

Evaluation par la méthode inverse des cinétiques de séchage d'un lit fixe de particules

Aymen Sdayria ^{1*}, Jalila Sghaier ^{2†}, Marko Vauhkonen ³ et Afif El Cafsi ¹

¹ Laboratoire d'Énergétique et des Transferts Thermiques et Massique, LETTM
Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis Al-Manar, Tunisie

² Unité de Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir
Avenue Ibn El Jazzar 5019 Monastir, Université de Monastir, Tunisie

³ Département de Physique Appliquée, Université de Korpio, Finlande Orientale
B.P. 1627, Fi-70211 Kuopio, Finlande

(reçu le 20 Novembre 2013 – accepté le 28 mars 2015)

Résumé - Dans ce travail, on utilise la tomographie de capacitance électrique (ECT) pour déterminer les cinétiques de séchage d'une couche mince de la silice. Cette technique est une modalité d'imagerie électrique dans laquelle la répartition de la permittivité à l'intérieur du produit à sécher est calculée à partir des mesures de la capacitance électrique au sein du produit et à l'aide des algorithmes mathématiques. La distribution d'humidité est estimée calculée à partir d'un étalonnage de la permittivité électrique, déterminée expérimentalement au cours du processus de séchage. Dans le présent travail, des estimations de la teneur en eau moyenne ont été déterminées et présentées. Les résultats obtenus présentent une bonne précision vis-à-vis des résultats de l'étalonnage.

Abstract - In this work, we use the electrical capacitance tomography (ECT) to determine drying kinetics if a thin layer of silicon. This technique is an electrical imaging modal in which the permittivity distribution into the product to be dried is calculated from measuring electrical capacitance within the product and using mathematic algorithms. Moisture distribution is evaluated from electrical permittivity calibration experimentally determined during the process of drying. In the present work, estimations on the average water content have been made and presented. Obtained results show good accuracy toward calibration results.

Mots clés: Tomographie de capacitance électrique - Permittivité électrique - Séchage - Milieu granulaire - Cinétiques de séchage.

1. INTRODUCTION

Le séchage des grains humides est un procédé utilisé dans divers secteurs industriels, tels que l'industrie pharmaceutique, chimique et dans les industries agroalimentaires. Ce processus est généralement effectué dans un sécheur à lit fixe ou à lit fluidisé.

Dans ce travail, une étude expérimentale du séchage d'une couche mince des particules sphériques poreuses de la silice (dioxyde de silicium SiO₂), est présentée. Ces grains humides caractérisés par un diamètre moyen égal à 4.2 mm sont introduits dans une chambre de séchage de forme cylindrique traversée par un écoulement d'air chaud dans le but d'extraire le maximum d'humidité contenue dans ces particules.

Les caractéristiques du fluide séchant sont contrôlées. Souvent, on cherche à obtenir une certaine teneur en humidité dans les particules humides qui doit être suffisante pour

* sdayria_aymen@hotmail.fr , afif.elcafsi@fst.rnu.tn

† jalila.sghaier@enim.rnu.tn , marko.vauhkonen@uef.fi

garantir la qualité du produit final. En outre, l'hydrodynamique des granulés pendant le séchage a une incidence sur la qualité du produit final. Par exemple, un débit d'air séchant très élevé peut entraîner une attrition des granules et l'entraînement de particules fines.

Par contre, un débit faible de l'air séchant peut être inefficace. Beaucoup des travaux de recherche se sont intéressés à l'étude de l'hydrodynamique des lits fixes et des lits fluidisés au cours de processus du séchage. [1, 3, 7, 8]

Dans cette étude, la technique de la tomographie de capacitance électrique (ECT) est utilisée pour la surveillance continue de la distribution tridimensionnelle de la teneur en eau continue dans une couche mince de la silice au cours du séchage.

Avec cette technique, l'estimation de la permittivité électrique du milieu granulaire formé par des grains de silice est déterminée à l'aide des mesures de la capacitance électrique de ce milieu et en utilisant des algorithmes mathématiques. La teneur en eau volumique contenue dans la couche de la silice est ensuite déduite expérimentalement à partir d'un étalonnage fait au cours du processus de séchage.

L'expérience de séchage est réalisée par un séchoir convectif produisant un flux d'air chaud dont la température est de l'ordre de 65 °C.

2. THEORIE

Dans cette partie, une brève description de la technique de tomographie de capacitance électrique, ainsi que la méthode inverse utilisée pour l'obtention de la permittivité électrique sont présentées.

2.1 Estimation de la distribution de la permittivité

Le domaine de calcul choisi est représenté par Ω . La permittivité électrique prise pour $x \in \Omega$ est définie par l'équation suivante:

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(x) \quad (1)$$

Où, ε_0 est la permittivité du vide $\varepsilon_0 \approx 8.8542 \times 10^{-12}$ F/m et $\varepsilon_r(x) \geq 1$ est la permittivité relative du milieu. Dans le problème inverse (la méthode d'imagerie électrique dans notre cas), un modèle reliant les mesures de la capacité électrique, la distribution du potentiel électrique $u(x)$ et les charges électriques q_1 des électrodes a été développé.

