

Conservation des Dattes 'Deglet Noir' Isothermes d'adsorption à 25, 30 et 40 °C

A. Ferradji¹, M.A.A. Matallah¹ et A. Malek²

¹ Département de Technologie Alimentaire, Institut National Agronomique
Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger, Algérie

² Division Energie Solaire Photovoltaïque, Centre de Développement des Energies Renouvelables
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

Résumé - L'objectif de ce travail est de déterminer les isothermes de sorption de la datte de la variété 'Deglet-Nour' à différentes températures (25, 30 et 40 °C) par équilibrage dans des atmosphères à humidités relatives fixées par des solutions diluées d'acide sulfurique. Cette étude nous a permis d'estimer la teneur en eau de la couche monomoléculaire (X_m) par deux modèles théoriques différents (G.A.B et B.E.T), ainsi que la chaleur de sorption de la couche monomoléculaire et de la multicouche, et la détermination de la chaleur de sorption de la datte 'Deglet-Nour' par l'équation de Clausius-Clapeyron.

Mots clés: Datte - Isotherme d'adsorption - Activité de l'eau - Equation de G.A.B. - Equation de B.E.T. - Equation de Clausius-Clapeyron.

1. INTRODUCTION

La datte est un aliment de grande valeur énergétique. Elle est très appréciée aussi bien sur le plan national qu'international, particulièrement la variété *Deglet-Nour*. La recherche de la qualité de cette variété relève de la technologie. Celle-ci recouvre toutes les opérations qui -de la récolte à la commercialisation- ont pour objet de préserver la valeur nutritive de ce fruit (Dowson *et al.*, 1963).

La sensibilité de la variété *Deglet-Nour* à l'altération et sa mauvaise conservation sur les lieux de production pose de gros problèmes aux opérateurs nationaux. La Fao a estimé que les pertes de cette variété dépassant 6 % ; nous signalons qu'une production de 430 000 tonnes (équivalent 25 800 tonnes de perte) avec un prix de 90 DA pour 1 Kg entraîne une perte de 2 322 millions DA. Cette altération est d'autant plus importante tant que les conditions de stockage et d'entreposage ne sont pas adéquates (Leraillez, 1952).

Durant ces deux dernières décennies un nombre important de travaux ont porté sur l'étude des isothermes de sorption des produits alimentaires (Bolin, 1980), l'influence de la température sur les isothermes (Iglisias *et al.*, 1982; Labuza *et al.*, 1985; Ayranci *et al.*, 1990) et l'étude des modèles mathématiques décrivant les isothermes de sorption (Cherifie *et al.*, 1983; Kim *et al.*, 1999; Maroulis *et al.*, 1988).

En outre, des nombreux travaux ont été faits sur la conservation de la datte, parmi lesquels les travaux de Kechaou *et al.*, (1996); Belarbi *et al.* (2000).

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail. Nous avons ainsi opté pour étudier la conservation de la datte et pour ce faire, nous nous sommes fixés sur l'objectif de déterminer expérimentalement les isothermes d'adsorption des dattes variété *Deglet-Nour* à 25 °C, 30 °C et 40 °C. Nous allons déterminer ces isothermes d'adsorption par la méthode gravimétrique.

2. ISOTHERMES DE SORPTION

La relation entre l'activité de l'eau (a_w) et la teneur en eau, à température constante, est décrite pratiquement et théoriquement par l'isotherme de sorption de la vapeur d'eau.

Les isothermes de sorption sont d'une grande importance dans les industries agro-alimentaires et notamment dans les opérations de séchage, de stockage et de conservation des aliments (Guilbot, 1949 et 1964; Gautier *et al.*, 1986).

L'étude des isothermes d'adsorption-désorption permet d'assurer un meilleur stockage des denrées et une détermination rationnelle des limites de séchage (Adambounou *et al.*, 1983).

3. MODELES THEORIQUES D'ISOTHERMES

De très nombreux essais de modélisation mathématique ont été tentés, deux voies ont été explorées, la première consiste à construire des équations théoriques intégrant des propriétés caractéristiques de l'adsorption, la deuxième voie plus utile en pratique consisterait à ajouter aux résultats expérimentaux une équation empirique.

3.1 Modèle B.E.T

Parmi les modèles thermiques proposés dans la littérature, le modèle le plus souvent appliqué aux fruits et aux aliments est celui de Baunauer, Emmett et Teller (B.E.T).

Cette équation fournit la valeur de la teneur en humidité des couches superficielles (monocouche), qui est un paramètre important dans l'étude des détériorations des aliments (Erol et Tsami, 1991).

Le modèle B.E.T est représenté par l'équation suivante:

$$X = \frac{X_m \times C \times a_w}{(1 - a_w) \times (1 - a_w + C \cdot a_w)}$$

C : Constante de B.E.T; X : Teneur en eau du produit (g /100 g de matière sèche); X_m : Teneur en eau correspondant à la couche monomoléculaire (g/100g de matière sèche).

