

Détermination expérimentale et modélisation des isothermes d'adsorption d'eau des amandes d'*Irvingia gabonensis* de la région du Haut-Sassandra (Côte d'Ivoire)

Casimir Anauma Koko¹, Massé Diomande¹, Benjamin Kan Kouame¹,
Emmanuel Nogbou Assidjo²

¹(Département de Biochimie et Microbiologie / Université Jean Lorougnon GUEDE, Côte d'Ivoire)

²(Département de Génie Chimique et AgroAlimentaire / Institut National Polytechnique Felix HOUPHOUËT-BOIGNY, Côte d'Ivoire)

Corresponding Author: Casimir Anauma Koko

Résumé : La présente étude vise à déterminer expérimentalement les isothermes d'adsorption des amandes d'*Irvingia gabonensis* par la méthode gravimétrique statique à différentes températures (25 °C, 30 °C, 40 °C). Les amandes utilisées proviennent de trois marchés de la ville de Daloa (Région du Haut-Sassandra). Sur ces amandes, des paramètres physicochimiques ont été déterminés selon des méthodes conventionnelles. Les données collectées ont été soumises à des traitements statistiques qui incluent des analyses de régression non linéaire. Pour la modélisation des isothermes, neuf modèles empiriques ont été utilisés. Les résultats ont révélé que les isothermes d'adsorption déterminées sont de type II caractérisées par une forme sigmoïdale. De plus, le modèle G.A.B (pour 25 et 30 °C) et le modèle Peleg (pour 40 °C) ont montré un bon accord avec les données expérimentales. Ainsi, ces modèles permettent de prédire le comportement hygroscopique du produit lors de la conservation à ces différentes températures. Les amandes d'*Irvingia gabonensis* ont présenté une surface spécifique comprise entre 18,28 et 50,28 m².g⁻¹. En outre, aux températures allant de 25 °C à 30 °C, la teneur en eau pouvant favoriser la conservation des amandes est comprise entre 0,0104 et 0,0143 g/g d'amandes, soit entre 1,04 et 1,43 %. Compte tenu du fait que, la teneur en eau des amandes vendues sur les marchés (3,7 - 13,01 %) est supérieure à celle de la monocouche, il serait souhaitable pour améliorer leur durée de conservation, de les sécher de sorte à atteindre cette valeur de la monocouche.

Mots clés: Côte d'Ivoire, *Irvingia gabonensis*, isotherme d'adsorption, modélisation, monocouche

Date of Submission: 11-02-2018

Date of acceptance: 05-03-2018

I. Introduction

Les plantes constituent un élément vital de la diversité biologique du monde et une ressource essentielle du bien être humain [1]. En Afrique, il existe environ 3000 espèces d'arbres fruitiers sauvages qui représentent une ressource naturelle immensément importante, en grande partie non exploitée [2]. Au nombre de ces espèces, figure *Irvingia gabonensis* appartenant à la famille des *Irvingiaceae*. C'est un grand arbre des forêts denses d'Afrique tropicale humide atteignant 35 à 40 mètres de hauteur dont les fruits produisent une amande comestible appréciée par certains peuples [2]. En Côte d'Ivoire, elle est connue sous le nom vernaculaire de *Kplé* en langue Wê, et de *Kaklou* chez les akans. Les fruits tombés sont ramassés, fendus suivi de l'extraction des amandes pendant la saison sèche entre décembre et mars. Ces amandes séchées et écrasées sont utilisées pour la préparation d'une sauce gluante et aromatique très consommée dans l'ouest et le sud-ouest du pays [3]. Elles constituent un important complément nutritionnel (vitamines, matières grasses, protéines, éléments minéraux). De plus, leur commercialisation procure des revenus aux populations rurales grâce à un important commerce informel social [4].

Malgré cette importance, les producteurs sont confrontés aux problèmes de pertes post-récolte liées à la teneur en eau du produit durant le stockage. Pour réduire les pertes, allonger la durabilité du produit et ajouter de la valeur au produit, le séchage classique est adopté [5]. C'est une opération largement utilisée tant dans l'industrie agroalimentaire, que de façon artisanale par les agriculteurs. Ce processus permet de stabiliser le produit par abaissement de l'activité d'eau [6]. Par ailleurs, pour optimiser les conditions de stockage d'un produit de manière à assurer sa stabilité physicochimique et microbiologique, la détermination des isothermes de sorption est une nécessité [7]. De plus, l'étude des isothermes de sorption est un moyen privilégié de connaissance de la répartition de l'intensité des liaisons de l'eau, ainsi que de sa disponibilité fonctionnelle dans les produits agroalimentaires peu ou moyennement hydratés. Ces isothermes sont des courbes qui donnent des

informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique d'un produit du fait qu'elles permettent de connaître son domaine de stabilité après séchage par détermination de la teneur en eau finale [8].

Durant ces deux dernières décennies, un nombre important de travaux a porté sur l'étude des isothermes de sorption des produits alimentaires [9], l'influence de la température sur les isothermes [6, 10] et l'étude des modèles mathématiques décrivant les isothermes de sorption [11, 12]. Par ailleurs, l'amande d'*Irvingia gabonensis* est un produit alimentaire très riche en éléments nutritifs et possédant de nombreuses vertus thérapeutiques [13]. De nombreux travaux à caractère ethnobotanique et nutritionnel soulignent l'importance de cette amande qui, à plus de 60 %, contient une graisse alimentaire qui pourrait avoir des utilisations industrielles [14, 15, 16, 17]. Cependant, très peu de travaux se sont consacrés à la détermination des isothermes de sorption de ces amandes. Et pourtant, c'est une étape indispensable pour optimiser les conditions de stockage et de séchage de ces produits alimentaires [8].

La présente étude permet de combler certaines lacunes et d'envisager des moyens de conservation de ces amandes. Elle a pour objectif la détermination expérimentale des isothermes d'adsorption d'eau des amandes d'*Irvingia gabonensis* à l'aide de la méthode gravimétrique statique à des températures de 25 °C, 30 °C et 40 °C. Il s'agira plus spécifiquement de :

- déterminer les isothermes d'adsorption d'eau des amandes ;
- caractériser les isothermes (type d'isotherme, teneur en eau de la couche monomoléculaire et surface spécifique) ;
- modéliser les isothermes d'adsorption obtenues.

II. Matériel Et Methodes

Matériel végétal

Des amandes d'*Irvingia gabonensis* ont été utilisées dans cette étude (Figure 1).



Fig. 1 : Amandes d'*Irvingia gabonensis*

Méthode d'échantillonnage

Trois échantillons d'amandes d'*Irvingia gabonensis*, provenant du marché de *Lobia*, du grand-marché et du marché de *Tazibouo* de la ville de Daloa (Région du Haut-Sassandra, Côte d'Ivoire) ont été achetés et utilisés. Ces amandes ont été séchées par les commerçantes et exposées sur les tables ou étalages pour la vente. Le choix de cette amande se justifie par son abondance sur le marché, par ses caractéristiques organoleptiques appréciées par certains peuples et par ses vertus thérapeutiques.

Détermination de la teneur en eau (base humide) des amandes d'*Irvingia gabonensis*

La teneur en eau est la quantité d'eau exprimée en pourcentage contenue dans un composé solide ou liquide. La méthode [18] a été utilisée dans cette détermination. La teneur en eau est déterminée en plaçant, dans une capsule préalablement séchée et de masse M connue, 5 g d'échantillon pesé à l'aide d'une balance de précision de marque Denver Instrument. La masse de la capsule contenant l'échantillon, M_1 , est notée. L'ensemble est séché à l'aide d'une étuve (Mettler, Allemagne) à une température de 105 °C pendant 24 h et la masse est notée (M_2). La teneur en eau (TE) est exprimée en pourcentage selon la formule (1) :

$$\% \text{ TE} = [(M_1 - M_2) \times 100] / (M_1 - M) \quad (1)$$

Détermination expérimentale des isothermes d'adsorption

La méthode gravimétrique statique été utilisée [19]. Dans six béchers préalablement tarés, une quantité de 6,0 g d'amandes broyées et séchées à l'étuve a été pesée. Les béchers sont introduits dans six (6) bocaux hermétiques contenant des solutions d'acide sulfurique (200 mL) à des concentrations croissantes (Tableau 1), tout en évitant le contact avec l'acide. Les échantillons sont stabilisés en température et en hygrométrie dans une étuve à 25, 30 et 40 °C et des pesées à intervalle régulier de 48 h sont effectuées jusqu'à ce que la masse ne varie plus. Ils sont alors supposés en équilibre avec l'air ambiant. On considère que l'équilibre est atteint lorsque la variation de masse entre deux mesures successives est inférieure ou égale à 0,001 g. Connaissant les masses humides, les masses sèches sont alors obtenues en plaçant les échantillons à l'étuve à une température de 105 °C pendant 24 heures. Ainsi, la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) est déduite à partir de la formule (2). Les couples (a_w , X_{eq}) fournissent les points de l'isotherme d'adsorption.

$$X_{eq} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \tag{2}$$

X_{eq} : Teneur en eau d'équilibre (g/g)

Ms : Masse sèche (g)

Mh : Masse humide (g)

Tableau 1: Valeurs de l'activité de l'eau a_w des solutions d'acide sulfurique en fonction de la concentration (% vol./vol.) et de la température

Concentration (% vol./vol.)	Température de la solution et de l'air (°C)		
	25	30	40
10	0,9429	0,9427	0,9562
25	0,8756	0,8736	0,8785
40	0,5683	0,5656	0,5748
55	0,2589	0,2605	0,2675
70	0,0434	0,0453	0,0497
85	0,0016	0,0018	0,0023

Modélisation des isothermes et critères statistiques de choix

Modélisation

Afin d'interpréter les courbes de sorption obtenues, neuf (9) modèles (Tableau 2) décrits dans la littérature ont été utilisés pour l'ajustement des isothermes d'adsorption des amandes d'*Irvingia gabonensis*. La modélisation des isothermes d'adsorption exige les méthodes statistiques d'analyse de régression et de corrélation.

