



The 1st International Conference on Local Resource Exploitation

www.lorexp.org / info@lorexp.org
REF: LOREXP_2021_A1232 Pages: 374–399



Détermination des isothermes de sorption d'eau de la betterave rouge et de la carotte : influence du prétraitement par Déshydratation Imprégnation par Immersion (DII)

Determination of water sorption isotherms of beet and carrot: influence of the pretreatment of Dehydration Impregnation by Immersion (DII)

Jeanine Maiblan¹ et Yvette Jiokap Nono^{1, 2, *}

¹ Laboratoire d'Analyses, Simulation et Essais (LASE), IUT, Université de Ngaoundéré-CAMEROUN, B.P. 455.

² Département de Génie Chimique et Environnement, IUT, Université de Ngaoundéré-CAMEROUN, B.P. 455.

* Auteur correspondant : jiokapnonoy@yahoo.fr

RÉSUMÉ :

Les isothermes de sorption (désorption et adsorption) de la betterave et de la carotte prétraitées et non prétraitées par déshydratation imprégnation par immersion (DII) ont été déterminées à quatre températures (30 °C, 40 °C, 50 °C et 60 °C). La méthode gravimétrique statique a été utilisée avec neuf sels couvrant une plage d'activité de l'eau comprise entre 0,055 et 0,836. Le prétraitement des légumes s'est fait à 35 °C avec une solution de saccharose à 61,5 °B et un ratio (masse produit/volume de solution) de 1/6, pendant 250 min. Toutes les isothermes obtenues étaient de type II. Onze modèles ont été testés pour la modélisation de ces isothermes, et le modèle de Peleg a ajusté au mieux les isothermes de six des huit produits alors que le modèle de GAB a ajusté au mieux les isothermes de deux des huit produits. L'enthalpie isostérique et l'entropie différentielle ont été déterminées et modélisées en fonction de la teneur en eau d'équilibre. Lors de la désorption de ces deux légumes, et sur toute la plage de teneur en eau d'équilibre, les enthalpies de sorption des produits prétraités ont été toujours inférieures à celles des produits non prétraités. A chaque point, les enthalpies de désorption de la betterave étaient supérieures à celle des carottes. Ce phénomène s'est inversé au cours du processus d'adsorption. Le prétraitement par DII des légumes a influencé les propriétés de l'eau liée dont la teneur en eau de la monocouche, la surface de sorption, le nombre de couches sorbées, le pourcentage et la densité d'eau liée des légumes.

Mots clés : Betterave, Carotte, Déshydratation Imprégnation par Immersion, Enthalpie isostérique, Entropie différentielle, Propriétés de l'eau liée.

ABSTRACT:

Sorption isotherms (desorption and adsorption) of beetroot and carrot pretreated and not pretreated by osmotic dehydration (DII) were determined at four temperatures (30 °C, 40 °C, 50 °C et 60 °C). The static gravimetric method was used with nine salts covering a water activity range of 0.055 to 0.836. The vegetables were pretreated at 35 °C with a sucrose solution at 61.5 °B and a ratio (mass of product/volume of solution) of 1/6, for 250 min. All the isotherms obtained were of type II. Eleven models were tested to model these isotherms, and Peleg's model best fitted the isotherms of six of the eight products tested while the GAB model best matched the isotherms of two of the eight products. Isothermic heat and differential entropy were determined and modeled as a function of the water content at equilibrium. During the desorption of these two vegetables, and over the entire equilibrium water content range, the sorption enthalpies of the pretreated products were always lower than those of the non-pretreated products. At each point, the desorption enthalpies of the beet were greater than that of carrots. This phenomenon was reversed during the adsorption process. The DII pretreatment of the vegetables influenced the properties of the bound water, including the water content of the monolayer, the sorption area, the number of sorbed layers, the percentage and the density of the bound water of the vegetables.

Keyword: Beetroot, Carrot, Osmotic dehydration, Isothermic heat, Differential entropy, Bound Water Properties.

1. INTRODUCTION

De nos jours la multitude de maladies liées à la mauvaise alimentation est très préoccupante. Pourtant la pyramide alimentaire présente les différents aliments que nous devons consommer quotidiennement et par priorité, permettant d'avoir une alimentation saine et équilibrée afin de nous assurer une bonne santé (Whitney et Rolfes, 2011). Les fruits et légumes, occupant pratiquement la base de cette pyramide, sont ainsi très importants du fait qu'ils sont riches en minéraux essentiels, vitamines, fibres et antioxydants, indispensables pour le maintien d'une bonne santé (Holland et al., 1991). Ce groupe d'aliments peut être classé en deux sous-groupes à savoir les fruits d'une part et les légumes d'autre part ; comparativement aux fruits, les légumes ont fait l'objet de moins de travaux bien qu'ils soient plus périssables du point de vue de leur pH. Or certains auteurs ont montré les propriétés bioactives de certains légumes (Rivier et al., 2010 ; Pennington et Fisher, 2009), c'est le cas de la betterave et de la carotte qui sont des légumes racines. De façon générale, les fruits et légumes sont très périssables en raison de leurs hautes teneurs en eau. Au Cameroun par exemple, les pertes sont très variées et peuvent aller jusqu'à 80 % selon le rapport de la FAO-BAD CMR (2010) ; Ces pertes sont causées par : les mauvaises techniques agricoles, les infrastructures déficientes, la complexité du système de commercialisation, et surtout la non maîtrise des technologies de conditionnement, de conservation et de transformation (Rivier et al., 2010).

Pour remédier au problème de périssabilité, plusieurs méthodes de conservation existent dans la bibliographie mais les méthodes de conservation par déshydratation sont les plus indiquées pour les produits à haute teneur en eau. Parmi ces méthodes, le séchage convectif occupe une place de choix (Mujumbar, 2006 ; Albagnac, et al., 2002). Cette technique bien qu'efficace, a pour inconvénient d'entraîner des changements (physiques, chimiques et biologiques), et des modifications organoleptiques qui de nos jours sont les préoccupations quotidiennes des consommateurs. En plus de cela, cette technique est très énergivore, en effet le séchage des produits végétaux nécessite environ 5000 kJ/kg d'eau évaporée (Mujumdar, 2006). Afin de résoudre ces problèmes, plusieurs auteurs proposent un enchaînement prétraitement – séchage (Teles et al., 2006 ; Ade-Omowaye et al., 2003 ; Wang et Sastry, 2000). Parmi les prétraitements, la déshydratation imprégnation par immersion (DII) occupe une place de choix car elle a comme avantages d'être facile à mettre en œuvre, de préserver la qualité nutritionnelle du produit traité, de conférer des propriétés sensorielles nouvelles et appréciées, et de déshydrater partiellement le produit (Bchir et al., 2011). Par ailleurs, l'eau dans les systèmes alimentaires est l'un des composants les plus importants et peut y exister sous forme libre ou liée ; et la meilleure manière de mesurer la liaison de l'eau est celle prenant en compte l'activité de l'eau et sa relation avec la teneur en eau (Lewicki, 2004 ; Singh et al., 2006). D'où la notion d'isothermes de sorption qui sont des courbes qui présentent pour une température T donnée, la teneur en eau d'équilibre X_{eq} d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau A_w ou l'humidité relative de l'air en équilibre HRE avec le produit. Cependant, les isothermes de sorption sont d'une grande importance en séchage et stockage, car elles permettent de prédire le domaine de stabilité après séchage d'un produit et de prédire ses conditions (température et hygrométrie) optimales de stockage et de conservation (Mbwalala, 2014 ; Bizot et al., 1998). Elles constituent donc une étude indispensable non seulement pour la bonne conduite du séchage (dimensionnement des séchoirs et procédé) mais aussi pour le conditionnement des produits séchés.

Dans la bibliographie, des informations relatives aux isothermes de sorption de la betterave et de la carotte sont respectivement inexistantes et incomplètes. D'où la nécessité de déterminer les isothermes de sorption de la betterave et de la carotte non prétraitées et prétraitées par DII, afin de ressortir l'impact de ce prétraitement sur les propriétés thermodynamiques des légumes étudiés et afin de mieux les mettre en œuvre dans les procédés. Spécifiquement, l'objectif de ce travail est d'une part, de déterminer et modéliser les isothermes de sorption d'eau de la betterave et de la carotte prétraitées et non prétraitées par DII et d'autre part, de déterminer les

propriétés thermodynamiques respectives ainsi que les propriétés de l'eau liée de ces deux légumes, ayant au préalable subi ou non, le prétraitement de DII.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Prétraitement des légumes

Les légumes (betterave et carotte) fraîchement récoltés (Figure 1) ont été lavés avec de l'eau du robinet, puis trempés dans une eau chlorée à 1 % pendant 15 min pour être désinfectés. Ils ont ensuite été rincés avec de l'eau distillée, parés, découpés et trempés dans une solution de benzoate de sodium à 10 % afin d'éviter un développement ultérieur de moisissures. Ce sont ces morceaux qui ont servi aux expérimentations. En ce qui concerne les légumes prétraités par DII, les morceaux obtenus à l'étape précédente ont été trempés dans une solution de saccharose à 61,6 °Brix, une température de 35 °C, un ratio produit/solution (masse/volume) de 1/6 pendant 250 min sous agitation manuelle toutes les 10 min.



Figure 1 : Légumes étudiés. © Maiblan 2020

2.2. Détermination des teneurs en eau d'équilibre (X_{eq})

Pour obtenir les teneurs en eau d'équilibre, la méthode gravimétrique statique décrite par Jannot (2003) a été adoptée. Neuf (09) sels (KOH, LiCl, KCH_3CO_2 , $MgCl_2$, K_2CO_3 , NaBr, $CuCl_2$, NaCl, KCl) ont été utilisés pour la préparation des solutions salines ; ceux-ci confèrent des activités d'eau allant de 0,055 à 0,836, à 30, 40, 50, et 60 °C. La procédure expérimentale a consisté à placer les échantillons de légumes apprêtés, de masses connues, dans des coupelles. Celles-ci ont été disposés à l'intérieur des bocal pour isothermes (Kemene Dapabko et al., 2021), et l'ensemble a été introduit dans un incubateur à température constante. Des supports ont permis d'empêcher le contact entre les échantillons et les solutions salines saturées contenues dans les bocal (Figure 2). Les échantillons ont été pesés à intervalle régulier de 24h jusqu'à ce que la différence de masse entre deux pesées consécutives soit inférieure ou égale à 0,01g, marquant ainsi l'atteinte de l'équilibre entre les échantillons et l'air à la température et humidité relative fixées. A l'équilibre, les échantillons ont été récoltés puis séchés à 105 °C pendant 24 h pour déterminer leurs teneurs en eau résiduelle. La détermination des teneurs en eau à l'équilibre en base sèche a été effectuée selon l'équation 1.

$$X_{eq} = 100 \times \frac{(M_{eq} - M_s)}{M_s} \quad (1)$$

avec X_{eq} : Teneur en eau à l'équilibre de l'échantillon sur base sèche (en %) ; M_{eq} : Masse à l'équilibre de l'échantillon testé (en g) ; M_s : Masse anhydre de l'échantillon testé (en g).

Pour une température donnée, les différents couples de valeurs d'activité de l'eau et de teneur en eau d'équilibre obtenues (a_w, X_{eq}) ont permis de tracer expérimentalement les isothermes de sorption des produits étudiés. Par conséquent, la teneur en eau du produit à l'équilibre peut s'exprimer par la relation suivante : $[X_{eq} = f(a_w)]_T$ où T est la température d'équilibre du système en °C et a_w , l'activité de l'eau du produit à l'équilibre (qui est, à l'équilibre, égale à l'humidité relative de l'air au-dessus de la solution saturée de chaque bocal d'isotherme de sorption).

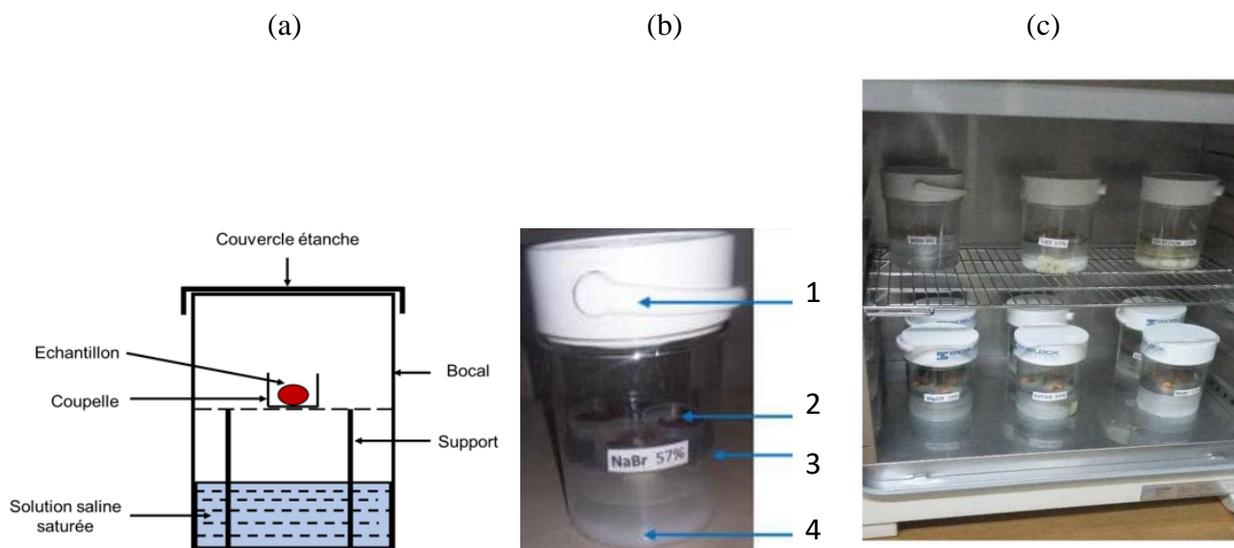


Figure 2 : Schéma du montage expérimental type pour la méthode gravimétrique statique (a) ; Bocal d'isothermes de sorption utilisé (1. Pompe manuelle, 2. Coupelle contenant le produit, 3. Support, 4. Solution saturée de sel) et étuve à température contrôlée (c).

