

Etude expérimentale et modélisation du séchage de boues générées par l'épuration des eaux usées

L. Bennamoun^{1*} et A. Leonard^{2†}

¹ Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes et Sciences Naturelles et de la Vie,

Université Larbi Ben M'Hidi, B.P. 358, Oum El Bouaghi, Algérie

² Laboratoire de Génie Chimique, Département de Chimie Appliquée, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, B6C Sart Tilman, 4000, Liège, Belgique

(reçu le 5 Mai 2010 – accepté le 25 Mars 2011)

Résumé - Dans ce travail, des résultats expérimentaux relatifs au séchage de boues générées dans deux stations d'épuration d'eaux usées sont présentés. Les expériences ont été effectuées dans un sécheur convectif reproduisant le fonctionnement d'un sécheur à bandes. Pour chaque essai, 1 kg de produit humide est extrudé en cylindres de 12 mm de diamètre sur une grille perforée au travers de laquelle l'air chaud circule. Le produit est séché jusqu'à élimination de la totalité de l'humidité initialement présente. Les résultats obtenus montrent que le procédé est affecté par plusieurs paramètres, tout particulièrement les conditions externes, c'est-à-dire les propriétés de l'air de séchage, comme la température, mais aussi par des conditions internes, c'est-à-dire la nature des boues. Les résultats expérimentaux ont été modélisés. Pour le 1^{er} type de boues, le modèle de Page a présenté les meilleurs résultats avec un coefficient de corrélation égal à 0.9996 et une erreur standard égale à 0.0081. Cependant, pour le 2^{ème} type de boues, le modèle polynomial de 4^{ème} degré donne des résultats comparables au modèle de Page, avec des coefficients de corrélation qui changent avec la température de l'air, mais qui avoisinent l'unité et avec des erreurs standard allant de 0.0037 et 0.081.

Abstract - In this work, experimental drying results of wastewater sludges generated by two wastewater treatment plant are presented. The experiments were effectuated in a convective dryer, reproducing similar functions of the belt dryer. For each essay, 1 kg of wet product is extruded in a 12 mm diameter cylinders, putted in perforated grid which allows circulation of the heated air. The product is dried until total elimination of product humidity. The obtained results show that drying process is affected by multiple parameters, in particular the properties of the heated air used for drying, such as its temperature, but also by internal conditions, represented by the nature of the sludges. The experimental results were modeled. For the 1st sort of sludge, Page model has presented better results with a correlation coefficient equal to 0.9996 and 0.0081 as standard error. However, for the 2nd sort of sludge's, the results obtained by the 4th degree polynomial model were comparable to those obtained by Page model with a coefficient of correlation near the unity and standard errors varying from 0.0037 to 0.081.

Mots clés: Séchage convectif - Profil d'humidité - Modélisation - Conditions de séchage.

1. INTRODUCTION

La recherche du confort quotidien et du bien-être socio-économique de l'être-humain a donné naissance à un développement industriel inconditionnel et incontrôlable

* lyes_bennamoun@yahoo.ca

† a.leonard@ulg.ac.be

qui augmente chaque année avec la croissance de la population mondiale. Cela en dépit, tout particulièrement, de l'environnement engendrant ainsi des conséquences alarmantes pour notre planète, comme le réchauffement climatique.

L'utilisation des modèles climatiques indique une augmentation de la température de surface du globe allant de 1.1 °C à 6.4 °C au cours du XXI^{ème} siècle [1]. La dégradation flagrante de l'environnement a obligé les nations à se mobiliser pour essayer de préserver, sinon d'améliorer, ce précieux environnement et participer au développement durable de cette planète.

Cette mobilisation s'est concrétisée par des sommets mondiaux appelés sommets de la terre, dont le premier s'est déroulé à Stockholm, Suède, en 1972. La lutte contre le réchauffement climatique s'est aussi concrétisée par la signature de protocoles, comme le protocole de Kyoto, Japon, en 1995, visant à la réduction des gaz à effet de serre, signé par 183 pays, mais boudé par les pays les plus polluants.

On retrouve parmi les conséquences du réchauffement climatique la sécheresse, rendant ainsi l'eau une source de vie importante qui nécessite qu'elle soit préservée, afin d'avoir un approvisionnement d'une façon continue et raisonnable de cette source. Cela peut déjà s'observer dans les régions sahariennes de l'Afrique et dans quelques régions de l'Asie comme le moyen orient où des moyens importants sont investis pour avoir et préserver cette précieuse eau.

