la teneur en eau d'un aliment et l'activité de l'eau à température constante. La technique la plus utilisée pour préserver la qualité des aliments consiste à réduire l'activité de l'eau jusqu'à un niveau suffisamment bas. ; L'obtention de l'isotherme de sorption est essentielle pour déterminer le niveau d'humidité à partir duquel on inhibe la croissance microbienne et la production de mycotoxines pendant la conservation.

La teneur en humidité d'équilibre et la chaleur isostérique nette de sorption sont des propriétés essentielles dans l'analyse et la conception des divers procédés agroalimentaires tels que la conservation, le séchage et le stockage. La chaleur isostérique nette de sorption peut être utilisée pour estimer les besoins énergétiques des procédés de déshydratation. Le niveau de la teneur en eau de produit au cours de laquelle la chaleur isostérique nette de sorption se rapproche de la chaleur latente de vaporisation de l'eau est souvent considéré comme une indication de la quantité de "eau liée" existant dans le produit alimentaire [3].

Plusieurs travaux de recherche ont été focalisés sur la modélisation des isothermes de sorption, de nombreux modèles ont été proposés sur la base de



Le 5<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 5<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 24 et 25 Octobre 2018



différentes théories. Quelque 80 corrélations, quelque unes sont basés sur la théorie, d'autres sont purement empiriques [4]. Chirife et Iglesias [5] ont établi et discuté vingt-trois modèles. Boquet, et al. [6,7] ont évalué la capacité de ce grand nombre de modèles pour décrire les isothermes de 39 produits alimentaires et analysé statistiquement la qualité d'ajustement de ces modèles. Ces deux dernières décennies, un nombre important de travaux ont porté sur l'étude des modèles mathématiques décrivant les isothermes de sorption des produits alimentaires, d'autre travaux montrent l'influence de la température sur les isothermes de sorption [8-12], de ces modèles, nous choisissons le modèle de GAB [13], le modèle le plus largement utilisé est qui a montré un bon ajustement jusqu'à une activités de l'eau de l'ordre de 0.9 et permet une bonne évaluation de la quantité d'eau fortement liée au niveau des sites d'adsorption primaires  $X_m$  [7,13-17]. En plus de sa base théorique fiable, ce modèle comprend des paramètres qui traduisent physiquement le processus de sorption [18]. Il peut donc décrire l'effet de la température sur les isothermes de sorption grâce aux équations du type d'Arrhenius.

## II. MODELISATION DES ISOTHERMES DE SORPTION

### A. Base théorique de modèle de GAB

L'isotherme de sorption de modèle de GAB représente une extension raffinée des théories de Langmuir et de BET (Brunauer, Emmett, Teller). La base théorique pour l'isotherme de sorption de GAB est l'hypothèse d'adsorption physique localisée dans les multicouches avec des interactions non latérales. La première couche d'eau couvre également la surface du sorbant (i.e. le produit) est très fortement liée dans une monocouche, les couches subséquentes moléculaires d'eau ont moins d'interaction avec la surface du sorbant. Dans ces dernières, les molécules ont des interactions avec le sorbant de telle manière que le niveau d'énergie se situe quelque part entre celui des molécules de monocouche et l'énergie au niveau du volume liquide [21].

Pour l'établissement de modèle de GAB, trois hypothèses : le système de sorption comporte sites actifs identiques, isothermique et ouvert à la vapeur du sorbant.

L'équation de l'isotherme de sorption de GAB où il a introduit un paramètre  $K$  [13] est représenté par l'équation (1) :

$$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{[(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)]} \quad (1)$$

Les paramètres du modèle de GAB  $C$  et  $K$  peuvent être exprimés selon le modèle de l'équation d'Arrhenius :

$$C = C_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta H_C}{RT}\right) \quad (2)$$

$$K = K_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta H_K}{RT}\right) \quad (3)$$

$\Delta H_C = H_L - H_m$  est la différentielle de chaleur de sorption (ou la différence en enthalpie entre la sorption de monocouche et celle de multicouche) dû à l'interaction exothermique de l'eau avec les sites de sorption primaires, la valeur de  $\Delta H_C$  devrait être positive.