2.3. Modélisation des isothermes de sorption

Les courbes de teneur en eau d'équilibre en fonction de l'activité de l'eau ($X_{eq} = f(a_w)$) obtenues ont été modélisées par 12 modèles d'isothermes de sorption, modèles essentiellement fondamentaux et semi-empiriques, présentés dans le Tableau 1.

2.3.1. Critères de Validation des modèles

Les critères de validations de ces modèles sont le R^2 (équation 2), le R^2 ajusté (équation 3), le RMSE (Root Mean Square Error) (équation 4) et l'erreur relative moyenne (MRE) (équation 5).

$$R_{sq} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{exp,i} - Y_{pre,i})^2}{N-n} \quad (2)$$

$$R_{sqaj} = 1 - \frac{(1-R_{sq})(n-1)}{n-p} \quad (3)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{calc,i} - Y_{exp,i})^2}{N} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$MRE = \frac{\sum_i^N |Y_{cal} - Y_{exp}|}{Y_{exp}} \quad (5)$$

Tableau 1 : Modèles choisis pour la modélisation des courbes d'isothermes de sorption.

N°	Auteurs	Modèle	Références
1	Brunauer Emmett Teller (BET)	$X_{eq} = \frac{X_m * C_b * a_w}{(1 - a_w) * (1 + (C_b - 1) * a_w)}$ $C_b = C_o * \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$	Brunauer et al., 1938
2	Caurie	$\frac{1}{X_{eq}} = \frac{1}{C_c * X_m} * \left(\frac{1 - a_w}{a_w}\right)^{\frac{2 * C_c}{X_m}}$	Caurie, 1981
3	Ferro Fontan	$X_{eq} = \left[\frac{1}{\alpha} * \ln\left(\frac{\gamma}{a_w}\right)\right]^{-\frac{1}{r}}$	Ferro et al., 1982
4	Guggenheim Anderson de Boer (GAB)	$X_{eq} = \frac{X_m * C_g * k_g * a_w}{(1 - k_g * a_w) * (1 + (C_b - 1) * k_g * a_w)}$ $X_m = X_m' * \exp\left(\frac{-\Delta H_m}{RT}\right)$ $C_g = C' * \exp\left(\frac{-\Delta H_c}{RT}\right)$ $k_g = k' * \exp\left(\frac{-\Delta H_k}{RT}\right)$ $\Delta H_c = \Delta H_m - \Delta H_q$ $\Delta H_k = \Delta H_l - \Delta H_q$	Van den Berg, 1984
5	Halsey	$X_{eq} = X_m \left(-\frac{a}{R * T * \ln(a_w)}\right)^{\frac{1}{r}}$	Halsey, 1948
6	Harkins et Jura	$X_{eq} = \left(\frac{a}{b - \ln a_w}\right)^{\frac{1}{2}}$	Harkins et Jura, 1944
7	Henderson	$X_{eq} = \left(-\frac{\ln(1 - a_w)}{a}\right)^{\frac{1}{b}}$	Henderson, 1952
8	Langmuir	$X_{eq} = \frac{1}{a + b * a_w^{(c-1)}}$	Langmuir, 1916
9	Lewicki	$X_{eq} = k * \left(\frac{1}{a_w} - 1\right)^{n-1}$	Lewicki, 2000
10	Oswin	$X_{eq} = k * \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^n$	Oswin, 1946
11	Peleg	$X_{eq} = A * a_w^{k_1} + B * a_w^{k_2}$	Peleg, 1993

2.3.2. Classification des modèles

La classification des modèles s'est effectuée en rangeant par ordre décroissant les modèles en fonction de la somme des minimums calculée selon la formule l'équation 6.

$$\text{Somme des minimums} = (1 - R_{sq}) + (1 - R_{sqj}) + RMSE + \text{Chi_square} + MAE + MRE \tag{6}$$

2.4. Détermination des propriétés thermodynamiques

2.4.1. Enthalpie isostérique nette de désorption

L'enthalpie isostérique nette de désorption a été déterminée à partir des données expérimentales en utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron, donnée par l'équation 7 (Hossain et al., 2002 ; Singh et al., 2001).

$$\left[\frac{d \ln(a_w)}{d\left(\frac{1}{T}\right)}\right]_{X_{eq}} = -\frac{Q_{st} - L_v}{R} = -\frac{q_{st}}{R} \tag{7}$$

Dont l'intégration aboutit à l'équation 8 :

$$[-\ln(a_w)]_{X_{eq}} = \frac{q_{st}}{R} \times \frac{1}{T} - C \quad (8)$$

Où q_{st} est l'enthalpie isostérique nette ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) ; Q_{st} l'enthalpie isostérique de désorption ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) ; L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau pure ($43,53 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) ; T la température absolue, (K) ; R la constante des gaz parfaits ($8,3145 \text{ J}\cdot\text{mol}\cdot\text{K}$) et C , une constante.

L'enthalpie isostérique nette à une teneur en eau d'équilibre donnée, est déduite de la pente de l'isostère correspondante, c'est-à-dire de la courbe de $-\ln(a_w)$ en fonction de $1/T$. On obtient ainsi une série de couples (X_{eq}, q_{st}) dont le nombre dépend du découpage du domaine expérimental. La relation entre ces deux grandeurs a été modélisées par une corrélation empirique exponentielle donnée par Oladiran et al. (1997) (équation 9) :

$$Q_s = K_1 \exp(-K_2 \cdot X_{eq}) + K_3 \quad (9)$$

2.4.2. Théorie de la compensation enthalpie-entropie

La constante de l'équation 8 peut être explicitée grâce à l'expression de l'enthalpie libre de Gibbs, à température et pression constantes (équation 10) :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (10)$$

Or, l'équation 11 permet en l'associant avec les équations 8 et 10 de faire ressortir l'expression de la constante C (McMinn and Magee, 2003) (équation 12) :

$$\Delta G = -RT\ln(a_w) \quad (11)$$

$$[-\ln(a_w)]_{X_{eq}} = \frac{q_{st}}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (12)$$

L'entropie différentielle est donc déduite de chaque isostère, à partir de l'ordonnée à l'origine. Les entropies différentielles obtenues ont été modélisées par une corrélation empirique exponentielle donnée par Oladiran et al., (1997) (équation 13) :

$$\Delta S = K_2 \exp(-K_5 \cdot X_{eq}) + K_7 \quad (13)$$

La théorie de la compensation enthalpie-entropie ou théorie isocinétique, propose une relation linéaire entre l'enthalpie et l'entropie différentielles donnée par l'équation 14 :

$$q_{st} = T_\beta \Delta S + \Delta G_\beta \quad (14)$$

T_β est la température isocinétique dont la comparaison avec la température harmonique (équation 15), permet de déterminer le mode de contrôle du processus de sorption. Pour que cette compensation s'applique, il faut que ces deux températures soient différentes. ΔG_β est l'énergie libre à la température T_β . Le signe de l'énergie libre ΔG_β fournit un critère pour évaluer si le processus de désorption est spontané (valeur négative) ou non.

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_i}\right)} \quad (15)$$

2.5. Détermination des propriétés de l'eau liée

La détermination des propriétés de l'eau liée a été faite en appliquant aux données expérimentales l'équation de Caurie sous sa forme linéarisée comme suit (Caurie, 2005) (équation 16) :

$$\ln X_{eq} = \ln C^{1/n} X_m + \frac{2C^{1/n}}{X_m} \ln \frac{a_w}{1-a_w} \quad (16)$$

Où :

X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre à une activité de l'eau de a_w , X_m teneur en eau de la monocouche et $C^{1/n}$ est la densité d'eau liée (g/ml) (équation 17) :

$$n = \frac{X_m}{C^{1/n}} \quad (17)$$

Le pourcentage d'eau liée a été calculé comme suit (Singh et al, 2001) (équation 18) :

$$B_w = X_m \times n \quad (18)$$

La surface sorbante (A (m²/g)) a été calculée comme suit (Rao et al., 2006 ; Sahu et Das, 2010) (équation 19) :

$$A = \frac{X_m}{C^{1/n} \cdot d \cdot 10^8} \quad (19)$$

Où d est le diamètre d'une molécule d'eau ($3,673 \times 10^{-10}$ m).

2.6. Détermination du rayon des pores des matrices

L'équation de Kelvin a été utilisée pour calculer le rayon critique (Singh et al., 2001) (équation 20) :

$$r_C = \frac{2\sigma \cdot V_M}{R \cdot T \cdot \ln(1/a_w)} \quad (20)$$

L'équation de Halsey a été utilisée pour calculer l'épaisseur de la couche d'eau sorbée (Singh et al., 2006) (équation 21) :

$$t = 0,354 \left(\frac{-5}{\ln a_w} \right)^{1/3} \quad (21)$$

Le rayon des pores (r_p) a été déduit des équations 16 et 17 selon l'équation 22 (Singh et al., 2001) :

$$r_p = 10^9 \cdot r_C + t \quad (22)$$

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Isothermes de sorption

Les figures 3 et 4 puis 5 et 6 présentent les isothermes de sorption d'eau de la betterave et de la carotte non prétraitées et prétraitées par DII respectivement. Ces isothermes ont toutes une forme sigmoïdale, correspondant à l'isotherme de type II du classement de Brunauer et al. (1940) et caractéristique de la majorité des produits alimentaires (Ajibola et al., 2003 ; Vazquez et al., 2003 ; Delgado et al., 2002 ; Giovanelli et al., 2002 ; Iglesias et Chirife, 1982). Ces résultats sont en accord avec les travaux de Edoun et al., (2010) et Timoumi et al. (2004) qui ont obtenu des isothermes de types II respectivement pour la désorption d'un légume feuille (*Gnetum africanum*), de la carotte et de la pomme. L'on note également que pour une température constante, la teneur en eau d'équilibre des produits augmente avec l'activité de l'eau indiquant ainsi que les produits deviennent autant plus hygroscopiques dans un environnement plus humide.

Par ailleurs, ces figures illustrent l'effet de la température sur la sorption d'eau de la betterave et de la carotte. Pour une activité de l'eau constante, la teneur en eau d'équilibre des produits diminue avec l'augmentation de la température, indiquant que les produits deviennent moins hygroscopiques ; l'augmentation de la température

est donc défavorable à la sorption d'eau des produits. Cette conclusion va dans le même sens que celle des travaux de Timoumi et al. (2004).

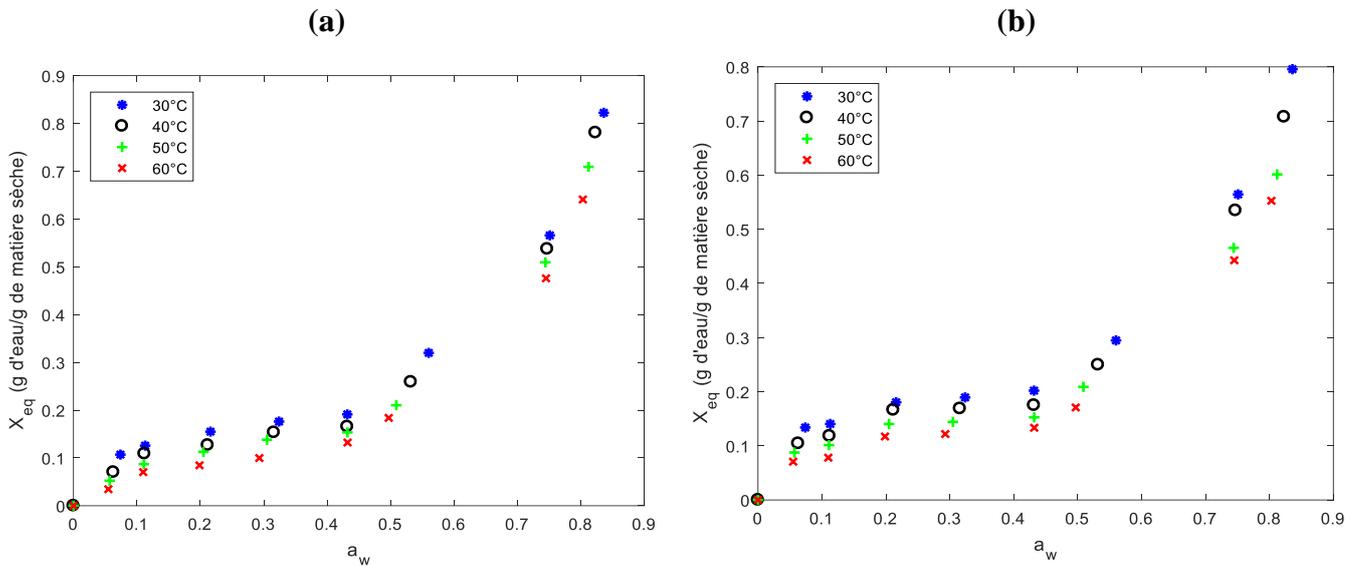


Figure 3 : Isothermes de désorption d'eau de la betterave (a) et de la carotte (a) non prétraitées à différentes températures.