Critères statistiques de choix du modèle adéquat

Le coefficient de corrélation (r) a été le premier critère de sélection de la meilleure équation pour décrire les courbes d'adsorption [20]. En plus de r , les calculs des valeurs d'Erreur Moyenne Relative (EMR), d'Erreur Standard de la teneur en eau (ESH) ont permis de justifier le choix du modèle [21].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N X_{eqi,pre} - \bar{X}_{eqi,exp}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{eqi,pre} - \bar{X}_{eqi,exp})^2}} \tag{3}$$

$$ESH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{eqi,exp} - X_{eqi,pre})^2}{df}} \tag{4}$$

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{eqi,exp} - X_{eqi,pre}}{X_{eqi,exp}} \right| \tag{5}$$

Avec

$X_{eqi,exp}$: i^{ème} teneur en eau expérimentale de d'équilibre (% MS) ;

$X_{eqi,pre}$: i^{ème} teneur en eau prédite d'équilibre (% MS) ;

N : Nombre de points expérimentaux ;

d_f : Degré de liberté de la régression du modèle ($d_f=N-n$) ;

n : Nombre de variables de chaque modèle

Tableau 2 : Modèles mathématiques utilisés

Modèles	Equations	Paramètres
G.A.B (Van der Berg and Bruin, 1981)	$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{((1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - k \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w))}$	X_m, K, C
B.E.T (Brunauer, Emmet et Teller, 1938)	$X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{((1 - a_w) \cdot (1 - a_w + C \cdot a_w))}$	X_m, C
Hasley (Hasley, 1948)	$X = \left(\frac{A}{\ln\left(\frac{1}{a_w}\right)} \right)^{1/B}$	A, B
Henderson (Henderson, 1952)	$X = \left(\frac{-\ln(1 - a_w)}{A} \right)^{\frac{1}{B}}$	A, B
Iglesias-Cherife (Iglesias et al., 1978)	$X = A + B \left(\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right)$	A, B
Oswin (Oswin, 1946)	$X = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^C$	A, C
Caurie (Caurie, 1970)	$X = \text{expo}(a+b \cdot a_w)$	a, b
Smith (Smith, 1946)	$X = C_1 - C_2 \cdot \ln(1 - a_w)$	C_1, C_2
Peleg (Peleg, 1993)	$X = K_1 \cdot a_w^{n_1} + K_2 \cdot a_w^{n_2}$	K_1, K_2, n_1, n_2

Caractérisation des isothermes d'adsorption des amandes

Détermination de la teneur en eau de la couche monomoléculaire (X_m)

Le paramètre X_m de l'équation de G.A.B a été déterminé par identification aux courbes expérimentales d'adsorption, en minimisant la somme des Ecarts Quadratiques Moyennes [22]. L'équation de G.A.B selon [23] est la suivante (6) :

$$X = \frac{X_m \times C \times K \times a_w}{(1 - K \times a_w) \times (1 - K \times a_w + C \times K \times a_w)} \quad (6)$$

X : Taux d'humidité du produit ;

X_m : Teneur en eau correspondant à l'occupation de tous les sites de sorption de la couche monomoléculaire d'eau dans le produit (exprimée en g/g de la matière sèche) ;

a_w : Activité de l'eau ;

C : Constante de G.A.B. ;

K : Facteur correctif aux propriétés de la multicouche.

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{eqi,exp} - X_{eqi,pre}}{X_{eqi,exp}} \right|^2 \quad (7)$$

Détermination du type d'isotherme

La valeur du paramètre C de l'équation de GAB permet de caractériser les isothermes de sorption. Lorsque $C \leq 10$, l'isotherme est de type III alors que pour $C \geq 10$, l'isotherme est de type II [24]. Ce paramètre a été déterminé par identification aux courbes expérimentales d'adsorption.

Détermination de la Surface spécifique (SS) de la couche monomoléculaire

La détermination de la teneur en eau de la couche monomoléculaire (X_m) permet de calculer la surface de la monocouche en supposant que celle-ci est recouverte de molécules d'eau alignées. On a considéré également que les molécules sont sphériques et empilées dans les couches suivantes de la manière la plus compacte possible, soit un empilement cubique à faces centrées. Elle est calculée à partir de la formule (8) [25]:

$$SS = 3516. X_m \quad (8)$$

Avec

SS : Surface spécifique ($m^2.g^{-1}$)

X_m : Teneur en eau de la couche monomoléculaire (g/g).

Analyses statistiques

L'analyse de la régression a été réalisée, sous SPSS 17.0 et Excel 2013. Cette régression non linéaire a été employée pour évaluer les paramètres des différents modèles avec les algorithmes de Levenberg-Marquardt et GRG du solveur. L'analyse de variance à un facteur a été effectuée pour la détermination de différence entre les teneurs en eau des amandes provenant de sites différents. Lorsque la différence est significative, un test post-hoc (TUKEY HSD) a été conduit pour séparer les échantillons à $p < 0,05$.

III. Résultats**Teneur en eau des amandes d'*Irvingia gabonensis***

Les teneurs en eau des amandes collectées au niveau des trois sites choisis (marché de *Lobia*, grand-marché et marché de *Tazibouo*) ont été déterminées. Les résultats sont consignés dans le tableau 3. A l'analyse, les teneurs en eau varient entre $3,70 \pm 0,07$ % (Grand-marché) et $13,01 \pm 4,33$ % (Marché de *Lobia*) en passant par $4,58 \pm 0,37$ % pour le marché de *Tazibouo*. Par ailleurs, l'analyse de variance a révélé qu'il existe une différence significative ($p < 0,05$) entre les valeurs de teneurs en eau des amandes d'*Irvingia gabonensis* des trois sites. En addition, le coefficient de variation calculé au niveau du site du marché de *Lobia* est supérieur à 15 %.

Isothermes d'adsorption des amandes d'*Irvingia gabonensis*

L'équilibre hygroscopique est atteint pour les amandes d'*Irvingia gabonensis* au bout de 16 jours à 25 °C, 12 jours à 30 °C et 8 jours à 40 °C. Les courbes de sorption expérimentalement obtenues à 25 °C, 30 °C et 40 °C sont présentées sur la figure 2. Elles présentent toutes des allures sigmoïdales.

Tableau 3: Teneurs en eau des amandes d'*Irvingia gabonensis* vendues sur les marchés la ville de Daloa

Paramètres	Marchés		
	<i>Lobia</i>	Grand-marché	<i>Tazibouo</i>
Teneur en eau des amandes (%)	$13,01 \pm 4,33^a$	$3,70 \pm 0,07^b$	$4,58 \pm 0,37^c$
Coefficient de variation (CV) (%)	33,27	1,89	8,07

Les teneurs avec les lettres alphabétiques différentes sur la même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$)

