



Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



## Modélisation des isothermes de désorption de la citrouille en vue de leur séchage solaire

A. BENSEDDIK<sup>#,\*1</sup>, A. AZZI<sup>\*2</sup>, A.K. ALLAF<sup>\*3</sup>

<sup>#</sup> Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER,  
Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algérie  
<sup>1</sup>a\_benseddik@uraer.fr

<sup>\*</sup>Unité de Recherche des Matériaux et Energie Renouvelables, (URMER), Tlemcen, Algérie  
<sup>2</sup>a\_azzi@mail.univ-tlemcen.dz

<sup>\*\*</sup> Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement, Pôle Sciences et Technologie  
Avenue Michel Crépeau 17042 La Rochelle Cedex 1, France.  
<sup>3</sup>Kallaf@univ-lr.fr

**Abstract** - The knowledge of the desorption isotherm is particularly important for the drying of a product training. This work focuses on the one hand, modeling the desorption isotherm, the prediction of the hygroscopic behavior during storage or drying of figs, and secondly, the use of experimental results to determine their heat isosteric desorption. Nine mathematical models were used; the model of Peleg with four parameters optimizes the smoothing of experimental points in a large field of water activities. The thermodynamic relation used for the estimation desorption isostere which is based on the Clausius-Clayperon equation. An empirical equation of an exponential form expresses the net isosteric heat of desorption as a function of moisture content was proposed.

**Résumé** - La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit par entraînement. Ce travail s'intéresse d'une part de la modélisation de l'isotherme de désorption, la connaissance fine de l'influence de la température sur le processus de désorption, et la prédiction du comportement hygroscopique lors du séchage de la citrouille, et d'autre part, l'exploitation des résultats expérimentaux pour déterminer leurs chaleurs isostériques de désorption. Neuf modèles mathématiques ont été utilisés, le modèle de Peleg a quatre paramètres optimise le lissage des points expérimentaux dans un domaine d'activité de l'eau assez important. La relation thermodynamique sur laquelle l'estimation d'isostères de désorption est basée sur l'équation de Clausius-Clayperon. Une équation exponentielle empirique exprime la chaleur isostérique nette de désorption en fonction de la teneur en eau a été proposé.

**Mots-clefs** - isotherme de désorption - citrouille - effet de température - prédiction du comportement hygroscopique - modèle de Peleg- chaleur isostérique nette de désorption.

### I. INTRODUCTION

Les citrouilles sont plus couramment consommées dans la région de Ghardaïa, elles sont cultivées comme plante potagère dans la plupart des jardins familiaux de la wilaya, qui s'est forgée une réputation pour la production de la citrouille. Les citrouilles contiennent une quantité particulièrement intéressante de caroténoïdes, des composés antioxydants. Elles sont de bonnes sources de caroténoïdes, et certaines variétés sont riches en provitamines A, principalement de bêta-carotène et d'alpha-carotène [1-4]. La consommation d'aliments riches en caroténoïdes a été associée à la prévention du cancer, la dégénérescence maculaire et d'autres maladies dégénératives, principalement liée à leurs propriétés antioxydantes et des propriétés de piégeage de radicaux libres [5].

Les producteurs qui vivent de leurs petites parcelles de terrain sont exposés aux fluctuations du marché, notamment lors des saisons de production où les prix baissent jusqu'à rendre la production déficitaire. Sécher permet à ces entrepreneurs ruraux d'allonger la durabilité des produits, de diminuer les pertes (qui peuvent parfois dépasser 50% de la production) et d'ajouter de la valeur à leurs produits. L'utilisation des séchoirs à air chaud avec un très haut pouvoir de chauffage sont utiles, néanmoins leur consommation



**Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014



en énergie demeure trop élevée. Chaque pays a donc intérêt à tenir compte des sources d'énergies de remplacement. C'est pour cette raison que le séchage solaire présent un tel intérêt pour les pays en voie de développement. La conception de procédés de séchage exige la connaissance de la relation entre la teneur en eau et de l'équilibre de la pression de vapeur, puisque les gradients de pression de vapeur sont les moteurs essentiels au cours de ces processus. En raison de son importance dans les processus de transformation des aliments, comme dans leur séchage, le mélange, le stockage et l'emballage et aussi de prévoir les changements dans la stabilité des aliments, choix du matériau d'emballage approprié, et à comprendre les changements physico-chimiques impliqués dans le processus de production, la sorption de vapeur d'eau par les aliments a reçu beaucoup d'attention [6-8]. Dans le séchage, la connaissance de l'isotherme de désorption permet de calculer la teneur en eau d'équilibre du produit  $X_{eq}$  avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau  $X$  du produit en fin de séchage.