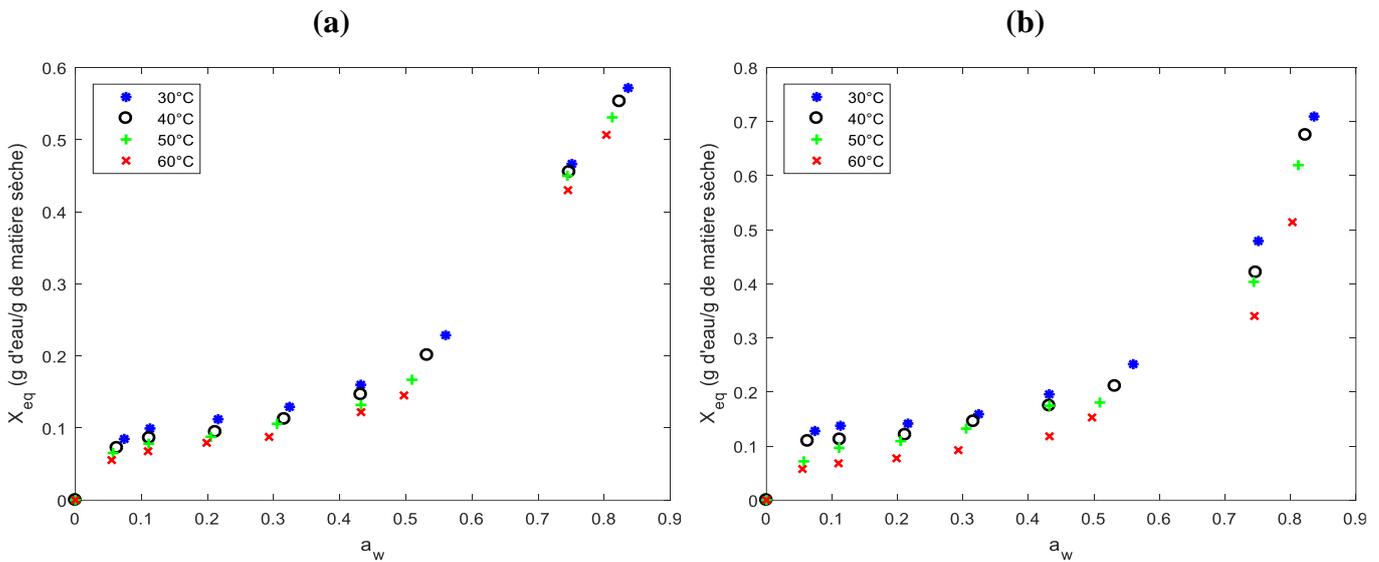


Figure 4 : Isothermes d'adsorption d'eau de la betterave (a) et de la carotte (b) non prétraitées à différentes températures.

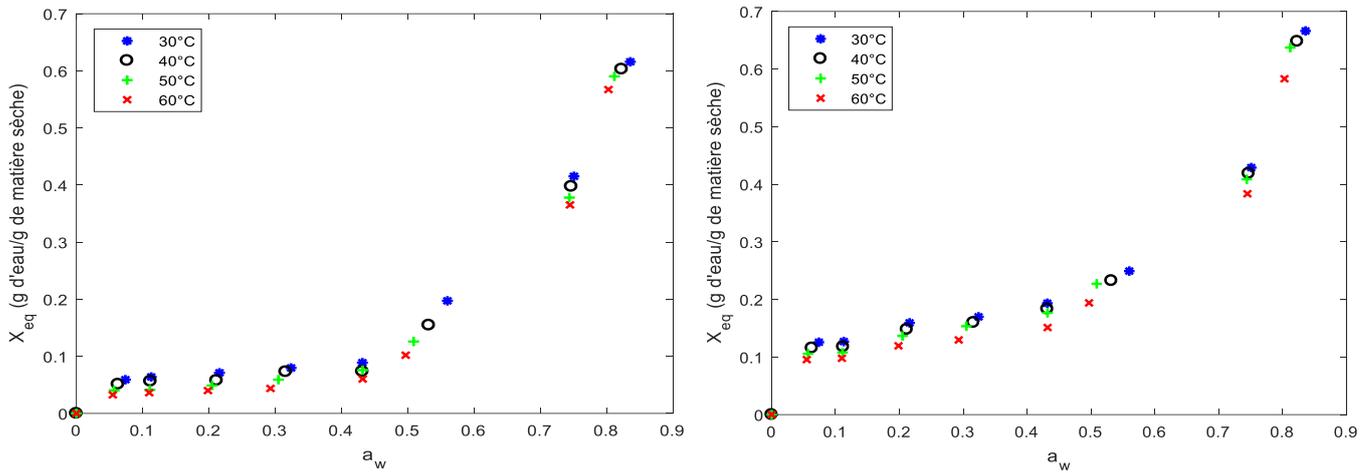


Figure 5 : Isothermes de désorption d'eau de la betterave (a) et de la carotte (b) prétraitées par DII à différentes températures.

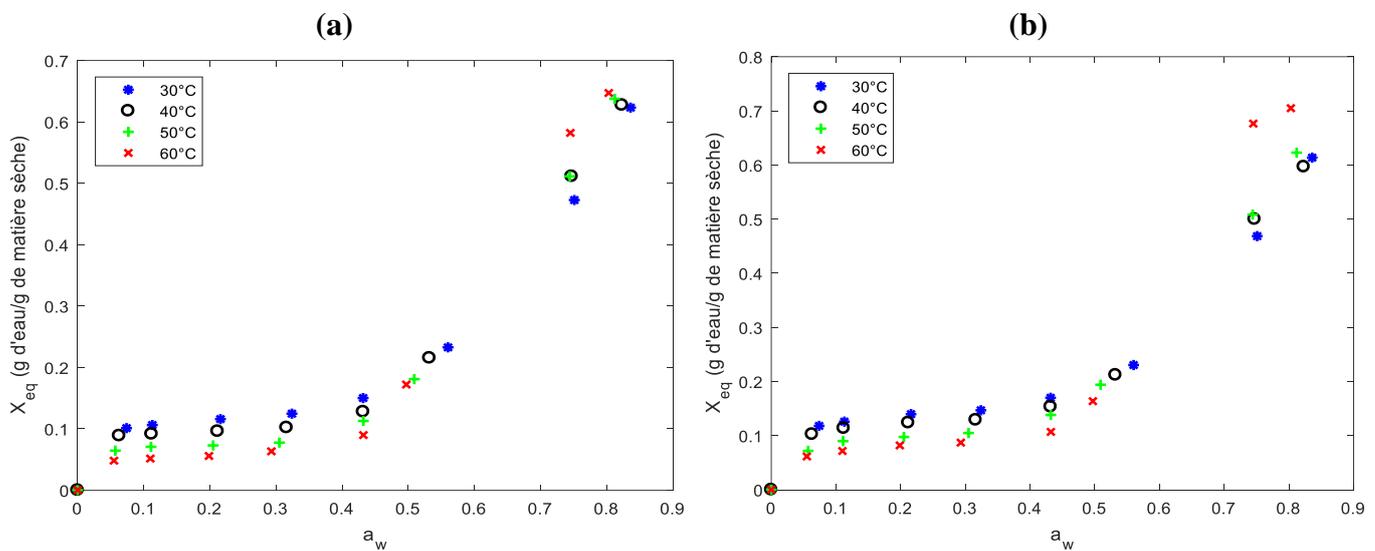


Figure 6 : Isothermes d'adsorption d'eau de la betterave (a) et de la carotte (b) prétraitée par DII à différentes températures

3.2. Modélisations des isothermes de sorption

3.2.1. Résultats de modélisation

Après avoir obtenu les résultats expérimentaux, nous avons testé onze modèles d'isothermes de sorption pour ajuster les isothermes de sorption d'eau de la betterave et de la carotte prétraitées et non prétraitées par DII. Les tableaux 9 et 10 présentent respectivement pour les produits prétraités et non prétraités par DII, la classification de ces modèles sur la base de la somme minimale (Σ_{min}) des valeurs des quatre critères de validations calculées ; la plus petite somme correspondant au modèle ayant le mieux ajusté les résultats expérimentaux. L'expression de Σ_{min} est donnée par l'équation 6.

Du Tableau 2 il ressort que le Modèle de Peleg ajuste mieux la désorption et l'adsorption de la betterave non prétraitée ainsi que la désorption de la Carotte non prétraitée. Le modèle de GAB quant à lui ajuste au mieux l'adsorption de la carotte non prétraitée. Bien que les modèles de Peleg et GAB ont été retenus pour les cas concernés dans la suite de ce travail, la bibliographie rapporte cependant que généralement le Modèle de GAB épouse bien les isothermes de forme sigmoïdale pour la majorité des produits alimentaires (Ajibola et al., 2003 ; Vazquez et al., 2003 ; Lahsasni et al., 2002).

Tableau 2 : Classement des modèles testés pour les légumes non prétraités.

BETTERAVE				CAROTTE			
DESORPTION		ADSORPTION		DESORPTION		ADSORPTION	
Modèle	Σ_{min}	Modèle	Σ_{min}	Modèle	Σ_{min}	Modèle	Σ_{min}
Peleg	0,077	Peleg	0,076	Peleg	0,069	GAB	0,046
GAB	0,096	Halsey	0,174	GAB	0,104	Peleg	0,073
Ferro	0,117	Langmuir	0,194	BET	0,125	Ferro	0,104
Halsey	0,122	Ferro	0,194	Ferro	0,175	Harkins	0,129
Langmuir	0,139	GAB	0,207	Halsey	0,183	BET	0,136
BET	0,158	BET	0,213	Harkins	0,202	Halsey	0,183
Lewicki	0,256	Lewicki	0,271	Langmuir	0,237	Langmuir	0,243
Caurie	0,256	Oswin	0,271	Lewicki	0,314	Lewicki	0,333
Oswin	0,256	Caurie	0,271	Caurie	0,314	Caurie	0,333
Harkins	0,334	Harkins	0,352	Oswin	0,314	Oswin	0,333
Henderson	0,413	Henderson	0,379	Henderson	0,468	Henderson	0,498

Tableau 3 : Classement des modèles testés pour les matières prétraitées par DII.

BETTERAVE DII				CAROTTE DII			
DESORPTION		ADSORPTION		DESORPTION		ADSORPTION	
Modèle	Σ_{min}	Modèle	Σ_{min}	Modèle	Σ_{min}	Modèle	Σ_{min}
Peleg	0,112	Peleg	0,132	GAB	0,058	Peleg	0,137
Ferro	0,220	Halsey	0,263	Peleg	0,072	GAB	0,255
Halsey	0,227	Ferro	0,293	BET	0,085	Halsey	0,258
Langmuir	0,228	BET	0,306	Harkins	0,091	BET	0,262
GAB	0,305	GAB	0,311	Ferro	0,107	Ferro	0,293
BET	0,337	Langmuir	0,334	Halsey	0,199	Langmuir	0,351
Oswin	0,339	Lewicki	0,352	Langmuir	0,293	Lewicki	0,369
Lewicki	0,339	Oswin	0,352	Lewicki	0,342	Caurie	0,369
Caurie	0,339	Caurie	0,352	Caurie	0,342	Oswin	0,369
Henderson	0,449	Henderson	0,431	Oswin	0,342	Harkins	0,429
Harkins	0,674	Henderson	0,481	Harkins	0,593	Harkins	0,482

Du Tableau 3 il ressort que le Modèle de Peleg ajuste mieux la désorption et l’adsorption de la betterave prétraitée par DII ainsi que l’adsorption de la Carotte non prétraitée. Le modèle de GAB quant à lui ajuste mieux la désorption de la carotte prétraitée par DII. Les modèles de Peleg et GAB ont donc été retenus pour les cas concernés dans la suite de ce travail.

Les figures 7 et 8 puis 9 et 10 présentent les isothermes de sorption d’eau modélisées de la betterave et de la carotte non prétraitées et prétraitées par DII respectivement. De ces isothermes modélisées, l’on apprécie mieux la forme sigmoïdale caractéristique des isothermes de type II observée sur les résultats expérimentaux. Cependant nous remarquons que dans tous les cas de produits prétraités par DII, à une activité de l’eau constante, la teneur en eau d’équilibre diminue avec l’augmentation de la température jusqu’à un point d’intersection des quatre isothermes (30, 40, 50 et 60 °C) où l’on observe une nette inversion de cette tendance. En effet à partir de ce point et pour une activité de l’eau constante, la teneur en eau d’équilibre augmente avec la température, indiquant que les produits deviennent plus hygroscopiques et que l’augmentation de la température est favorable à la sorption d’eau à partir de ce point. Cette inversion peut s’expliquer par la teneur en sucres plus élevée des produits prétraités suite au gain en soluté (sucre) pendant la DII, les produits prétraités par DII étant ainsi plus hygroscopiques car le gain en soluté a augmenté le nombre de site de fixation des molécules d’eau. Ces résultats

sont en accord avec les travaux de Timoumi et al., (2003) qui a conclu que l'inversion des isothermes dépend de la composition du matériau, la teneur en sucre décidant de l'inversion. Roman et al., en 1982 a montré que les isothermes de sorption des produits à faible teneur en sucre ne s'inversent pratiquement pas.

