

Isothermes d'adsorption à 25 °C et 45 °C des pommes chargées de solutés et séchées

A. Ferradji¹, H. Acheheb¹, A. Malek² et N. Hadjad¹

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

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

(reçu le 20 Octobre 2008 – accepté le 22 Décembre 2008)

Résumé - Les isothermes de sorption déterminées à 25 °C et à 45 °C sont de type II caractérisées par une forme sigmoïdale. L'équation de sorption de Guggenheim – Anderson - de Boer (GAB) a été utilisée pour déterminer la teneur en eau de la couche mono moléculaire et celle de Clausius – Clapeyron pour calculer la chaleur de sorption isostérique. L'ajustement des valeurs expérimentales au modèle de l'équation de GAB est de bonne qualité (RMS = 7.56 %, MSE = 3.85 %, P = 5.65 %). La teneur en eau de la couche mono moléculaire (X_m) est de 12.35 % à 25 °C, et de 10.31 % à 45 °C. La chaleur de sorption (Q_{st}), à une humidité de 6 % et à 25 °C, est de 23.76 kcal/mole.

Abstract – Sorption isotherms determined at 25 °C and 45 °C are of Type II and characterized by a sigmoid form. The equation of sorption Guggenheim - Anderson - de Boer (GAB) was used to determine the water content of the single molecular layer and the Clausius - Clapeyron to calculate the heat sorption isosteric. The adjustment of experimental values to the model of the GAB equation is of good quality (RMS = 7.56 %, MSE = 3.85 %, P = 5.65 %). The moisture content of the single molecular layer (X_m) is 12.35 % at 25 °C and 10.31 % at 45 °C. The heat of sorption (Q_{st}), to a 6 % humidity and 25 °C is 23.76 kcal/mole.

Mots clés: Isothermes de sorption - Pomme - Equation de G.A.B. - Equation de Clausius-Clapeyron.

1. INTRODUCTION

La déshydratation osmotique des pommes dans une solution fortement concentrée de saccharose est une opération qui précède une stabilisation complémentaire effectuée par un séchage à entraînement à l'air permettant l'obtention des pommes séchées dont l'activité de l'eau est assez basse pour assurer leur conservation.

L'étape de la déshydratation osmotique entraîne de substantielles économies d'énergie (Farkas et Lazar, 1969; Bolin *et al.*, 1983; Hough *et al.*, 1993) Dans ce contexte, Girod (1990) a rapporté que la consommation énergétique ramenée à la masse de produit final est 5 fois plus importante pour le produit non traité que pour le produit chargé en soluté.

Les isothermes d'adsorption d'eau et la chaleur isostérique de sorption des aliments séchés sont utiles pour prévoir l'évolution de leur teneur en eau au cours du stockage. Elles permettent de déterminer la teneur en eau de la couche mono moléculaire à l'équilibre, de mesurer l'interaction entre les composants de l'aliment et l'eau et d'estimer la quantité d'énergie pour l'élimination de l'eau au cours du séchage, (Bolin,

1980; Iglisisas *et al.*, 1976; Labuza *et al.*, 1985; Ayranci *et al.*, 1990; Kim *et al.*, 1999; Ferradji *et al.*, 2005).

L'objectif principal de cette étude est de déterminer en premier lieu la cinétique de la déshydratation osmotique dans une solution de saccharose fortement concentrée, d'étudier les isothermes de sorption en vue de déterminer la teneur en eau de la couche mono moléculaire et la chaleur isostérique d'adsorption de l'eau (Q_{st}) en utilisant respectivement l'équation de G.A.B et l'équation de Clausius-Clapeyron.