Plusieurs travaux de recherche ont été focalisés sur la modélisation des isothermes de sorption, de nombreux modèles ont été proposés sur la base de différentes théories. Quelque 80 corrélations, les unes sont basées sur la théorie, les autres sont purement empiriques [9]. Chirife et Iglesias [10] ont établi et discuté vingt-trois modèles. Boquet, et al. [11,12] ont évalué la capacité de ce grand nombre de modèles pour décrire les isothermes de 39 produits alimentaires et analyser 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'autres travaux montrent l'influence de la température sur ces isothermes de sorption [13-17].

L'objectif de ce travail était de tester neuf modèles mathématique des isothermes de sorption afin de sélectionner le modèle le plus approprié à la citrouille, d'étudier l'influence de la température sur le processus de désorption, de déterminer la chaleur isostérique de désorption et de proposer une équation empirique sous une forme exponentielle exprimant cette chaleur en fonction de la teneur en eau.

## II. ISOTHERMES DE DESORPTION

Les données expérimentales de la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  de désorption de la Citrouille, pour trois températures, 30, 50 et 70°C donné par [18]

ont été utilisés pour évaluer la relation entre la teneur en eau d'équilibre et l'activité de l'eau de la citrouille, en utilisant les équations représentant les modèles couramment utilisés dans les produits alimentaires.

TAB. 1 : Modèles des isothermes de sorption.

modèle	Equation
GAB(Guggenhei m-Anderson-de Boer) (Van den Berg, 1985) [19]	$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{[(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)]}$
BET (Brunauer, Emmett & Teller, 1938) [20]	$X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{[(1 - a_w)(1 - a_w + C a_w)]}$
Halsey (Halsey, 1948) [21]	$X = \left[ \frac{A}{\ln(1/a_w)} \right]^{1/B}$
Henderson (Henderson, 1952) [22]	$X = [-\ln(1 - a_w)/A]^{1/B}$
Iglesias-Chirife (Iglesias & Chirife, 1978) [23]	$X = A + B(a_w/(1 - a_w))$
Oswin (Oswin, 1946) [24]	$X = A(a_w/(1 - a_w))^C$
Caurie (Caurie, 1970) [25]	$X = \exp(a + b a_w)$
Smith (Smith, 1947) [26]	$X = C_1 - C_2 \ln(1 - a_w)$
Peleg (Peleg, 1993) [27]	$X = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2}$

Dans cette étude, les neuf modèles d'isothermes de sorption sont utilisés pour ajuster les données expérimentales sont présentées dans le tableau 1. Les paramètres de ces Modèles ont été estimés en ajustant les modèles mathématiques aux données expérimentales, en utilisant la méthode de régression non linéaire directe avec le procédé de Levenberg-Marquardt (Tableau 2).

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 [28]. La première couche d'eau ( $X_m$ ) couvre également la surface du sorbant est très fortement liée dans une monocouche. La prédiction de la valeur de ( $X_m$ ) est très importante car la détérioration des produits alimentaires est très faible en dessous de cette valeur. C'est parce que l'eau est fortement lié au produit en dessous de ( $X_m$ ) et n'est



Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



pas impliqué dans une réaction dégradable soit comme solvant ou comme l'un des substrats [29]. L'influence de la température sur les paramètres de modèle de GAB C et K ils peuvent être exprimés selon le modèle de l'équation d'Arrhenius [30]:

$$C = C_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta H_C}{RT}\right) \quad (1)$$

$$K = K_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta H_K}{RT}\right) \quad (2)$$

$\Delta H_C = H_L - H_m$  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.  $\Delta H_K = H_l - H_m$  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 petite car les molécules de multicouche sont moins fermement attachées. Parfois une valeur positive peut être obtenue en raison de la dissolution des sucres végétaux [24].