$\Delta H_K = H_1 - H_m$  est la différence entre la chaleur de sorption des molécules absorbées dans les multicouches et la chaleur de condensation de l'eau. Cette valeur doit être négative et de faible valeur du fait que les molécules de multicouche sont moins fermement attachées. Il arrive qu'une valeur positive puisse être obtenue en raison de la dissolution des sucres végétaux [21].

### B. Analyse de régression

Il existe deux méthodes d'analyse de régression pour estimer les paramètres du Modèle GAB; la méthode directe et indirecte. Dans la méthode directe, les cinq paramètres de modèle de GAB ( $X_m$ ,  $C_0$ ,  $\Delta H_C$ ,  $K_0$  et  $\Delta H_K$ ) sont estimées en substituant les équations (2) et (3) dans l'équation (1). Dans la méthode (successive) indirecte, la première étape consiste à estimer les trois paramètres  $X_m$ ,  $C$  et  $K$  du modèle GAB pour chaque température par analyse de régression de l'équation (1), dans la deuxième étape les paramètres  $C_0$ ,  $\Delta H_C$ ,  $K_0$  et  $\Delta H_K$  sont estimées par l'analyse de régression selon les équations (2) et (3). Les inconvénients de la méthode indirecte résident dans : (i) l'utilisation du lissage deux fois successives d'où le risque d'augmenter significativement les incertitudes. (ii) la méthode dépend fortement de la marge confiance des constantes  $X_m$ ,  $C$  et  $K$  obtenus à partir du premier lissage.

La qualité de l'ajustement a été déterminée en utilisant le coefficient de corrélation ( $r$ ) et la statistique du test ki-carrée ( $\chi^2$ ) réduite qui est essentiellement la somme des carrés des différences entre les données expérimentales et les données obtenues par le calcul à partir des modèles, chaque différence au carré divisée par les données



**Le 5<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 5<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 24 et 25 Octobre 2018



correspondantes calculées à partir des modèles. Ceci peut être représenté mathématiquement comme suite [39, 40]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{eq\_exp,i} - X_{eq\_pré,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{X_{eq\_exp}} - X_{eq\_exp,i})^2}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{eq\_exp,i} - X_{eq\_pré,i})^2}{N - n}$$

avec :

$$\overline{X_{eq\_exp}} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{eq\_exp,i}}{N}$$

avec  $X_{eq\_exp}$  est la teneur en eau d'équilibre expérimentale,  $X_{eq\_pré}$  est la teneur en eau d'équilibre prédite,  $N$  le nombre de points expérimentaux.

### III. CALEUR ISOSTERIQUE NETTE DE SORPTION

La chaleur nette isostérique de sorption ( $\Delta H_{is}$ ) est définie comme la différence entre l'énergie totale nécessaire pour enlever de l'eau du produit alimentaire ( $Q_{st}$ ) et l'énergie totale nécessaire pour vaporiser l'eau normale ( $\Delta H_V$ ) :  $\Delta H_{is} = Q_{st} - \Delta H_V$ . La chaleur nette isostérique peut être dérivée à partir des isothermes de sorption à divers températures en utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron [14, 22]:

$$\Delta H_{is} = -R \left( \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (T^{-1})} \right)_X \quad (4)$$

Les valeurs obtenues de cette équation sont valables seulement pour des considérations qualitatives des propriétés thermodynamiques car elles peuvent présenter des erreurs considérables à cause des manipulations graphiques et des données

La chaleur nette isostérique de sorption diminue considérablement lorsque la teneur en humidité augmente. Dans le but de décrire la relation entre la chaleur nette isostérique de sorption et de la teneur en eau d'équilibre, une corrélation empirique exponentielle comme suite [24]:

$$\Delta H_{is} = q_0 \cdot \exp\left(\frac{-X}{X_0}\right) \quad (6)$$

où  $q_0$  est la chaleur nette de sorption isostérique des premières molécules d'eau dans le produit ( $kJmol^{-1}$ ),  $X$  est la teneur en eau d'équilibre, ( $gH_2O/100 g MS$ ) et  $X_0$  est la teneur en eau caractéristique de produit, ( $gH_2O/100 g MS$ ). Le paramètre  $q_0$  fournit des informations importantes sur les interactions physico-chimiques d'eau avec les constituants majeurs de produit et l'état de l'eau dans le produit, et il s'agit d'un paramètre indispensable, pour l'estimation des besoins en énergie au cours du séchage [4].