Par ailleurs, nous remarquons que le point d'intersection, où l'inversion des isothermes d'adsorption des produits prétraités par DII, est vite atteint (entre 0,5 et 0,6 d' a_w) comparativement au point d'intersection où l'inversion des isothermes de désorption des produits prétraités par DII (entre 0,75 et 0,8 d' a_w). Ceci indique que les produits prétraités séchés sont plus hygroscopiques (à partir de 0,05 d' a_w) que les produits fraîchement prétraités (à partir de 0,07 d' a_w) et ce avec l'augmentation de la température.

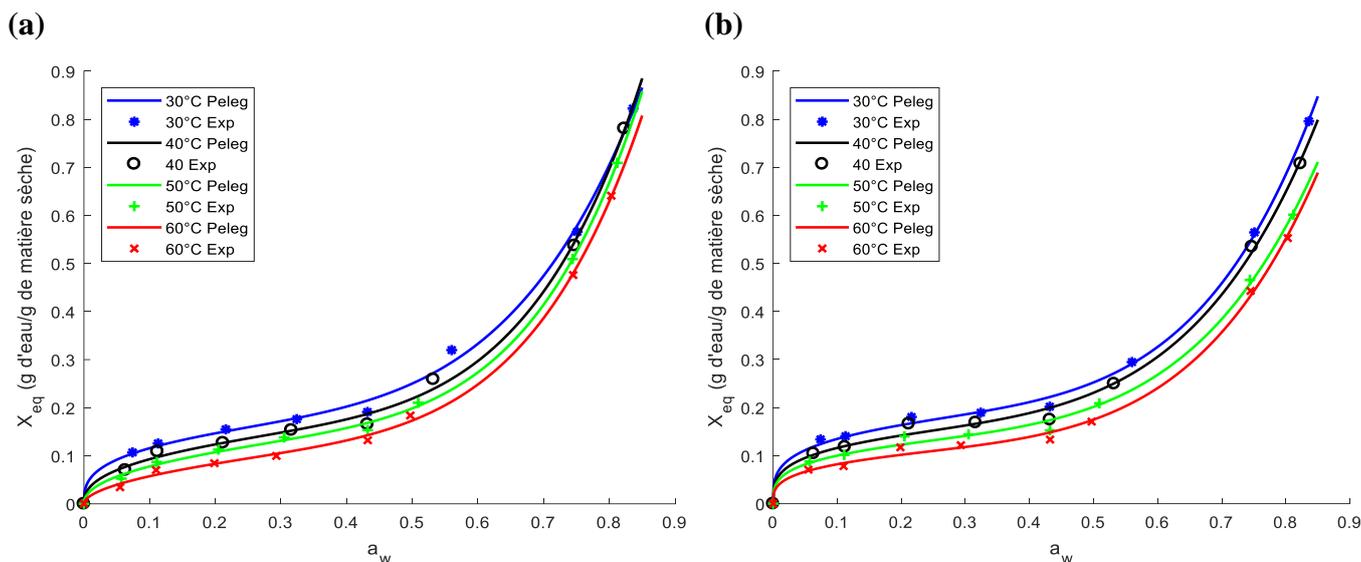


Figure 7 : Isothermes de désorption d'eau modélisées de la betterave (a) et de la carotte (b) non prétraitées.

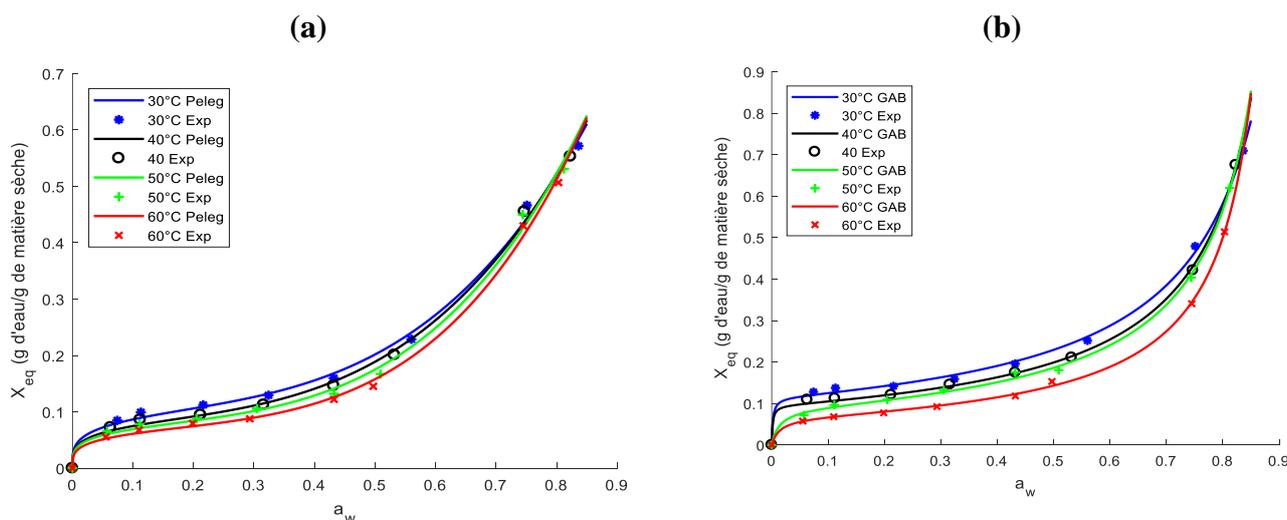


Figure 8 : Isothermes d'adsorption d'eau modélisées de la betterave (a) et de la carotte (b) non prétraitées.

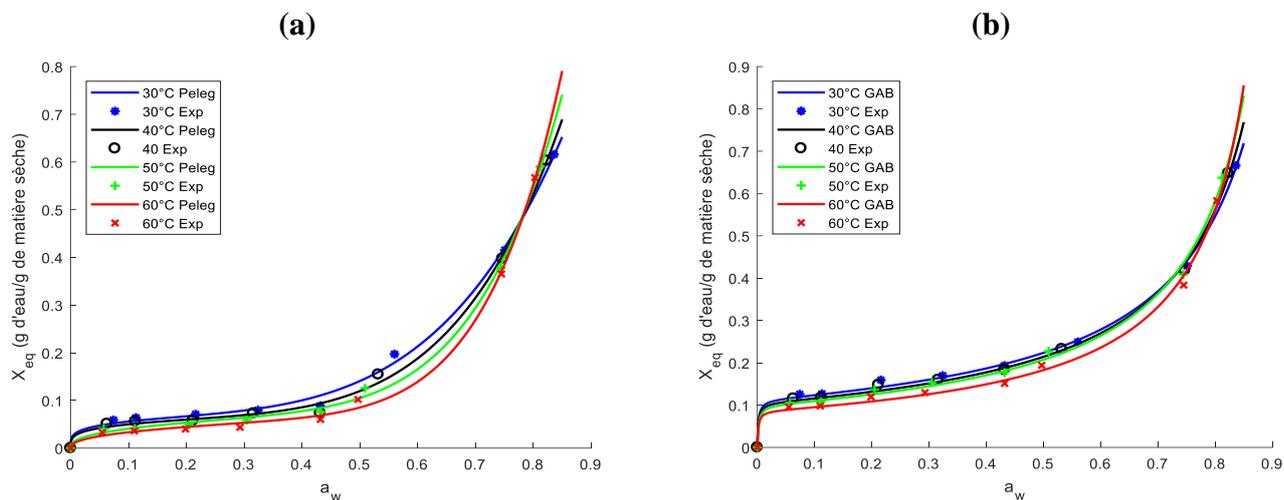


Figure 9 : Isothermes de désorption d’eau modélisées de la betterave (a) et de la carotte (b) prétraitée par DII.

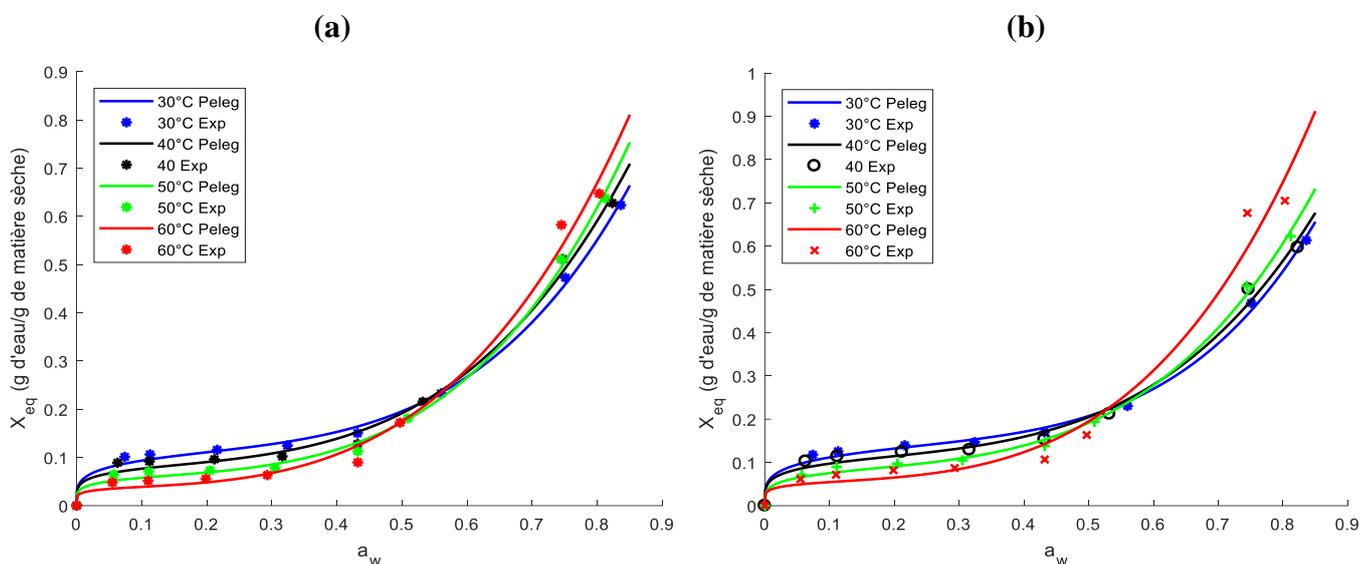


Figure 10 : Isothermes d’adsorption d’eau modélisées de la betterave (a) et de la carotte (b) prétraitées par DII.

3.2.2. Paramètres du modèle de GAB.

Le modèle de Peleg et le modèle de GAB, qui sont respectivement empirique et semi-empirique, ayant le mieux ajusté les isothermes de sorption de nos deux légumes, nous les avons retenus pour faire une meilleure prédiction des énergies de sorption d’eau des produits concernés. Cependant, il existe dans la bibliographie des modèles semi-empiriques ayant dans leurs écritures des paramètres importants qui caractérisent les produits et donnent des informations permettant de calculer les différences d’énergie de sorption entre la monocouche et la multicouche des produits ; C’est le cas du modèle de GAB qui est réputé être celui qui prédit mieux le comportement de la plupart des produits alimentaires (Al-Muhtaseb et al., 2002). Nous avons donc utilisé le modèle de GAB afin d’exploiter ses paramètres dont notamment la teneur en eau de la monocouche (X_m), les paramètres C_g et K_g (présentés en annexe 7) ont été utilisés pour déterminer les enthalpies intermoléculaires. Le tableau 11 présente les teneurs en eau de la monocouche de la betterave et de la carotte prétraitées et non prétraitées par DII. Le tableau 9 présente les enthalpies intermoléculaires (ΔH_c et ΔH_k) de ces légumes.

Tableau 4 : Teneurs en eau à la monocouche (X_m) des légumes prétraités et non prétraités.

	DESORPTION				ADSORPTION			
	Betterave		Carotte		Betterave		Carotte	
	Non DII	DII	Non DII	DII	Non DII	DII	Non DII	DII
T (°C)								
30 °C	0,137	0,106	0,134	0,113	0,117	0,107	0,114	0,111
40 °C	0,120	0,094	0,123	0,106	0,109	0,110	0,095	0,109
50 °C	0,109	0,084	0,105	0,100	0,099	1,237	0,089	0,108
60 °C	0,100	0,081	0,091	0,086	0,088	4,897	0,066	4,841

Du Tableau 4 il ressort que dans six produits sur huit, la teneur en eau de la monocouche (X_m) décroît avec l’augmentation de la température, indiquant ainsi que la teneur en eau de la monocouche dépend de la température de sorption. Cette observation a été faite par d’autres auteurs sur des produits alimentaires (Cervenka et al., 2008 ; Ayranci et Duran, 2005 ; Hossain et al., 2002 ; Singh et al., 2001) ; Des auteurs ont énoncé que la diminution de la teneur en eau de la monocouche avec l’augmentation de la température serait due à la réduction du nombre total de sites actifs disponibles pour la liaison de l’eau, suite aux changements physiques ou chimiques induits par la température (Dalgic et al., 2012 ; Iglesias et Chirife, 1976).