### III. CHALEUR ISOSTERIQUE NETTE DE DESORPTION

La chaleur nette isostérique de désorption ( $\Delta H_{is}$ ) 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 désorption à divers températures en utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron [28, 31]:

$$\Delta H_{is} = -R \left( \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (T^{-1})} \right)_X \quad (3)$$

Les valeurs obtenues de cette équation sont correctes seulement pour des considérations qualitatives des propriétés thermodynamiques car elles peuvent présenter des erreurs considérables à cause des manipulations graphiques et des données expérimentales des isothermes. En intégrant l'équation (3) et en supposant que la chaleur nette isostérique de désorption  $\Delta H_{is}$  est indépendante de la température, on obtient :

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

La chaleur nette isostérique de désorption diminue considérablement lorsque la teneur en humidité augmente. Dans le but de décrire la relation entre la chaleur nette isostérique de désorption et de la teneur en eau d'équilibre, une corrélation empirique exponentielle comme suite [32]:

$$\Delta H_{is} = q_0 \cdot \exp\left(\frac{-X}{X_0}\right) \quad (5)$$

où  $q_0$  est la chaleur nette de désorption isostérique des premières molécules d'eau dans le produit ( $\text{kJmol}^{-1}$ ),  $X$  est la teneur en eau d'équilibre, ( $\text{gH}_2\text{O/g MS}$ ) et  $X_0$  est la teneur en eau caractéristique de produit, ( $\text{gH}_2\text{O/g MS}$ ). 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 [9].

### IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### A. Ajustement des modèles aux données expérimentales des isothermes de désorption

Les résultats expérimentaux de la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  de désorption de la citrouille, pour trois températures, 30, 50 et 70°C donné par [18] ont été analysée par neuf modèles d'isothermes de désorption. La régression non linéaire à été employée pour évaluer les paramètres de ces modèles avec le procédé de Levenberg-Marquardt. Les valeurs de ces paramètres sont présentées dans le tableau 2 avec le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et la statistique du test ki-carrée ( $\chi^2$ ) réduite. Ces coefficients peuvent être représentés mathématiquement comme suite [35]:

$$R^2 = \frac{\sum (X_{eq\_exp} - \bar{X}_{eq\_pré})^2}{\sum (X_{eq\_exp} - \bar{X}_{eq\_pré})^2 + \sum (X_{eq\_exp} - X_{eq\_pré})^2} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(X_{eq\_exp,i} - X_{eq\_pré,i})^2}{X_{eq\_pré,i}} \quad (7)$$

avec :

$$\bar{X}_{eq\_pré} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{eq\_pré,i}}{N}$$

ou  $X_{eq\_exp}$  est la teneur en eau d'équilibre expérimentale,  $X_{eq\_pré}$  est la teneur en eau



**Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014



d'équilibre prédite, N le nombre de points expérimentaux.

TAB. 2 : paramètres des modèles des isothermes de désorption

Modèle		Températures		
		30°C	50°C	70°C
GAB	$X_m$	0,0884	0,0468	2,18362
	$C$	2,1459	3,175	0,01827
	$K$	0,9815	1,0287	0,79375
	$r$	0,9949	0,9966	0,97241
	$\chi^2$	3,12E-4	9,83E-5	2,98E-4
BET	$X_m$	0,0748	0,06285	0,03803
	$C$	3,7004	1,27189	3,12919
	$r$	0,9935	0,99381	0,99112
	$\chi^2$	3,52E-4	1,61E-4	8,41E-5
Halsey	$A$	0,0753	0,06683	0,04142
	$B$	1,03899	0,87964	0,9627
	$r$	0,99297	0,99596	0,99204
	$\chi^2$	3,84E-4	1,057E-4	6,70E-5
Henderson	$A$	2,88674	3,16061	4,65317
	$B$	0,62125	0,52642	0,63049
	$r$	0,98773	0,98090	0,97086
	$\chi^2$	6,70E-4	4,98E-4	2,76E-4
Iglesias-Chirife	$A$	0,0267	0,00648	0,01032
	$B$	0,0790	0,06373	0,04096
	$r$	0,9892	0,99392	0,99067
	$\chi^2$	5,92E-4	1,43E-4	8,83E-5
Oswin	$A$	0,11629	0,06749	0,0537
	$B$	0,82593	0,9792	0,86646
	$r$	0,99479	0,99344	0,98782
	$\chi^2$	2,84E-4	1,71E-4	1,15E-4
Caurie	$a$	-4,95483	-5,95128	-5,46122
	$b$	5,07527	5,88702	4,75163
	$r$	0,98177	0,97166	0,96502
	$\chi^2$	9,96E-4	7,39E-4	3,3E-4
Smith	$C1$	-0,04028	-0,03257	-0,00808
	$C2$	0,28207	0,20253	0,12156
	$r$	0,93883	0,90262	0,93477
	$\chi^2$	0,003	0,002	6,18E-4
Peleg	$K1$	0,00334	1,59811	2,2995
	$K2$	0,26155	0,23502	0,1926
	$n1$	9,11773	13,36883	20,45074
	$n2$	1,16299	1,57094	1,53454
	$r$	0,99605	0,99444	0,99360
	$\chi^2$	2,77E-4	1,86E-4	8,08E-5