2. CINETIQUE DE LA DESHYDRATATION PARTIELLE PAR OSMOSE

Les principaux paramètres utilisés pour étudier le transfert de masse en déshydratation osmotique sont: - la perte en poids (PP), - la perte en eau (PE) et - le gain en substances solides solubles (GS). Ces paramètres sont définis comme suit:

- La perte en poids (μ) est calculée par le rapport de la perte de masse nette de l'échantillon sur la masse initiale de l'échantillon:

$$\mu = \frac{(M_0 - M)}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

- La perte en eau (ω) est déterminée par le rapport de la perte d'eau nette sur la masse initiale de l'échantillon:

$$\omega = \frac{(M_0 \times X_{\omega 0}) - (M \times X_{\omega})}{M_0} \times 100 \quad (2)$$

- Le gain en substances solides solubles (δ) est déterminé par le rapport de la masse de substances transférées dans l'échantillon sur la masse initiale de l'échantillon:

$$\delta = \frac{((M_0 \times X_s) - (M \times X_{s0}))}{M_0} \times 100 \quad (3)$$

où M_0 et M sont respectivement la masse de l'échantillon de pomme au temps initial et à un temps donné (t), $X_{\omega 0}$ et X_{ω} sont respectivement la fraction de la masse d'eau initiale et au temps (t), X_{s0} et X_s étant respectivement les masses des fractions solides au temps initial et au temps (t).

Selon Rahman et Lamb (1990), le gain en solide peut être corrélé à une perte en poids et à une perte en eau:

$$\mu = \omega - \delta \quad (4)$$

La déshydratation osmotique est caractérisée par une période d'équilibre et une période dynamique. A l'équilibre, le transfert de masse est nul, et en période dynamique, le transfert de masse (perte en poids, perte en eau et gain en solide) varie jusqu'à ce que la période d'équilibre s'installe.

3. 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.

3.1 Equation de GAB (Guggenheim-Anderson-De Boer)

Plusieurs modèles mathématiques ont été utilisés pour corréliser la teneur en eau des produits alimentaires en équilibre avec l'humidité relative environnante.

De ces modèles, nous citons l'équation de BET de Brunauer *et al.*, (1938) et la version modifiée du GAB, citée par Labuza *et al.*, (1985).

L'équation de GAB (Guggenheim-Anderson-De Boer), modèle le plus largement utilisé par les chercheurs, est applicable pour des activités de l'eau comprise entre 0,05 et 0,95.

Ce modèle permet non seulement de calculer la teneur en eau de la couche mono-moléculaire, mais permet aussi de déterminer la chaleur de sorption de la couche mono-moléculaire et de la multicouche.

L'équation de GAB peut être écrite selon la forme suivante:

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{[(1 - K \cdot a_w) \times (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)]} \quad (5)$$

La détermination de ses coefficients C et K se fait comme suit:

$$C = C_0 \times \exp\left(\frac{\Delta H_c}{R \times T}\right) \quad (6)$$

$$K = K_0 \times \exp\left(\frac{\Delta H_k}{R \times T}\right) \quad (7)$$

Avec: X: Teneur en eau du produit à l'équilibre, X_m : Teneur en eau de la couche mono-moléculaire du produit, C: Constante liée à la température, ΔH_c et ΔH_k : Paramètres de la chaleur de sorption d'eau avec:

$$\Delta H_c = H_m - H_n \quad (8)$$

$$\Delta H_k = H_1 - H_n \quad (9)$$

T: Température en Kelvin, R: Constante des gaz, C_0 et K_0 : Constantes, H_m : Chaleur de sorption de la monocouche d'eau, H_n : Chaleur de sorption de la multicouche d'eau, H_1 : Chaleur de condensation de la vapeur d'eau.

Le premier critère utilisé pour évaluer le résultat du lissage est exprimé par une valeur $\{P(\%)\}$ qui exprime la différence entre les données expérimentales et celles prévues, cette constante $\{P(\%)\}$ est définie par l'équation suivante proposée par Lomauro *et al.*, (1985):

$$P(\%) = \frac{100}{n} \times \sum_{I=1}^m \frac{|M_i - M_{pi}|}{M_i} \quad (10)$$

avec: M_i : Valeur expérimentale, M_{pi} : Valeur prévue, n: Nombre de mesures.

