

Interaction eau-algues rouges : isotherme de sorption du *Gelidium sesquipedale* (Rhodophyta)

Moulay Chrif HNINI, M'barek BENCHANAA, Mustapha EL HAMMIOUI,
*Laboratoire de Recherche sur la Réactivité des Matériaux et l'Optimisation des Procédés «REMATOP»,
Faculté des Sciences Semlalia Marrakech, Bd. Prince Mly Abdellah, B.P. : 2390 - 40000 Marrakech – Maroc.
E-mail address: mhnini11@yahoo.fr, mbarek_benchanaa@yahoo.fr, m.elhammioui@yahoo.fr*

Résumé : Les isothermes de sorption du *Gelidium sesquipedale* ont été obtenues, en utilisant la méthode gravimétrique statique à 30, 45, et 60 °C. Ces isothermes, ont une forme sigmoïdale et se classent dans le type II de la classification IUPAC [1], varient avec la température et présentent un léger phénomène d'hystérésis. L'analyse thermodynamique des résultats expérimentaux a permis de déterminer et d'illustrer la variation de la chaleur isothermique en fonction de la teneur en eau à l'équilibre. Deux types de molécules d'eau ont été mis en évidence par ces résultats : 20% de molécules faiblement liées à des sites potentiels d'adsorption à l'intérieur des cellules végétales et 80% de molécules d'eau intercellulaire et de mouillage.

Mots clés : Séchage, Thermique, *Gelidium sesquipedale*, isotherme de sorption, thermodynamique, la chaleur nette isostérique net, humidité relative.

1. Introduction

Le Maroc est le troisième producteur mondial d'agar-agar. Cette activité, entièrement dépendante de la récolte sur les gisements naturels des algues rouges, assure un revenu à plus de 8000 personnes le long du littoral. Le *Gelidium sesquipedale* est la principale algue rouge récoltée, elle constitue une matière première de bonne qualité pour la transformation industrielle et la production de l'agar-agar. Ce dernier produit est un aditif alimentaire jouant aujourd'hui une importance capitale dans l'industrie agroalimentaire [2,3] Il est considéré comme un gélifiant neutre de bonne qualité [4]. Il intervient également dans les produits cosmétiques, pharmaceutique et les substrats nutritifs utilisés en microbiologie [5].

Le travail présenté dans cet article porte sur l'étude du système «Eau - *Gelidium sesquipedale*» pour déterminer les influences de la teneur en eau et de la température de stockage sur l'équilibre hygroscopique du système. Il concerne la détermination des isothermes de sorption. Ces dernières permettent de prévoir les allures de séchage, aident à classer les matériaux par ordre d'hygroscopicité et indiquent la répartition et l'intensité des liaisons de l'eau ainsi que sa disponibilité fonctionnelle dans les substances. Elles offrent également des informations précieuses sur le processus de désorption des produits telles que :

- La teneur en eau optimale qu'il faut atteindre lors du séchage pour approcher un état d'équilibre stable et donc garantir une meilleure conservation.
- L'analyse des transferts de l'humidité entre le produit et l'air environnant puisque c'est par rapport à l'état d'équilibre que se déterminent l'importance et le sens de cet échange.
- Les meilleures conditions thermiques et aérothermiques qu'il convient de maintenir lors du stockage.

2. Matériaux et techniques expérimentales

2.1. Matériaux étudiés

Le *Gelidium sesquipedale* est une algue rouge marine pluricellulaire fronde de grande taille 10-15 cm, en touffes s'élevant de filaments rampants. Les rameaux sont minces, aplatis, aigus, à peu près nus à la base, puis ils portent des rameaux secondaires généralement opposés pourvus de ramules simples ou pennés à leur tour [6].

Après la récolte de l'algue, elle subit un lavage à l'eau douce pour enlever le sable et les impuretés. Les échantillons sont préparés après découpage des racines et triage des bâtonnets quasiment cylindrique sur la base de la même taille et la même couleur. Ces bâtonnets sont stockés dans des conditions d'humidité et de température déterminées.