TAB. 3 : Estimation des paramètres de modèle de GAB a 5 paramètres (régression non linéaire directe)

Isothermes de désorption						
$X_m$	$C_0$	$\frac{\Delta H_c}{[J.mol^{-1}]}$	$K_0$	$\frac{\Delta H_k}{[J.mol^{-1}]}$	$r^2$	$\chi^2$
0.083	7.59E - 8	4.35E7	0.7	867.08E3	0,991	2,8E-4

Les valeurs  $\chi^2 = 0$  et  $R^2 = 1$  correspondent à un ajustement parfait, le modèle présentant la plus basse valeur de  $\chi^2$  et la plus haute valeur de  $R^2$  a été identifié comme étant le modèle le plus approprié pour décrire les isothermes de désorption des citrouilles [36-40]. Parmi les modèles étudiés, le modèle de Peleg donne la plus haute valeur de coefficient de détermination  $R^2$  et la plus basse valeur de test ki-carrée  $\chi^2$  pour l'isotherme de désorption (Fig. 1). De ce fait, il est considéré le meilleur modèle pour le lissage des données expérimentales de l'isotherme de désorption de la citrouille dans tout le domaine de température étudié, température entre 30 et 70°C.

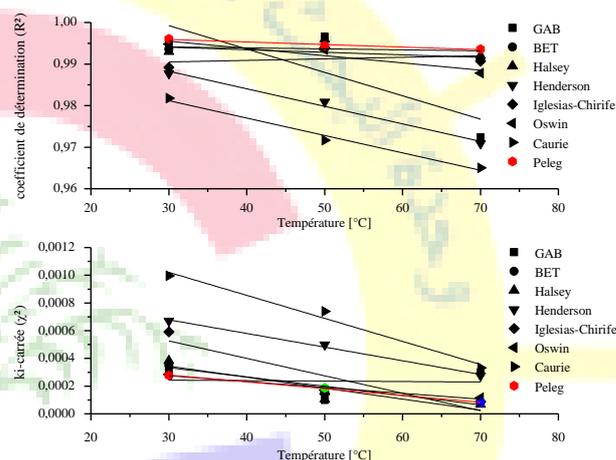


Fig. 1 : Comparaison entre les degrés d'ajustement des modèles analysés

### B. Isothermes de désorption

La détermination des isothermes de sorption constitue une étape incontournable dans les opérations de séchage et de conservation de la Citrouille. Ces courbes fournissent des informations sur l'équilibre hygroscopique, le domaine de leur stabilité et la nature des interactions eau-matrice solide du produit. La figure 2 présente les résultats expérimentaux de l'isotherme de désorption pour 30, 50 et 70°C ainsi que les courbes de lissage de modèle de Peleg. On observe que les courbes théoriques de lissage présentes également une allure sigmoïdale comme la plupart des produits biologiques.



**Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014

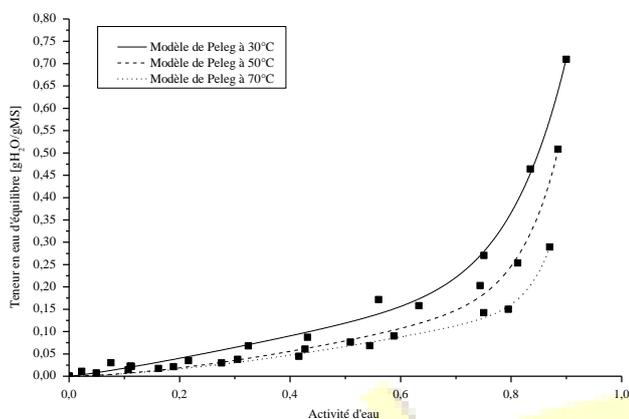


Fig. 2 : Courbes des isothermes de désorption expérimentales et prédites par le modèle de Peleg pour la citrouille.