### IV. RESULTATS ET DISCUSSION

#### A. Teneur en eau d'équilibre

Les résultats expérimentaux de la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  de sorption de la figue, pour quatre températures, 15, 30, 45 et 60°C donné par Tsami et al [20] ont été analysée par le modèle de GAB à cinq paramètres qui prend en compte l'effet de la température. La régression non linéaire directe à été employée pour évaluer les paramètres du modèle de GAB avec le procédé de Levenberg-Marquardt en utilisant le programme OriginPro9® (Tableau 2).

TAB. 2 : Estimation des Paramètre de modèle de GAB (régression non linéaire directe)

Isothermes de sorption	$X_m$	$C_0$	$\Delta H_C$ [J.mol <sup>-1</sup> ]	$K_0$	$\Delta H_K$ [J.mol <sup>-1</sup> ]	$R^2$	$\chi^2$
<i>Désorption</i>	11.30	$2.28 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^7$	1.122	$-3.75 \times 10^5$	0,982	2,439
<i>Adsorption</i>	9.58	$1.75 \times 10^{-4}$	$2.33 \times 10^7$	1.22	$-5.35 \times 10^5$	0,991	1,938

expérimentales des isothermes.

En intégrant l'équation (4) et en supposant que la chaleur nette isostérique de sorption  $\Delta H_{is}$  est indépendante de la température, on obtient:

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{\Delta H_{is}}{R}\right) \frac{1}{T} + cst \quad (5)$$

Les paramètres  $\Delta H_C$  et  $\Delta H_K$  représentent les valeurs moyennes de la chaleur de désorption ou d'adsorption de l'eau dans la figue. Les valeurs positives de  $\Delta H_C$  sont dues à l'interaction exothermique de la vapeur d'eau avec les sites primaires de désorption ou d'adsorption dans la figue. Les valeurs négatives de  $\Delta H_K$  correspondent à la chaleur de désorption ou d'adsorption de la



multicouche.

La figure 1 présente les résultats expérimentaux pour 15, 30, 45 et 60°C en adsorption et désorption respectivement ainsi que les courbes de lissage de modèle de GAB. On observe que les courbes théoriques de lissage présentes également une allure sigmoïdale comme la plupart des produits biologiques, particulièrement les produits à forte teneur en sucre.

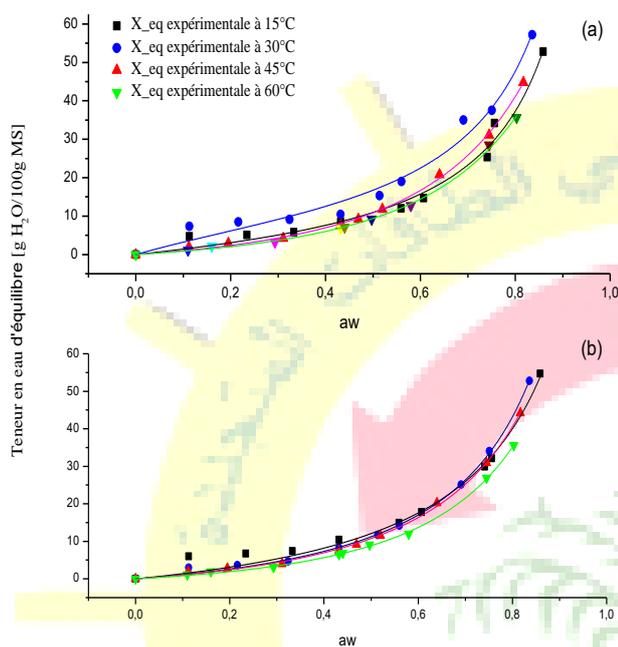


Fig. 1 : Courbes expérimentales et prédites par le modèle de GAB des isothermes d'adsorption (a) et de désorption (b) de la figure