Figure 1 : Coupe transversale d'une tige du *Gelidium sesquipedale* –a- tige humide –b- tige sèche.

Comme le montre la figure 1-a-, l'observation morphologique de la section droite de chaque bâtonnet présente des cellules végétales qui baignent dans un milieu liquide constitué généralement de 8 acides aminés et de macrominéraux associant plusieurs éléments tels que : Le Potassium, Le Magnésium, Le Silicium, Le Zinc, Le Manganèse, Le Sélénium, et Le Cuivre, ces cations assurent l'électroneutralité de l'algue et constituent des sites attractifs [7]. La figure 1-b- montre une coupe transversale d'une tige sèche de *Gelidium sesquipedale*.

2.2. Dispositif expérimentale et mode opératoire

Les expériences d'adsorption et de désorption des échantillons de l'algue étudiée de masse initiale $m_0 = 0.5 \text{ g}$ ont été réalisées de la manière suivante :

- Pour la désorption, l'échantillon est maintenu à une température de 5°C sous une humidité relative qui correspond à la saturation totale de l'échantillon. Cet état constitue l'état de référence de toutes les expériences de désorption
- Pour l'adsorption, la matière première préparée est maintenue dans une étuve (WTC BINDER) à une température de 50°C jusqu'à séchage totale. Cet état constitue également l'état de référence pour toutes les manipulations d'adsorption. La teneur en humidité à l'équilibre est déterminée au moyen de la méthode gravimétrique en utilisant une étuve et une balance de précision de $\pm 0.001 \text{ g}$ (M T AB104-S).

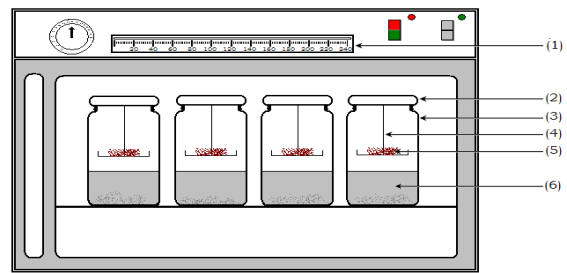


Figure 2 : Dispositif expérimentale de la détermination des isothermes de sorption : 1. Thermomètre, 2. Couvercle hermétique, 3. Pot de verre, 4. Porte échantillon, 5. Echantillon d'algue rouge, 6. Solution saturée en sel.

Cette méthode consiste à mettre l'échantillon dans une atmosphère à température et humidité relative constante pour ne chercher, grâce à sa variation de masse, que sa teneur en eau à l'équilibre thermique et hygroscopique [8]. Une fois l'expérience achevée, les échantillons sont introduits dans l'étuve à la température de 105°C , pour avoir leurs masses après séchage total [9].

Sept sels ont été choisis (KOH, KF, MgCl_2 , K_2CO_3 , CoCl_2 , KCl et K_2SO_4) pour fournir une gamme d'humidité 5-97 % [10]. Les valeurs des Humidité relative sont données dans le tableau 1 Le dispositif expérimental (Fig. 2) est constitué de sept bocaux. Chaque bocal est muni d'un couvercle hermétique, et contient 100 cl de solution de sel saturée. Les expériences ont été réalisées à trois températures 30, 45, et 60°C et ont été effectuées plusieurs fois pour s'assurer de la reproductibilité des résultats.

3. Résultats expérimentaux

L'étude du système «Eau – *Gelidium sesquipedale*» a été réalisé en abordant l'aspect thermodynamique de l'interaction de la molécule d'eau dans l'algue qui se traduit par des isothermes de sorption. Ce sont des courbes d'équilibre qui lient, à température constante, les teneurs en eau à l'équilibre des matériaux (X_{we}) à leurs activités d'eau à l'équilibre (a_w) qui est égales aux humidités relatives (HR) des atmosphères qui les entourent. La détermination de ces isothermes est une étape nécessaire et importante dans tout procédé de séchage car non seulement elles peuvent décrire les états d'équilibre entre l'air et les produits étudiés, mais déterminent les interactions microscopiques qui existent entre l'eau et la matière sèche de ces produits et en particulier des produits agroalimentaires [12].