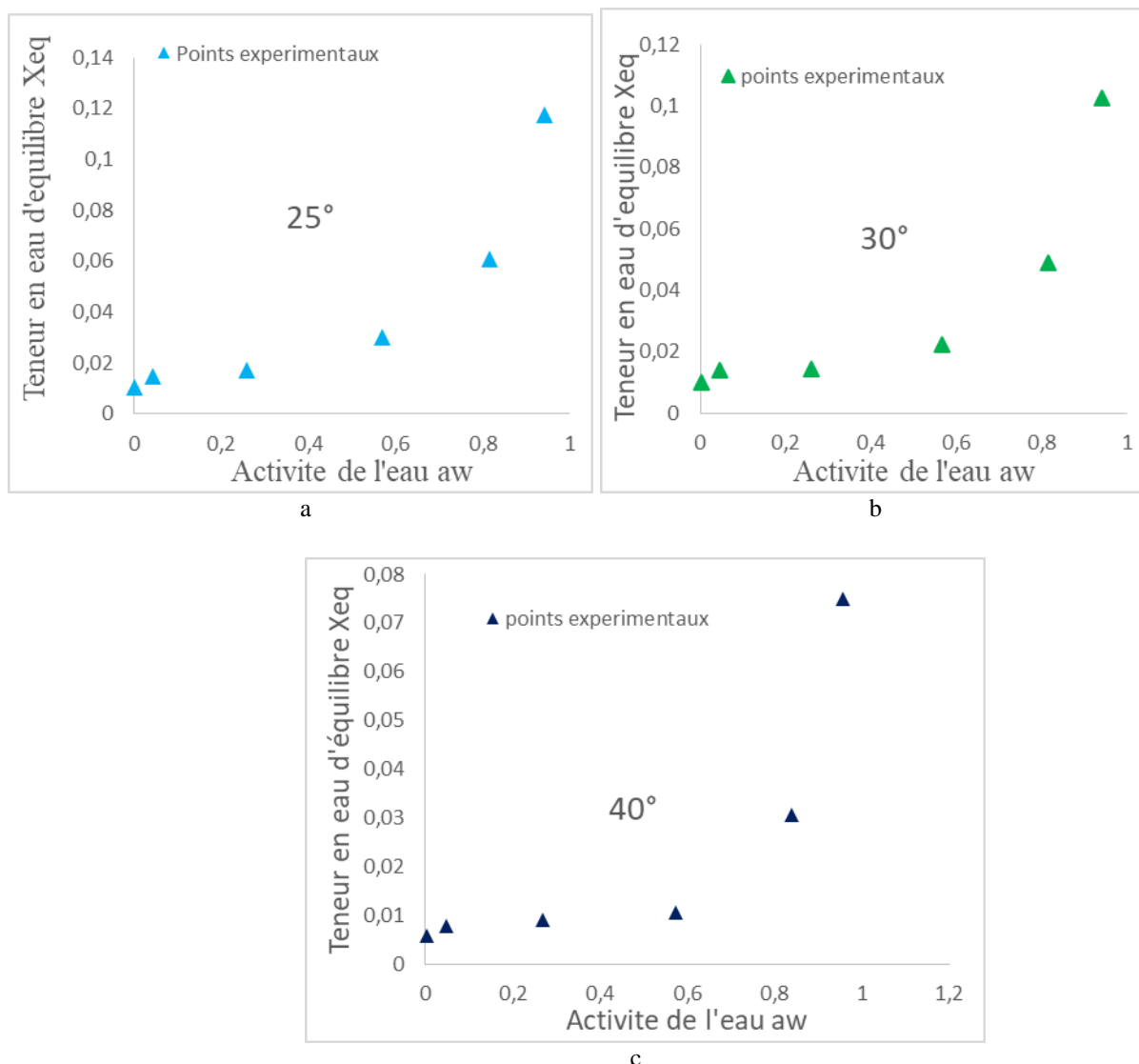


Fig. 2: Isothermes d'adsorption des amandes *d'Irvingia gabonensis* aux températures de 25 °C (a), 30 °C (b) et 40 °C (c)

Influence de la température sur les isothermes d'adsorption

La figure 3 présente dans un même repère, les isothermes d'adsorption des amandes *d'Irvingia gabonensis* déterminées à 20 °C, 30 °C et 40 °C. D'une manière générale, les isothermes obtenues à température élevée sont en dessous de celles obtenues à faible température. De plus, la teneur en eau d'équilibre du produit diminue avec l'augmentation de la température, à une même activité de l'eau.

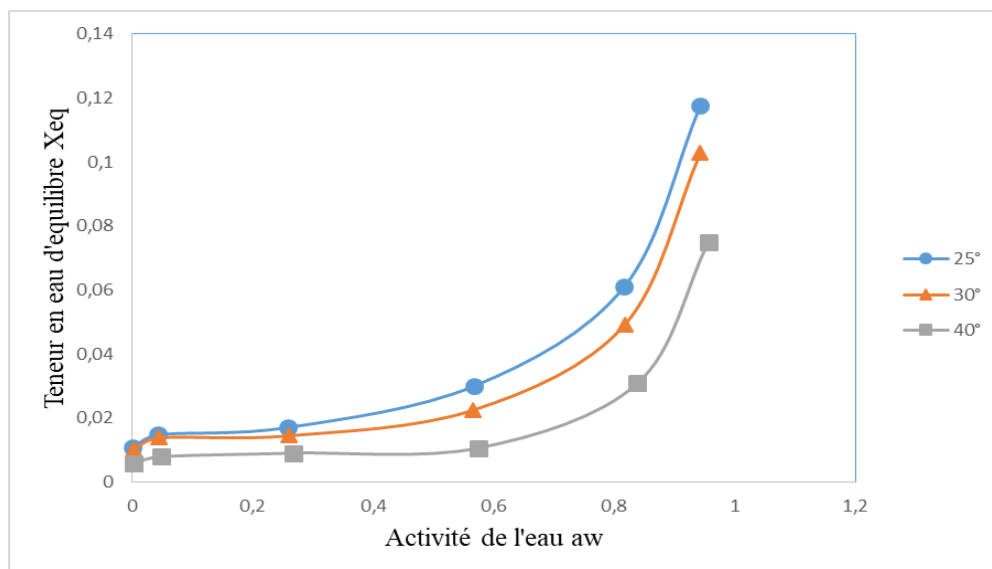


Fig. 3 : Influence de la température sur les isothermes d'adsorption des amandes d'*Irvingia gabonensis*

Modélisation des isothermes d'adsorption

Caractéristiques des isothermes

Les points expérimentaux de la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) des amandes d'*Irvingia gabonensis* pour trois températures (25 °C, 30 °C et 40 °C) ont été analysés par les modèles de G.A.B et B.E.T. Le tableau 4 présente quelques caractéristiques des isothermes d'adsorption des amandes d'*Irvingia gabonensis* (type d'isotherme, teneur en eau de la monocouche et surface spécifique). Les valeurs de X_m déterminées par l'équation de B.E.T sont relativement proches de celles déterminées par l'équation de G.A.B. Ces valeurs sont 0,0130 et 0,0143 g/g d'amandes à 20 °C, 0,0104 et 0,011 g/g d'amandes à 30 °C, 0,005 et 0,0053 g/g d'amandes à 40 °C pour les modèles de B.E.T et de G.A.B, respectivement. Il est à noter que la teneur en eau de la couche monomoléculaire diminue de 0,014 à 0,0050 g/g d'amandes lorsque la température s'élève de 25 à 40 °C. En outre, les valeurs du paramètre C du modèle de G.A.B ont varié de 1950,28 à 100000 (Tableau 4). De plus, toutes les valeurs du paramètre C enregistrées au niveau des amandes d'*Irvingia gabonensis* sont supérieures à 10. Par ailleurs, les valeurs de la surface spécifique obtenues ont varié entre 18,63 et 50,28 m²/g pour le modèle de GAB et entre 18,28 à 45,71 m²/g pour le modèle B.E.T. En outre, la surface spécifique diminue avec l'augmentation de la température.

Tableau 4: Valeurs de quelques paramètres caractérisant les isothermes d'adsorption des amandes d'*Irvingia gabonensis* à partir des modèles G.A.B et B.E.T.

Modèles	Paramètres	Températures		
		25 °C	30 °C	40 °C
G.A.B	X_m	0,0143	0,011	0,0053
	C	1950,284	6402,358	100000
	SS	50,2788	38,676	18,6348
B.E.T	X_m	0,0130	0,0104	0,0050
	C	488629,274	2,773E12	2,77E12
	SS	45,708	36,5664	18,2832

C : Constante de Guggenheim reliant la monocouche à la chaleur de sorption ; X_m : Teneur en minimale de monocouche (g/g de produit) ; SS : Surface spécifique

Ajustement des isothermes par des modèles mathématiques empiriques

Les ajustements des points expérimentaux avec chacun des neuf modèles théoriques ont été effectués aux différentes températures allant de 25 °C à 40 °C. Les figures 4 et 5 illustrent les isothermes d'adsorption des amandes d'*Irvingia gabonensis* obtenues à partir des points expérimentaux et celles obtenues à partir des modèles mathématiques à 25 °C. A cette température, le modèle de G.A.B semble être le modèle ajustant le mieux les isothermes d'adsorption des amandes d'*Irvingia gabonensis*. Il est suivi du modèle de Smith et du modèle de Peleg. Par ailleurs, à une a_w inférieure à 0,5, le modèle B.E.T semble être le mieux adapté pour décrire l'évolution. Les courbes de sorption obtenues à 30 °C sont présentées sur les figures 6 et 7. Parmi les modèles mathématiques utilisés à cette température, le modèle de G.A.B paraît être le meilleur pour le lissage de

données expérimentales de l'isotherme d'adsorption des amandes *Irvingia gabonensis*. Il est suivi par le modèle Peleg et le modèle Iglesias. Par ailleurs, les **figures 8 et 9** présentent les ajustements des isothermes de sorption déterminées expérimentalement par les modèles théoriques ou empiriques. A cette température, le modèle Peleg présente une allure qui semble mieux ajuster les points expérimentaux de l'isotherme d'adsorption des amandes d'*Irvingia gabonensis*. Il est suivi par le modèle G.A.B et le modèle Iglesias.