Les efforts déployés pour la préservation et l'amélioration de l'environnement en Algérie restent insuffisants avec une industrie pétrolière et lourde dominante. Mais aussi avec une politique non-réelle et non-stricte de récupération et traitement des déchets. Les statistiques données par le Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme Algérien, effectuées en 2008, présentent uniquement 17 projets agréés traitant la gestion des déchets, 12 projets pour la pollution atmosphérique, et 7 projets touchant les ressources en eau [2]. On peut ainsi voir que cette dernière n'a pas encore le degré d'importance qu'elle devrait avoir.

Préoccupée par la situation actuelle de l'environnement et de sa sauvegarde, l'Union Européenne a mis en action une politique de récupération et de recyclage des déchets biodégradables qui sont mis en décharge [3]; mais également de collecte et de traitement des eaux urbaines résiduaires [4]. Il est nécessaire de noter que dans les pays Européens, on consomme 1500 litres d'eau par habitant et par jour, cette quantité diminue à 40 litres pour les pays en voie de développement, mais augmente à 4000 litres pour les Etats-Unis [5]. Cette consommation excessive entraîne d'énormes quantités d'eaux usées, qui peuvent jouer un rôle important dans la pollution de l'environnement.

L'utilisation des stations d'épuration est largement répandue comme solution à ce problème. Cependant, cela conduit à d'autres problèmes environnementaux, tout particulièrement la production de boues, un excès de biomasse, durant le processus d'épuration biologique. En Europe, la mise en décharge de ces boues est interdite, ainsi que le rejet en mer. Les deux voies majeures de valorisation sont la valorisation agricole et la valorisation énergétique, via l'incinération.

En 2004, en Belgique, la valorisation agricole des boues est estimée à 21 %, tandis que la mise en décharge est à seulement 8 % et que 32 % des boues sont utilisées en incinération [6]. Cependant, la Wallonie enregistre une valorisation agricole atteignant les 90 % contre 10 % des boues sont mises en décharge [5]. Ces valeurs sont

respectivement de 65 %, 15 % et 7 % pour l'Espagne et de 43.9 %, 22 % et 16 % pour la France [6].

Que ce soit en amont de la valorisation agricole ou énergétique, le séchage de ces boues constitue une étape importante dans leur traitement après la déshydratation mécanique. Cette étape permet de réduire leur contenu en eau jusqu'à 5 %, permettant ainsi de réduire la masse et le volume et en conséquence de diminuer les coûts de stockage, de manutention et de transport. De plus, l'élimination de l'eau augmente le pouvoir calorifique des boues en vue de leur incinération.

Vu les quantités croissantes de boues générées suite à l'augmentation du nombre de stations d'épuration, leur gestion est devenue une question préoccupante. L'étude scientifique du séchage des boues est relativement récente et de nombreux points restent encore à éclaircir, notamment le rôle joué par la nature de la boue sur son comportement au séchage. Cependant, quelques publications peuvent être citées considérant le séchage des boues générées de l'épuration des eaux usées. L'influence des conditions opératoires de séchage, que sont la température de l'air, sa vitesse et son humidité, a été étudiée, utilisant deux types de boues [7].

Les résultats ont montré que le comportement du produit durant le procédé de séchage diffère d'une boue à une autre. L'introduction de la microtomographie à rayons X a permis de suivre le comportement du produit durant le processus de séchage, de déterminer les profils d'humidité à l'intérieur du produit [8] et de suivre les différents changements de texture qui peuvent apparaître, comme le retrait, permettant ainsi le calcul de la porosité et la surface d'échange [9]. Vu le traitement récent de ce sujet, les résultats présentés sont des résultats expérimentaux et peu de travaux ont abordé la modélisation et la simulation du comportement des boues durant le séchage [10-13].

Dans ce travail, des résultats expérimentaux obtenus lors du séchage de boues de deux origines sont présentés, ainsi que la modélisation des cinétiques.

2. MATERIELS ET METHODES

Deux types de boues ont été collectés dans la station d'épuration de Mainz (Allemagne). La boue A est une boue mixte issue des décanteurs primaires et secondaires. La boue B est obtenue par ajout de scories à la boue A, de manière à faciliter son extrusion et améliorer sa texture.