Comme s'est décrit dans de nombreux travaux sur la sorption des gaz par des matériaux [13] les isothermes de sorption présentent (Fig. 3) six allures différentes, chaque allure décrit un mécanisme de sorption en relation avec les liaisons de Van der Waals. Souvent, les isothermes de sorption pour les produits agroalimentaires correspondent au type II ou III. Ces deux derniers types d'isothermes se caractérisent par un comportement asymptotique dans le domaine des hautes a_w dans lequel l'eau se comporte comme de l'eau pure.

3.1- Isothermes de Sorption

L'équilibre hygroscopique du *Gelidium sesquipedale* a été atteint, dans le domaine de température exploré, au bout de neuf jours pour la désorption et huit jours pour l'adsorption. Les résultats obtenus lors des expériences d'adsorption et de désorption sont données dans le tableau 2.

Tableau 2 : Teneur en eau d'équilibre (X_{we} en %) du *Gelidium sesquipedale* pour l'adsorption et la désorption à différentes activités d'eau (a_w) et températures.

30°C			45°C			60°C		
a_w	Des	Ads	a_w	Des	Ads	a_w	Des	Ads
0,0738	6,40	7,81	0,0594	4,33	4,80	0,0549	4,11	3,78
0,2727	11,97	10,80	0,2146	9,48	8,14	0,2077	8,12	6,19
0,3238	13,02	11,82	0,3110	11,64	9,24	0,2926	10,17	6,80
0,4317	15,88	14,79	0,4395	14,44	11,18	0,4500	13,91	9,21
0,6183	21,27	19,23	0,5256	16,39	13,22	0,4674	14,21	9,84
0,8362	32,45	32,17	0,8174	28,14	27,08	0,8025	24,73	24,88
0,9700	52,18	71,85	0,9612	51,32	64,62	0,9570	48,39	58,44

Tableau 2. Selected saturated salt solutions and corresponding relative humidity (%) [11]

Sels	Humidité relative (%)		
	30 °C	45 °C	60 °C
KOH	7,38	5,94	5,49
KF	27,27	21,46	20,77
MgCl_2	33,44	31,10	29,26
K_2CO_3	43,17	43,95	45,00
CoCl_2	61,83	52,56	46,74
KCL	83,62	81,74	80,25
K_2SO_4	97,00	96,12	95,70

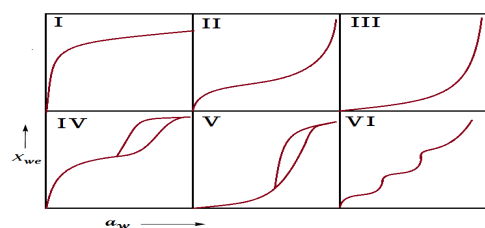


Figure 3 : Forme générale des isothermes de sorption selon la classification IUPAC.

Les isothermes de sorption correspondantes sont illustrées dans la figure 4, L'influence de la température sur ces isothermes est présentée par la figure 5.

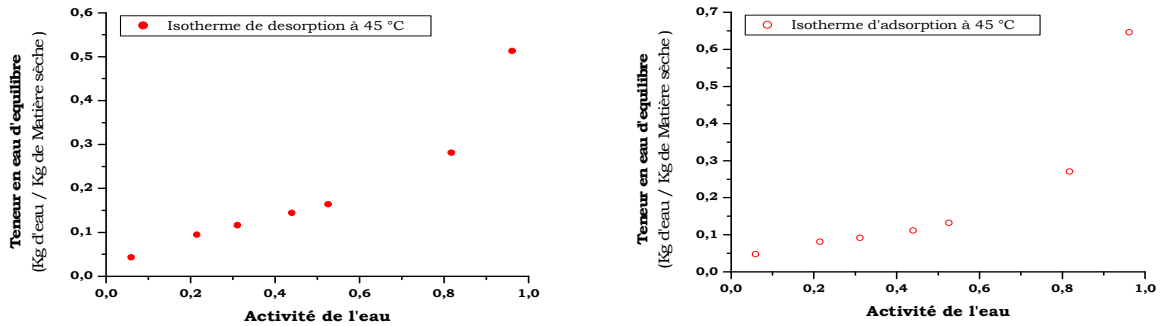


Figure 4: Isotherme de sorption du *Gelidium sesquipedale* à 45 °C -a- désorption -b- adsorption.