Le modèle B.E.T est connu pour être utilisé pour les a_w ne dépassant pas 0.5 (Iglesias *et al.*, 1989). L'application de données de sorption avec l'équation du B.E.T même dans cette zone des activités basses n'est pas toujours satisfaisante.

3.2 Modèle G.A.B

Ces dernières années, le modèle le plus utilisé pour les isothermes de sorption a été le modèle de G.A.B (Guggenheim, Anderson et Boer) (Labuza *et al.*, 1985). Ce modèle est l'un des meilleurs modèles théoriques pour les aliments. Il est utilisé et accepté en technologie alimentaire par tous les chercheurs en Europe (Bizot, 1989). Il est applicable pour les activités de l'eau comprises entre 0.05 et 0.95.

Ce modèle permet non seulement de calculer la teneur en eau de la couche monomoléculaire, mais permet aussi de déterminer la chaleur de sorption de la couche monomoléculaire et de la multicouche. L'équation de G.A.B selon Kiranoudis *et al.*, 1993 est la suivante:

$$X = \frac{X_m \times C \times K \times a_w}{(1 - K \times a_w) \times (1 - K \times a_w + C \times K \times a_w)}$$

X : Taux d'humidité du produit; X_m : Teneur en eau correspondante à l'occupation de tous les sites de sorption de la couche mono moléculaire d'eau dans le produit (exprimée en % par rapport à la matière sèche); a_w : Activité de l'eau; C : Constante de G.A.B.; K : Facteur correctif aux propriétés de la multicouche.

D'après Do Amaral Sobral *et al.*, 1999, K augmente avec l'élévation de la température. Du point de vue énergétique, cela correspond à l'affaiblissement des liaisons entre l'eau et les sites de sorption avec la température.

$$C = C' \times \exp(\Delta H_1 / R T) \quad \text{où } \Delta H_1 = (H_m - H_q)$$

H_q : Chaleur totale de sorption de la multicouche (J/mole); H_m : Chaleur totale de sorption de la couche mono moléculaire (J/mole); H_L : Chaleur latente de vaporisation de l'eau liquide (J/mole), soit 43.98 kJ/mole (10500cal/mole) sur le domaine (20-80°C).

$$K = K' \times \exp(\Delta H_2 / R T) \quad \text{où } \Delta H_2 = (H_L - H_q)$$

Les trois constantes de G.A.B dépendent des caractéristiques du produit et de la température. Elles sont déterminées à partir des résultats expérimentaux.

Labuza *et al.*; 1985, ont constaté que le taux d'humidité de la couche mono moléculaire obtenu par l'équation de G.A.B, ne diffère pas de celui obtenu par l'équation de B.E.T à un niveau de 95 %, signification pour chaque température.

En effet, des tests de Erol et Tsami (1991), montre que la valeur de X_m obtenue par les deux modèles décroît avec l'augmentation de la température.

D'après Bizot (1983), le modèle G.A.B présente l'avantage de décrire correctement les isothermes de sorption des produits agroalimentaires pour des valeurs d'activité d'eau ne dépassant pas 0.90. L'utilisation du modèle B.E.T est limitée à des activités de l'eau ne dépassant pas 0.50 (Belarbi *et al.*, 2000; Do Amaral Sobral *et al.*, 1999; Loncin et Weisser, 1977).

L'ajustement des valeurs expérimentales par le modèle GAB et l'estimation de ses paramètres, ont été effectuées à l'aide du logiciel Statistica version 4.5 dont le programme utilisé est de la régression non linéaire par une méthode d'estimation utilisée de quasi-Newton. La qualité de l'ajustement des modèles est appréciée par l'examen de la distribution des points expérimentaux par rapport aux courbes des modèles (B.E.T et G.A.B) et par les carrés des écarts (Tsami *et al.*, 1990). La qualité de l'ajustement est vérifiée par le calcul de la racine carrée de la moyenne relative de l'erreur P (%).

$$P (\%) = \sqrt{\frac{\sum \{(X_{\text{exp}} - X_{\text{cal}}) / X_{\text{exp}}\}^2}{N}} \times 100$$

Où X_{exp} et X_{cal} sont respectivement les teneurs en eau expérimentales et calculées. Le terme N est le nombre de points expérimentaux. La teneur en eau de la couche

mono-moléculaire (X_m) est déterminée à partir des équations de B.E.T et G.A.B qui décrivent l'isotherme de sorption. Elle représente la quantité d'eau adsorbée sur des sites hydrophiles disponibles à la surface de l'adsorbant.

3 CHALEUR ISOSTERIQUE DE SORPTION

La méthode la plus courante pour la détermination de la chaleur de sorption (ΔH_b), résulte de l'équation Clausius-Clapeyron (Do Amaral Sobral *et al.*, 1999; Iglesias *et al.*, 1989).

$$\ln \frac{a_{w1}}{a_{w2}} = \frac{\Delta H_b}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

ΔH_b est la chaleur de sorption (kJ/mole). a_{w1} et a_{w2} sont les activités d'eau aux températures T_1 et T_2 respectivement, R est une constante des gaz.