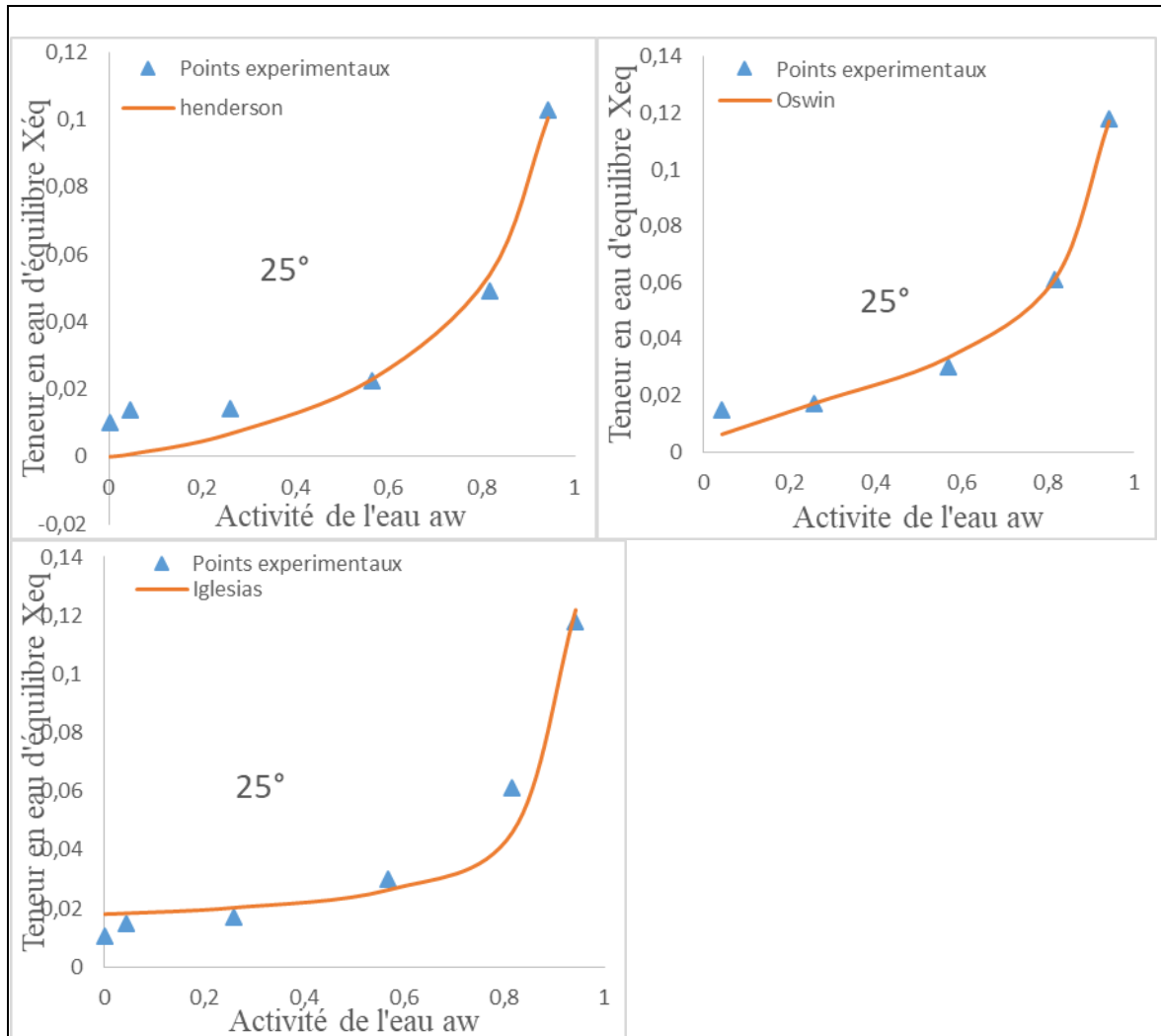


Fig. 4: Isothermes d'adsorption expérimentale et théorique (Henderson, Oswin, Iglesias) des amandes *Irvingia gabonensis* à 25 °C

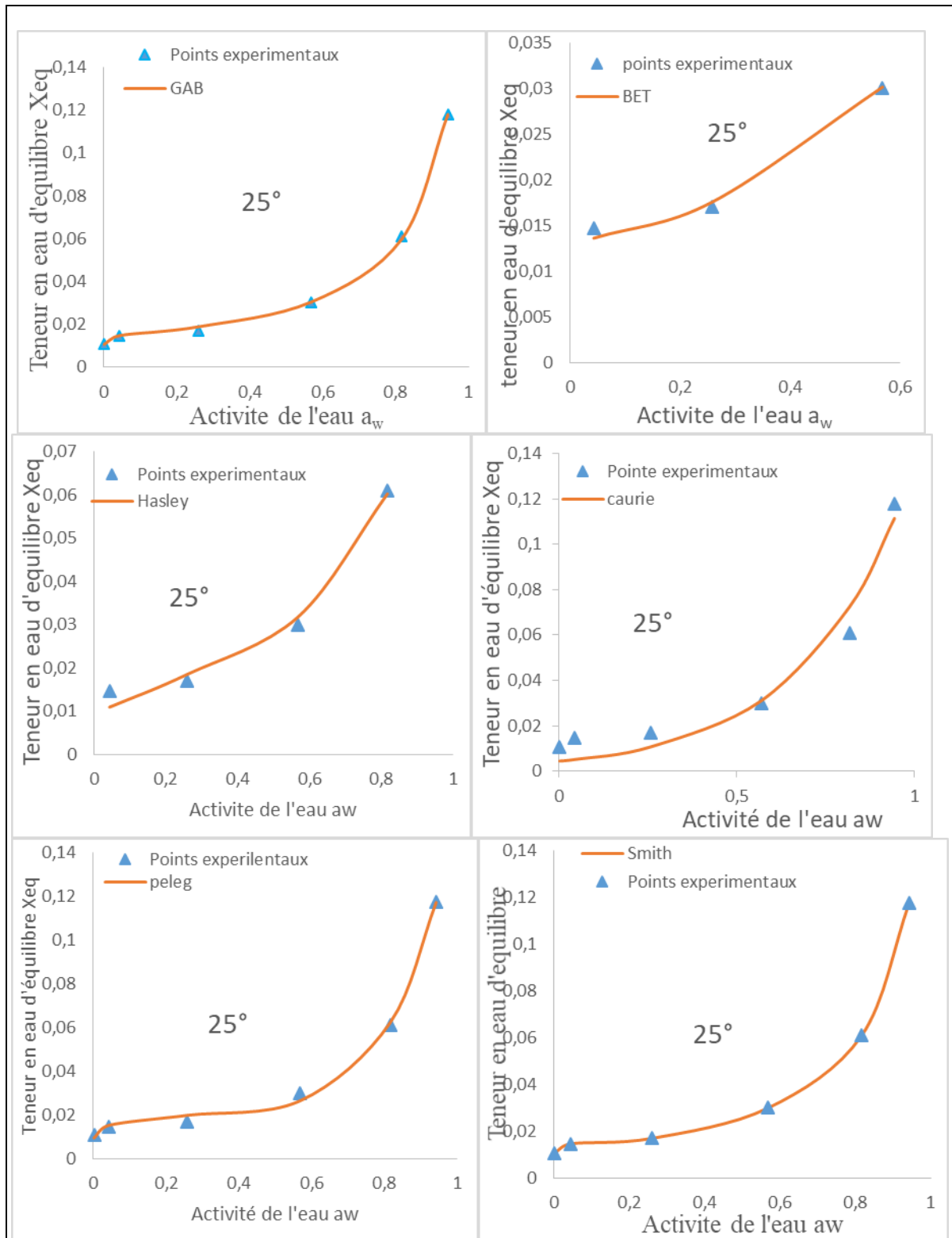


Fig. 5: Isothermes d'adsorption expérimentale et théorique (Peleg, Smith, Caurie, Hasley, G.A.B et B.E.T) des amandes d'*Irvingia gabonensis* à 25 °C