Le deuxième critère utilisé est RMS (%), exprimé comme suit:

$$\text{RMS} (\%) = 100 \times \sqrt{\frac{\sum \frac{|M_i - M_{pi}|}{M_i}}{n}} \quad (11)$$

Le troisième critère utilisé est $\text{MSE} (\%)$, exprimé comme suit:

$$\text{MSE} (\%) = \frac{\sum |M_i - M_{pi}|}{n - 1} \quad (12)$$

L'ajustement des valeurs expérimentales au modèle de GAB est réalisé à l'aide du logiciel Statistica version 4.5, en utilisant le programme de la régression non linéaire et la technique 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 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 (RMS %).

3.2 Chaleur de sorption

De nombreux auteurs ont calculé les chaleurs de sorption à partir d'un réseau connu d'isothermes (Van Den Berg et Leniger, 1976) en utilisant la formule de Clausius-Clapeyron (Soekarto *et al.*, 1981):

$$\text{Ln} \frac{a_{w1}}{a_{w2}} = \frac{\Delta H_b}{R} \times \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (13)$$

Où $\Delta H_b = Q_{st} - \Delta H_0$

a_{w1} et a_{w2} sont les deux activités de l'eau correspondant à une teneur en eau aux températures T_1 et T_2 . La chaleur de sorption isostérique est désignée par Q_{st} . ΔH_b correspond à l'enthalpie de vaporisation de l'eau et R la constante universelle des gaz parfaits. Dans ce cas, le paramètre important considéré est Q_{st} .

ΔH_b est l'enthalpie molaire partielle d'adsorption, c'est-à-dire la chaleur absorbée d'une mole d'eau à l'état adsorbée, et est supposé constant dans l'intervalle ($T_1 - T_2$).

Le principal intérêt de la 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 Déshydratation osmotique partielle des rondelles de pommes de la variété Golden Noble

Les rondelles de pommes ont subi une déshydratation par immersion dans une solution de saccharose, dans les proportions 1/4, à 50 °C, 60 °Brix pendant 6 heures.

La perte en poids des rondelles des pommes au cours de cette déshydratation osmotique a été déterminée pendant les deux premières 15 minutes, puis toutes les demis heures.

4.2 Opération de séchage

L'opération de séchage est réalisée sur une soufflerie de laboratoire réglée en température, humidité, vitesse de l'air, ayant les caractéristiques suivantes: 3 kW, capacité: 500 g, température: 20 à 60 °C, humidité relative: 0 à 100 %, vitesse de l'air: 0 à 2 m/s.

Une balance au 1/10 de gramme de précision est utilisée pour la pesée. Cette balance est connectée à un ordinateur pourvu d'un logiciel permettant d'enregistrer automatiquement la perte de poids au cours du séchage.

4.3 Isothermes d'adsorption

Les isothermes de sorption ont été déterminées selon la méthode standard du projet CEE-Cost90 (Spiess et Wolf, 1983).

Les six solutions salines saturées préparées dans de l'eau bidistillée correspondent à des activités de l'eau, déterminées par l'activimètre (rotronic), allant de 0.119 à 0.876. Les solutions sont: LiCl, MgCl₂, K₂CO₃, NaNO₂, NaCl et KCl, (**Tableau 1**).

Tableau 1: Valeurs des activités de l'eau mesurées à 25 °C et 45 °C par l'activimètre

↓Sels → a _w	a _w (25°C)	a _w (45°C)
LiCl	0.163	0.119
MgCl ₂	0.368	0.311
K ₂ CO ₃	0.459	0.399
NaNO ₂	0.669	0.584
NaCl	0.770	0.758
KCl	0.876	0.841

Les solutions salines sont placées dans des hygrostats ayant un volume de 500 ml. Les échantillons de pommes séchées sont finement coupées et lyophilisées. Cinq échantillons de 0.5 g de pommes séchées et lyophilisées sont placés dans chaque hygrostat sur un support perforé se trouvant au dessus de la solution saline saturée. Les hygrostats sont placés dans deux étuves réglées à une température de 25°C et de 45 °C.