La chaleur isostérique (Q_{st}) est ensuite calculée par l'équation: $Q_{st} = \Delta H_b + \Delta H_0$. Et dans laquelle, ΔH_0 est la chaleur de vaporisation de l'eau pure.

Le principal intérêt de cette mesure est de permettre le calcul de la chaleur intégrale de sorption pour évaluer la quantité de chaleur nécessaire pour sécher le produit.

L'interaction de la vapeur d'eau avec le substrat solide est déterminée en calculant l'énergie de liaison d'adsorption ΔH_b qui est définie comme étant la différence: $Q_{st} - \Delta H_0$, où Q_{st} est la chaleur d'adsorption isostérique et ΔH_0 la chaleur de condensation de la vapeur d'eau à une température donnée ($\Delta H_0 = 10,53$ kcal/mole à 25 °C).

4. MATERIELS ET METHODES

4.1 Matériels

La datte étudiée, de la variété '*Deglet-Nour*', provient d'une unité de conditionnement de Biskra. Sa pleine maturité s'est déroulée au mois Octobre-Novembre. Le choix de cette variété se justifie par son abondance sur le marché national et par sa qualité gustative appréciée par le consommateur. Cette datte étudiée est caractérisée par: - une longueur moyenne de 4,33 cm/pulpe et 2,4 cm/noyau, - largeur moyenne: 2,2 cm/pulpe et 0,6 cm/noyau, - poids moyen de la datte: 11,70 g, - poids moyen de la pulpe: 10,9 g - poids moyen du noyau: 0,8 g, noyau/fruit: 0.07 g.

Afin de préserver les caractéristiques de départ et éviter toutes altérations pouvant changer les propriétés de l'échantillon, ce dernier est stocké à une température de + 4 °C.

Les dattes utilisées sont mises à adsorber dans des enceintes qui maintiennent une température et une humidité relative constante, le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre. Dix hygrostats de un litre (cuve en verre) ont été utilisés. Chaque hygrostat contient une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à une concentration bien déterminée pour prévenir une humidité relative constante bien définie.

Les activités de l'eau des solutions ont été mesurées à l'aide d'un activimètre. Des capsules contenant les échantillons sont placées au-dessus de ces solutions.

Après équilibre, la teneur en eau est déterminée par l'analyseur d'humidité MA30 permettant de mesurer rapidement la teneur en eau par séchage infra rouge. La reproductibilité des mesures à partir de 1g/5g est comprise entre $\pm 0,2$ et $\pm 0,3$.

4.2 Méthode

De fines tranches de dattes (1 à 2 mm d'épaisseur approximativement) sont coupées à partir d'un échantillon représentatif afin de faciliter l'échange entre le milieu environnant.

Des échantillons d'environ 50 g sont placés dans des pots de pesée et déposés dans une enceinte hermétique, contenant l'acide sulfurique (H_2SO_4) à une concentration de 96 % pendant 15 jours à une température de chambre.

Quatre applications d'échantillons (desséchés) sont placées dans chacune des 10 hygromètres (4 capsules/hygromètre) et équilibrés avec adsorption de vapeur d'eau à une humidité relative et une température constante. Une étuve a été utilisée pour maintenir les températures choisies (25, 30 et 40°C). L'équilibre est atteint dans 15 jours ou plus (lorsque la différence de masse entre trois pesées consécutives était inférieure à 2 %, la durée entre les pesées est de 24 heures).

A des activités en eau élevées ($a_w > 0.7$), des cristaux de thymol ont été placés dans les hygromètres pour éviter le développement des moisissures. Le temps total pour enlever, peser et replacer les échantillons était limité à environ 30 secondes (recommandé par COST 90). Le taux d'humidité équilibré était déterminé par l'humidimètre à infrarouge (Morin, 1980).

Tableau 1: Valeurs de l'activité a_w de solution d'acide sulfurique en fonction de la concentration (% vol./vol.) et de la température (Multon, 1981)

Concentration (%vol./vol.)	Température de la solution et de l'air (°C)		
	25	30	40
10	94.29	94.27	95.62
20	87.56	87.36	87.85
25	81.66	81.70	83.42
30	74.93	74.79	75.37
35	66.51	66.62	67.42
40	56.83	56.56	57.48
45	45.88	46.19	47.00
50	35.57	35.51	36.69
55	25.89	26.05	26.75
60	16.71	17.00	17.80
65	9.43	9.71	10.23
70	4.34	4.52	4.97
75	1.72	1.82	2.06
80	0.52	0.58	0.69
85	0.16	0.18	0.23
90	0.03	0.04	0.05
95	-	-	0.01

5. RESULTATS ET DISCUSSION

5.1 Isotherme d'adsorption de la datte à 25, 30 et 40 °C

Les valeurs expérimentales de la teneur en eau à l'équilibre de la datte variété *Deglet-Nour*, déterminées pour chaque activité de l'eau (a_w) et pour trois températures différentes sont présentées sur le Tableau 2. La teneur en eau à l'équilibre pour chaque activité de l'eau représente la valeur moyenne de la teneur en eau de quatre échantillons. Les courbes des isothermes de sorption de la datte ont une forme sigmoïdale type III caractéristiques des fruits riches en glucides (Iglesias et Chirifie, 1982).