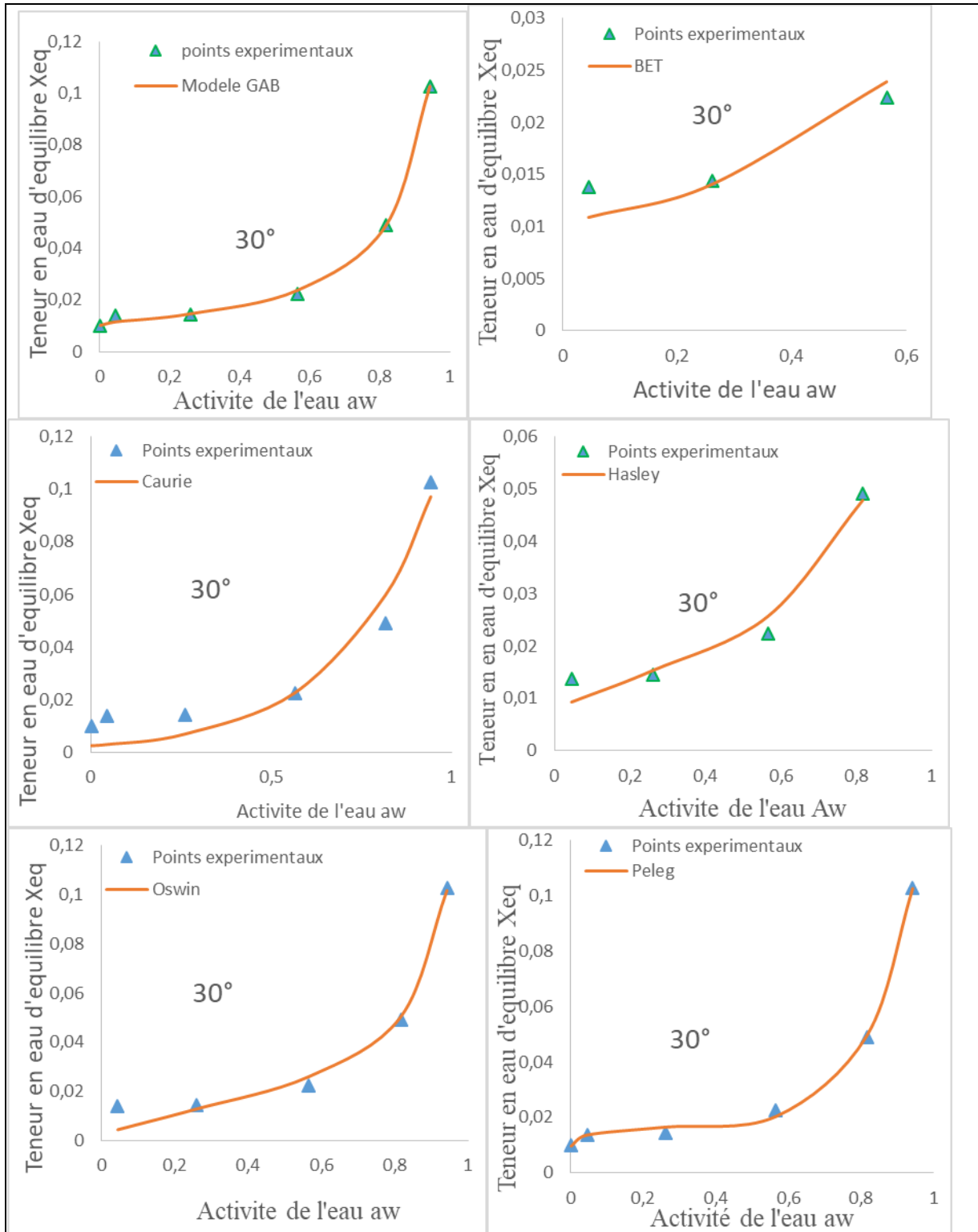


Fig. 6: Isothermes d'adsorption expérimentale et théorique (Oswin, Peleg, Caurie, Hasley, G.A.B et B.E.T) des amandes d'*Iringia gabonensis* à 30 °C

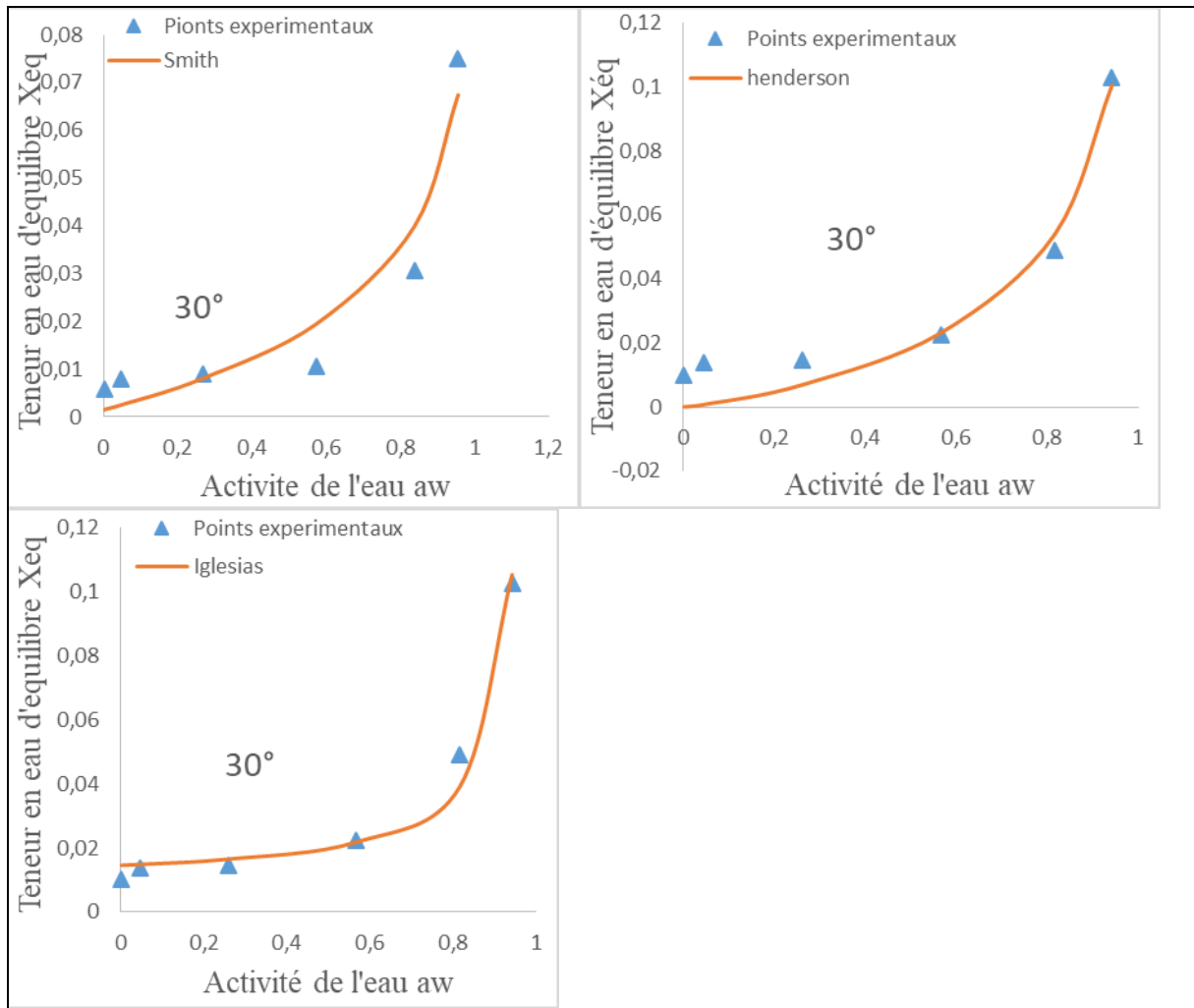


Fig. 7: Isothermes d'adsorption expérimentale et théorique (Iglesias, Smith, Henderson) des amandes *d'Irvingia gabonensis* à 30 °C

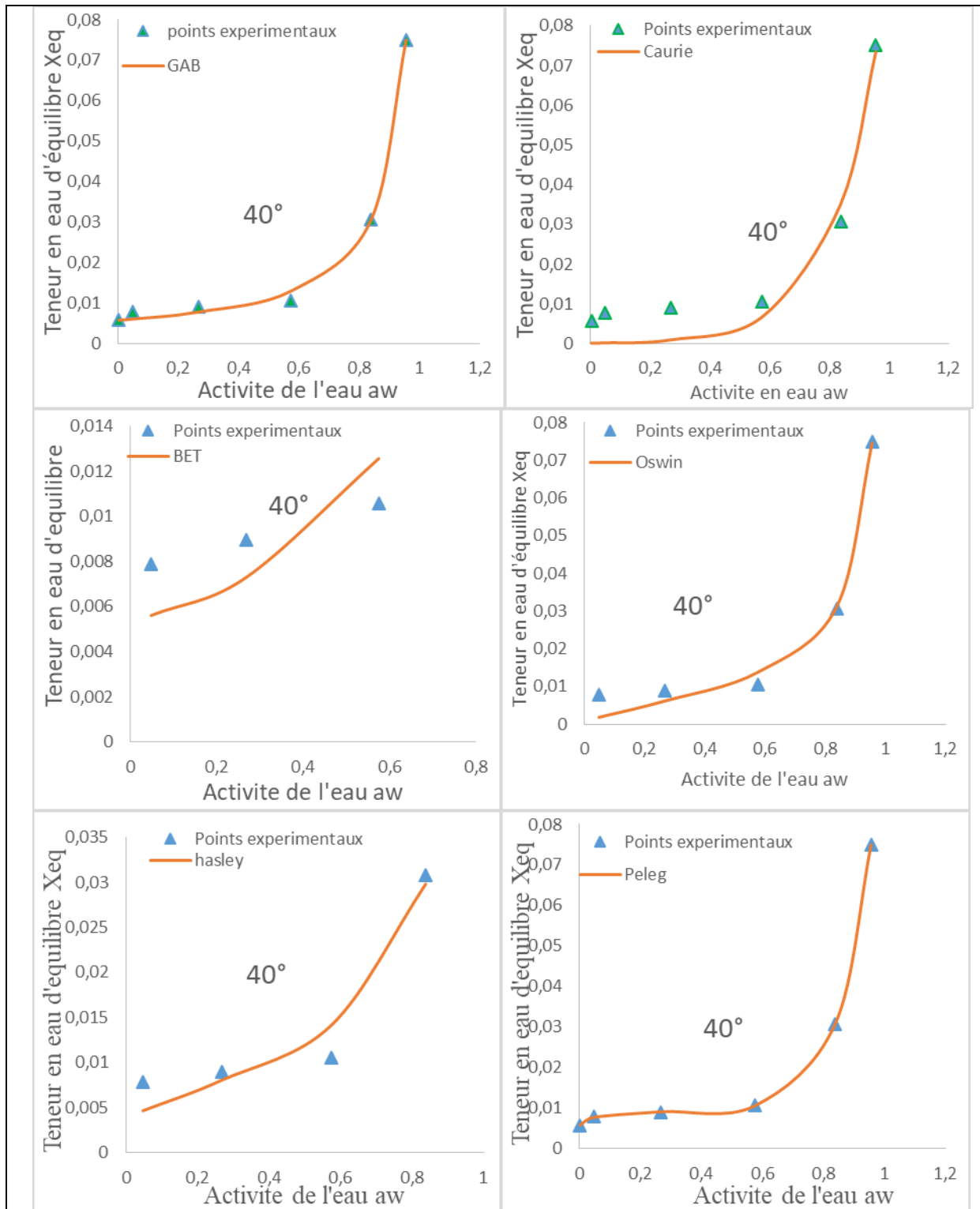


Fig. 8: Isothermes d'adsorption expérimentale et théorique (Peleg, Smith, Caurie, Hasley, G.A.B et B.E.T) des amandes *Irvingia gabonensis* à 40 °C