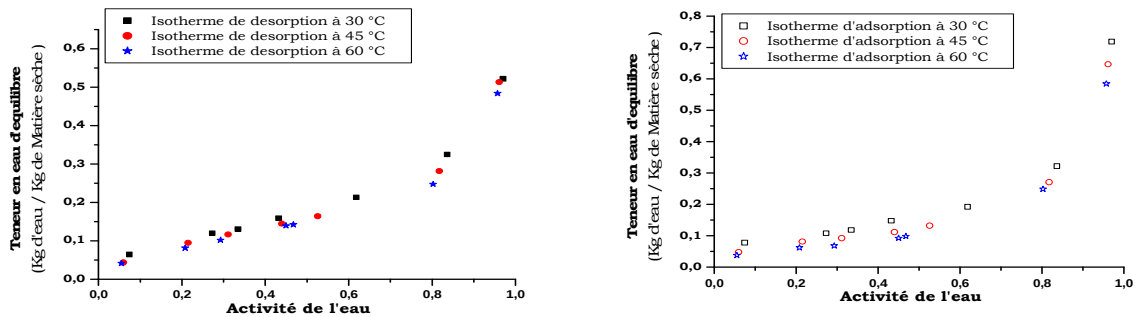


Figure 5: Influence de la température sur les Isothermes de sorption du *Gelidium sesquipedale*. -a- désorption -b- adsorption.

L'analyse des courbes expérimentales obtenues montre que :

- Dans l'intervalle de température étudié, la teneur en eau de l'algue à l'équilibre thermodynamique varie avec l'activité de l'eau : pour l'adsorption, de $X_w(5,49) = 3.78\%$ à $X_w(97) = 71.85\%$ et pour la désorption, de $X_w(5,49) = 4.11\%$ à $X_w(97) = 52.18\%$. La teneur en eau X_w du *Gelidium sesquipedale* à l'équilibre hygroscopique augmente lorsque l'activité de l'eau a_w augmente.
- Chaque isotherme de sorption présente un pseudo-palier au voisinage de l'activité d'eau $a_w = 0,20$.
- La température a une légère influence sur la teneur en eau à l'équilibre. Pour une humidité relative donnée, la teneur en eau de l'algue à l'équilibre diminue normalement lorsque la température augmente.
- Les isothermes d'adsorption et de désorption ont, quelque soit la température, des allures similaires et présentent un phénomène d'hystérésis aux hautes humidités relatives.
- Les isothermes de sorption présentent une allure correspondante à la classe des isothermes de type II selon la classification IUPAC (Fig. 3).

3.2 Chaleur nette isostérique

La connaissance de la chaleur de désorption de l'eau dans les produits est utile pour la conception et l'optimisation des séchoirs. En effet, elle améliore le calcul de l'énergie consommée durant le séchage. Cette chaleur de désorption peut être obtenue à partir des courbes des isothermes de désorption en utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron. Cette équation met en relation la pression de vapeur et la température dans une phase de transition entre un liquide absorbé et la phase vapeur.

Le processus globale l'adsorption des molécules d'eau sur le *Gelidium sesquipedale*, s'accompagne d'un dégagement d'une chaleur égale à la chaleur de condensation de la vapeur d'eau (ΔH_v) augmentée d'une chaleur d'adsorption Q_n qui correspond à l'établissement d'une liaison entre les molécules d'eau et le substrat. Cette chaleur peut être calculée à partir des isothermes d'adsorption grâce à la relation de Clausius-Clapeyron:

$$Q_t = Q_n + \Delta H_v \quad (1)$$

$$Q_n = -R \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (1/T)} \quad (2)$$

L'intégration de l'équation (2), en supposant que la chaleur isostérique de sorption est indépendante de la température donne l'équation suivante:

$$-\ln(a_w) = \left(\frac{Q_n}{R}\right) \frac{1}{T} + K \quad (3)$$

La courbe $-\ln(a_w) = f\left(\frac{1}{T}\right)$ (figure 6) permet de déterminer la chaleur Q_n .