Avant d'effectuer l'opération de séchage, les boues sont extrudées en cylindres de 12 mm de diamètre et disposées en lit sur une grille perforée. Un schéma simplifié du système de séchage est représenté à la figure 1.

Il s'agit d'un pilote reproduisant le fonctionnement d'un sécheur à bandes à courant croisé. L'air est alimenté via un ventilateur (noté **a** dans la figure 1), dont la fréquence est contrôlée afin de réguler la vitesse de l'air asséchant.

Cet air passe ensuite au travers de résistances électriques (notée **b**) afin de le porter à la température souhaitée. Si nécessaire, l'air chaud peut être humidifié en utilisant un générateur de vapeur. L'air est ensuite forcé au travers du lit de boue extrudée (**d**) qui est connecté à une balance (notée **e**).

Le pilote de séchage permet d'avoir le contrôle de la vitesse, de la température, ainsi que l'humidité de l'air. Quant aux cinétiques de séchage, elles sont obtenues par la mesure, en continue de la masse du produit.

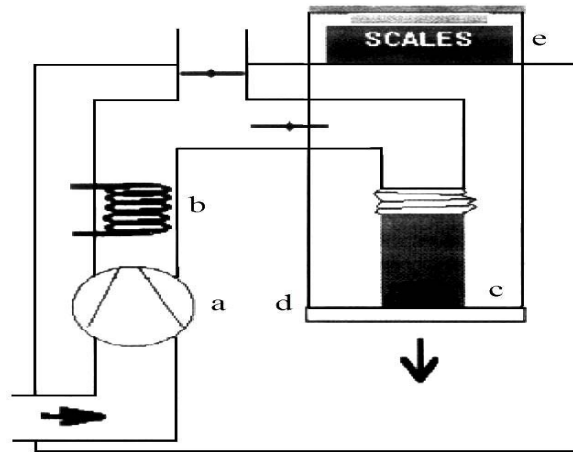


Fig. 1: Schéma simplifié du sécheur convectif [9]

Les conditions opératoires exercées sur les deux boues sont représentées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1: Conditions opératoires durant le séchage des deux boues

	Température (°C)	Vitesse (m/s)
Boue A	120	0.8
Boue B	120	1.73
	140	1.79

3. MODELISATION MATHEMATIQUE DES CINETIQUES DE SECHAGE

Les cinétiques de séchage sont fréquemment représentées par des modèles empiriques ou semi empiriques, pour les fruits et légumes par exemple [14, 15].

Cette approche bien que simplifiée par rapport aux modèles théoriques, tels que le modèle diffusif [16] ou le modèle de transport capillaire [17], permet d'aboutir rapidement à une représentation mathématique, dans une perspective d'optimisation. Les 9 modèles testés dans ce travail sont repris dans le **tableau 2**.

Les paramètres a , b , c , d , n , k , k_0 et k_1 varient selon le modèle utilisé.

M^* est la teneur en eau réduite, définie par l'équation suivante:

$$M^* = M / M_0 \quad (1)$$

M représente la teneur en eau, définie en base sèche (kg/kg), et t représente le temps (s).

L'ajustement paramétrique a été réalisé en utilisant le logiciel Curve-Expert. Pour chaque modèle, le coefficient de corrélation 'r' et l'erreur standard χ^2 définie par l'équation (2) sont déterminés.

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^N \frac{(M_{\text{expérimentale},i}^* - M_{\text{prédite},i}^*)^2}{N - z} \quad (2)$$

N est le nombre d'observations et z le nombre de constantes.

Tableau 2: Modèles mathématiques utilisés pour la modélisation des cinétiques de séchage des boues

N°	Equation du modèle	Nom du modèle	Réf.
1	$M^* = \exp(-kt)$	Newton	[18, 19]
2	$M^* = \exp(-kt^n)$	Page	[20, 21]
3	$M^* = a \times \exp(-kt) + c$	Logarithmique	[22, 23]
4	$M^* = a \times \exp(-k_0t) + b \times \exp(-k_1t)$	Two - term	[18, 21]
5	$M^* = 1 + a.t + b.t^2$	Wang et Singh	[18, 21]
6	$M^* = a + b.t + c.t^2 + d.t^3$	Polynôme 3 ^{ème} degré	
7	$M^* = a + b.t + c.t^2 + d.t^3 + e.t^4$	Polynôme 4 ^{ème} degré	
8	$M^* = a \times \exp(-kt)$	Henderson et Pabis	[18]
9	$M^* = a \times \exp(-kt) + (1-a) \times \exp(-kbt)$	Diffusion approach	[18]

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Des études précédentes ont montré qu'il est très difficile de prévoir le comportement au séchage des boues, à cause de la variation de leur composition et de leur texture, notamment.