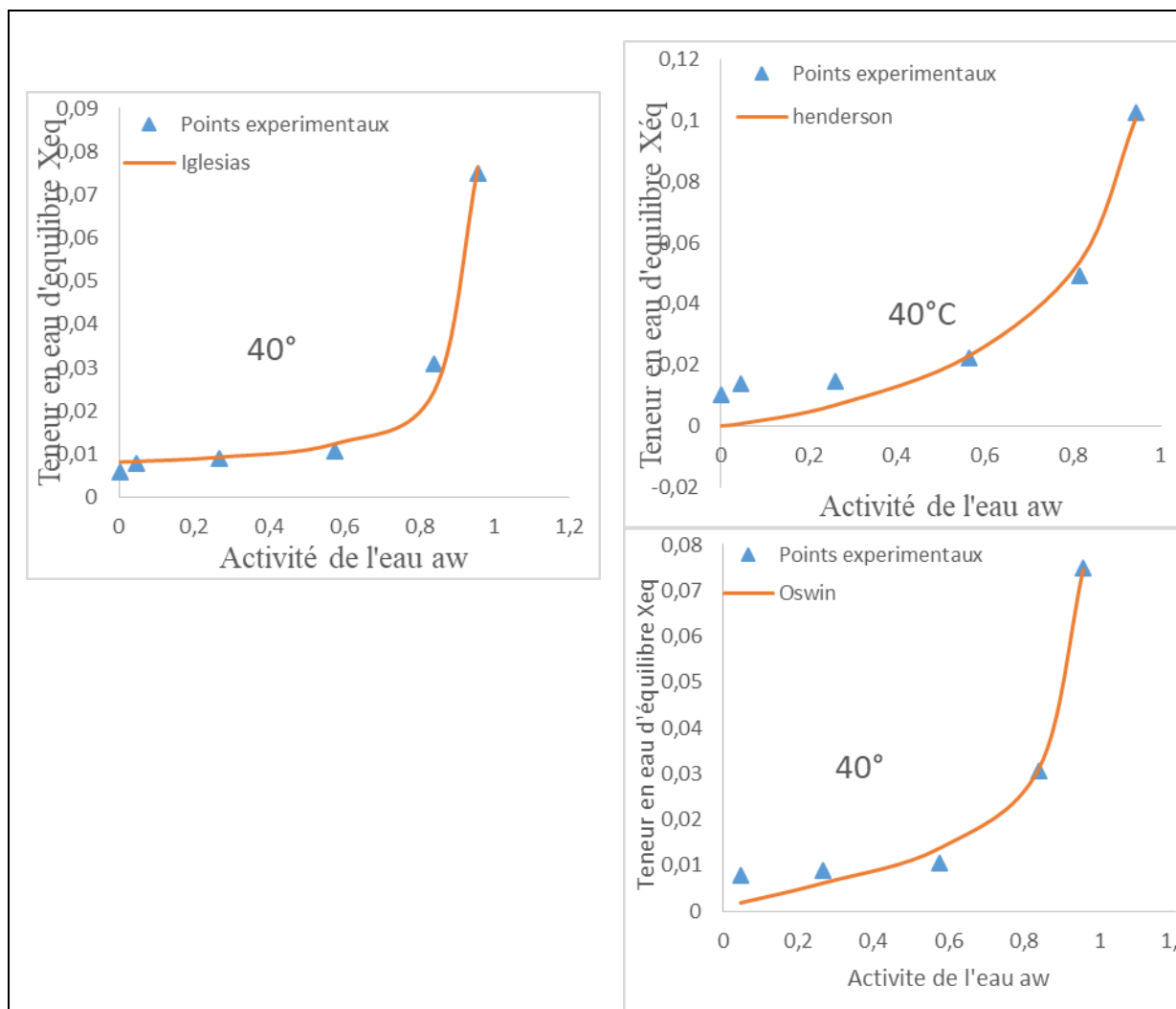


Fig. 9: Isothermes d'adsorption expérimentale et théorique (Henderson, Oswin, Iglesias) des amandes *Irvingia gabonensis* à 40 °C

Choix des modèles mathématiques adéquats

Le tableau 5 présente les valeurs de tous les paramètres des différentes équations utilisées et les critères de choix statistique du modèle adéquat décrivant les isothermes de sorption. Les coefficients de corrélation r obtenus ont varié entre 0,9803 et 0,9995 pour 20 °C, entre 0,9706 et 0,9994 pour 30 °C et entre 0,9628 et 1 pour 40 °C. Ils sont tous élevés pour les différentes températures. L'analyse des paramètres des neuf (9) modèles empiriques utilisés montre que le modèle de G.A.B a donné des coefficients de corrélation r plus élevés qui sont 0,995 et 0,994 respectivement à 25 °C et 30 °C. Cependant, à 40 °C, le modèle de Peleg a présenté un coefficient de corrélation plus élevé ($r = 1$). Au niveau des erreurs d'estimation (EQM, ESH et EMR), les valeurs les plus faibles sont obtenues au niveau du modèle de G.A.B pour les températures de 25 °C et 30 °C. Par contre, à 40 °C, c'est le modèle de Peleg qui a présenté les valeurs plus faibles des critères statistiques (EQM, ESH et EMR).

Tableau 5 : Valeurs des paramètres estimés et critères de choix statistique

Modèles	Paramètres	25 °C	30 °C	40 °C
G.A.B	Xm	0,0143	0,011	0,0053
	C	1950,284	6402,358	100000
	K	0,932	0,947i	0,965
	r	0,9995	0,9994	0,9985
	EQM	8,060E-07	1,188E-06	1,7776E-06
	EMR	2,3444	4,3170	10,1993
	ESH	0,0013	0,0015	0,0019
B.E.T	Xm	0,0130	0,0104	0,0050
	C	488629,274	2,773E12	2,77E12
	r	0,9958	0,9859	0,9828

	EQM	5,1646E-07	3,5603E-05	3,9479E-06
	EMR	3,78528	10,0256	22,0503
	ESH	0,00124	0,0033	0,0034
Hasley	A	0,0001	0,0013	0,0008
	B	2,1027	1,663	1,501
	r	0,9930	0,9811	0,9669
	EQM	5,0554E-06	8,2299E-06	6,1927E-06
	EMR	10,4152	13,9753	22,0038
	ESH	0,0032	0,00406	0,0035
Henderson	A	22,0589	19,5316	17,736
	B	0,94446	0,8364	0,6671
	r	0,9909	0,9888	0,9928
	EQM	6,11331E-05	5,4943E-05	2,34745E-05
	EMR	40,5789	43,6792	46,8030
	ESH	0,0096	0,0092	0,0060
Iglesias	A	0,018	0,146	0,008
	B	0,006	0,005	0,003
	r	0,9803	0,9899	0,9930
	EQM	5,5435E-05	2,1660E-05	8,7472E-06
	EMR	25,6315	15,5744	15,2573
	ESH	0,0091	0,0057	0,0036
Oswin	A	0,0291	0,0225	0,0114
	C	0,4964	0,5395	0,6079
	r	0,9953	0,9853	0,9936
	EQM	1,6599E-05	2,1254E-05	1,083E-05
	EMR	14,1832	19,7779	27,7988
	ESH	0,0053	0,0059	0,0042
Caurie	A	-5,41	-5,975	8,589
	b	3,41	3,865	6,251
	r	0,9803	0,9706	0,9736
	EQM	5,6451E-05	6,2148E-05	3,1398E-05
	EMR	31,0973	38,7511	55,8017
	ESH	0,0092	0,0096	0,0069
Smith	C1	0,007	0,006	0,0015
	C2	0,036	0,031	0,0211
	r	0,9874	0,9762	0,9628
	EQM	3,5138E-05	5,0573	4,4547
	EMR	20,4570	27,3500	96,3342
	ESH	0,0073	0,0087	0,0082
Peleg	K1	0,0241	0,019	0,0103
	K2	0,134	0,126	0,095
	n1	0,144	0,107	0,095
	n2	6,092	6,944	8,682
	r	0,9985	0,9985	1,000
	EQM	4,0220E-06	1,5386E-06	6,5016E-09
	EMR	7,6712	4,9397	0,7578
	ESH	0,0035	0,0021	0,00014