Il est largement admis qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de la teneur en eau d'équilibre [41]. La dépendance de la température avec la teneur en eau d'équilibre a un rôle important d'incidence concrète sur les réactions chimiques et microbiologiques associés à la détérioration [42]. A la même teneur en humidité, des températures plus élevées entraînent une plus grande activité de l'eau et par conséquent un taux de détérioration plus rapides [43].

### C. Effet de la température

Il est largement admis qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de la teneur en eau d'équilibre [41]. Cela a été observé dans tout le domaine d'activité de l'eau sur la figure 3. Dans certains cas, tels que les produits riches en sucre comme les fruits, il ya un effet d'inversion où les courbes se croisent, et cela dû à l'augmentation de la solubilité de sucres où la solubilisation réduit la mobilité de l'eau [42, 30].

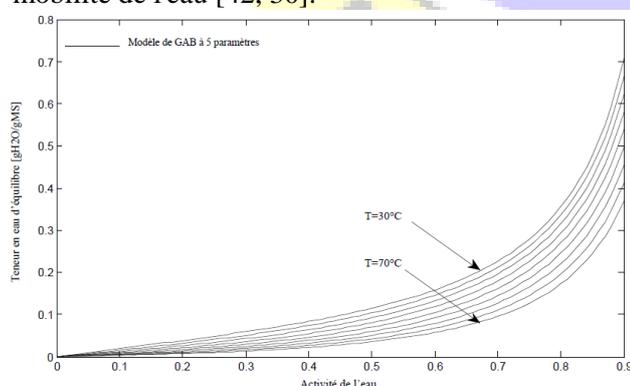


Fig. 3 : Isothermes de désorption de la citrouille décrite par le modèle de GAB à 5 paramètres

La figure 4 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, ceci est expliqué par l'augmentation de l'agitation thermique. D'autre par, cette figure montrent clairement la plage des activités de l'eau où l'influence de la température est très importante.

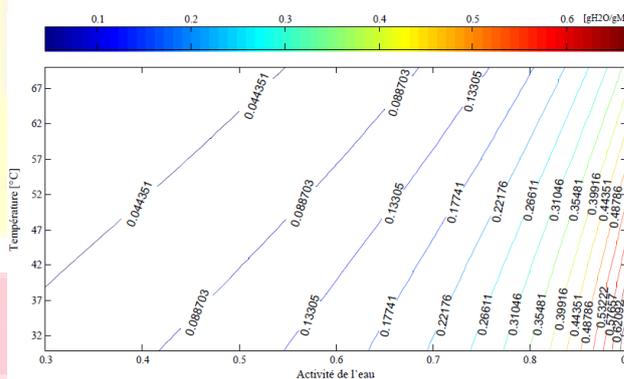


Fig. 4 : Diagramme température-activité de l'eau d'iso-désorption de la citrouille décrite par le modèle de GAB à 5 paramètres.

### D. Chaleur isostérique de désorption

Il résulte de l'équation (4) que la chaleur nette isostérique de désorption 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. 5). Pour construire cette figure, les valeurs de  $a_w$  à différentes températures sont nécessaires pour une teneur en eau constante. Néanmoins, les données de désorption n'ont pas été déterminées à teneur en eau 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 à 5 paramètres sous sa forme transformée selon [44] est qui est représenté par l'équation (8):

$$a_w = [2 + AAC - \{(2 + AAC)^2 - 4BB\}^{1/2}] / [2KBB] \quad (8)$$

avec :  $AA = (X_m/X_{eq} - 1)$  et  $BB = (1 - C)$

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 comme il est indiqué sur la figure 5.