Ainsi, des boues obtenues à partir du traitement des eaux usées d'origine industrielle peuvent être fortement différentes des boues générées lors du traitement d'eaux usées domestiques.

Ceci est clairement illustré par la figure 2 représentant l'évolution de la teneur en eau au cours du temps lors du séchage de deux boues d'origine différentes.

Ces deux boues se distinguent par leurs humidités initiales. Ainsi, le premier type de boue est caractérisé par une teneur en eau initiale égale à $M_A = 4.73 \text{ kg/kg}$ et le second type par une teneur initiale $M_B = 2.63 \text{ kg/kg}$.

La figure 2 représente les courbes de séchage obtenue pour une même quantité initiale des deux types de boue, à une température de 120 °C et des vitesses d'air qui valent respectivement: $V_A = 0.8 \text{ m/s}$ pour la boue A, $V_B = 1.73 \text{ m/s}$ pour la boue B.

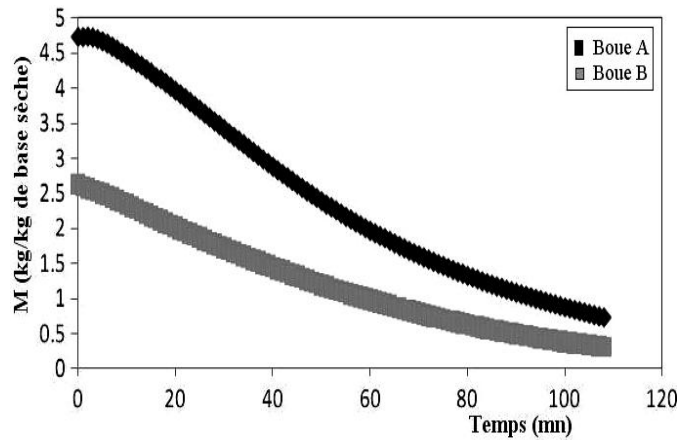


Fig. 2: Evolution de la teneur en eau au cours du temps

L'allure générale des courbes montre la diminution de la quantité d'eau se trouvant dans le produit, résultat du passage de l'air chauffé à la surface du produit et qui provoque l'évaporation de l'eau. Fréquemment, le séchage se divise en deux phases: lors de la première phase, l'air chauffé sert à l'évaporation de l'eau du produit (généralement représenté par une vitesse de séchage constante).

Tandis qu'en deuxième phase, l'énergie acquise sert à l'évaporation de l'eau du produit et à l'augmentation de sa température [24], représenté par la diminution de la vitesse de séchage.

L'analyse de la vitesse de séchage (dM/dt) de boues, comme il est illustré sur la figure 3, montre, d'une part, que les deux phases, citées précédemment, sont clairement observées avec une première phase qui n'est pas toujours constante [6].

En accord avec d'autres résultats [25-27], cette même figure montre que l'augmentation de la vitesse de l'air conduit à l'accroissement des échanges thermique ou massique et par conséquent à la réduction du temps de séchage et à l'augmentation de la vitesse de séchage.

D'autre part, le séchage de la boue A (c'est-à-dire la boue qui contient plus d'eau et moins de matière sèche) est plus rapide que celui de la boue B, alors que V_A est moins importante que V_B . Cela est en accord avec d'autres résultats obtenus, où on trouve que l'augmentation de la quantité de matière sèche conduit à l'augmentation du temps de séchage [24].