IV. Discussion

En prélude à une valorisation des amandes *d'Irvingia gabonensis*, la présente étude portant sur la détermination expérimentale et théorique des isothermes d'adsorption a été menée à différentes températures. Ces températures oscillant entre 25 et 40 °C sont celles de stockage et de traitement (séchage) de la denrée. A ce propos, l'humidité des amandes vendues sur les marchés de la ville de Daloa a été évaluée. Les résultats ont révélé que la teneur en eau des amandes varie significativement ($p < 0,05$) d'un site à l'autre. De plus, au sein d'un même site des variations sont enregistrées. En effet, le coefficient de variation obtenu dans le site de *Lobia* est supérieur à 15 %. Il y a donc une grande dispersion des valeurs autour de la moyenne dans ce site. Les valeurs enregistrées dans cette étude au niveau des sites de *Tazibouo* et du grand-marché sont similaires à celle de l'ordre de 4 % déjà rapportée [25]. Des valeurs plus élevées (12,81 %) ont été obtenues dans les amandes au Bénin [26]. Ces valeurs sont proches de celles enregistrées dans le site de *Lobia* (13,01 %). Les différences de teneurs peuvent s'expliquer par les méthodes de séchage adoptées. En effet, deux techniques de séchage sont utilisées par les producteurs : le séchage à la claie et le séchage au soleil [15]. De plus, il est bien connu que le séchage influence notablement la teneur en eau et par conséquent, certaines des caractéristiques du produit. L'une de ces caractéristiques est la viscosité. En effet, c'est le degré de séchage qui détermine le degré de viscosité des amandes. Ainsi, plus les amandes sont sèches, plus elles deviennent moins gluantes [15]. Par ailleurs, une teneur en eau élevée des amandes pourrait favoriser des réactions chimiques et enzymatiques, le développement des microorganismes conduisant à la détérioration du produit [27]. En outre, cette teneur en eau des produits alimentaires joue un rôle primordial dans la conservation [28]. Il apparaît dès lors indispensable de déterminer la teneur en eau minimale pouvant favoriser la conservation des amandes *d'Irvingia gabonensis*.

C'est ainsi que les isothermes d'adsorption des amandes ont été déterminées et caractérisées. Par ailleurs, l'équilibre hygroscopique de ces amandes a été obtenu après 16 jours. Des durées plus longues pouvant atteindre 33 jours ont été rapportées [29]. Les isothermes sont particulièrement importantes pour la détermination de la teneur en eau minimale d'un produit [19]. Au nombre des caractéristiques des isothermes, figure le type, la teneur en eau de la monocouche et la surface spécifique.

Le type d'isotherme d'adsorption des amandes *d'Irvingia gabonensis* est déterminé en considérant les valeurs du paramètre C du modèle de G.A.B. Lorsque le paramètre $C \geq 10$, l'isotherme est de type II et quand $C \leq 10$, l'isotherme est de type III [24]. Les résultats de cette étude ont révélé des valeurs du paramètre C supérieures à 10 pour les différentes températures. Par conséquent, les isothermes obtenues sont de type II avec une forme sigmoïdale caractéristique. Ce type d'isotherme d'adsorption a été également observé au niveau des fèves de cacao (*Theobroma cacao* L.) marchand [29]. Cela implique une formation de monocouche, puis de multicouche [30]. En outre, ce type d'isotherme est caractéristique du comportement hygroscopique de la plupart des produits alimentaires [7, 31]. Ces résultats sont en concordance avec le comportement des produits biologiques [32, 33]. Par ailleurs, les courbes de sorption obtenues à différentes températures ont permis d'observer une diminution de la teneur en eau d'équilibre des amandes *d'Irvingia gabonensis* avec l'augmentation de la température. Kakou et al. [29] expliquent cela par l'augmentation de l'agitation thermique. En effet, à température élevée, l'état d'excitation est plus fort et favorise la réduction des forces d'attraction des molécules entre elles [32].

Une deuxième caractéristique déterminée est la teneur en eau de la couche monomoléculaire. A ce propos, l'évaluation des paramètres X_m du modèle G.A.B a permis de révéler les teneurs en eau de la monocouche. Ainsi, aux températures de conservation allant de 25 à 30 °C, la teneur en eau est de 1,10 – 1,40 % MS. Ces valeurs sont similaires à celles obtenues avec le modèle B.E.T (1,04 – 1,30 % MS) aux mêmes températures. Elles permettent d'assurer une conservation idéale des amandes *d'Irvingia gabonensis*. En effet, la perte de la qualité des produits déshydratés, due aux réactions chimiques, aux microorganismes et aux insectes est négligeable en dessous de la valeur de la teneur en eau de la monocouche [29]. De plus, Karel et al. [34] ont observé qu'à cette valeur ou en dessous de celle-ci, les réactions chimiques d'altération sont faibles et la stabilité des produits est satisfaisante au cours du stockage. En addition, plusieurs produits alimentaires possèdent une teneur en eau optimale pour laquelle la stabilité est maximale. C'est le cas des dattes avec 6,52 % [35] et des fèves de cacao (2,12 %) [29]. La teneur en eau de la monocouche (X_m) enregistrée dans les amandes *d'Irvingia gabonensis* de la présente étude est inférieure à la teneur en eau des amandes vendues sur les marchés de la ville de Daloa. Ainsi, les amandes sont-elles plus sujettes à la détérioration au cours du stockage. Pour améliorer la durée de conservation de ces amandes, il faut les sécher de telles sortes à avoir une teneur en eau maximale de l'ordre de 1,04 – 1,43 %. Par ailleurs, à partir des valeurs de teneur en eau de la monocouche, la surface spécifique a été obtenue. Elle correspond à la surface totale par unité de masse du produit accessible aux atomes et aux molécules. Sa connaissance contribue à améliorer le contrôle de la réactivité d'un échantillon lorsque celui-ci est mis en présence d'autres matériaux [36]. Des valeurs de surface spécifique comprises entre 200 et 2000 $m^2.g^{-1}$ ont été rapportées dans une étude réalisée sur le charbon actif [37]. Dans la présente étude, les surfaces spécifiques enregistrées sont plus faibles. Selon Bouziane [38], la surface spécifique varie avec la capacité d'adsorption du produit. Plus la surface spécifique est importante, plus grande sera la quantité de molécules adsorbées.

Les différentes isothermes d'adsorption déterminées expérimentalement aux températures de 25, 30 et 40 °C ont été ajustées par neuf modèles empiriques. En tenant compte du coefficient de corrélation r le plus grand et des estimations d'erreurs (EQM, ESH et EMR) les plus faibles, les modèles décrivant le mieux les points expérimentaux ont été choisis. L'analyse de ces critères de choix a révélé que le modèle de G.A.B fournit le meilleur ajustement à 25 et 30 °C. En effet, il a donné à ces températures, le r le plus grand et les estimations d'erreurs les plus petites. A 40 °C, les données montrent que le modèle de Peleg apparaît le meilleur pour le lissage des points expérimentaux. Ces résultats sont en concordance avec de nombreux travaux réalisés sur les isothermes de sorption où le modèle de G.A.B simulait mieux, sur une large gamme d'activité de l'eau, les données expérimentales [7, 29, 39].

La détermination des isothermes de sorption est une étape indispensable et un moyen privilégié pour déterminer la teneur en eau finale à atteindre en vue d'optimiser les conditions de stockage et de séchage de ces produits. Elles donnent par ailleurs, des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique du produit à sécher et à conserver. Les modèles de G.A.B et de Peleg décrivant mieux les isothermes d'adsorption des amandes *d'Irvingia gabonensis* permettent de comprendre et de prédire le comportement des amandes lors du stockage ou de la conservation à une température donnée.

V. Conclusion

La présente étude a été réalisée dans le but de déterminer les isothermes d'adsorption des amandes *d'Irvingia gabonensis* par la méthode gravimétrique pour trois températures (25 °C, 30 °C et 40 °C). Il ressort

de cette étude que l'équilibre hygroscopique est obtenu après 16 jours à 25 °C, 12 jours à 30 °C et 8 jours à 40 °C. Les isothermes d'adsorption déterminées sont de type II avec une allure sigmoïdale caractéristique. De plus, la teneur en eau d'équilibre diminue avec l'augmentation de la température, pour une activité de l'eau donnée. Par ailleurs, les modèles mathématiques couramment utilisés dans la littérature ont aidé à expliquer le comportement hygroscopique pendant la conservation des amandes *d'Irvingia gabonensis*. C'est ainsi que les courbes obtenues avec certains modèles (G.A.B et Peleg) coïncident bien avec les résultats expérimentaux. Le modèle de G.A.B à 25 °C ($r = 0,995$), à 30 °C ($r = 0,9994$) et le modèle de Peleg à 40 °C ($r = 1$) ont montré un bon accord avec les données expérimentales. Ils permettent donc de prévoir le comportement hygroscopique des amandes *d'Irvingia gabonensis*. De plus, la surface spécifique des amandes est de 18,28 – 50,28 m²/g pour les températures de l'étude. En addition, la teneur en eau de la couche monomoléculaire est de 0,0130 - 0,0143 g/g (soit 1,30 - 1,43 %) à 25 °C et 0,0104 - 0,011 g/g (soit 1,04 – 1,1 %) à 30 °C. Pour améliorer la durée de conservation de ces amandes, il conviendrait de les sécher de sorte à atteindre la teneur en eau de la monocouche.