Par contre, dans les cas d’adsorption des légumes prétraités par DII, la teneur en eau de la monocouche ne suit pas cette évolution précédemment mentionnée. Ceci peut s’expliquer par le fait que l’enchaînement DII-séchage (précédant l’adsorption) aurait modifié la configuration de la structure du matériau de façon aléatoire et donc celle de la monocouche. Certains auteurs dans la bibliographie n’ont pas aussi trouvé de corrélation entre la teneur en eau de la monocouche et la température de sorption (Valeria et al., 2011 ; Simal et al., 2007 ; Kaymak-Ertekin et al., 2004).

Les autres paramètres de GAB (C_g, K_g) ont permis de calculer les enthalpies intermoléculaires à savoir ΔH_c qui est la différence enthalpique de sorption entre la monocouche et la multicouche, et ΔH_k qui est la différence entre la chaleur de condensation de l’eau pure et l’enthalpie de sorption de la multicouche (Van den Berg, 1984). Les valeurs de ces différences enthalpiques pour la betterave et la carotte prétraitées et non prétraitées par DII sont résumées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Enthalpie de sorption intermoléculaires

	DESORPTION				ADSORPTION			
	Betterave		Carotte		Betterave		Carotte	
	Non DII	DII	Non DII	DII	Non DII	DII	Non DII	DII
ΔH_c (kJ/mol)	-0,343	-0,232	-0,379	0,009	-0,117	-0,662	-0,413	-0,619
ΔH_k (kJ/mol)	0,015	0,022	0,013	0,018	0,022	-0,102	0,020	-0,064

Du Tableau 5, il ressort que les différences enthalpiques de sorption entre la monocouche et la multicouche (ΔH_c) sont toutes négatives, exception faite du cas de la désorption de la carotte prétraitée par DII. Ces valeurs négatives indiquent que la sorption de l’eau des matériaux concernés est endothermique. Par ailleurs nous notons

aussi que les valeurs des différences entre la chaleur de condensation de l'eau pure et les enthalpies de sorption de la multicouche (ΔH_k) sont positives, exception faite des cas d'adsorption de la betterave et de la carotte prétraitées par DII. Les valeurs positives indiquent que la chaleur de sorption de la multicouche est plus petite que la chaleur de condensation, et les valeurs négatives indiquent que la chaleur de sorption de la multicouche est supérieure à la valeur de condensation de l'eau pure.

3.3. Propriétés thermodynamiques

3.3.1. Enthalpie isostérique de sorption

La Figure 11 présente l'évolution de l'enthalpie isostérique de désorption de la betterave prétraitée et non prétraitée par DII en fonction de la teneur en eau. Pour les deux produits nous notons que l'enthalpie isostérique décroît exponentiellement avec l'augmentation de la teneur en eau puis tend asymptotiquement vers la chaleur latente de vaporisation de l'eau pure (L_v) ; les valeurs de l'enthalpie isostérique les plus élevées correspondant aux faibles teneurs en eau. Ceci peut être attribué au fait qu'au début de la désorption, les produits sont riches en eau libre facile à éliminer, alors qu'à de faibles teneurs en eau on est en présence de molécules d'eau fortement liées difficiles à éliminer en raison de leurs fortes interactions avec l'adsorbant. Ces observations sont en accord avec les résultats obtenus par des auteurs ayant travaillé sur la carotte, la pomme, la mangue, la banane et l'ananas (Valeria et al., 2011 ; Talla et al., 2005 ; Timouni et al., 2004).

Par ailleurs nous notons que le courbe de l'enthalpie isostérique de la betterave prétraitée par DII est en dessous de celle de la betterave non prétraitée, indiquant ainsi que la désorption à une même teneur en eau des produits prétraités requiert moins d'énergie que la désorption des produits non prétraités. La DII aurait donc un effet réducteur d'énergie sur le séchage des produits. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que pendant la DII, étant en présence de sucre, les fibres solubles des légumes vont en désorption favoriser le départ d'eau.

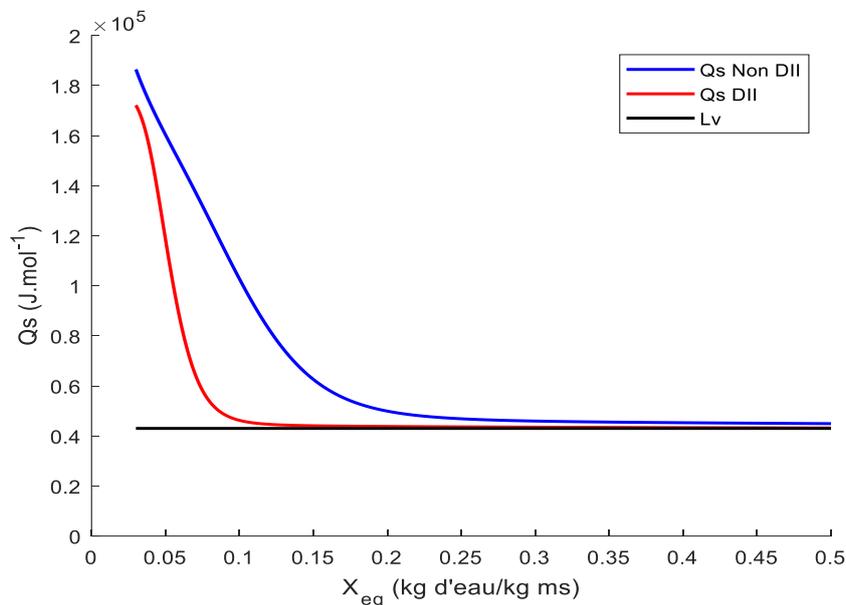


Figure 11 : Enthalpies isostériques de désorption d'eau de la betterave prétraitée par DII ou non, en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

Les fonctions représentant les chaleurs isostériques de désorption de la betterave non prétraitée et prétraitée sont respectivement données par les équations 23 et 24 :

$$Q_s = 249950. \exp^{-15,24.X_{eq}} + 42904 \quad (r = 0,987; r^2 = 0,987) \quad (23)$$

$$Q_s = 555810. \exp^{-42,85.X_{eq}} + 42944 \quad (r = 0,981; r^2 = 0,981) \quad (24)$$

Q_s Exprimé en $J.mol^{-1}$.

La Figure 12 présente l'évolution de l'enthalpie isostérique de désorption de la carotte prétraitée et non prétraitée par DII en fonction de la teneur en eau. Tout comme dans le cas de la betterave, nous notons que la courbe de l'enthalpie isostérique de la carotte prétraitée par DII est en dessous de celle de la carotte non prétraitée, indiquant ainsi que la désorption à une même teneur en eau des produits prétraités requiert moins d'énergie que la désorption des produits non prétraités. La DII aurait effectivement effet réducteur d'énergie sur le séchage des produits.

Pour ce qui est de l'allure des courbes, celle de la carotte non prétraitée est similaire à celle de la betterave non prétraitée. Par contre, l'enthalpie isostérique de désorption de la carotte prétraitée croît légèrement avec la teneur en eau et atteint son maximum pour une teneur en eau d'environ 0,055, puis décroît graduellement avec l'augmentation de la teneur en eau et afin s'annule en L_v (chaleur latente de vaporisation de l'eau pure). Ce maximum indiquerait la situation de la monocouche. Benado et Rizvi (1985) ont attribué ce phénomène à l'influence d'un changement de volume et du recouvrement de la monocouche sur le comportement thermodynamique du matériau. A de faibles teneurs en eau, l'eau est absorbée aux endroits les plus accessibles sur la surface extérieure du solide ; au fur et à mesure que l'humidité augmente, le matériau gonfle et par conséquent, de nouveaux sites à haute énergie s'ouvrent pour que l'eau se lie. Cela fait augmenter l'enthalpie isostérique avec la teneur en eau à de faibles valeurs de teneur en eau. L'augmentation de l'enthalpie isostérique se poursuit jusqu'à ce que les sites de liaison les plus forts soient couverts. Une baisse de l'enthalpie isostérique se produit lorsque des emplacements moins favorables sont couverts et que des couches multiples d'eau sorbée se forment (Pérez-Alonso, 2006). Ce résultat est en accord avec les travaux de Fasina (2005) McMinn et al., (2003) ;

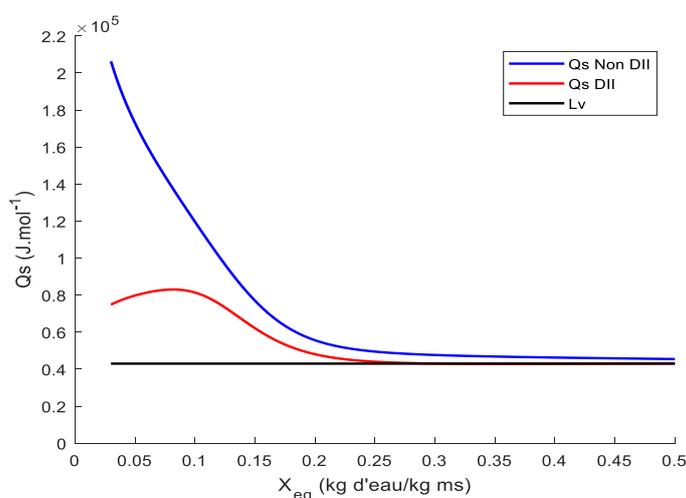


Figure 12 : Enthalpies isostériques de la désorption d'eau de carotte prétraitée par DII ou non, en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

Les fonctions représentant les enthalpies isostériques de désorption de la carotte non prétraitée et prétraitée sont respectivement données par les équations 25 et 26 :

$$Q_s = 311340. \exp^{-14,95.X_{eq}} + 44245 \quad (r = 0,991; r^2 = 0,991) \quad (25)$$

$$Q_s = 104920. \exp^{-11,09.X_{eq}} + 40552 \quad (r = 0,942; r^2 = 0,942) \quad (26)$$

Q_s Exprimé en $J.mol^{-1}$.

La Figure 13 présente l'évolution de l'enthalpie isostérique d'adsorption de la betterave prétraitée et non prétraitée par DII en fonction de la teneur en eau. Ici, l'enthalpie isostérique représente l'énergie nécessaire pour retirer du légume l'eau qu'il a reçue par adsorption. Tout comme dans le cas de la désorption, l'on observe que les enthalpies isostériques des deux produits décroissent exponentiellement avec l'augmentation de la teneur en eau puis temps asymptotiquement s'annule en L_v (chaleur latente de vaporisation de l'eau pure). Cependant, nous notons que la courbe de l'enthalpie isostérique d'adsorption de la betterave prétraitée par DII est au-dessus de celle de la betterave non prétraitée, indiquant ainsi que l'adsorption à une même teneur en eau des produits prétraités requiert plus d'énergie que l'adsorption des produits non prétraités. La DII augmenterait donc l'énergie nécessaire pour le retrait d'une eau reçue par adsorption par les légumes. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'en effet les produits séchés prétraités par DII seraient plus avides d'eau que les produits séchés non prétraités car le gain en soluté (pendant la DII) augmente les sites de fixation de l'eau ; d'où l'importance capitale d'assurer l'étanchéité à l'humidité des emballages des produits séchés à conserver.

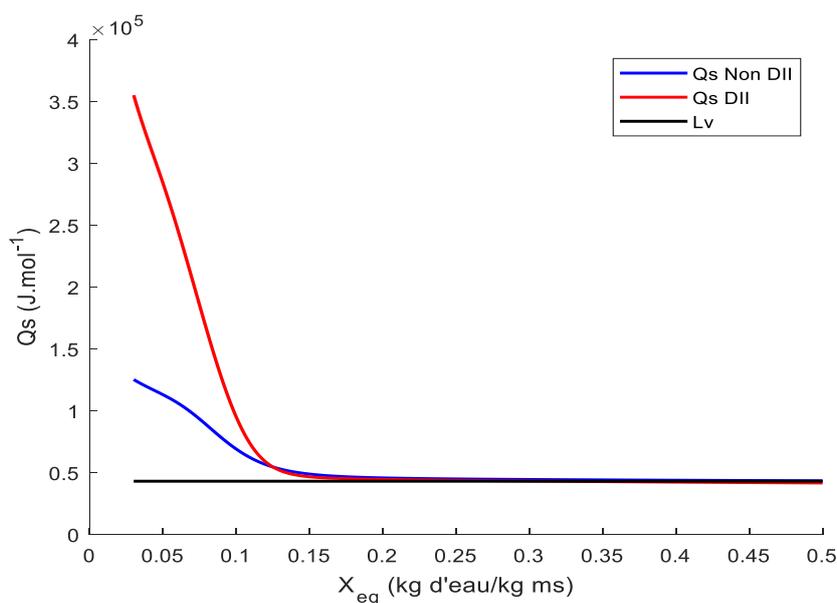


Figure 13 : Enthalpies isostériques d'adsorption d'eau de la betterave prétraitée par DII ou non, en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

Les fonctions représentant les enthalpies isostériques d'adsorption de la betterave non prétraitée et prétraitée sont respectivement données par les équations 27 et 28 :

$$Q_s = 166820. \exp^{-18,33.X_{eq}} + 42827 \quad (r = 0,976; r^2 = 0,976) \quad (27)$$

$$Q_s = 742740. \exp^{-2384.X_{eq}} + 39376 \quad (r = 0,977; r^2 = 0,977) \quad (28)$$

Q_s Exprimé en $J.mol^{-1}$.