### B. Effet de la température

Il est largement admis qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de la teneur en eau d'équilibre [25]. Cela a été observé jusqu'à une activité de l'eau de l'ordre de 0,55 à 0,8, dans cette région, les courbes se croisent. Pour une activité de l'eau supérieure à 0,8 on observe une inversion due à l'effet de la température (dans ce cas la teneur en eau d'équilibre augmente avec l'augmentation de la température). Dans certains cas, tels que les produits riches en sucre comme les fruits, il y a un effet d'inversion, cela est dû à l'augmentation de la solubilité de sucres où la solubilisation réduit la mobilité de l'eau.

La figure 2 montre clairement le point d'intersection et l'effet inverse de la température sur les isothermes de sorption entre 15 et 60°C, ce point dépend de la composition de l'aliment et de la solubilité des sucres,

ce ci est en accord avec les résultats [20, 26], contrairement aux produits à faible teneur en sucre comme le cas de la pomme [27] et l'ananas [28] où les courbes ne se croisent pas.

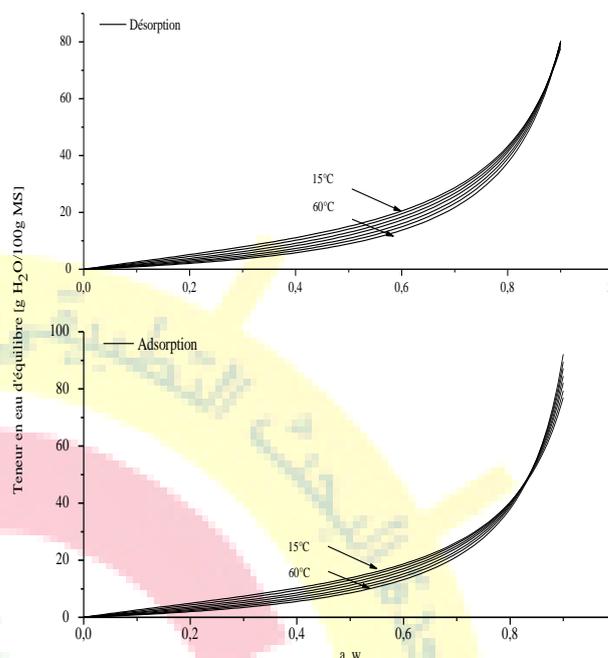


Fig. 2 : Isothermes de sorption de la figure décrite par le modèle de GAB

La figure 3 illustre les résultats obtenus. Ces diagrammes donnent en effet les barèmes température-activité d'eau pour chaque niveau de la teneur en eau. Elles montrent que la teneur en eau d'équilibre du produit diminue avec l'augmentation de la température pour une même activité de l'eau [29-32], ceci est expliqué par l'augmentation de l'agitation thermique. D'autre par la figure 3 montrent clairement la plage des activités de l'eau où l'influence de la température est très importante. Ces observations sont également valables pour les isothermes d'adsorption et de désorption