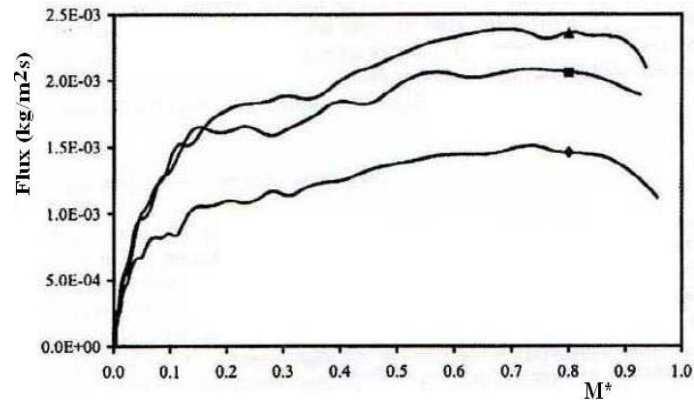


Fig. 3: Influence de la vitesse sur la cinétique de séchage sous les conditions suivantes: $T = 120^{\circ}\text{C}$, $Y = 0.006 \text{ kg/kg}$,
Et une vitesse (♦) 1 m/s ; (■) 2 m/s ; (▲) m/s

Y représente l'humidité relative de l'air exprimée en kg/kg.

La figure 4 illustre l'influence de la température de l'air sur le séchage de la boue B.

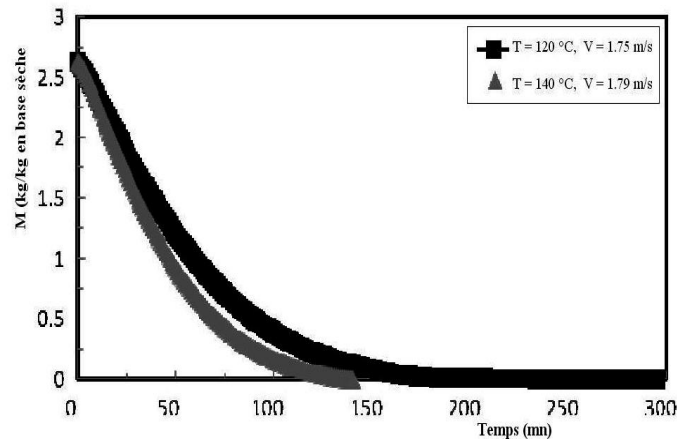


Fig. 4: Influence de la température sur la courbe de séchage de la boue B

En accord avec d'autres travaux [7], [25-29], l'analyse de la figure montre que l'augmentation de la température de l'air (ou en d'autres termes, une augmentation de l'apport en énergie) conduit à la réduction du temps de séchage.

Les résultats de la modélisation des courbes de séchage obtenues sur les deux types de boues, en utilisant différentes températures d'air pour le séchage, sont représentés dans les **tableaux 3** et **4**.

Ils montrent que pour la boue A, c'est le modèle de Page, proche du modèle de diffusion avec un paramètre de correction 'n', qui peut être sélectionné. Ce dernier, présente un coefficient de corrélation r égal à 0.9996 et une erreur standard χ^2 égale à 0.0081.

Pour la boue B, le modèle de Page permet également une bonne représentation des résultats expérimentaux, avec un coefficient de corrélation $r = 0.9997$ et une erreur standard $\chi^2 = 0.0064$, lors d'un séchage mené à une température de 120°C. Les paramètres du modèle changent avec l'augmentation de la température de séchage à 140°C, avec un coefficient de corrélation $r = 0.9997$ et une erreur standard $\chi^2 = 0.0081$.

Il est important de noter que pour la boue B, le modèle polynomial du 4^{ème} degré permet également une bonne représentation des résultats expérimentaux, avec un coefficient de corrélation r égal à 0.9998 et une erreur standard χ^2 égale à 0.005, à 120 °C. Ces valeurs passent respectivement à 0.9999 et 0.0037 à 140 °C.