Tableau 2: Teneur en eau à l'équilibre X_{eq} (g d'eau /100g de matière sèche) pour l'isotherme d'adsorption de la datte

Température (°C)	a_w	X_{eq} (%)
25	0.74	42.95
	0.66	32.11
	0.56	19.3
	0.45	13.1
	0.35	11.5
	0.25	9.9
	0.16	9.1
	0.09	8.5
	0.04	6.06
30	0.94	50.01
	0.87	30.05
	0.74	19
	0.67	14.4
	0.47	10.05
	0.26	8.76
	0.17	8.7
	0.09	8.11
0.04	6.27	
40	0.95	54.51
	0.87	28.86
	0.75	19.5
	0.67	14.3
	0.47	8.61
	0.36	8.27
	0.26	8.05
	0.17	7.09
0.04	6.52	

Chaque point de la courbe représente la moyenne de cinq valeurs de la teneur en eau. Les isothermes de sorption présentées sur la figure 1 montrent que l'absorption de l'eau par les fruits secs est minimale aux faibles activités de l'eau et importante aux activités de l'eau élevées. Les isothermes à 25 °C et à 40 °C sont similaires à celles rapportées par Kaymak-Ertekin et Gedick (2004).

Sur la figure 1, la première partie de l'isotherme comprise entre $a_w = 0$ et $a_w = 0.2$, est celle dite de la monocouche, où les molécules d'eau sont fortement fixées par plusieurs liaisons d'hydrogène de forte énergie sur les sites primaires d'adsorption

(groupements polaires). Ces molécules d'eau caractérisées par une chaleur de sorption élevée, ont une mobilité pratiquement nulle et ne peuvent participer à aucune interaction ou réaction. Ces molécules d'eau sont considérées comme une partie intégrante de la phase solide.

Aux faibles activités de l'eau, la vapeur d'eau est adsorbée uniquement par la couche des groupements hydroxyles des glucides cristallisés.

Aux activités de l'eau élevées, il y a d'une part une dissolution des glucides et d'autre part un passage des glucides de l'état cristallin à l'état amorphe. L'augmentation de la quantité d'eau absorbée après cette transition est due à l'augmentation du nombre de sites d'adsorption (groupements d'hydroxyles). La rétention d'eau est influencée en effet par l'état cristallin ou amorphe des glucides (Saravacos *et al.*, 1986)

5.2 Effet de la température sur les isothermes d'adsorption

La figure 1 présente les courbes des isothermes d'adsorption déterminées à 25 et 40 °C. On remarque que la teneur en eau à l'équilibre diminue lorsque la température augmente pour une même valeur de l'activité de l'eau. Ceci est observé pour les activités de l'eau inférieure à 0.8.

Cependant, pour les valeurs supérieures à l'activité de l'eau de 0.8, l'effet opposé est observé à savoir que la teneur en eau à l'équilibre augmente, lorsque la température augmente. Le croisement des deux courbes des isothermes est observé aux environs des activités de l'eau de 0.8 (Fig. 1). Cette observation est en accord avec les isothermes de la plupart des aliments riches en glucides et qui pourrait être expliqué par l'augmentation de la chaleur de sorption (énergie de liaison de l'eau élevée). Cependant, l'effet opposé était observé pour des valeurs élevées de l'activité de l'eau à savoir: que les dattes absorbent plus d'eau aux températures élevées. Le changement de propriétés de sorption des dattes aux activités de l'eau élevées se traduit par l'intersection des deux courbes des isothermes de sorption. Cette observation est similaire à celle rapportée par Saravacos *et al.*, (1986).

Aux faibles activités de l'eau, les glucides des dattes, à l'état cristallin, absorbent de faibles quantités d'eau. Les sucres à l'état amorphe absorbent plus d'eau que les sucres se trouvant à l'état cristallin.