Pour des activités de l'eau élevées (a_w > 0.7), des cristaux de thymol sont placés dans les hygrostats pour éviter le développement des moisissures.

L'équilibre est atteint au bout de trois à quatre semaines. Après équilibre, la teneur en eau des échantillons est déterminée en utilisant un analyseur d'humidité M 30 à infra rouge.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Déshydratation osmotique partielle des pommes

Les pourcentages de perte en eau, en poids et du gain en substances solides solubles, calculées à partir des équations (1), (2) et (3), sont présentés en figure 1 en fonction des conditions expérimentales.

La perte en eau et en poids est rapide durant la première période d'immersion s'étalant entre 60 et 90 minutes. La figure 1 montre que les échantillons de pommes perdent beaucoup plus d'eau qu'ils ne gagnent de saccharose.

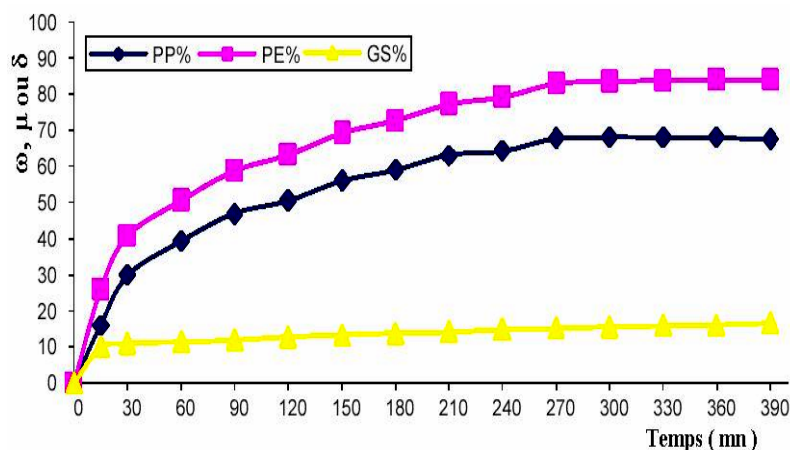


Fig. 1: Variation de la perte en eau, de la perte en poids et du gain en substances solubles au cours de la déshydratation partielle par osmose (à 30 °C et 677 g)

Au bout de six heures de déshydratation osmotique, le taux de perte en eau et celui de perte en poids atteignent respectivement 84 % et 67 %, alors que le gain en substances solubles atteint 10 % du poids initial des pommes pour une température de traitement de 30 °C et une concentration de sirop de 677 g.

Ce phénomène serait dû à une augmentation en surface de la concentration en soluté entraînant, ainsi la formation d'un important gradient de concentration au sein de l'aliment accentuant par la suite, le transport de l'eau du cœur du produit vers l'extérieur (Raoult et Wack, 1990).

Les rondelles des pommes chargées de solutés et séchées sont caractérisées par une couleur jaunâtre dorée et une texture moelleuse (Fig. 2).

La durée de déshydratation osmotique des pommes, pour diminuer la teneur en eau de 82 % à 30 °C, est de 6 heures et celle du séchage du produit chargé en soluté est de 6 heures pour une teneur en eau finale de 21 %. Ce résultat nous permet de conclure que le produit chargé de soluté sèche plus difficilement que le produit frais.

Cette difficulté d'évaporer l'eau est due à la forte concentration de solutés à la périphérie qui pourrait jouer le rôle de 'couche barrière' à la vapeur d'eau. Ce résultat est similaire à celui de Girod, (1990) qui a rapporté que la consommation énergétique ramenée à la masse finale est 5 fois plus importante pour le produit non traité que pour le produit chargé en soluté.