Tableau 3: Analyse statistique des différents modèles pour la boue A
T = 120°C et $V_1 = 0.8\text{m/s}$

Modèle N°	Paramètre (s)	'r'	' χ^2 '
1	k = 0.0317	0.9859	0.0499
2	k = 0.0073, n = 1.40030	0.9996	0.0081
3	a = 1.1687, k = 0.0316, c = -0.0464	0.9967	0.0243
4	a = b = 0.5761 k ₀ = k ₁ = 0.0360	0.9938	0.0334
5	a = -0.0209, b = 0.0001	0.9923	0.0369
6	a = 1.0742, b = -0.0284 c = 0.0002, d = -7.1784×10 ⁻⁷	0.9994	0.0104
7	a = 1.0669, b = -0.0274 c = 0.0002, d = -3.0493×10 ⁻⁷ e = -1.5125×10 ⁻⁹	0.9994	0.0101
8	a = 1.1521, k = 0.0360	0.9938	0.0333
9	a = -5.1569, b = 1.1081 k = 0.0166	0.9937	0.0337

Tableau 4: Analyse statistique des différents modèles pour le séchage de la boue B et pour différentes températures de séchage

N°	Température 140			Température 120		
	Paramètre (s)	'r'	' χ^2 '	Paramètre (s)	'r'	' χ^2 '
1	k = 0.0219	0.9876	0.0475	k = 0.0176	0.9923	0.0340
2	k = 0.0059 n = 1.3307	0.9997	0.0081	k = 0.0053, n = 1.2837	0.9997	0.0064
3	a = 1.1771 k = 0.0187 c = -0.1116	0.9987	0.0155	a = 1.1097 k = 0.0176 c = -0.0276	0.9975	0.0196
4	a = b = 0.5567 k ₀ = k ₁ = 0.0243	0.9936	0.0348	a = b = 0.5508 k ₀ = k ₁ = 0.0192	0.9958	0.0252
5	a = -0.0159 b = 6.3856 × 10 ⁻⁵	0.9991	0.0127	a = -0.0105 b = 2.5872 × 10 ⁻⁵	0.9738	0.0606
6	a = 1.0390 b = -0.0184 c = 0.0001 d = -1.7870 × 10 ⁻⁷	0.9998	0.0067	a = 1.0228 b = -0.0143 c = 6.6035 × 10 ⁻⁵ d = 9.9725 × 10 ⁻⁸	0.9997	0.0063
7	a = 1.0238 b = -0.0162 c = 3.1292 × 10 ⁻⁵ d = 6.3003 × 10 ⁻⁷ e = -2.8882 × 10 ⁻⁹	0.9999	0.0037	a = 1.0336 b = -0.0151 c = 7.7294 × 10 ⁻⁵ d = -1.5916 × 10 ⁻⁷ e = 1.0074 × 10 ⁻⁹	0.9998	0.0051
8	a = 1.1133 k = 0.0243	0.9936	0.0345	a = 1.1017 k = 0.0192	0.9958	0.0251
9	a = 4.8335 b = 0.8329 k = 0.0111	0.9976	0.0213	a = -18.1239 b = 1.0256 k = 0.0106	0.9969	0.0217

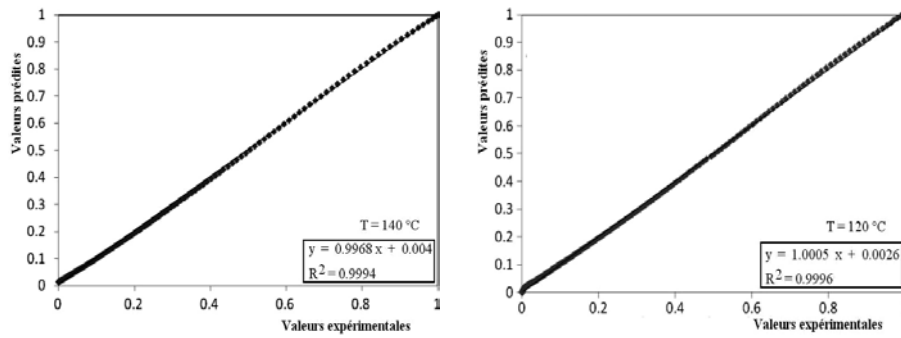


Fig. 5: Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par le modèle de Page pour 'Boue B' et pour plusieurs températures de séchage (Trait continu : valeur prédite, Point : valeur expérimentale)