On constate un parfait accord du profil avec les résultats obtenus par [45-48]. De la pente des



**Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014



isostères et pour chaque teneur en eau  $X$ , on peut déduire la chaleur isostérique correspondante et tracer la courbe  $Q_{st} = f(X_{eq})$  (Fig. 6). Cette figure représente la chaleur isostérique nette de désorption de la citrouille en fonction de la teneur en eau entre les températures 30 et 70°C et les courbes de lissage correspondantes.

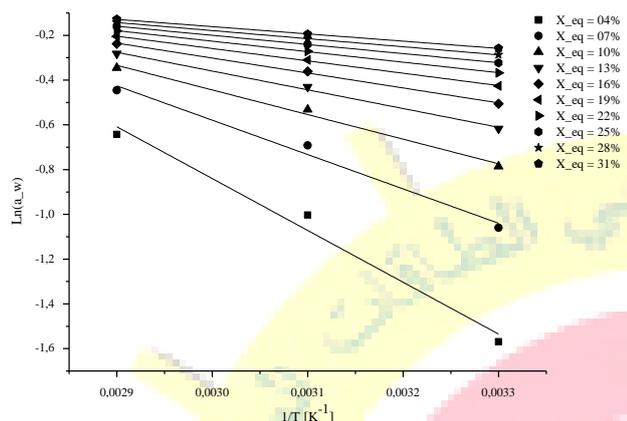


Fig. 5: Isothermes de désorption pour la citrouille.

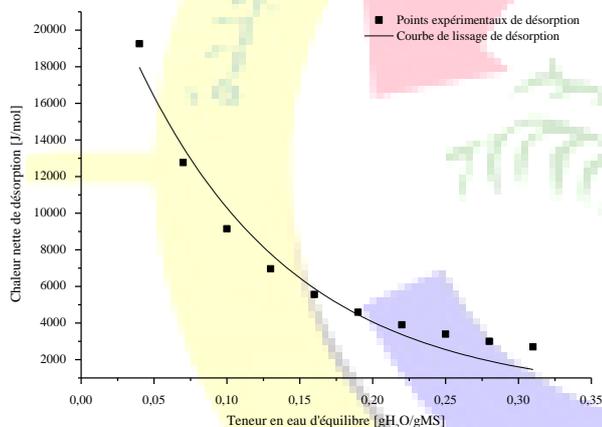


Fig. 6: Chaleur isostériques nette de désorption de la citrouille en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

Dans la figure 6, On observe également une augmentation de la chaleur nette de désorption, au fur et à mesure que le degré de déshydratation augmente. Cela est dû à l'existence de sites polaires fortement actifs dans le produit qui sont couverts de molécules d'eau formant la couche moléculaire [49]. La régression non linéaire a été employée pour évaluer les paramètres de l'équation empirique (5) avec le procédé de Levenberg-Marquardt (Tableau 4). Ces résultats sont en parfait accord avec les résultats obtenus par [50] pour d'autres produits alimentaires.

TAB. 4 : Estimation des Paramètres de l'équation empirique (5) pour la citrouille.

Isothermes de désorption		
$q_0$ [KJ. mol <sup>-1</sup> ]	$X_0$ [gH <sub>2</sub> O/g MS]	$r^2$
26,069	0,10757	0,96388

### V. CONCLUSION

La modélisation des isothermes de désorption d'eau entre 30 et 70°C a été réalisée en utilisant le modèle de Peleg. Il donne une excellente prédiction de l'évolution de la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'activité d'eau. Nous avons démontré le champ d'iso-désorption de la citrouille, on a utilisé 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. Les résultats ont montré que la teneur en eau à l'équilibre diminue avec l'augmentation de la température. La chaleur nette isostérique de désorption de la citrouille à diverses températures a été déterminée en utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron. Elle augmente au fur et à mesure que le degré de déshydratation augmente, elle est exprimée par une équation exponentielle de la teneur en eau à l'équilibre.

### REFERENCES

[1] Arima H. K. and Rodriguez-Amaya D. B. (1988). Carotenoid composition and vitamin A value of commercial Brazilian squashes and pumpkins. *Journal of Micronutrient Analysis*, 4, 177–191.

[2] Dutta A., Raychaudhuri U. and Chakraborty R. (2006). Rheological characteristics and thermal degradation kinetics of beta-carotene in pumpkin puree. *Journal of Food Engineering*, 76, 538–546.