La détermination expérimentale et théorique des isothermes de sorption est apparue comme un moyen privilégié de la connaissance du séchage des amandes *d'Irvingia gabonensis*. Toutefois, d'autres études mériteraient d'être effectuées pour en savoir encore plus sur le séchage des amandes notamment en ce qui concerne la cinétique de séchage et la répartition de l'intensité des liaisons de l'eau.

References

- [1] SMCP, *Stratégie mondiale pour la conservation des plantes*. (Secrétariat de la Convention sur la biodiversité, BGCI, Montréal-Canada, 2002).
- [2] M. Quenum, *Diversité des fruits sauvages au Bénin*. (DFs, Bénin, 2015).
- [3] CNRA, *La culture d'une espèce alimentaire sauvage en péril, Irvingia gabonensis* (CNRA, 2003).
- [4] M.G. Gnahoua, A. Konan et D. Louppe, *Irvingia gobonensis, un fruitier sauvage d'avenir* (CNRA/CIRAD/UE, 2003).
- [5] C. Bonazzi et J.J. Bimbinet, Séchage des produits alimentaires, *Techniques de l'Ingénieur, traité Agroalimentaire, F3000*, 2003 : 1-14.
- [6] H.A. Iglesias and J. Chirife, *Handbook of Food Isotherms: water sorption parameters for food and food components* (Academic Press: New York, 1982).
- [7] C. Ahouannou, Y. Jannot, Sanya E. et Degan G., Détermination expérimentale et modélisation des isothermes de désorption de produits agricoles tropicaux, *Afrique Science*, 06 (3), 2010, 1– 17.
- [8] A. Lamharrar, C.E.S. Kane, A. Idlimam, S. Akkad, M. Kouhila, A. Mimet et M. Ahachad, Détermination expérimentale des isothermes de sorption et de la chaleur isostérique des feuilles d'absinthe et de menthe pouliot, *13èmes Journées Internationales de Thermique*, Albi, France, 28 au 30 Août, 2007.
- [9] H.R. Bolin, Relation of Moisture to Water Activity in Prunes and Raisins, *Journal of Food Science*, 45(5), 1980, 1190-1192
- [10] T.P. Labuza, A. Kaanane and J.Y. Chen, Effect of Temperature on the Moisture Sorption and Water Activity Shift of two Dehydrated Foods, *Journal of Food Science*, 50 (2)1985, 385-392.
- [11] J. Chirife, R. Boquet, C.F. Fontan and H.A. Iglesias, New Model for Describing the Water Sorption Isotherms of Foods, *Journal of Food Sciences*, 48(4), 1983:1382-1383.
- [12] 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*, 7(1),1988, 63-78.
- [13] Z. Tchoundjeu, A. Tsobeng, A. Degrande, T. Sado, H. Tabuna, E. Asaah et J. Iseli, *Domestication de Irvingia gabonensis* (WAIC-ICRAF : FAO, 2011).
- [14] H. M. Womeni, *Optimisation des opérations de traitement des amandes de la mangue sauvage (Irvingia gabonensis) et de palmiste (Elais guineensis) en vue de l'extraction d'huile : qualité des huiles et des sous-produits* (Réseau de chercheurs Génie des procédés appliqués à l'agro-alimentaire, Dschang, 2006).
- [15] A. Awono A. et D. Manirakiza, Etude de base sur la mangue sauvage (*Irvingia* spp.), projet pour la mobilisation et le renforcement des capacités des petites et moyennes entreprises paysannes en relation avec l'exploitation des produits forestiers non ligneux au cameroon et RDC (*CIFOR*, 2007).
- [16] T. Silou, Corps gras non conventionnels du Bassin du Congo : Caractérisation, biodiversité et qualité, *OCL*, 21(2), 2014, 1-15.
- [17] N.M.T. Kouame, K. Soro, A. Mangara, N. Diarrassouba, A.V. Coulibaly et N.T.K.M. Boraud, Étude physico-chimique de sept (7) plantes spontanées alimentaires du centre-ouest de la Côte d'Ivoire, *Journal of Applied Biosciences*, 90, 2015, 8450-8463.
- [18] AOAC, Official Methods of Analysis (17th edn) (Association of Official Analytical Chemist: Washington, D C, 2000).
- [19] Y. Jannot, Isothermes de sorption : modèles et détermination, 2008, [www. Thermique55.com/.../sorption.pdf](http://www.Thermique55.com/.../sorption.pdf), consulté le 07/02/2018.
- [20] T.T. Inci and P. Dursun, Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process, *Journal of food engineering*, 65(3), 2004, 413-425.
- [21] D.W. Sun and J.L. woods, The selection of sorption isotherm equations for wheat based on the fitting of available data, *Journal of stored products research*, 30(1), 1994, 27-43.
- [22] M.C. Gely and A.M. Pagano, Moisture desorption isotherms and isosteric heat of sorption characteristics of malting barley (hordeum distichum l.), *Latin American Applied Research*, 42(3), 2012, 237-243.
- [23] C.T. Kiranoudis, Z.B. Maroulis, E. Tsami and Marinos-Kouris, 1993.- 'Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of Some Vegetabals', *Journal of Food Engineering*, (20), 1993, 55 – 74.
- [24] M.L. Medeiros, A. Ayrosa, R.N.D. Pitombo and S.C.D. Lannes, Sorption isotherms of cocoa and cupuassu products, *Journal of food engineering*, 73(4), 2006, 402-406.
- [25] B.S. Platt, Tables of representative values of foods commonly used in tropical countries, *Special report series Medical Research Council*, 302, 1962, 1-46.
- [26] E. Dahouenon-Ahoussi, D.R.M. Cadjia, T.S. Djenontin et D.K.C. Sohounhloue, Morphologie des fruits et quelques caractéristiques physique et chimique de l'huile et des tourteaux de *Irvingia gabonensis* (Irvingiaceae) du Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(5), 2013 : 2263-2273.

- [27] AMROUCHE, L'altération des aliments. *Génie alimentaire*, 2016. Via <http://genie-alimentaire.com/> Consulté le 13/02/2018
- [28] J. C. Cheftel et H. Cheftel, Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. vol 1, (*Techniques et Documentation Lavoisier*, Paris, 1984).
- [29] K.E. Kakou, D.C. Akmel, N.V. Abouo, N.E. Assidjo, et N.S Niamké, Isotherme d'adsorption d'eau des fèves de cacao (*Theobroma cacao* L.) marchand, *European Scientific Journal*, 11(12), 2015, 355-370.
- [30] A. Danion, *Développement d'un réacteur à base de fibres optiques photocatalytiquement actives pour la dépollution de l'eau*, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2004.
- [31] M. Maskan and F. Gogus, The fitting of various models to water sorption isotherms of pistachio nut paste. *Journal of food engineering*, 33(3-4), 1997, 227-237.
- [32] M. Kouhila, N. Kechaou, M. Otmani, M. Fliyou, and S. Lahsasni, Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan *Eucalyptus globulus*, *Drying Technology*, 20, 2002, 2027-2039.
- [33] S. Lahsasni, M. Kouhila and M. Fliyou, Moisture adsorption-desorption isotherms of prickly pear cladode (*Opuntia ficus indica*) at different temperatures, *Energy Conversion and Management*, 44(6), 2003, 923-936.
- [34] M. Karel, O.R. Fennema and D.B. Lund, *Principles of food science, Part II. Physical principles of food preservation* (Marcel Dekker, New York and Basel, 1975).
- [35] A. Ferradji, M.A.A. Matallah et A. Malek, Conservation des dattes 'Deglet Nour' : Isothermes d'adsorption à 25, 30 et 40 °C, *Revue des Energies Renouvelables SMSTS 08*, 2008, 207-2019.
- [36] A. Ceppi & A. Rodde, *Surface spécifique*. LP polymer engineering, Université Savoie mont-blanc, France, 2015.
- [37] M. Zarrouki, *Etude de l'adsorption dans un système liquide-solide : Solution d'ion dicyanoaurate-charbon actif*, Thèse de Doctorat, Génie des procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 1990.
- [38] M.N. Bouziane, *Élimination du 2-mercaptobenzothiazole par voie photochimique et par adsorption sur la bentonite et le charbon actif en poudre*, Mémoire de master chimie analytique, physique et environnement, institut national des hydrocarbures, Boumerdes, Algérie, 2007.
- [39] A.J. Sandoval and J.A. Barreiro, Water sorption isotherms of non-fermented cocoa beans (*Theobroma cacao*), *Journal of food engineering*, 51(2), 2002, 119-123.

Casimir Anauma Koko. "Détermination expérimentale et modélisation des isothermes d'adsorption d'eau des amandes d'*Irvingia gabonensis* de la région du Haut-Sassandra (Côte d'Ivoire)." *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)* 12.2 (2018): 50-66.