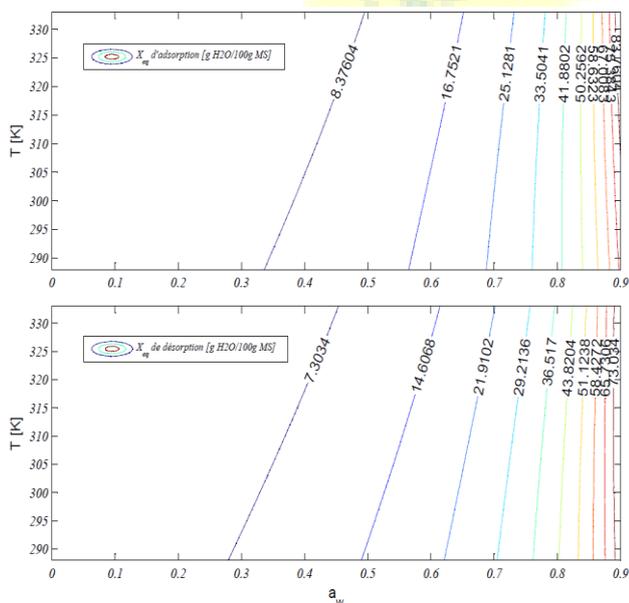
### C. Chaleur isostérique de sorption (Enthalpie Différentielle)

Il résulte de l'équation (5) que la chaleur nette isostérique de sorption peut être obtenue à partir de la pente de la courbe représentant  $\ln(a_w)$  en fonction de  $1/T$  à une teneur en eau  $X$  constante (Fig. 4). Pour construire cette figure, les valeurs de  $a_w$  à différentes températures sont calculées pour chaque teneur en eau. Néanmoins, les données de sorption n'ont pas été déterminées à teneur constante. Par conséquent, la procédure suivante a été appliquée. Depuis l'un des points de teneur en eau des données expérimentales disponibles à une température donnée, les valeurs de

l'activité d'eau sont déterminées pour d'autres températures en appliquant les paramètres du modèle de GAB sous sa forme transformée selon [23] est qui est représenté par l'équation (7) :

$$a_w = \left[ 2 + (X_m/X_{eq} - 1)C - \left\{ (2 + (X_m/X_{eq} - 1)C)^2 - 4(1 - C) \right\}^{1/2} \right] / [2K(1 - C)] \quad (7)$$

La méthode des moindres carrés est utilisée pour obtenir la pente de la courbe représentant  $\ln(a_w)$  en fonction de  $1/T$  pour chaque valeur de la teneur en eau  $X$  en utilisant le programme OriginPro9® comme il est indiqué sur la figure 5.





# Le 5<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

## The 5<sup>nd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 24 et 25 Octobre 2018

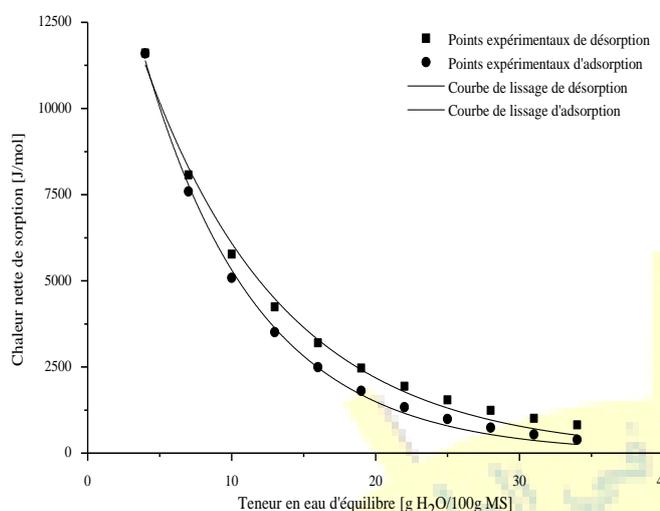


Fig. 5 : Chaleur isostérique nette de sorption de la figue en fonction de la teneur en eau d'équilibre

### V. CONCLUSION

La détermination de l'état de l'eau dans la figue en termes de modélisation des isothermes de sorption et de chaleur nette de sorption constituent une étape obligatoire dans les opérations de séchage et de conservation. La modélisation des isothermes de sorption d'eau entre 15 et 60°C a été réalisée en utilisant le modèle de GAB à cinq paramètres, ce modèle donne une excellente prédiction de l'évolution de la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'activité d'eau et de la température. L'originalité de ce travail est que nous avons représenté le champ d'iso-sorption, à notre connaissance, cette représentation n'a pas été établie dans les travaux antérieurs. Les résultats ont montré que la teneur en eau à l'équilibre diminue avec l'augmentation de la température jusqu'à ce que l'activité de l'eau soit  $a_w = 0.8$ , à cette valeur de l'activité d'eau, les courbes se croisent et donnent lieu à une inversion due à l'effet de la température. La chaleur nette isostérique de sorption de la figue à divers températures a été déterminé en utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron. Elle augmente au fur et à mesure que le degré de déshydratation augmente, elle varie exponentiellement avec la teneur en eau à l'équilibre.