6. ISOTHERMES DE SORPTION

Les courbes des isothermes de sorption (Fig. 3) sont tracées à partir des valeurs des teneurs en eau à l'équilibre et des valeurs des activités d'eau, (Tableau 2).



Fig. 2: Aspect des rondelles de pommes chargées de solutés et séchées

Tableau 2: Quantité d'eau absorbée des pommes déshydratées partiellement par osmose et séchées en fonction des activités d'eau à deux températures (25 °C – 45 °C)

Sels	25 °C		45 °C	
	a_w	Teneur en eau (g d'eau/100gMS)	a_w	Teneur en eau (g d'eau/100gMS)
LiBr	0.163	14.10	0.119	9.40
MgCl ₂	0.368	19.30	0.311	14.80
K ₂ CO ₃	0.459	23.30	0.399	17.50
NaNO ₂	0.669	26.50	0.584	22.70
NaCl	0.770	36.50	0.758	28.90
KCl	0.876	52.50	0.841	43.70

L'isotherme de sorption a une forme sigmoïdale ayant une valeur de K inférieure à 1 et une valeur de C largement supérieure à 1. Ce résultat est en accord avec ceux de Lewicki, (1997) qui a rapporté que les isothermes de sorption sont caractérisées par $0.24 < K \leq 1$ et $5.67 < C \leq \infty$.

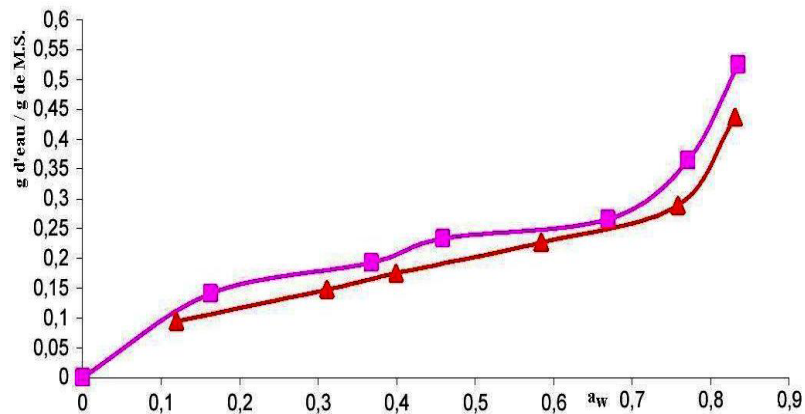


Fig. 3: Isothermes de sorption à 25°C et à 45°C des pommes déshydratées partiellement par osmose

L'équation de G.A.B. prévoit les isothermes de sorption avec des faibles valeurs de RMS %, MES % et P % (**Tableau 3**).

Tableau 3: Valeurs de RMS (%), MSE (%) et de P (%)

T (°C)	RMS (%)	MSE (%)	P (%)
25	7.56	3.85	5.65
45	9.66	4.27	7.27

La stabilité des fruits secs au cours du stockage est satisfaisante pour les faibles teneurs en eau. Les fruits secs conservés ont une stabilité maximale pour des teneurs en eau optimales. La limite minimale de la quantité d'eau optimale correspond à la teneur en eau de la couche mono moléculaire (X_m) calculée par l'équation de **BET** (Brunauer *et al.*, (1938)).

La teneur en eau de la couche mono moléculaire est définie comme étant la quantité d'eau pour laquelle tous les sites hydrophiles sont liés à la première monocouche d'eau. Un des paramètres de l'équation de GAB, X_m , où la teneur en eau de la couche mono moléculaire, est équivalent au X_m de l'équation de **BET**. (**Tableau 5**)

Pour cette étude, il a été montré que pour les pommes chargées de solutés et séchées, la teneur en eau de la monocouche d'eau est de 12.35 % à 25 °C, et de 10.31 % à 45 °C (**Tableau 4**). Ces teneurs en eau permettent un stockage satisfaisant et de longue durée sont similaires à ceux rapportées par Maroulis *et al.*, (1988) et Tsami *et al.*, (1990).