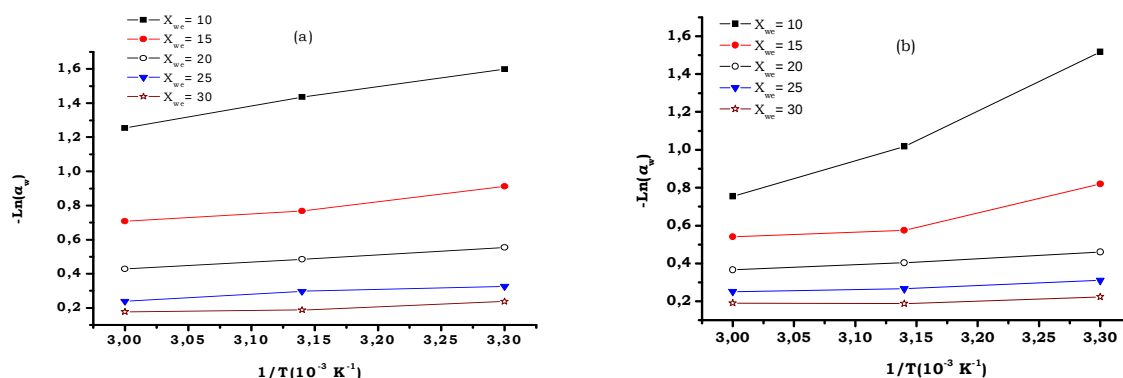


Figure 6: Courbe permettant de calculer la chaleur de sorption du *Gelidium sesquipedale*
-a- désorption, -b- adsorption

La régression polynomiale d'ordre 3 des données expérimentales a donné les équations suivantes pour la chaleur nette isostérique Q_n (kJ/mol) en fonction de teneur en eau à l'équilibre X_{we} (%) :

$$Q_n (\text{Désorption}) = 25.0739 - 2.1876 X_{we} + 0.0728 (X_{we})^2 - 8.6233 \cdot 10^{-4} (X_{we})^3$$

$$Q_n (\text{Adsorption}) = 89.2284 - 10.3042 X_{we} + 0.4055 (X_{we})^2 - 0.0053 \cdot 10^{-4} (X_{we})^3$$

Ces deux équations permettent de calculer la chaleur de sorption pour l'algue *Gelidium sesquipedale* pour différentes valeurs de la teneur en eau.

Les valeurs de la teneur en eau d'équilibre X_{we} à différentes températures et humidités et la chaleur nette isostérique calculées à partir des isothermes d'adsorption en utilisant les équations (1), (2) et (3) sont regroupées dans les tableaux 3 et 4 et leurs évolutions en fonction de la teneur en eau à l'équilibre sont présentées par la figure 7.

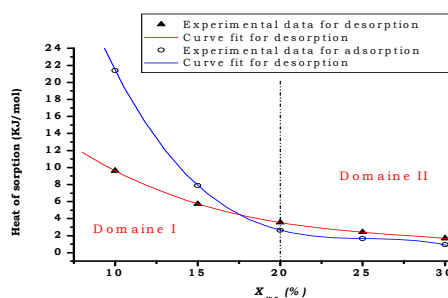


Figure 7 : Variation de la chaleur nette isostérique d'adsorption en fonction de la teneur en eau d'équilibre du *Gelidium sesquipedale*

Tableau 4 : Valeurs de la chaleur nette isostérique de sorption du *G. sesquipedale* pour différentes teneurs en eau.

X_{we} (%)	Q_n (kJ/mol) désorption	Q_n (kJ/mol) adsorption
10	9,6155	21,4018
15	5,7317	7,8937
20	3,5420	2,6470
25	2,4131	1,6604
30	1,6848	0,9251

Tableau 3 : Teneur en eau d'équilibre X_{we} à différentes températures et humidités.