[3] Murkovic M., Mulleder U. and Neunteufl H. (2002). Carotenoid content in different varieties of pumpkins. *Journal of Food Composition and Analysis*, 15, 633–638.

[4] Garcia C. C., M. A. Mauro, M. Kimura (2007). Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucurbita moschata*). *Journal of Food Engineering*, 82, 284–291.



**Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014**



- [5] Krinsky N., (1993). Actions de caroténoïdes dans les systèmes biologiques. *Revue annuelle de la nutrition*, 13, 561-587.
- [6] Vega-Gálvez A., R. Lemus-Mondaca, P. Fito and A. Andrés (2007). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of red bell pepper (var. Lamuyo). *Food Science and Technology International*, 13, 309-316.
- [7] Erbas M., Ertugay M.F. and Certel M. (2005). Moisture adsorption behaviour of semolina and farina. *Journal of Food Engineering* 69 191–198.
- [8] Moreira R., Chenlo F. and Torres M. D. (2009). Simplified algorithm for the prediction of water sorption isotherms of fruits, vegetables and legumes based upon chemical composition. *Journal of Food Engineering*, 94, 334-343.
- [9] Jangam, S.V. and Mujumdar, A.S., (2010). Basic concepts and definitions, in *Drying of Foods. Published in Singapore*, 1, 1-30.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Vazquez, G., F. Chenlo, R. Moreira (2003). Sorption isotherms of lupine at different temperatures, *Journal of Food Engineering*, 60, 449-452.
- [14] Yazdani M., P. Sazandehchi, M. Azizi and P. Ghobadi, Moisture sorption isotherms and isosteric heat for pistachio, *Eur Food Res Technol*, Vol.223.pp.577-584, 2006.
- [15] Al-Mahasneha M.A., M.M. Bani Amerb and T.M. Rababah, Modeling moisture sorption isotherms in roasted green wheat using least square regression and neural-fuzzy techniques, *Food and Bioprocess Processing*, Vol.90.pp.165–170, (2012).
- [16] Rohvein, C., E. Santalla, M.C. Gely, Note: Estimation of Sorption Isotherm and the Heat of Sorption of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) Seeds, *Food Science and Technology International*, Vol.10.pp.409, 2004.
- [17] Kamran, M. M., S. H. Karparvarfard, A. Farahnaky and K. Jafarpour, Thermodynamic of Water Sorption of Grape Seed: Temperature Effect of Sorption Isotherms and Thermodynamic Characteristics, *Food Biophysics*, pp.01-11, 2012.
- [18] Filho L. M., A. K. R. Gonçalves, M. A. Mauro, E. C. Frascareli (2011). Moisture sorption isotherms of fresh and blanched pumpkin (*Cucurbita moschata*). *Food Science and Technology* , 31 714-722
- [19] Van den Berg, C., "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.
- [20] Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. Adsorption of gases in multimolecular layer, *Journal of American Chemists Society*, Vol. 60.pp.309–319, 1938.
- [21] Halsey, G., Physical adsorption on non-uniform surfaces, *Journal of Chemistry and Physics*, Vol.16.pp.931–937, 1948.
- [22] Henderson, S. M., A basic concept of equilibrium moisture, *Agricultural Engineering*, Vol.33.pp.29–32, 1952.
- [23] Iglesias, H. A., & Chirife, J., An empirical equation for fitting water sorption isotherms of fruits and related products, *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, Vol.11.pp.12–15, 1978.
- [24] Oswin, C. R., The kinetics of packing life. III. The isotherm. *Journal of Chemical Industry*, Vol.65.pp. 419-423, 1946.
- [25] Caurie, M., A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods, *Journal of Food Technology*, Vol.5.pp.301–307, 1970.
- [26] Smith, S.E., The sorption of water vapour by high polymers, *Journal of the American Chemical Society*, Vol.69.pp.646, 1947.
- [27] Peleg, M., Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms, *Journal of Food Process Engineering*, Vol.16.pp.21–27, 19930.
- [28] Quirijns E. J., A. JB Bostel, W. KP. Loon and G. Straten, Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption, *Sci Food Agric*, Vol.85.pp.1805–1814, 2005.
- [29] Ayranci E., Duman O., Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and



**Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014**



its protein isolate at 10, 20 and 30 °C. *J Food Eng*, Vol.70.pp.83–91, 2005.