La Figure 14 présente l'évolution de l'enthalpie isostérique d'adsorption de la carotte prétraitée et non prétraitée par DII en fonction de la teneur en eau.

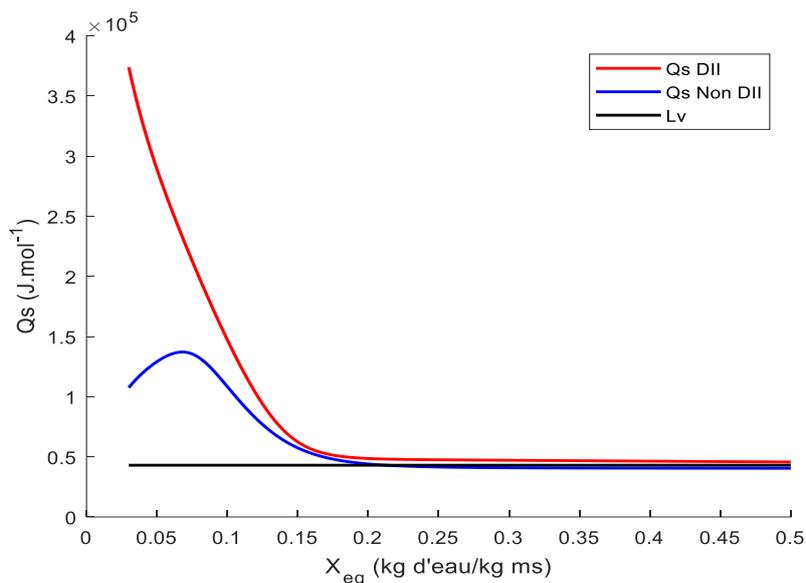


Figure 14 : Enthalpies isostériques de l'adsorption d'eau de la carotte prétraitée par DII ou non, en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

Tout comme dans le cas de l'adsorption de la betterave, l'on observe que les enthalpies isostériques des deux produits décroissent exponentiellement avec l'augmentation de la teneur en eau puis tend asymptotiquement vers Lv (chaleur latente de vaporisation de l'eau pure). Nous notons aussi que la courbe de l'enthalpie isostérique d'adsorption de la carotte prétraitée par DII est au-dessus de celle de la carotte non prétraitée, indiquant ainsi que l'adsorption à une même teneur en eau des produits prétraités requiert plus d'énergie que la désorption des produits non prétraités. La DII augmenterait donc effectivement l'énergie nécessaire pour le retrait d'une eau reçue par adsorption par les légumes.

Les fonctions représentant les enthalpies isostériques d'adsorption de la carotte non prétraitée et prétraitée sont respectivement données par les équations 29 et 30 :

$$Q_s = 970410. \exp^{-23,65.X_{eq}} + 44571 \quad (r = 0,988; r^2 = 0,988) \quad (29)$$

$$Q_s = 364060. \exp^{-18,16.X_{eq}} + 38831 \quad (r = 0,972; r^2 = 0,972) \quad (30)$$

Q_s Exprimé en J.mol⁻¹.

3.3.2. Entropie différentielle

Les figures 15 et 16 puis 17 et 18 présentent l'évolution des entropies différentielles de désorption et d'adsorption de la betterave prétraitée et non prétraitée, et de la carotte prétraitée et non prétraitée, respectivement en fonction de la teneur en eau. Nous observons pour les huit produits que les courbes d'entropie différentielle ont la même allure que celles des courbes d'enthalpie isostérique respectives. En effet l'entropie de sorption est proportionnelle au nombre de sites de sorption à un niveau d'énergie spécifique (Valeria et al., 2011).

Selon Wark (1971), en se basant sur le deuxième principe de la thermodynamique, un processus est réversible lorsque la somme de tous les changements d'entropie pour tous les sous-systèmes d'un processus est constante. L'observation des courbes de figures suscitées permet ainsi de conclure que le processus de sorption d'eau dans

les huit produits étudiés est irréversible car l'entropie n'est constante dans aucun des cas, il y a en effet variation de celle-ci et donc production. Cependant l'on observe aussi une entropie presque constante pour des teneurs en eau plus élevées ; Madamba et al., (1996) a conclu que cela suggère que la sorption d'eau est réversible jusqu'à ce qu'une teneur en eau critique soit atteinte.

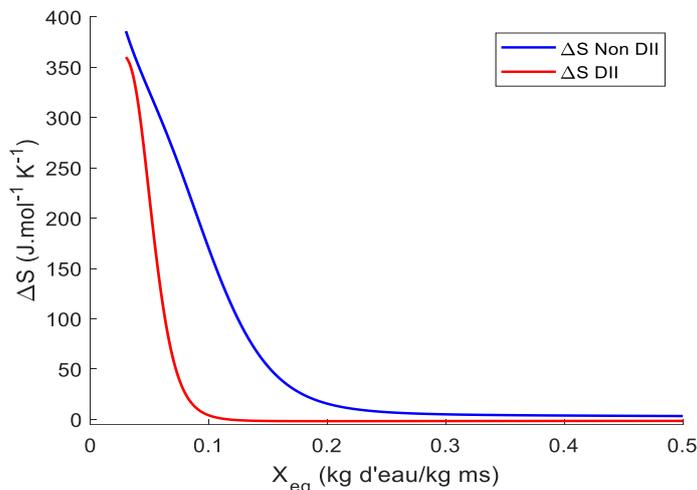


Figure 15 : Entropies différentielles de désorption d'eau de la betterave prétraitée par DII ou non, en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

Les fonctions représentant les entropies différentielles de désorption de la betterave non prétraitée et prétraitée sont respectivement données par les équations 31 et 32 :

$$\Delta S = 685,41 \cdot \exp^{-14,83 \cdot X_{eq}} - 3,81 \quad (r = 0,983; r^2 = 0,983) \quad (31)$$

$$\Delta S = 1586,8 \cdot \exp^{-42,56 \cdot X_{eq}} - 3,53 \quad (r = 0,977; r^2 = 0,977) \quad (32)$$

ΔS Exprimé en $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$.

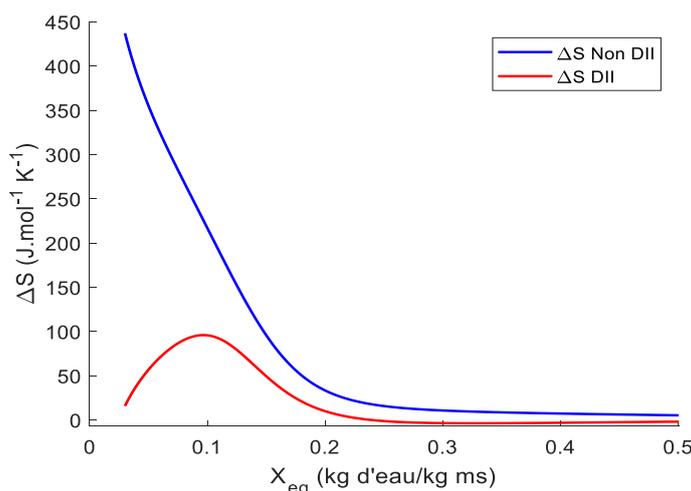


Figure 16 : Entropies différentielles de désorption d'eau de la carotte prétraitée par DII ou non, en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

Les fonctions représentant les entropies différentielles de désorption de la carotte non prétraitée et prétraitée sont respectivement données par les équations 33 et 34 :

$$\Delta S = 861,61. \exp^{-14,7.X_{eq}} + 0,98 \quad (r = 0,989; r^2 = 0,989) \quad (33)$$

$$\Delta S = 230,07. \exp^{-9,81.X_{eq}} - 10,74 \quad (r = 0,9; r^2 = 0,9) \quad (34)$$

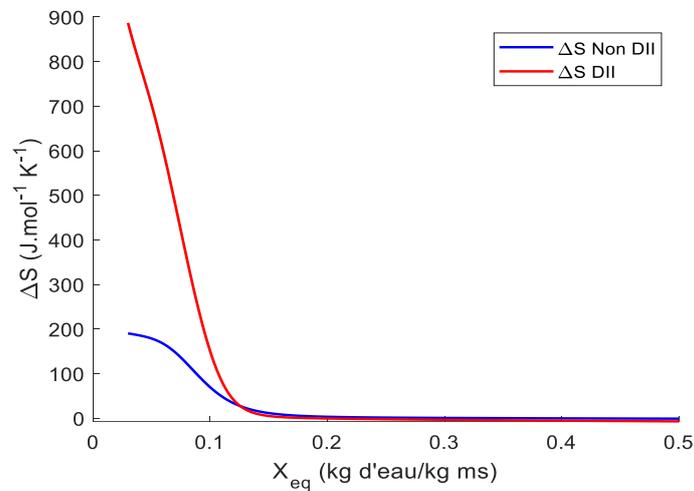


Figure 17 : Entropies différentielles d’adsorption d’eau de la betterave prétraitée par DII ou non, en fonction de la teneur en eau d’équilibre.

Les fonctions représentant les entropies différentielles d’adsorption de la betterave non prétraitée et prétraitée sont respectivement données par les équations 35 et 36 :

$$\Delta S = 407,15. \exp^{-17,19.X_{eq}} - 3,82 \quad (r = 0,96; r^2 = 0,96) \quad (35)$$

$$\Delta S = 2127,7. \exp^{-23,41.X_{eq}} - 14,96 \quad (r = 0,973; r^2 = 0,973) \quad (36)$$

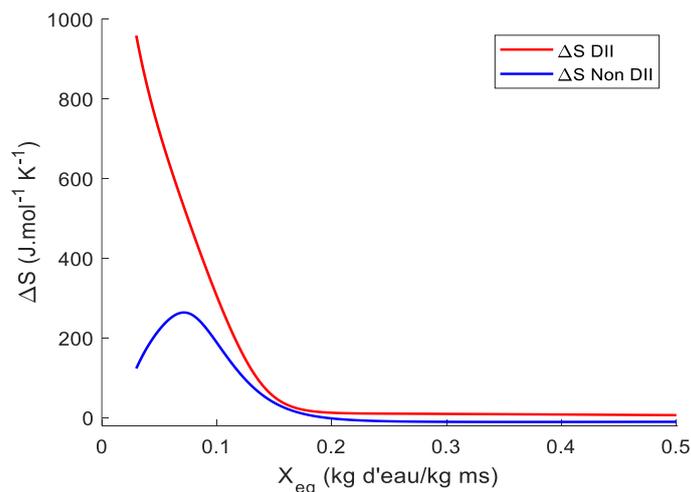


Figure 18 : Entropies différentielles d’adsorption d’eau de la carotte prétraitée par DII ou non, en fonction de la teneur en eau d’équilibre.

Les fonctions représentant les entropies différentielles d’adsorption de la carotte non prétraitée et prétraitée sont respectivement données par les équations 37 et 38 :

$$\Delta S = 2894,6 \cdot \exp^{-23,78 \cdot X_{eq}} + 1,99 \quad (r = 0,987; r^2 = 0,986) \quad (37)$$

$$\Delta S = 1023,7 \cdot \exp^{-17,86 \cdot X_{eq}} - 16,32 \quad (r = 0,965; r^2 = 0,965) \quad (38)$$

3.4. Théorie de la compensation

Le Tableau 13 présente les températures isocinétiques (T_β) et les énergies libres à ces températures (ΔG_β) pour les huit produits testés. La valeur calculée de la température harmonique de cette étude est : **Thm= 317,756 K**. Ce Tableau indique qu’aucune température isocinétique n’est égale à la température harmonique. Par conséquent, la théorie de la compensation est applicable aux processus de sorption d’eau de tous les huit produits étudiés. Il ressort en outre que toutes les températures isocinétiques (T_β) sont supérieures à la température harmonique (**Thm**), ce qui nous permet de conclure que les processus de sorption d’eau de la betterave et de la carotte sont tous entraînés par l’enthalpie. Les valeurs positives de l’énergie libre de Gibbs obtenues pour tous les huit produits, indiquent que les processus de sorption d’eau dans ces deux légumes sont non-spontanés. Dans la bibliographie, des travaux effectués sur d’autres légumes, ont eu la même conclusion ; c’est le cas de Cervenka et al., (2015), Dalgıç et al., (2012), Hatibaruah et al., (2011) respectivement sur le yerba mate, la menthe et le thé.

Tableau 6 : Températures isocinétiques et énergies libres.

		Isotherme	T_β (K)	ΔG_β (kJ/mol)
DESORPTION	Betterave	Non DII	356,513	905,116
		DII	345,373	1152,2
	Carotte	Non DII	356,513	905,116
		DII	345,373	1152,2.
ADSORPTION	Betterave	Non DII	383,668	933,33
		DII	341,518	1192,4
	Carotte	Non DII	383,668	933,33
		DII	341,518	1192,4

3.5. Propriétés de l’eau liée

Les tableaux 14 et 15 présentent les propriétés de l’eau liée des légumes étudiés en désorption et en adsorption respectivement. Il en ressort que la surface du sorbant (A) et le nombre de monocouches sorbées augmentent avec l’augmentation de la température de sorption pendant que, le pourcentage et la densité d’eau liée diminuent avec l’augmentation de la température de sorption aussi bien en désorption qu’en adsorption.