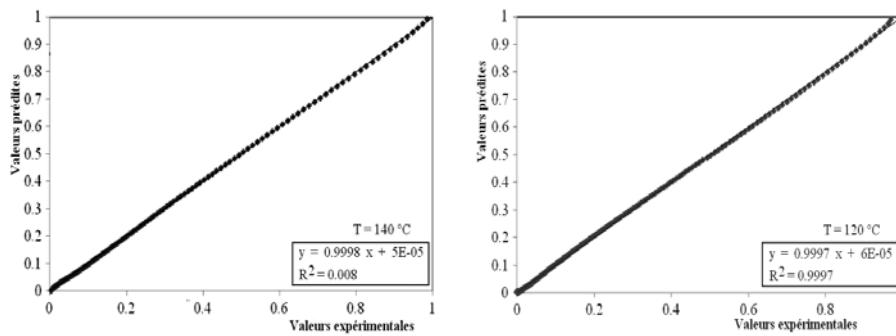


Fig. 6: Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par le modèle polynomial du 4^{ème} degré pour 'Boue B' et pour diverses températures de séchage (Trait continu : valeur prédite, Point : valeur expérimentale)

La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux prédits par le modèle sélectionné de Page, est présentée dans les figures 5 et 6. Elle présente d'excellents résultats avec des coefficients de corrélation qui avoisinent l'unité.

5. CONCLUSION

Le séchage des boues d'épuration est affecté par plusieurs paramètres. D'une part, on retrouve des facteurs extérieurs comme les conditions opératoires notamment la température de l'air. Ainsi, l'augmentation de la température de l'air conduit à la diminution du temps de séchage. D'autre part, la nature de la boue influence fortement le comportement lors du séchage.

Ce travail montre que, pour les boues étudiées, les modèles de Page ou polynôme du 4^{ème} degré peuvent être utilisés pour représenter les courbes de séchage.

Les différents paramètres de ces modèles changent avec les conditions opératoires ou le type de boue. La réalisation d'un plan expérimental plus vaste incluant

température, vitesse et humidité d'air suivi d'une étape de modélisation devrait permettre d'établir, pour différentes boues, la mise en équation des cinétiques de séchage, avec des paramètres variant avec conditions opératoires.

Cette représentation mathématique pourrait ensuite être utilisée pour optimiser la conduite de sécheur à boues.

REFERENCES

- [1] http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3A9chauffement_climatique
- [2] <http://www.matet.dz/>
- [3] Report, Conseil de l'Union Européenne. Directive 1999/31/EC du 26 avril 1999 du Conseil, *Relative à la Mise en Décharge de Déchets*. OJ L 182 16.07.1999.
- [4] Report, Conseil de l'Union Européenne. Directive 1991/271/EC du 21 mai 1991 du Conseil, *Relative au Traitement des Eaux Urbaines Résiduelles*. OJ L 135 30.05.1991.
- [5] A. Léonard, '*Etude du Séchage Convective de Boues de Station d'Épuration – Suivi de la Texture par Microtomographie à Rayons X*', Thèse de Doctorat, Université de Liège, 2002.
- [6] Report, Eurostat de la commission Européenne du 19 Mars 2010, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/product_results/search_results?mo=containtsall&ms=boue&saa=&p_action=SUBMIT&l=f&co=equal&ci=,&po=equal&pi=,
- [7] A. Léonard, S. Blacher, P. Marchot, J.P. Pirard and M. Crine, '*Convective Drying of Wastewater Sludges: Influence of Air Temperature, Superficial Velocity and Humidity on the Kinetics*', *Drying Technology*, Vol. 23, N°8, pp. 1667 – 1679, 2005.
- [8] A. Léonard, S. Blacher, P. Marchot, J.P. Pirard and M. Crine, '*Moisture Profiles Determination during Convective Drying using X-ray Microtomography*', *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 83, N°1, pp. 127 – 137, 2005.
- [9] A. Léonard, E. Meneses, E. Le Trong, T. Salmon, P. Marchot, D. Toye and M. Crine, '*Influence of Back Mixing on the Convective Drying of Residual Sludges in a Fixed Bed*', *Water Research*, Vol. 42, N°10-11, pp. 2671 – 2677, 2008.
- [10] D.S. Albino, P.R. Barros, J.S. da Rocha Neto, A.C. van Haandel and P.F. Cavalcanti, '*Modelling and Estimation of Physical Parameters in a Sludge System*', *Water Science and Technology*, Vol. 45, N°4-5, pp. 389 – 396, 2002.
- [11] I. Seginer and M. Bux, '*Modeling Solar Drying Rate of Wastewater Sludge*', *Drying Technology*, Vol. 24, N°11, pp. 1353 – 1363, 2006.
- [12] J.H. Ferasse, P. Arlabosse and D. Lecompte, '*Heat, Momentum and Mass Transfer Measurements in Indirect Agitated Sludge Dryer*', *Drying Technology*, Vol. 20, N°4-5, pp. 749 – 769, 2002.
- [13] J. Vaxelaire and J.R. Puiggali, '*Analysis of the Drying of Residual Sludge: From the Experiment to the Simulation of a Belt Dryer*', *Drying Technology*, Vol. 20, N°4-5, pp. 989 – 1008, 2002.
- [14] C.T. Kiranoudis, Z.B. Maroulis and D. Marinos-Kouris, '*Model Selection in Air Drying of Foods*', *Drying*, Vol. 92, pp. 785 – 793, 1992.
- [15] C.T. Kiranoudis, Z.B. Maroulis and D. Marinos-Kouris, '*Drying Kinetics of Onion and Green Pepper*', *Drying Technology*, Vol. 10, N°4, pp. 995 – 1011, 1992.