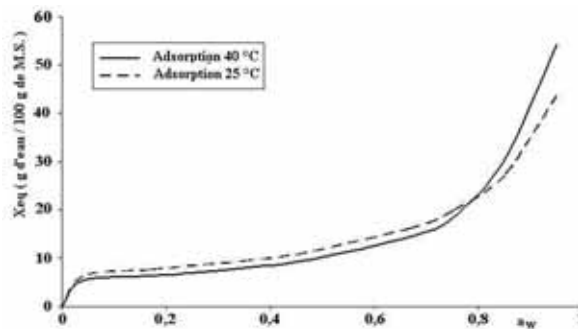


Fig. 1: Courbe d'isotherme d'adsorption de la datte *Deglet-Nour* à 25 et 40 °C

5.3 Ajustement des valeurs expérimentales aux modèles mathématiques de sorption (G.A.B. – B.E.T.)

Les résultats de l'analyse de la régression non linéaire de l'ajustement de l'équation de G.A.B et de B.E.T aux valeurs expérimentales sont présentés respectivement sur les

Tableaux 4 et 5. Les valeurs de la moyenne relative du pourcentage de déviation $P(\%)$ sont présentées sur le **Tableau 3**. Les valeurs du pourcentage $P(\%)$ sont comprises entre 3.6 et 5.86 pour les trois isothermes de d'adsorption (**Tableau 3**). Les valeurs de $P(\%)$ sont donc inférieures à 10 % et cela nous permet de conclure que les équations de G.A.B et de B.E.T peuvent être utilisées pour prédire la valeur de la teneur en eau à l'équilibre et d'autres paramètres tels que la teneur en eau de la couche mono moléculaire et les enthalpies de liaison de la monocouche et la multicouche.

Les figures 2, 3 et 4 représentant les isothermes d'adsorption des dattes de la variété 'Deglet-Nour', montrent que les courbes des points expérimentaux et calculés sont presque confondues et ceci est confirmé par les faibles valeurs de $P(\%)$ (**Tableau 3**).

Tableau 3: Valeur de $P(\%)$ des isothermes d'adsorption à 25, 30 et 40 °C

Isotherme d'adsorption	$P(\%)$
25 °C	5.86
30 °C	4.41
40 °C	3.6

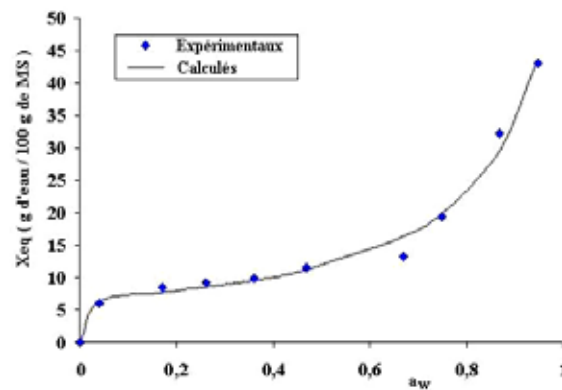


Fig. 2: Isotherme d'adsorption de la datte à 25 °C

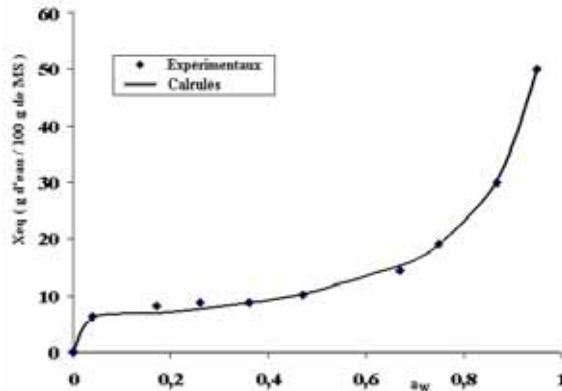


Fig. 3: Isotherme d'adsorption de la datte à 30 °C

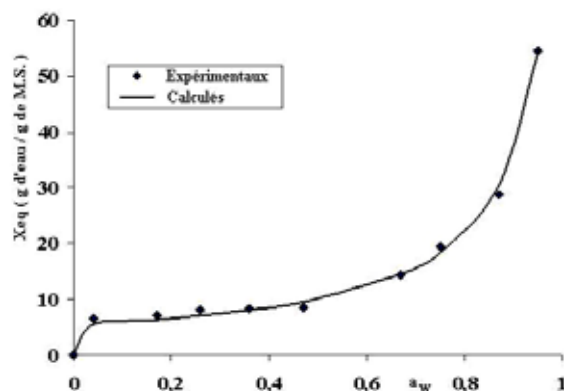


Fig. 4: Isotherme d'adsorption de la datte à 40 °C

5.3.1 Estimation des paramètres

Les paramètres de l'équation de G.A.B (X_m , C , K) et B.E.T (X_m , C) sont déterminés par le logiciel Statistica à partir des résultats expérimentaux en utilisant la régression non linéaire (Tableaux 4 et 5).

Les valeurs de la teneur en eau de la couche mono moléculaire X_m déterminées par les équations de G.A.B. et B.E.T. sont présentées respectivement sur les tableaux 4 et 5.

Les valeurs de X_m déterminées par l'équation de B.E.T sont légèrement supérieures à celles déterminées par l'équation de G.A.B. Cette observation est similaire à celle rapportée par Labuza *et al.*, 1985.

Tableau 4: Valeurs des paramètres de l'équation de G.A.B.