La valeur de ΔH_c est estimée pour les pommes déshydratées par osmose et séchées à 130.8 kJoules/mole. Cette valeur montre que la chaleur de sorption de l'eau de la couche mono moléculaire est supérieure à celle de la multi-couche.

La valeur négative de ΔH_k (Eq. (5)), qui est de - 0.186 kJoule/mole, (**Tableau 4**) représente la différence entre la chaleur de sorption de l'eau pure et la chaleur de sorption de la multi-couche.

Cette valeur montre que l'énergie nécessaire pour libérer l'énergie de sorption des multi-couches est supérieure à celle de l'eau pure. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Lim *et al.*, (1995) et de DAS *et al.*, (2002).

Tableau 4: Valeurs des 5 paramètres de l'équation de G.A.B. (X_m , C_0 , K_0 , H_c et H_k)

T	X_m (g/100g)	C_0	K_0	ΔH_c (kJ/mole)	ΔH_k (kJ/mole)	R
25°C	12.35	261721.2	0.937	130.795	-0.1868	0.989
45°C	10.31	130635.4	0.945	65.274	-0.1074	0.985

Tableau 5: Valeurs des 3 paramètres de l'équation de G.A.B. (X_m , C et K)

T	X_m (g/100g)	C	K	R
25°C	12.35	36029	0.937	0.989
45°C	10.31	45036	0.908	0.985

Effet de la température

Pour les activités de l'eau inférieures à 0.6, ($a_w < 0.6$), à une même valeur de l'activité de l'eau, la teneur en eau à l'équilibre diminue, lorsque la température augmente de 25 °C à 45 °C (**Tableau 2**, Fig. 1). Cette observation est similaire à celle des isothermes des aliments riches en glucides, qui est souvent expliquée par l'augmentation de la chaleur de sorption (énergie de liaison de l'eau élevée).

Aux activités de l'eau élevées, le changement de propriétés de sorption des fruits secs riches en sucre se traduit par l'intersection des deux courbes des isothermes de sorption (Saravacos *et al.*, 1986; Erol *et al.*, 1990).

Cependant, les isothermes de sorption des pommes chargées de solutés montrent, que l'augmentation de la température conduit à une diminution de la teneur en eau pour toutes les activités d'eau, mais avec absence du croisement des courbes.

Ce résultat est identique à celui de Roman *et al.*, (1982), qui ont signalé que l'absence de croisement des isothermes de sorption des pommes séchées est spécifique aux fruits secs pauvres en sucres.

La chaleur de sorption

À une teneur en eau donnée, il est possible d'estimer ΔH_b à partir des isothermes de sorption aux deux températures 25 °C et 45 °C, en utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron.

Aux faibles teneurs en eau (< 15 %), les valeurs négatives de l'énergie de liaison (ΔH_b) montrent que la réaction est exothermique due à une interaction importante entre la couche mono moléculaire et les groupes hydrophiles du substrat.

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

La figure 4 montre que dans la zone des teneurs en eau élevées, la chaleur de sorption (ΔH_b) est positive et ceci indique que l'interaction entre la vapeur d'eau et le substrat est endothermique correspondant à une dissolution des sucres. Lorsque la teneur en eau augmente, les sites de sorption disponibles diminuent entraînant une diminution des chaleurs de sorption.

La figure 4 montre également que la valeur maximale de $-\Delta H_b$ est de 13.23 kcal/mole pour une teneur en eau égale à 6 %. Par conséquent, la chaleur isostérique d'adsorption (Q_{st}) à 25 °C, en valeur absolue, est de 23.76 kcal/mole correspondant à l'énergie nécessaire à la rupture de la liaison de l'eau.

L'énergie totale nécessaire pour le séchage est déterminée en additionnant la valeur de Q_{st} (23.76 kcal/mole) à celle de la chaleur latente de vaporisation de l'eau (= 10.53 kcal/mole à 25 °C), soit 34.29 kcal/mole. L'énergie totale, exprimée en joule par gramme (J/g), nécessaire pour sécher les rondelles de pommes chargées de solutés de 30 % à 21 % est de 2454 J/g.