Tableau 7 : Propriétés de l'eau liée en désorption de la betterave et de la carotte.

DESORPTION BETTERAVE								
Non DII					DII			
	A	N	B _w	C ^{1/n}	A	n	B _w	C ^{1/n}
	m ² /g				(g/mL)			
30 °C	66,569	2,4451	2,2005	0,3681	69,746	2,5618	1,7695	0,2696
40 °C	66,766	2,4523	2,0899	0,3475	70,323	2,5829	1,7153	0,2571
50 °C	67,036	2,4622	1,9998	0,3299	70,365	2,5845	1,6352	0,2448
60 °C	67,409	2,4759	1,8490	0,3016	71,027	2,6088	1,5447	0,2270

DESORPTION CAROTTE								
Non DII					DII			
	A	N	B _w	C ^{1/n}	A	n	B _w	C ^{1/n}
	m ² /g				(g/mL)			
30 °C	66,974	2,460	2,275	0,376	68,565	2,519	2,191	0,345
40 °C	67,473	2,478	2,200	0,358	68,569	2,522	2,182	0,343
50 °C	68,488	2,516	2,114	0,334	68,661	2,518	2,169	0,342
60 °C	68,993	2,534	2,002	0,312	69,325	2,546	2,097	0,324

Tableau 8 : Propriétés de l'eau liée en adsorption de la betterave et de la carotte.

ADSORPTION BETTERAVE								
Non DII					DII			
	A	N	B _w	C ^{1/n}	A	n	B _w	C ^{1/n}
	m ² /g				(g/mL)			
30 °C	68,901	2,531	2,013	0,314	68,144	2,530	2,046	0,319
40 °C	69,084	2,537	1,961	0,305	68,702	2,526	1,993	0,312
50 °C	69,374	2,548	1,929	0,297	68,781	2,523	1,872	0,294
60 °C	69,687	2,560	1,861	0,284	68,895	2,503	1,757	0,280

ADSORPTION CAROTTE								
Non DII					DII			
	A	N	B _w	C ^{1/n}	A	n	B _w	C ^{1/n}
	m ² /g				(g/mL)			
30 °C	68,180	2,504	2,193	0,350	68,956	2,533	2,136	0,333
40 °C	68,761	2,526	2,126	0,333	68,866	2,529	2,102	0,329
50 °C	68,679	2,523	2,037	0,320	68,384	2,512	1,991	0,316
60 °C	70,305	2,582	1,862	0,279	67,496	2,479	1,908	0,310

3.6. Rayons des pores

Les figures 25 et 26 puis 27 et 28 présentent l'évolution de la taille des pores respectivement de la betterave et de la carotte, en fonction de la teneur en eau. De l'observation de ces courbes il ressort que le rayon des pores des produits augmente avec l'augmentation de la teneur en eau, autrement dit plus les produits sèchent, plus leurs rayons sont petits. L'on note que dans les zones de l'eau libre et l'eau faiblement liée, à une même teneur en eau, les rayons des pores sont plus grands à faible température ; contrairement à la zone d'eau fortement liée où cette tendance est inversée. Ceci pourrait s'expliquer par une modification de la nature des liaisons intermoléculaires au niveau de la monocouche. L'on note aussi que la vitesse de chute des rayons des pores est plus grande à hautes température comparativement aux faibles températures.

Par ailleurs, on remarque que dans les cas de produits prétraités par DII (figures 21b, 22b, 23b et 24b), les courbes à différentes températures sont plus distinctes les unes des autres, indiquant ainsi que les pores des produits prétraités par DII sont plus visibles en résultat de la réduction du phénomène de leur rétrécissement suite à la DII. En effet l'apport de soluté pendant la DII réduit les phénomènes de rétrécissement quel que soit le matériau traité.

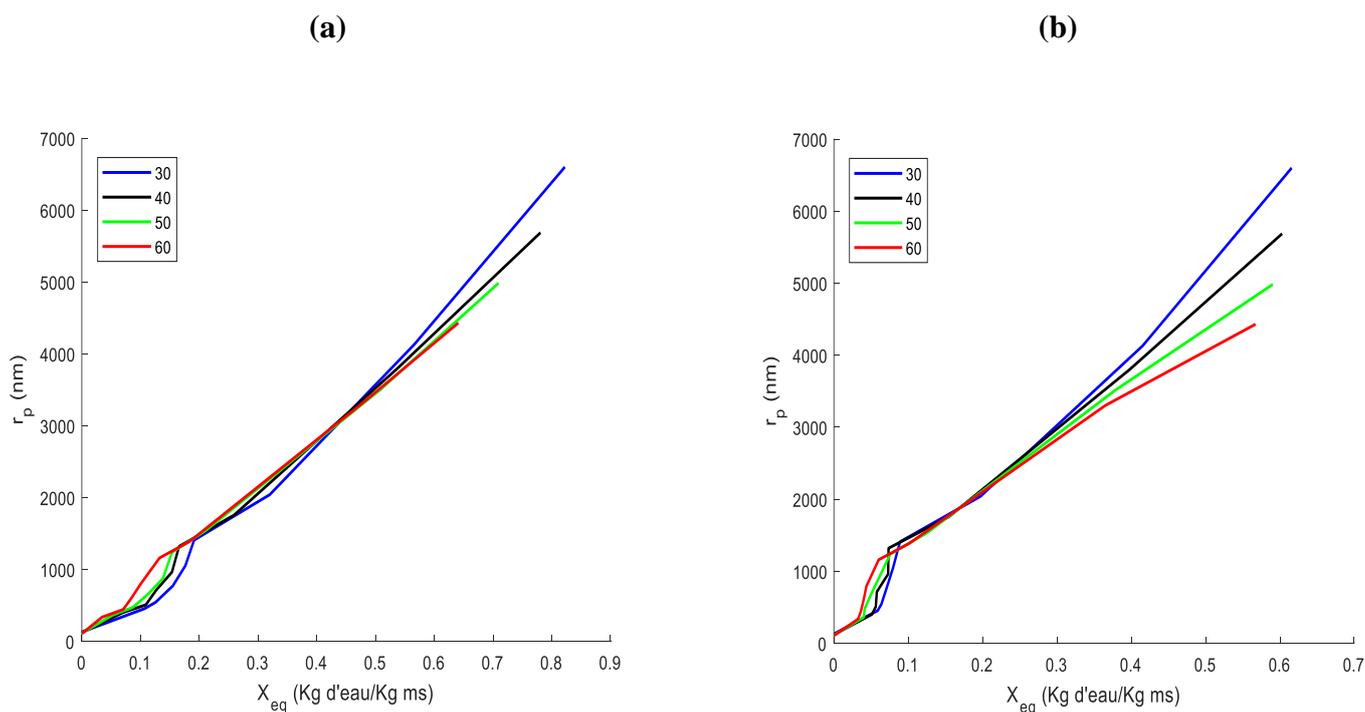


Figure 19 : Rayons des pores en désorption d'eau de la betterave non prétraitée (a) et prétraitée par DII (b) en fonction de la teneur en eau d'équilibre.

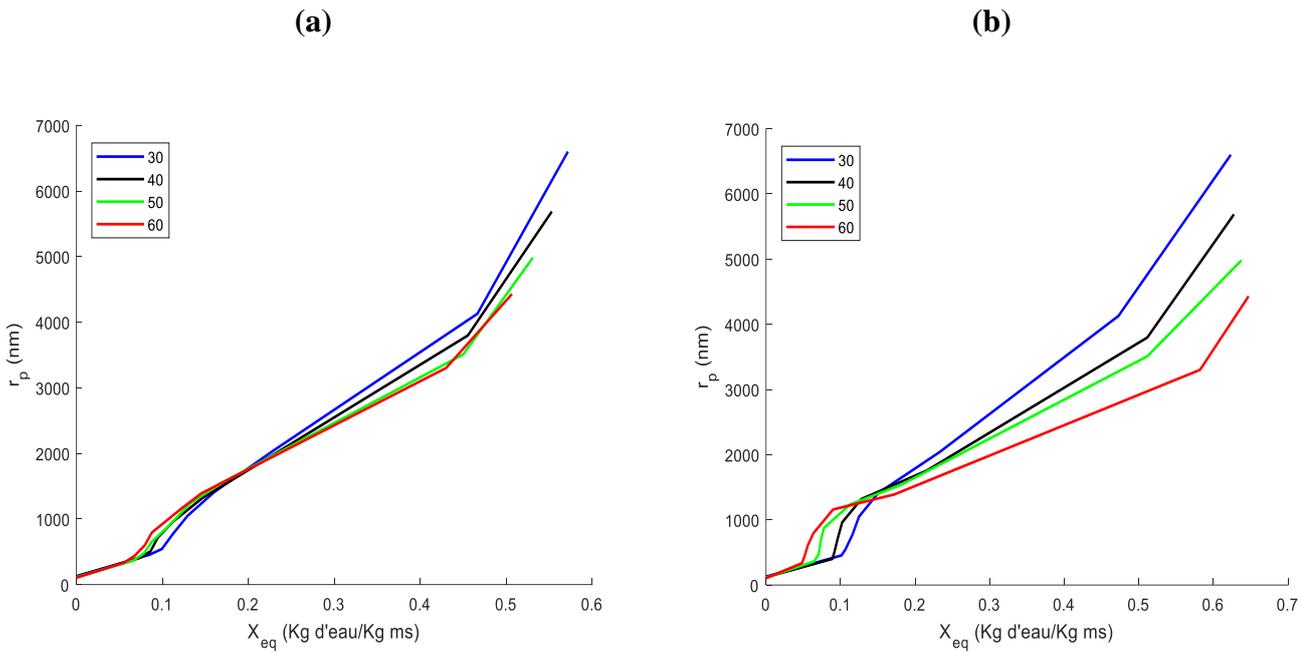


Figure 20 : Rayons des pores en adsorption d’eau de la betterave prétraitée (b) par DII et non (a) en fonction de la teneur en eau d’équilibre.

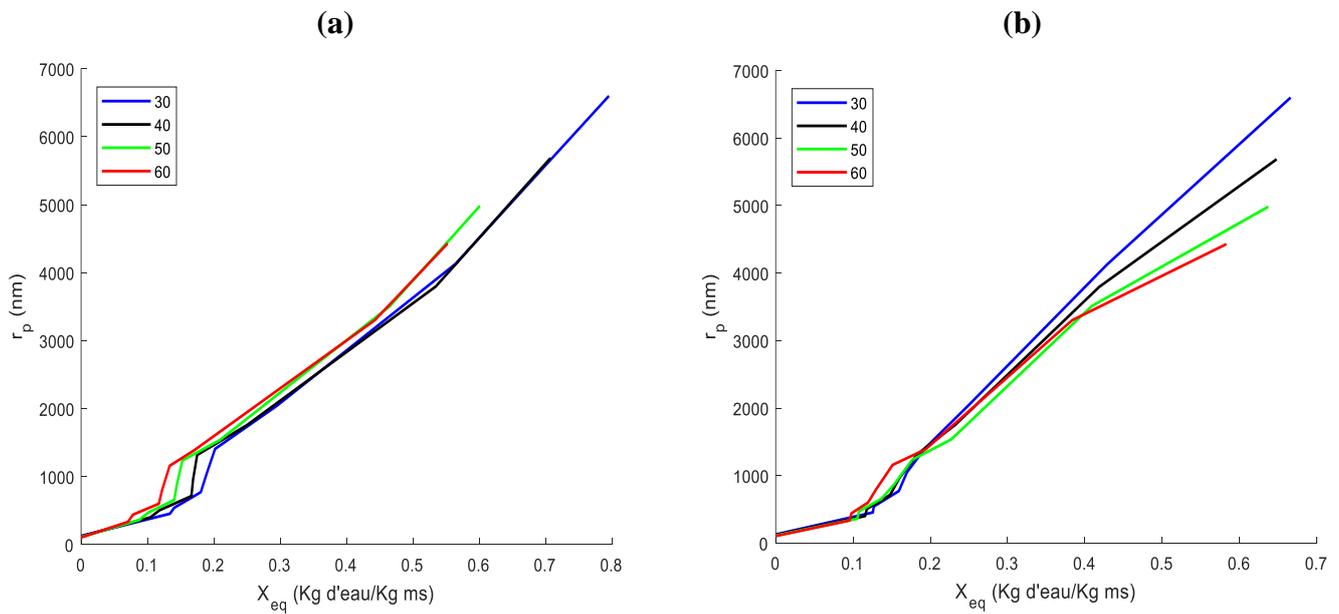


Figure 21 : Rayons des pores en désorption d’eau de la carotte prétraitée par DII (a) et non (b) en fonction de la teneur en eau d’équilibre.