Paramètre	X_m	C	K	R^2
Isothermes d'adsorption				
25 °C	6.525	377.655	1.207	99.363
30 °C	5.779	1796.135	1.263	99.896
40 °C	5.290	1854.669	1.625	99.827

Tableau 5: Valeurs des paramètres de l'équation de B.E.T.

Paramètre	X_m	C	R^2
Isothermes d'adsorption			
25 °C	6.451	342.942	96.01
30 °C	5.857	885.202	97.77
40 °C	5.343	376.592	94.08

La valeur de la teneur en eau de la couche mono moléculaire (X_m) estimée par l'équation de G.A.B à 25 °C est de 6.52 %. Cette valeur est inférieure à celle rapportée par Belarbi *et al.* (2000) (Tableau 6).

5.3.2 Valeurs thermodynamiques déterminées par l'équation de G.A.B à 5 paramètres

Le paramètre ΔH_1 de l'équation de G.A.B représente la différence entre l'enthalpie de la couche mono-moléculaire et celle de la multicouche. Dans cette étude, la valeur ΔH_1 est estimée à 39.70 kJ/mole (**Tableau 7**). Cette valeur indique qu'il existe une forte liaison entre les sites hydrophiles primaires du solide et la première couche des molécules d'eau. ΔH_2 , représentant la différence entre la chaleur latente de condensation de l'eau pure et la chaleur de sorption de la multicouche, est estimée à -0.74 kJ/mole (**Tableau 7**). Cette valeur négative montre que la chaleur de sorption de la multicouche est supérieure à celle de la chaleur latente de condensation de l'eau pure.

Tableau 6: Comparaison des valeurs du X_m de la datte avec d'autres fruits secs

Produit	Echantillon	Datte d'après Belarbi et al. (2000)	Abricot	Pomme	Pomme de terre	Raisin Sec
X_m (%MS)	6.52	8.73	9.5	7.6	6.7	11.5

(Belarbi et al., 2000; Kaymak-Ertekin et Gedik, 2004; Saravacos et al., 1986)

Tableau 7: Valeurs des cinq paramètres de G.A.B d'ajustement aux isothermes d'adsorption des dattes

Paramètres	X_m	C'	K'	ΔH_1	ΔH_2	R^2
Isothermes						
Adsorption 25 °C	6.525	377.655	1.207	39.760	- 0.740	99.363
Adsorption 30 °C	5.779	1796.135	1.263	23.413	- 0.770	99.896
Adsorption 40 °C	5.290	1854.669	1.175	31.734	- 0.554	99.827

5.4 Calcul de chaleur de sorption

Les valeurs de ΔH_b calculées sont inversement proportionnelles aux valeurs des teneurs en eau. La variation de la chaleur de sorption en fonction de la teneur en eau est représentée dans la figure 5. Ces résultats sont comparables à ceux trouvés par Do Amaral Sobral et al., 1999.

L'étude de la variation de la chaleur de sorption d'eau en fonction de la teneur en eau, a montré que ΔH_b augmente lorsque la teneur en eau diminue, et ceci s'explique par la forte interaction qui existe entre l'eau et les composants adsorbants de la datte.

A des teneurs en eau élevées, les sites de sorption diminuent et ceci conduit à une diminution de la valeur de ΔH_b (Tsami et al., 1990).

Aux faibles teneurs en eau (< 0,15), l'énergie de liaison (ΔH_b) est négative et cela montre que l'interaction est exothermique. La valeur maximale de cette énergie ($-\Delta H_b$) étant égale à ≈ 32 kJ/mole.

Aux teneurs en eau élevées, la valeur de l'énergie de liaison tend vers zéro, cela signifie que la chaleur de sorption isostérique est égale à la chaleur de condensation de l'eau ($Q_{st} = \Delta H_0$).

Sur la figure 5, on constate que dans la zone des teneurs en eau élevées la chaleur de sorption (ΔH_b) est positive et ceci indique que l'interaction entre l'eau et le substrat

est endothermique et correspond à une dissolution des sucres. La chaleur de sorption initiale est très élevée aux faibles teneurs en eau.

Les valeurs élevées des chaleurs de sorption à faible teneur en eau indiquent que l'interaction entre les composants de l'aliment et l'eau est importante. Lorsque la teneur en eau augmente les sites de sorption disponibles diminuent et conduisant ainsi à une diminution des valeurs des chaleurs de sorption.

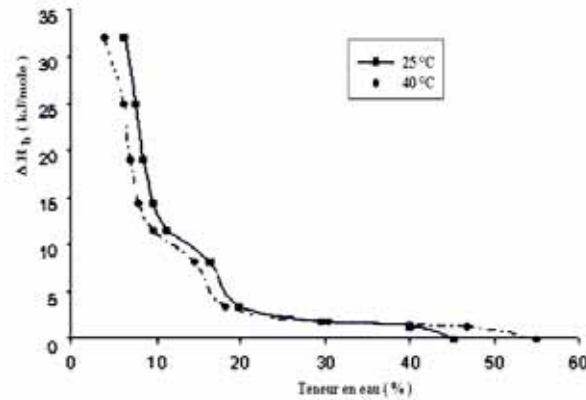


Fig. 5: Relation entre l'énergie de sorption de la datte 'Deglet-Nour' et la teneur en eau

6. CONCLUSION

Au terme de cette étude, les résultats obtenus nous ont permis de calculer la teneur en eau de la couche monomoléculaire ' X_m ' par les équations de G.A.B et de B.E.T dont les valeurs sont respectivement de 6.52 % et 6.45 % pour une température de 25 °C.