(°C)	X_{we} (%)									
	10	15	20	25	30					
	Des	Ads	Des	Ads	Des	Ads	Des	Ads	Des	Ads
30	0,2023	0,2195	0,4018	0,4405	0,5743	0,6313	0,7213	0,7155	0,7884	0,7997
45	0,2378	0,3613	0,4642	0,5631	0,6153	0,6683	0,7428	0,7736	0,8289	0,8286
60	0,2855	0,4710	0,4926	0,5824	0,6518	0,6938	0,7867	0,8031	0,8369	0,8261

Dans l'intervalle de température étudié, la chaleur nette isostérique de l'algue à l'équilibre thermodynamique varie avec la teneur en eau d'équilibre : pour la désorption, de Q_n (30%) = 1.68 kJ/mol à Q_n (10%) = 9.61 kJ/mol et pour l'adsorption, de Q_n (30%) = 0,92 kJ/mol à Q_n (10%) = 21.4018 kJ/mol. La chaleur nette isostérique de sorption diminue lorsque la teneur en eau d'équilibre augmente.

4. Interprétation des résultats

Dans le but d'interpréter les résultats expérimentaux, relatifs à cette partie, il nous semble indispensable de rappeler que plusieurs théories ont été proposées pour décrire l'aspect énergétique des phénomènes d'adsorption et de désorption d'un gaz par un solide [14]. Il en ressort qu'il faut distinguer dès le début d'une étude entre chimisorption et physisorption. Dans certains cas, les deux contributions peuvent coexister. Cependant, au cours de ce travail, seul le phénomène de physisorption sera abordé puisque les interactions entre les molécules d'eau et l'algue étudiée, sont de type Van der Waals.

Pour l'algue rouge *Gelidium sesquipedale*, les cations compensateurs de charges se situent à l'intérieur des branches cylindriques de l'algue, constitués comme le montre la figure 1 par une infinité de cellules végétales baignantes dans des solutions aqueuses (acides, vitamines, des cations Le Potassium, le magnésium, le silicium,

le zinc, le manganèse, le sélénium, et le cuivre), Ces cations génèrent des champs électrostatiques qui sont dû à l'origine des interactions avec les molécules de l'adsorbat. Lorsque l'adsorbat est une molécule polaire H_2O , il existe alors des interactions entre le moment dipolaire de chacune des molécules et le champ de chaque cation compensateur de charges.

L'analyse de l'ensemble des résultats suggère que:

- (i) Pour des activités en eau $a_w < 0,20$, un premier type de molécules d'eau est à distinguer. Ce sont les molécules d'eau faiblement liées aux sites d'adsorption (molécules d'hydratation des cations) et qui apportent l'énergie nécessaire pour lutter contre la cohésion des cellules végétales. Ce type de molécules peut constituer les premières couches de molécules d'eau adsorbées. Dans ce domaine d'activité, la quantité d'eau adsorbée ou désorbée par l'algue, varie légèrement en fonction de l'activité de l'eau et tend vers un pseudo - palier au voisinage de 0,20. Les points expérimentaux obtenus par adsorption et par désorption ne se situent pas sur la même courbe et présentent un léger décalage. Dans ce cas, la réversibilité des phénomènes d'adsorption et de la désorption n'est pas vérifiée.
- (ii) Pour des activités en eau $a_w > 0,20$, il existe un second type d'eau : l'eau de mouillage et intercellulaires. Dans ce domaine, il convient de noter également une irréversibilité des transformations adsorption et désorption qui se caractérise par l'existence d'un phénomène d'hystérésis. Bien que le mécanisme de désorption se schématise de manière renversible, il n'est pas réversible. En effet, pour obtenir une capacité d'hydratation, il faut réaliser une pression de vapeur d'eau plus élevée en adsorption qu'en désorption ce qui se traduit par des branches d'adsorption et de désorption non confondues. Ceci s'explique par le fait que lors de l'adsorption, il faut vaincre des forces de cohésion des cellules plus ou moins accolés avant de procéder à la fixation de l'eau tandis que lors de la désorption, il faut vaincre des forces moindres correspondants aux interactions eau intercellulaire ou de mouillage.
- (iii) l'allure identique des isothermes d'adsorption et de la désorption obtenues a une forme sigmoïdale et permet de les classer dans le type II de la classification IUPAC [1]. Ce type d'isotherme est identique aux isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau dans les systèmes «Eau – Produits Agroalimentaires» et «Eau – Plantes Aromatiques et Médicinales» [15]. Ces dernières sont également constituées de cellules végétales dans lesquelles l'eau, molécule polaire, est adsorbée en se localisant sur les sites actifs (essentiellement les ions). L'adsorption est sous forme multicouche pour les faibles pressions relatives et s'opère sur les sites libres actifs. Pour des pressions relatives élevées, l'adsorption se fait sur les surfaces nues des branches et des membranes cellulaires et les premières couches d'eau formées. La condensation peut également avoir lieu dans ce cas, comme l'a déjà montré Prost [16]. L'arrangement des particules, des agrégats engendre des pores dont certains sont de grandes dimensions et dans lesquels la condensation se produit.
- (vi) Enfin, les courbes obtenues tendent asymptotiquement à la droite $a_w=1$. Dans ce domaine ou la saturation est obtenue l'algue présente une adsorption plus importante : ceci traduit la dilatation des membranes cellulaires qui entraîne la formation d'une solution aqueuse diluée. En effet, dans ce cas, une condensation capillaire dans les macropores de l'algue sèche vient s'ajouter à l'adsorption dans les cellules.

Les courbes de chaleurs d'adsorption de la vapeur d'eau par l'algue étudié qui ont été mises en évidence dans ce travail (Fig. 7), peuvent se rapprocher de celles obtenues par Ait Mohamed [6], Lemus et coll. [17] au cours de l'étude du phénomène d'adsorption de la vapeur d'eau par des échantillons d'algue, et Jamali et coll. [18] (plantes aromatiques) ainsi que d'argiles de Camp-Berteau saturés par différents type de cations (Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++}). Les études ont été réalisées à la température 298K pour des pressions relatives P/P_o allant de 0,05 jusqu'à 0,90. Les phénomènes thermiques observés pendant l'adsorption de la vapeur d'eau par ces argiles, ainsi que ceux observés par d'autres auteurs sont conformes à ceux que nous avons observés au cours de l'adsorption de la vapeur d'eau par l'algue. La comparaison de nos résultats expérimentaux (Fig. 7) avec les résultats précédents permet de distinguer deux domaines d'activité d'eau dans lesquels le phénomène d'adsorption se traduit par des énergies différentes:

- aux basses activités d'eau (Domaine I), la courbe calorimétrique montre une décroissance rapide de l'énergie mise en jeu. Cette diminution de la chaleur nette isostérique peut être attribuée à l'adsorption des premières couches aux niveaux des sites actifs.
- aux activités d'eau élevées (Domaine II) où l'on observe de faibles valeurs des chaleurs de sorption des molécules d'eau de mouillage ou intercellulaires.

Conclusion

L'originalité de cette étude consiste dans le tracé des isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau par l'algue rouge *Gelidium sesquipedale*. Les données d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau à différentes températures mettent en évidence deux types de molécules d'eau. Ces résultats soulignent le rôle essentiel que jouent les cations compensateurs de charges, dans le processus d'adsorption et de désorption.

Ces deux types d'eau sont confirmés par la détermination des chaleurs isostériques nettes d'adsorption et de désorption. Les résultats obtenus permettent de situer les discontinuités des chaleurs en fonction de la pression relative et en fonction de la capacité d'adsorption, donc de localiser deux états successifs d'hydratation. Les résultats obtenus sont conformes avec ceux de la littérature.