### REFERENCES

- [1] FAO. 2011. Agricultural data. *FAOSTAT*.
- [2] Mefti A. et M.Y. Bouroubi (1999). Estimation et cartographie de la composante globale du rayonnement solaire. *Rev. Energ. Ren. : Valorisation*, 219-224.
- [3] Al-Muhtaseb, A. H., W.A.M. McMinn et T. R. A. Magee (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A Review. *Trans IChemE*, **80**, 118-128.
- [4] Jangam, S.V. and Mujumdar, A.S. (2010). Basic concepts and definitions, in *Drying of Foods*. Published in Singapore, **1**, 1-30.
- [5] Chirife, J. and H. A. Iglesias (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1- a review. *J. Fd Technol*, **13**, 159-174.
- [6] Boquet, R., J.Chirife and H. A. Iglesias (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods II. Evaluation of various two-parameter models. *J. Fd Technol*, **13**, 319-327.
- [7] BOQUET, R., J.Chirife and H. A. Iglesias (1979). Equations for fitting water sorption isotherms of foods. III. Evaluation of various three-parameter models. *J. Fd Technol*, **14**, 527-534.
- [8] Vazquez, G., F. Chenlo, R. Moreira (2003). Sorption isotherms of lupine at different temperatures. *Journal of Food Engineering*, **60**, 449-452.
- [9] Yazdani M., P. Sazandehchi, M. Azizi and P. Ghobadi (2006). Moisture sorption isotherms and isosteric heat for pistachio. *Eur Food Res Technol*, **223** 577-584.
- [10] Al-Mahasneha M.A., M.M. Bani Amerb and T.M. Rababah (2012). Modeling moisture sorption isotherms in roasted green wheat using least square regression and neural-fuzzy techniques. *Food and Bioprocess Processing*, **90** 165-170.
- [11] Rohvein, C., E. Santalla, M.C. Gely (2004). Note: Estimation of Sorption Isotherm and the Heat of Sorption of Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) Seeds. *Food Science and Technology International* **10**, 409.
- [12] Kamran, M. M., S. H. Karparvarfard, A. Farahnaky and K. Jafarpour (2012). Thermodynamic of Water Sorption of Grape Seed: Temperature Effect of Sorption Isotherms and Thermodynamic Characteristics. *Food Biophysics* 01-11.
- [13] Van den Berg, C. (1985). Development of B.E.T. like models for sorption of water of foods; theory and relevance. In D. Simatos, & J. L. Multon (Eds.), *Properties of water in foods* 119-135. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- [14] Quirijns E. J., Anton J.B., Wilko K.L. and Gerrit S (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *J Sci Food Agric* **85**, 1805-1814.
- [15] Timmermann E.O., J. Chirife, H. A. Iglesias (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters. *Journal of Food Engineering* **48**, 19-31.
- [16] Maroulis, Z.B., Tsami, E. and Marinos-Kouris, D. (1988). Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. *Journal of Food Engineering*, **7**, 63-78.
- [17] Lewicki P. P. (1997). The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. *International Journal of Food Science and Technology*, **32**, 553-557.
- [18] Nkouam G. B. (2007). *Conservation des fruits du karité (Vitellaria paradoxa Gaertn.) et de l'aïélé (Canarium schweinfurthii Engl.) : isothermes de sorption d'eau et extraction des matières grasses des fruits stockés. Doctorat/Ph.D en Génie de procédés. Université de Ngaoundere.*
- [19] HO THI, Thu Nga (2008). Étude de l'influence de la température et de l'humidité sur les propriétés mécaniques en traction des fibres De chanvre et de coco. *Doctorat en Génie Ph.D. Ecole de technologie supérieure, Université de Québec*.
- [20] Tsami, E., D. Marinos-Kouris and Z.B. Maroulis (1990). Water Sorption Isotherms of Raisins, Currants, Figs, Prunes and Apricots. *Journal of Food Science* **55**, 1597.
- [21] Quirijns E. J., A. JB Bostel, W. KP. Loon and G. Straten (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Sci Food Agric* **85**, 1805-1814.
- [22] Hunter A. J., Clayton, Australia (1991). On the basic equation of sorption and the isosteric heat. *Wood Sci. Technol*, **25**, 99 - 111.