[30] Gabas A.L., J. Telis-Romero and F.C. Menegalli, Thermodynamic models for water sorption by grape skin and pulp, *Drying Technology*, Vol.17.pp.961-974, 1999.

[31] Hunter A. J., Clayton, Australia, On the basic equation of sorption and the isosteric heat, *Wood Sci. Technol*, Vol.25.pp.99 – 111, 1991.

[32] Tsami, E., Maroulis, Z. B., Morunos-Kouris,D. and Saravacos, G. D., Heat of sorption of water in dried fruits, *Int J Food Sci Technol*, Vol.25.pp.350–359, 1990

[33] Madamha P S; Driscoll R H; Buckle K A., Enthalpy–entropy compensation models for sorption and browning of garlic, *Journal of Food Engineering*, Vol.28.pp.109–119, 1996.

[34] Aviara, N.A., Ajibola, O.O., Dairo, U.O., Thermodynamics of moisture sorption in sesame seed, *Biosystems Engineering*, Vol.83.pp.423–431, 2002.

[35] Foo K.Y. and B.H. Hameed, Review: Insights into the modeling of adsorption isotherm systems, *Chemical Engineering Journal*, Vol.156.pp.2–10, 2010.

[36] Singh K. P., H. N. Mishra and S. Saha, Sorption Isotherms of Barnyard Millet Grain and Kernel, *Food Bioprocess Technol*, Vol.4.pp.788–796, 2011.

[37] Ho Y. S., W. T. Chiu, C. C. Wang, Regression analysis for the sorption isotherms of basic dyes on sugarcane dust, *Bioresource Technology*, Vol.96.pp.1285–1291, 2005.

[38] Honorato C. P., C. Vigneault, F. C. Menegalli, L. R. de Castro and L. A. B. Cortez, Evaluation of sorption isotherm models for figs, *Canadian Biosystems Engineering*, Vol.50.pp.377-383, 2008.

[39] Vega-Gálvez A., M. Palacios, R. Lemus-Mondaca and C. Passaro, Moisture sorption isotherms and isosteric heat determination in chilean papaya (*Vasconcellea pubescens*), *Quim. Nova*, Vol.31.pp.1417-1421, 2008.

[40] Ho Y. S., W. T. Chiu, C. C. Wang, Regression analysis for the sorption isotherms of basic dyes on sugarcane dust, *Bioresource Technology*, Vol.96.pp.1285–1291, 2005.

[41] Chen X. D. and A. S. Mujumdar, *Drying Technologies in Food Processing*. First edition Blackwell Publishing, 2008.

[42] Al-Muhtaseb A. H., McMinn W. A. M. and Magee T. R. A., Water sorption isotherms of starch

powders. Part I: Mathematical description of experimental data, *J Food Eng*, Vol.61.pp.297–307, 2004.

[43] B. K. Koua, P. M. Ekoun Koffi, P. Gbaha and S. Toure, Thermodynamic analysis of sorption isotherms of cassava (*Manihot esculenta*), *J Food Sci Technol*, 2012.

[44] Maroulis ZB, Kiranoudis CT and Marinos-Kouris D, Heat and mass transfer modeling in air drying of foods, *J Food Eng*, Vol.26.pp.113–130, 1995.

[45] Mujumdar A. S., *Handbook of Industrial Drying*, Third Edition Editor(s). National University of Singapore, 2006.

[46] Stamatios J. B. and V. G. Belessiotis, Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs, *Journal of Food Engineering*, Vol, pp.65, 449-458, 2004.

[47] Talla A., Experimental Determination and Modelling of the Sorption Isotherms of Kilishi. *British Journal of Applied Science & Technology*, Vol.2.pp.379-389, 2012.

[48] Siripatrawan U. and P. Jantawat, Determination of Moisture Sorption Isotherms of Jasmine Rice Crackers Using BET and GAB Models, *Food Sci Tech Int*, Vol.12.pp.459–465, 2006.

[49] Tsami E., Net Isosteric Heat of Sorption in Dried Fruits, *Journal of Food Engineering*, Vol.14.pp. 327-335. 1991.

[50] Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Tsami, E. and Marinos-Kouris, D., Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables, *J. Food Eng*, Vol.20.pp.55-74, 1993.