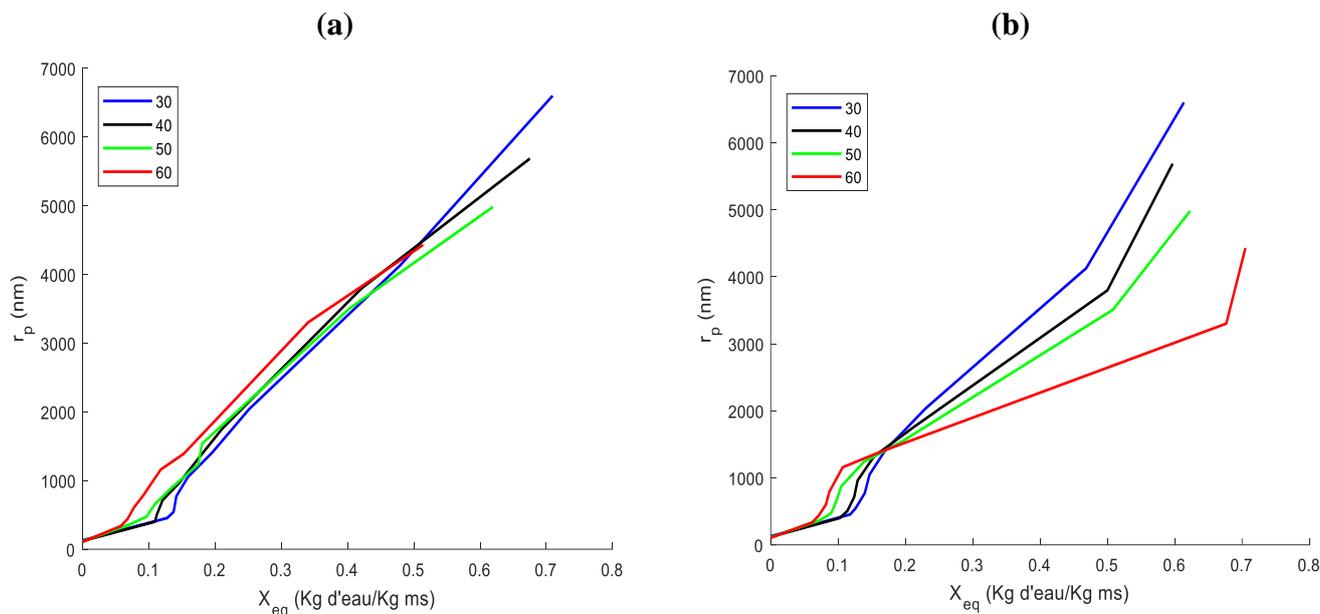


Figure 22 : Rayons des pores en adsorption d’eau de la carotte prétraitée par DII (a) et non (b) en fonction de la teneur en eau d’équilibre.

4. CONCLUSION

Au terme de ce travail dont l’objectif général était de déterminer les propriétés thermodynamiques et les propriétés de l’eau liée de la betterave et de la carotte prétraitées et non prétraitées par DII, les isothermes de désorption et d’adsorption à quatre températures (30 °C, 40 °C, 50 °C et 60 °C) de la betterave et de la carotte prétraitées et non prétraitées par DII ont été déterminées, modélisées et ajustées par les modèles de Peleg et de GAB ; puis l’enthalpie isostérique et l’entropie différentielle de ces légumes ont été modélisées en vue de prédire la demande énergétique du séchage des légumes prétraités et non prétraités en fonction de leur teneur en eau d’équilibre. Par ailleurs, le rayon des pores et les propriétés de l’eau liée dont la teneur en eau de la monocouche, la surface sorbante, le nombre de monocouches sorbées, le pourcentage et la densité d’eau liée des légumes ont été déterminés pour les quatre températures. Il ressort de ce travail que la DII influence la demande énergétique de sorption d’eau des betteraves et des carottes. En désorption, un prétraitement par DII des légumes diminue la demande énergétique nécessaire pour leur séchage ; en adsorption, ce prétraitement augmente la demande énergétique nécessaire au retrait d’eau reçue par adsorption par les produits séchés. Par ailleurs, la DII permet de mieux conserver la structure des produits en réduisant les phénomènes de rétrécissement.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère de l’Enseignement Supérieur de la République du Cameroun pour son soutien financier à travers le Compte du Fonds Spécial pour la modernisation de la recherche dans les Universités d’Etat (Décret Présidentiel N_2009/121 du 8 avril 2009).

6. CONFLITS D’INTÉRÊT

Les auteurs déclarent n’avoir aucun conflit d’intérêt.

7. RÉFÉRENCES

- Ade O.B., Rastogi N., Angersbach, A. and Knorr D., 2003. Combined effects of pulsed electric field pre-treatment and partial osmotic dehydration on air drying behavior of red bell pepper. *Journal of Food Engineering*, **60**, 89–98.
- Ajibola O.O., Aviara N.A. and Ajetumobi O.E., 2003. Sorption equilibrium and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Journal of Food Engineering*, **58**, 317–324.
- Albagnac G., Varoquaux P. and Montigaud J.C., 2002. Technologie de Transformation des Fruits, Tec&Doc Lavoisier, Paris, France, 209–234.
- Al-muhtaseb A.H., McMinn W.A.M. and Magee T.R.A., 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. *Institution of Chemical Engineers Trans IChemE.*, **80**(2), 118–128.
- Ayranci E. and Duman O., 2005. Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isolate at 10, 20 and 30 °C. *Journal of Food Engineering*, **70**, 83–91.
- Bchir B., Besbes S., Giet J.M., Attia H. and Blecker C., 2011. Synthèse des connaissances sur la déshydratation osmotique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, **15**(1), 129–142.
- Benado A.L. and Rizvi S.S.H., 1985. Thermodynamic properties of water on rice as calculated from reversible and irreversible isotherms. *Journal of Food Science*, **50**, 101–105.
- Bizot H., Riou N. et Multon J.L., 1998. Guide pratique pour la détermination des isothermes de sorption et de l'activité de l'eau. *Sciences des Aliments*, numéro hors-série.
- Brunauer S., Deming L.S., Deming W.E. and Teller E., 1940. On a theory of the Van Der Waals adsorption of gases. *Journal of American Chemical Society*, **62**(7), 1723–1732.
- Brunauer S., Emmett P.H. and Teller E., 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, **60**, 309–319.
- Caurie M., 1981. Derivation of full range moisture sorption isotherms In: L. B. Rockland, & G. F. Stewert (Eds.), *Water Activity: Influences on Food Quality*. New York: Academic Press, 63–87,
- Caurie M., 2005. The unimolecular character of the classical Brunauer, Emmett and Teller adsorption equation and moisture adsorption. *International Journal of Food Science and Technology*, **40**, 283–293.
- Červenka L., 2008. Adsorption of moisture on dried juniper berries (*Juniperus communis* L.) at various temperatures and properties of sorbed water. *Journal of Food and Nutrition Research*, **47**(3), 131–138.
- Červenka L., Hloušková L. and Žabčíková S., 2015. Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of green and roasted Yerba mate (*Ilex paraguariensis*). *Food Bioscience*, **12**, 122–127.
- Dalgiç A.C., Pekmez H. and Belibağlı K.B., 2012. Effect of drying methods on the moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of mint leaves. *Journal of Food Science and Technology*, **49**(4), 439–449.
- Delgado A.E. and Sun D.W., 2002. Desorption isotherms and glass transition temperature for chicken meat. *Journal of Food Engineering*, **55**, 1–8.
- Edoun M., Kuitche A. and Kapseu C. 2010. Determination of the *Gnetum africanum* water sorption isotherms for use in the design of an adapted dryer. *International Journal of Food Science & Technolog*, **45**(1), 105–112.
- FAO-BAD CMR, 2010.
- Giovanelli G., Zanouni B., Lavelli V. and Nani R., 2002. Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products. *Journal of Food Engineering*, **52**, 135–141.
- Hatibaruah D., Baruah D.C. and Sanyal S., 2011. Modeling desorption isotherms and thermodynamic properties of Assam CTC manufactured from tea cultivar T3E3. *Journal of Food Processing and Preservation*, **35**, 729–738.
- Holland B., Unwin J.D. and Buss D. H., 1991. Vegetables, herbs and spices: Fifth supplement to McCance and Widdowson's, London.
- Hossain S.A., Pal P.K., Sarkar P.K. and Patil G.R., 2002. Moisture sorption characteristics of dudh churpi, a traditional milk product in India. *Nahrung/Food*, **46**, 136–140.
- Iglesias H.A. and Chirife, J., 1982. Handbook of food isotherms water sorption. Parameters for food and food components. Academic Press, New-York.
- Iglesias, H. A., Chirife, J. et Viollaz, P., 1976. Thermodynamic of water vapor sorption by sugar beet root. *Journal of Food Technology*, **11**, 91–101.
- Jannot Y., 2003. Isothermes de sorption : Modèles et détermination, LEPT-ENSAM, (1-5).

- Kaymak E.F. and Gedik A., 2004. Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. *LWT-Food Science and Technology*, **37**, 429–438.
- Kemmene Dapabko S., Jiokap N.Y. Arebga W.A., Kapseu C. and Puiggali J.R., 2021. Determination and modeling isotherms of okra (*Abelmoschus esculentus L. Moench*) and swee Green Pepper (*Capsicum annum L. Moench*). *Journal of Biosystems Engineering*, **46**, 60–80.
- Lewicki P.P., 2004. Water as the determinant of food engineering properties : A review. *Journal of Food Engineering*, **61**(4), 483–495.
- Mbwalal K., 2014. Université de KINSHASA - Ingenieur Agronome Détermination des isothermes de sorption (adsorption-désorption) [Cas de l'aubergine (*Solanum melongena L.*)].
- McMinn W.A.M. and Magee T.R.A., 2003. Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. *Journal of Food Engineering*, **60**, 157–165.
- Mujumbar A.S., Cao H., Zhang M., Du W.H. and Sun J.C., 2006. Optimization of osmotic dehydration of kiwifruit. *Drying Technology, Taylor & Francis*, **24**, 89–94.
- Oladiran F., Shahab S. and Tyler R., 1997. Thermodynamics of moisture sorption in alfalfa pellets. *Drying Technology, An International Journal*, **15**(5), 1553–1570.
- Pennington J.A.T. and Fisher R.A., 2009. Classification of fruits and vegetables. *Journal of Food Composition and Analysis*, **22S**, S23–S31.
- Pérez A.C., Beristain C.I., Lobato C.C., Rodriguez H.M.E. and Vernon C.E.J., 2006. Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. *Journal of Food Engineering*, **77**, 753–760.
- Rao K.J., Dhas P.H.A., Emerald F.M.E., Ghosh B.C., Balasubramanyam B.V. and Kulkarni S., 2006. Moisture sorption characteristics of chhanapoda at 5°C and 35°C. *Journal of Food Engineering*, **76**, 453–459.
- Sahu J. K. and Das H., 2010. Moisture sorption isotherm, properties of sorbed water and heat of sorption of sandesh – an Indian milk product. *Journal of Food Process Preservation*, **34**, 152–166.
- Simal S., Femenia A., Castell P.A. and Rosselló C., 2007. Water desorption thermodynamic properties of pineapple. *Journal of Food Engineering*, **80**, 1293–1301
- Singh R.R.B., Rao K.H., Anjaneyulu A.S.R. and Patil G.R., 2001. Moisture sorption properties of smoked chicken sausages from spent hen meat. *Food Research International*, **34**, 143–148.
- Singh R.R.B., Rao K.H., Anjaneyulu A.S.R. and Patil G.R., 2006. Water desorption characteristics of raw goat meat: Effect of temperature. *Journal of Food Engineering*, **75**, 228–236.
- Talla A., Jannot Y., Elambo N.G. J. and Puiggali J.R., 2005. Experimental Determination and Modeling of Sorption Isotherms of Tropical Fruits: Banana, Mango, and Pineapple. *Drying Technology, An International Journal*, **23**(7), 1477–1498.
- Teles M., Fernandes F., Rodrigues S., Lima A., Maia G. and Figueiredo R., 2006. Optimization of osmotic dehydration of melons followed by air-drying. *International Journal of Food Science and Technology*, **41**, 674–680.
- Timouni S., Mihoubi D., Zagrouba F. and Ben-Amor M., 2003. Experimental study and modelling of adsorption/desorption isotherms of two agricultural products: apple and carrot. *4th European Congress of chemical engineering*, Espagne.
- Timouni S., Zagrouba F., Mihoubi D. and Tlili M.M., 2004. Experimental study and modelling of water sorption/desorption isotherms on two agricultural products: Apple and carrot. *Journal of Physics, IV France*, **122**, 235–240.
- Valeria S.E., Rossello C. and Antonio S.S., 2001. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of carrot. *International Journal of Food Engineering*, **7**, 3.
- Van-Den-Berg C., 1984. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption, McKenna B. M. (Ed.), *Engineering and Food*, **1**, 311–321.
- Vazquez G., Chenlo F. and Moreira R., 2003. Sorption isotherms of lupine at different temperatures. *Journal of Food Engineering*, **60**, 449–452.
- Wang W.C. and Sastry S., 2000. Effects of thermal and electrothermal pretreatments on hot air drying rate of vegetable tissue. *Journal of Food Process Engineering*, **23**(4), 299–319.
- Wark K., 1971. Thermodynamics, 2nd edn. McGraw-Hill, New York.
- Whitney E. and Rolfes S., 2011. Understanding nutrition, Wadsworth, Cengage Learning, 12e edition, 1007p.