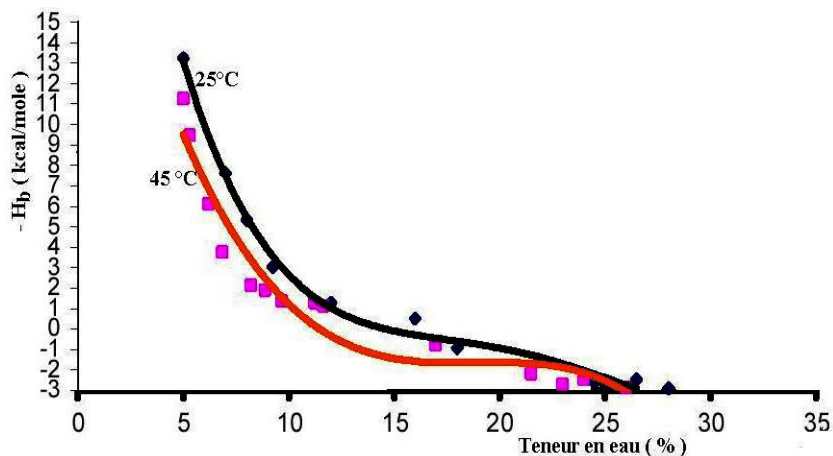


Fig. 4: Chaleur de sorption (ΔH_b) en fonction de la teneur en eau et la température des pommes chargées de solutés

7. CONCLUSION

Les isothermes d'adsorption des pommes chargées de solutés et séchées sont convenablement décrites par l'équation de G.A.B.

La valeur de RMS (%) qui est de 7.52 % à 25 °C indique un bon ajustement des valeurs expérimentales au modèle de l'équation de G.A.B.

La teneur en eau de la couche mono moléculaire est de 12.32 % à 25 °C.

La chaleur isostérique d'adsorption (Q_{st}) à 25 °C est de 23.76 kcal /mole pour les faibles teneurs en eau (≈ 6 %).

Les courbes des isothermes de sorption déterminées à 25 °C et à 45 °C sont caractérisées par une absence de croisement, qui est spécifique aux aliments pauvres en sucres.

REFERENCES

- [1] H.R. Bolin, 'Relation of Moisture to Water Activity in Prunes and Raisins', Journal of Food Science, Vol. 45, N°5, pp. 1190 - 1192, 1980.
- [2] S. Brunauer, P.F. Emmet and E. Teller, 'The Absorption of Gases in Multimolecular Layers', Journal of the American Chemical Society, Vol. 60, p. 309, 1938.
- [3] J.C. Cheftel, H. Cheftel and P.P. Besanson, 'Introduction à la Biochimie et à la Technologie des Aliments', Ed. Lavoisier, Vol. 2, 1977.
- [4] J. Chirifie and H.A. Iglesias, 'Equations for Fitting Water Sorption Isotherms of Foods: I- A Review', International Journal of Food Sciences and Technology, Vol. 13, p. 159, 1978.
- [5] M. Das and S.K. Das, 'Analysis of Moisture Sorption Characteristics of Fish Protein Myosin', International Journal of Food Science and Technology, Vol. 37, N°2, pp. 223 - 227, 2002.
- [6] 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.

Isothermes d'adsorption à 25 °C et à 45 °C des pommes chargées de solutés...