Nomenclature

Ads Adsorption
Des Desorption
 X_{we} Teneur en eau à l'équilibre

HR Humidités relatives
 a_w Activités d'eau à l'équilibre
R Constante des gaz parfaits

Références

- [1] K. S. W. Sing, D. H. Everett, R. A. W. Haul, L. Moscou, R. A. Pierotti, J. Rouquerol, T. Siemieniowska. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity, *Pure Appl Chem*, Volume 57, Pages 603–619, 1985.
- [2] A. Armisen, Agar, Agarose biotechnological applications, *Hydrobiology*, Volume 221, Pages 159-166, 1991
- [3] S. Petrovski, D. Tillett, Back to the kitchen: food-grade agar is a low-cost alternative to bacteriological agar, *Anal. Biochem.*, Volume 429, Pages 140–141, 2012.
- [4] M. R. Vignon, C. Rochas, R. Vuong, P. Tekely, H. Chanzy, *Gelidium sesquipedale* (Gelidiales Rhodophyta). II. An ultrastructural and morphological study. *Bo-tanica Marina*, Volume 37, Pages 331-340, 1994.
- [5] R. Armisen, Applications of agar-agar and agaroses in microbiology, electro-phoresis and chromatography. Proceedings of Workshop COST 49 Technology and Biotechnology of Algal Polysaccharides. *Future Trends*, Trieste: Published by European Commission EUR 18951, Pages 3-16, 1997.
- [6] L. Ait Mohamed, Etude physico-chimique de la qualité et de la conservation avant et après séchage solaire convectif du *Gelidium sesquipedale* (algue rouge) et du citrus aurantium (orange amer), Thèse de 3^{ème} Cycle, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc 2006.
- [7] A. Faraj. Contribution à l'étude qualitative des protéines de l'agarophyte *Gelidium sesquipedale*. Thèse de 3^{ème} Cycle, Faculté des Sciences, Rabat, Maroc 1987.
- [8] W. E. L. Spiess, W. R. Wolf, The results of the cost 90 project on water activity. In: R. Jowitt, F. Escher, B. Hallstrom, H.F.T. Meffert, W.E.L. Spiess, G. Vos editors. Physical properties of foods. London, NY: *Appl. Sci. Publ.* Pages 65-91, 1983.
- [9] AOAC, Official Methods of Analysis, 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Volume 2 Washington, DC. 1990.
- [10] H. Bizot, J. L. Multon, Méthode de référence pour la mesure de l'activité de l'eau dans les produits alimentaires, *Ann. Technol. Agric.*, Volume 27, Pages 441-445, 1978.
- [11] J. Greenspan, Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions, *J Res Natl Bur Stand Sect A* Volume 81A(1), Pages 89-96, 1977.
- [12] M. Ait Darham, Application de la technologie micro-onde dans le domaine du séchage des produits agro-alimentaires: cas des abricots, Thèse de 3^{ème} Cycle, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc, 1999.
- [13] T. P. Labuza, Sorption phenomena in food, *Food Techno. Chicago*, Volume 22(3), Pages 263-272, 1968.
- [14] I. Langmuir, L'adsorption de gaz sur des surfaces planes de verre, mica et Platine, *J. Am. Chem. Soc.*, Volume 40, 1361-1402, 1918.
- [15] C. T. Kiranoudis, Z. B. Maroulis, E. Tsami, D. Marinos-Kouris, Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables, *J. Food Eng.*, Volume 20, Pages 55-74, 1993.
- [16] R. Prost, Etude de l'hydratation des argiles: Interactions eau-minéral et mécanisme de la rétention de l'eau, Doctorat d'état Paris IV, France, 1975.
- [17] R. A. Lemus, M. Pérez, A. Andrés, T. Roco, C. M. Tello and A. Vega, Kinetic study of dehydration and desorption isotherms of red alga *Gracilaria*, *LWT - Food Science and Technology*, Volume 41, Pages 1592-1599, 2008.
- [18] A. Jamali, M. Kouhila, L. Ait Mohamed, J. T. Jaouhari, A. Idlimam and N. Abdenouri, Sorption isotherms of *Chenopodium ambrosioides* leaves at three temperatures, *J. Food Eng.*, Volume 72, Pages 77-84, 2006.