- [16] R.B. Keey, 'Drying of Loose and Particulate Materials', Hemisphere Pub. Corp. (1992) 215-254.
- [17] S. Whitaker, 'Heat and Mass Transfer in Granular Porous Media', Advances in drying, Chapter two, pp. 23 – 61, 1984.
- [18] I.T. Togrul and D. Phelivan, 'Modelling of Drying Kinetics of Single Apricot', Journal of Food Engineering, Vol. 58, N°1, pp. 23 – 32, 2003.
- [19] H. Amellal and S. Benamara, 'Vacuum Drying of Common Date Pulp Cubes', Drying Technology, Vol. 26, N°3, pp. 378 – 382, 2008.
- [20] V.T. Karathanos and V.G. Belessiotis, 'Application of Thin Layer Equation to Drying Data of Fresh and Semi-Dried Fruits', Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 74, pp. 1389 – 1401, 1999.
- [21] I. Doymaz, 'Sun Drying of Figs: an Experimental Study', Journal of Food Engineering, Vol. 71, N°4, pp. 403 – 407, 2005.
- [22] A. Boubekri, H. Benmoussa and D. Mennouche, 'Solar Drying Kinetics of Date Palm Fruits Assuming a Step-Wise Air Temperature Change', Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 4, N°3, pp. 292 – 304, 2009.
- [23] E.K. Akpınar, 'Determination of Suitable Thin Layer Drying Curve Model for Some Vegetables and Fruits', Journal of Food Engineering, Vol. 73, N°1, pp. 75 – 84, 2006.
- [24] L. Bennamoun and A. Belhamri, 'Design and Simulation of a Solar Dryer for Agriculture Products', Journal of Food Engineering, Vol. 59, N°2-3, pp. 259 – 266, 2003.
- [25] L. Bennamoun and A. Belhamri, 'Study of Heat and Mass Transfer in Porous Media: Application to Packed-Bed Drying', Fluid Dynamics & Materials Processing, Vol. 4, N°4, pp. 221 – 230, 2008.
- [26] L. Bennamoun and A. Belhamri, 'Numerical Simulation of Drying Under Variable External Conditions: Application to Solar Drying of Seedless Grapes', Journal of Food Engineering, Vol. 76, N°2, pp. 179 – 187, 2006.
- [27] L. Bennamoun and A. Belhamri, 'Study of Convective Heat and Mass Transfer in a Porous Media: Application to Packed Bed Drying', Drying, 2006, Proceeding of the 15th International Drying Symposium, Budapest, Hungary, Edited by I. Farkas, Serie Editor: A.S. Mujumbar, Vol. A, pp. 532 – 538, 20-23 August 2006.
- [28] L. Bennamoun, A. Belhamri and A. Ali Mohamed, 'Application of Diffusion Model to Predict Drying Kinetics Changes under Variable Conditions: Experimental and Simulation Study', Fluid Dynamics & Materials Processing, Vol. 5, N°2, pp. 177 – 192, 2009.
- [29] L. Bennamoun and A. Belhamri, 'Mathematical Description of Heat and Mass Transfer during Deep Bed Drying: Effect of Product Shrinkage on Bed Porosity', Applied Thermal Engineering, Vol. 28, N°17-18, pp. 2236 – 2244, 2008.