- [7] 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.
- [8] J.F. Girod, '*Contribution à l'Etude Energétique du Séchage de Fruits Chargés en Solutés*', Thèse Docteur-Ingénieur, ENS BANA, Campus Universitaire, Dijon, France, 1990.
- [9] G. Halsey, '*Physical Adsorption of Non-Uniform Surfaces*', Journal of Chemical Physics, Vol. 16, N°10, pp. 931 – 937, 1948.
- [10] J. Hawkes and J.M. Flink, '*Osmotic Concentration of Fruit Slices Prior to Freeze Dehydration*', Journal of Food Processing and Preservation, Vol. 2, pp. 265 – 284, 1978.
- [11] G. Hough, J. Chirifie and C. Marini, '*A Simple Model for Osmotic Dehydration of Apples*', Lebensm-wiss.u. Technology, Vol. 26, pp. 151 – 156, 1993.
- [12] H.A. Iglesias and J. Chirifie, '*B.E.T. Monolayer Values in Dehydrated Foods and Food Components*', International of Food Science and Technology. Vol. 9, pp. 107 – 113, 1976.
- [13] M.N. Islam and J.N. Flink, '*Dehydration of Potatoes. Part II. Osmotic Concentration and its Effect on Air Drying Behaviour*', International Journal of Food Science and Technology, Vol. 17, pp. 387 – 403, 1982.
- [14] T.P. Labuza, A. Kaanane 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, N°2, pp. 385 – 392, 1985.
- [15] A. Lenart and P.P. Lewicki, '*Osmotic Preconcentration of Carrot Tissue Followed by Convection Drying*', In Preconcentration and Drying of Food Materials (S. Bruin, Ed.), pp. 307 – 308, 1988.
- [16] C.R. Lerici, G. Pinnavaia, M. Dalla Rosa and D. Mastrocola, '*Applicazione Dell'Osmosi Diretta Nella Desidratazione Della Frutta*', Ind. Alim., Vol. 3, pp. 184 -190, 1983.
- [17] P.P. Lewicki, '*The Applicability of the GAB Model to Food Water Sorption Isotherms*', International Journal of Food Science and Technology, Vol. 32, pp. 553 – 557, 1997.
- [18] M.S. Rahman, K.A. Buckle, P. Parjoko and C.O. Perera, '*Osmotic Dehydration Kinetics of Pineapple Wedges using Palm Sugar*', Lebensm. Wiss. Technol., Vol.29, pp. 452 - 459, 1996.
- [19] M.S. Rahman and C.O. Perera, '*Effect of Pre-treatment on Air Drying Rate and Kin Layer Drying Kinetics of Fresh Cherry*', In Drying 96., Proc. Drying Kinetics of the 10th International Drying Symposium, Eds C.Z. Strumillo, Pakowski and A.S. Majumdar, pp. 1053 – 1060, Lodz Technical University, Lodz, Poland, 1996.
- [20] A.L. Raoult-Wack et S. Guilbert, '*Séchage Partiel par Immersion dans des Solutions Concentrées*', I.A.A., Octobre 1990, pp. 963 - 967, 1990.
- [21] A.L. Raoult-Wack, '*Progrès Récents dans le Domaine de la Déshydratation Osmotique des Produits Alimentaires*', Trends Food Science Technology, Vol. 5, N°8, pp. 255 – 260, 1990.
- [22] M. Riva and P. Masi, '*Osmo Dehydration of Grapes*', In Engineering and Food Preservation Processes and Related Techniques, Vol. 2, pp. 711 - 722, 1990.
- [23] G.N. Roman, M.J. Urbicain and E. Rotstein, '*Moisture Equilibrium in Apples at Several Temperatures: Experimental Data and Theoretical Considerations*', Journal of Food Science, Vol. 47, pp. 1484 – 1488, 1982.
- [24] 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, pp. 381 – 394, 1986.

- [25] E. Tsami, D. Marino-Kouris and Z.B. Maroulis, '*Water Sorption Isotherms of Raisins, Currants, Figs, Prunes and Apricots*', Journal of Food Science, Vol. 55, N°6, pp. 1594 – 1596, 1990.
- [26] C. Van den Berg and S. Bruin, '*Water Activity Influence on Food Quality*', L.B. Rockland and G.F. Stewart (Eds), Academic press, N.Y., 1981.