Les isothermes de sorption de la vapeur d'eau à l'équilibre sont décrites convenablement par le modèle de G.A.B. Les valeurs des chaleurs de sorption isostériques estimées par l'équation de Clausius – Clapeyron indiquent que l'interaction entre les molécules d'eau et le solide augmente, lorsque la teneur en eau diminue.

NOMENCLATURE

a_w : activité de l'eau	Exp.: Expérimental
Adso: Adsorption	Cal.: Calculé
B.E.T: Brunauer, Emmet et Toller	Déso: Désorption
G.A.B: Guggenheim, Anderson et Boer	H.R: Humidité Relative (%)
dX/dt : Courbe de la vitesse de séchage	H.R.E: Humidité relative d'équilibre
MS : Matière sèche	V_{air} : Vitesse de l'air
X_m : Teneur en eau de la couche monomoléculaire	
X_m : Teneur en eau à l'équilibre	X : Teneur en eau

REFERENCES

- [1] T.L. Adambounou et F. Castaigne, 'Déshydratation Partielle par Osmose des Bananes et Détermination de Courbes de Sorptions Isothermes', *Lebensm.wiss. U-Technology.*, Vol. 16, pp. 230 - 234, 1983.
- [2] E. Ayranci, G. Ayranci and Z. Dogantan, 'Moiture Sorption Isotherms of Dried Apricot, Fig and Raisin at 20 °C and 36 °C', *Journal of Food Sciences*, Vol. 55, N°6, pp. 1591 – 1594, 1990.
- [3] A. Belarbi, C. Aymard, J.M. Meot, A. Themelin and M. Reynes, 'Water Desorption Isotherms for Eleven Varieties of Dates', *Journal of Food Engineering*, Vol. 43, N°2, pp. 103 - 107, 2000.
- [4] E. Belhamidi, A. Belghith, A. Mrani, A. Mir et M. Kaoua, 1993, cité in N. Kechaou, M. Bagane, M. Maalej et C. Kapseu, 1996, 'Approche Empirique de la Cinétique du Séchage des Dattes', *Science des Aliments*, 1996, Vol. 16, pp. 593 - 606, 1996.
- [5] J.J. Bimbenet, 1978, cité in N. Kechaou, M. Bagane, M. Maalej et C. Kapseu, 1996, 'Approche Empirique de la Cinétique du Séchage des Dattes'. *Science des Aliments*, 1996, Vol. 16, pp 593 – 606, 1996.
- [6] H.R. Bolin, 'Relation of Moisture to Water Activity in Prunes and Raisins', *Journal of Food Sciences*, Vol. 45, N°5, pp. 1190 - 1192, 1980.
- [7] H. Bizot, 'Using GAB Model to Construct Sorption Isotherms', In *Physical Properties of Food*. Ed. Jowitt, Applied Sciences, Publishers, London and New York, 1989.
- [8] H. Bizot, cité in N. Kechaou, M. Bagane, M. Maalej et C. Kapseu, 1996, 'Approche Empirique de la Cinétique du Séchage des Dattes', *Science des Aliments*, 1996, Vol. 16, pp. 593 – 606, 1996.
- [9] J. Chirifie, R. Boquet, C.F. Fontan and H. Iglisias, 'A New Model for Describing the Water Sorption Isotherms of Foods', *Journal of Food Sciences*, Vol. 48, pp. 1382, 1983.
- [10] P.J.D. Do Amaral Sobral, A. Lebert et J.J. Bimbenet, 'Isothermes de Désorption de la Pomme de Terre entre 40 et 70 °C', *Sciences des Aliments*, Vol. 19, pp. 711 – 720, 1999.
- [11] V.H.M. Dowson and A. Aten, 'Récolte et Conditionnement des Dattes', *Collection F.A.O. Rome, Cahier n°72*, 397 p., 1963.
- [12] A. Erol, A. Guler and D. Zafer, 'Moisture Sorption Isotherms of Dried Apricots, Fig and Raisin at 20 °C and 36 °C', *Journal of Food Science*, Vol. 55, N°6, pp. 1591 – 1594, 1990.
- [13] Fao (Food Agriculture Organisation), 2003, FAOSTAT Database Query, In www.fao.org
- [14] A. Ferradji et A. Malek, 'Isothermes des Abricots à 25 °C et à 45 °C', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 8, N°1, pp. 39 - 48, 2005.
- [15] M. Gautier, F. Bolnot, J. Rozier et V. Carlier, 'Activité de l'Eau et Conservation des Denrées Alimentaires', *RTVA*, N°220, pp. 16 – 20, 1986.
- [16] Guilbot, 1949 and 1964, cité in J.L. Multon, 'Méthodes de Mesure de l'Activité de l'Eau dans les Aliments', *Techniques d'Analyse et de Contrôle dans les Industries Agro-Alimentaires*, Série APRIA, Vol. 4, pp. 19 – 60, 1981.
- [17] H.A. Iglisias and J. Chirifie, '*Handbook of Foods Isotherms*', Academic Press New York, 1982.
- [18] H.A. Iglesias and J. Chirife, 1982, cité in F. Kaymak-Ertekin and A. Gedik, 'Sorption Isotherms and Isosteric Heat of Sorption for Grapes, Apricots, Apples and Potatoes', *Lebensm.wiss. U-Technology*, Vol. 37, pp. 429 - 438, 2004.