Le 5<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 5<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 24 et 25 Octobre 2018



- [23] Maroulis ZB, Kiranoudis CT and Marinos-Kouris D (1995). Heat and mass transfer modeling in air drying of foods. *J Food Eng* **26**, 113–130.
- [24] Tsami, E., Maroulis, Z. B., Morunos-Kouris, D. and Saravacos, G. D., 1990, Heat of sorption of water in dried fruits, *Int J Food Sci Technol*, **25**, 350–359.
- [25] Chen X. D. and A. S. Mujumdar (2008). Drying Technologies in Food Processing. *First edition Blackwell Publishing*.
- [26] Gabas A.L., J. Telis-Romero and F.C. Menegalli (1999). Thermodynamic models for water sorption by grape skin and pulp. *Drying Technology*, **17**, 961-974.
- [27] Veltchev Z. N., N. D. Menkov (2000). Desorption isotherms of apples at several temperatures. *Drying Technology*, **18**, 1127-1137.
- [28] Hossain M.D., B.K. Bala, M.A. Hossain and M.R.A. Mondo (2001). Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. *Journal of Food Engineering* **48**, 103-107.
- [29] Bejar A. K., N. B. Mihoubi and N. Kechaou (2012). Moisture sorption isotherms-Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves. *Food Chemistry* **132**, 1728–1735.
- [30] Lahsani S., M. Kouhila, M. Mahrouz (2004). Adsorption-desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Energy Conversion and Management*, **45**, 249–261.
- [31] Kiranoudis C. T., Z. B. Maroulis, E. Tsami & D. Marinos-Kouris (1993). Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of Some Vegetables. *Journal of Food Engineering*, **20**, 55-74.
- [32] Jamali A., M. Kouhila \*, L. Ait Mohamed, A. Idlimam, A. Lamharrar (2006). Moisture adsorption-desorption isotherms of *Citrus reticulata* leaves at three temperatures. *Journal of Food Engineering* **77**, 71–78.
- [33] Mujumdar A. S. (2006). Handbook of Industrial Drying, Third Edition Editor(s). *National University of Singapore*.
- [34] Stamatios J. B. and V. G. Belessiotis (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, **65**, 449-458.
- [35] Talla A. (2012). Experimental Determination and Modelling of the Sorption Isotherms of Kilishi. *British Journal of Applied Science & Technology* **2** 379-389.
- [36] Siripatrawan U. and P. Jantawat (2006). Determination of Moisture Sorption Isotherms of Jasmine Rice Crackers Using BET and GAB Models. *Food Sci Tech Int*, **12**, 459–465.
- [37] Wang N. and J. G. Brent-m (1991). Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Potatoes at Four Temperatures. *Journal of Food Engineering*, **14** 269-287.
- [38] Tsami E. (1991). Net Isosteric Heat of Sorption in Dried Fruits. *Journal of Food Engineering*, **14**, 327-335.
- [39] Naderinezhad, S., Etesami, N., Najafabady, A.P., Falavarjani, M.G.h. (2016). Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters. *Food Sci Nutr* **4**: 110–118.
- [40] Ruhanian, S., Movagharnjad, K. (2016). Mathematical modeling and experimental analysis of potato thin-layer drying in an infrared-convective dryer. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* **9**: 84-91.