- [19] H.A. Iglesias, J. Chirife and C. Ferro-Fontan, 1989, cité in P.J.D. Do Amaral, A. Lebert et J.J. Bimbenet, '*Isothermes de Désorption de la Pomme de Terre entre 40 et 70 °C*'. Sciences des Aliments, Vol. 19, pp. 711 – 720, 1999.
- [20] Y. Jannot, '*Isothermes de Sorption: Modèles et Détermination*', Document Personnel, 15 p., Jan 2003.
- [21] F. Kaymak-Ertekin and A. Gedik, '*Sorption Isotherms and Isothermic Heat of Sorption for Grapes, Apricots, Apples and Potatoes*', Lebensm-wiss. U-Technology, Vol. 37, pp. 429 - 438, 2004.
- [22] N. Kechaou, M. Bagane, M. Maalej et C. Kapseu, '*Approche Empirique de la Cinétique de Séchage des Dattes*', Sciences des Aliments, N°16, pp. 593 – 605, 1996.
- [23] S.S. Kim, S.Y. Kim, D.W. Kim and S.G. Shin, '*Moisture Sorption Characteristics of Composite Foods Filled with Strawberry Jam*', Lebensm-wiss. U-Technology, Vol. 31, pp. 397 – 401, 1985.
- [24] C.T. Kiranoudis, Z. Maroulis, E. Tsami and D. Marinos-Kouris, '*Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of Some Vegetebals*', Journal of Food Engineering, Vol. 20, pp. 55 – 74, 1993.
- [25] T.P. Labuza, A. Scaanane and J.Y. Chen, '*Effect of Temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift of Two Dehydrated Foods*', Journal of Food Science, Vol. 50, pp. 385 – 391, 1985.
- [26] P.P. Lerailliez, '*La Conservation Industrielle des Fruits*', Edition Nouvelle, Bibliothèque Professionnelle, 343 p., 1952.
- [27] M. Loncin and H. Weisser, 1977, cité in S. Bandypadhyay, H. Weisser and M. Loncin, '*Water Adsorption Isotherms of Foods at High Temperatures*', Lebensm- Wiss. U-Technology, Vol. 13, pp. 182 – 185, 1980.
- [28] Mafart, 1991 cité in J.L. Roux, '*Conserver les Aliments, Comparaison des Méthodes et des Technologies*', 1994.
- [29] Z.B. Maroulis, E. Tsami and D. Marinos-Kouris, '*Application of the G.A.B. Model to the Moisture Sorption Isotherms of the Dried Fruits*', Journal of Food Engineering, Vol. 7, pp. 63 – 78, 1988.
- [30] Morin, 1980, cité in J.L. Multon, '*Méthodes de Mesure de l'Activité de l'Eau des Aliments*', Technique d'Analyse et de Contrôle dans les Industries Agro-Alimentaires, Série APRIA, Vol. 4, pp. 1 - 49, 1981.
- [31] J.L. Multon, '*Techniques d'Analyse et de Contrôle dans les Industries agro-Alimentaires*', Série APRIA, Vol. 4, 410 p., 1981.
- [32] J.L. Multon, '*Conservation et Stockage des Grains et Produits Dérivés*', Techniques et Documentation, Edition Lavoisier. Paris, 425 p.
- [33] G.M. Newman, W.E. Price and L.A. Woolf, '*Factors Influencing the Drying Prunes- Effects of Temperature upon the Kinetics of Moistre Loss during drying*', Food Chemistry, Vol. 57, N° 2, pp 241-244, 1996.
- [34] G.D. Saravacos, D.A. Tsiourvas and E. Tsami, '*Effect of Temperature on the Water Adsorption Isotherms of Sultana Raisins*', Journal of Food Science, Vol. 51, N°2, pp. 381 – 394, 1986.
- [35] E. Tsami, Z.B. Maroulis, D. Marinos-Kouris and G.D. Saravacos, '*Heat of Sorption Water in Dried Fruits*', International Journal of Food Science and Technology, Vol. 25, pp. 350 - 359, 1990.