Le problème électrique peut être résolu à partir de l'équation suivante:

$$\nabla \cdot \varepsilon(x) \nabla \cdot u(x) = 0, x \in \Omega \quad (2)$$

En posant les conditions aux limites suivantes:

$$u = 0, x \in \partial\Omega_{\text{écr}} \quad U_{l=1}^{N_e} e_l / e_{\text{ex}} \quad (3)$$

$$u = V, x \in e_{\text{ex}} \quad (4)$$

$$\varepsilon(x) \frac{\partial u}{\partial \nu} = 0, x \in \partial\Omega \setminus \left\{ \partial\Omega_{\text{écr}} \quad U_{l=1}^{N_e} e_l \right\} \quad (5)$$

Où $\partial\Omega$ est la frontière du domaine de calcul Ω , et $\partial\Omega_{\text{écr}}$ indique les frontières des écrans mises à terre (reliés à la terre), e_l est la $l^{\text{ème}}$ électrode, N_e est le nombre des électrodes, e_{ex} est l'électrode d'excitation, V est la tension d'excitation et $\frac{\partial u}{\partial \nu}$ est la

dérivée du potentiel dans la direction du vecteur normal unitaire sortant ν (vers l'extérieur de la surface de l'électrode). La condition de l'équation (3) est valable sur la surface des électrodes de détection et sur les écrans mis en terre, et la condition (4) est valide sur l'électrode d'excitation. La condition (5) est valable sur les frontières qui ne sont pas en métal et par suite, ils ne sont pas soumis à aucun potentiel spécifique. Cette condition signifie que le champ électrique de déplacement est nul dans la direction de la normale aux frontières.

La charge électrique sur la surface de la $i^{\text{ème}}$ électrode peut être calculée comme suit:

$$q_i(\varepsilon) = -\int_{e_i} \varepsilon(x) \frac{\partial u(x)}{\partial \nu} dS \quad (6)$$

Où, e_i représente la surface de la $i^{\text{ème}}$ électrode.

Ainsi, le modèle le plus utilisé pour les mesures de la capacitance électrode dans la forme discrète est:

$$C = -\frac{1}{V} \cdot q(\varepsilon) + V_c \quad (7)$$

Où, $C = [C_1, \dots, C_m]^T$ est le vecteur contenant les mesures de la capacitance électrique par rapport à l'électrode d'excitation et m est le nombre des mesures faites.

$\varepsilon = [\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n]^T$ est la distribution de la permittivité discrétisé, n est le nombre des points de la discrétisation.

$q(\varepsilon) = [q_1(\varepsilon), \dots, q_m(\varepsilon)]^T$ est un vecteur reliant la distribution de la permittivité avec les charges électriques sur les électrodes (comme il est défini dans l'équation (6) pour une des électrodes.

$V_c = [v_1^c, \dots, v_m^c]^T$ est le vecteur définissant la mesure additive du bruit. Pour le reste des calculs, le modèle présenté précédemment est modifié sous la forme suivante:

$$Q = -V \cdot C = q(\varepsilon) + V_q \quad (8)$$

Où, $Q = [Q_1, \dots, Q_m]^T$ est un vecteur indiquant les charges électriques qui

correspondent aux valeurs des capacitances mesurées, et $V_q = [v_1^q, \dots, v_m^q]^T$ est la mesure additive du bruit qui est en relation avec les charges électriques. Le modèle défini par l'équation (8) est choisi parce que les charges électriques sont dans certains cas induit par plusieurs excitations simultanées.

Dans ce travail, la méthode de la différence de reconstruction est utilisée pour résoudre le problème inverse. Dans cette méthode, la différence entre la distribution de la permittivité a déterminé ε et celle de la permittivité de référence ε_{ref} est estimée en se basant sur la différence entre les valeurs de Q mesurées et les valeurs des charges de référence Q_{ref} .

$$\varepsilon - \varepsilon_{\text{ref}} = \left(J^T J + \alpha_\varepsilon L_\varepsilon^T L_\varepsilon \right)^{-1} J^T (Q - Q_{\text{ref}}) \quad (9)$$

$$\varepsilon - \varepsilon_{\text{ref}} = K \cdot (Q - Q_{\text{ref}}) \quad (10)$$

Dans l'équation (9), J représente la matrice Jacobéenne, α_ε est un scalaire positif, dit paramètre de régularisation et L_ε est appelée matrice de régularisation. Finalement, K est dite matrice de reconstruction. Le terme de régularisation est nécessaire pour l'obtention de la matrice de reconstruction, car la matrice Jacobéenne présente quelques déficits occasionnels.

La matrice Jacobéenne de dimension ($m \times n$) est défini comme suit:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial q_1}{\partial \varepsilon_1} & \frac{\partial q_1}{\partial \varepsilon_2} & \dots & \dots & \frac{\partial q_1}{\partial \varepsilon_n} \\ \frac{\partial q_2}{\partial \varepsilon_1} & \frac{\partial q_2}{\partial \varepsilon_2} & \dots & \dots & \frac{\partial q_2}{\partial \varepsilon_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_1} & \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_2} & \dots & \dots & \frac{\partial q_m}{\partial \varepsilon_n} \end{bmatrix}$$

La matrice Jacobéenne est calculée exactement comme elle est décrite par Kaipio *et al.* [6]. Elle est évaluée par rapport à un point de linéarisation bien choisi. Habituellement, le point de linéarisation correspond à la distribution de la permittivité de référence.

2.2 Estimation de la distribution de la teneur en eau

Souvent, la variable recherchée dans les problèmes inverses n'est autre que la distribution de la permittivité électrique. Dans ce présent travail, la quantité à déterminer est la distribution de la teneur en eau dans les grains humides de la silice.

Ceci peut être directement estimé s'il existe un rapport fonctionnel entre les deux variables. Ce rapport fonctionnel existant entre la permittivité électrique et la teneur en eau peut être déduit facilement à partir d'un étalonnage de la permittivité électrique établi au cours du processus du séchage.

Dans cette étude, la méthode de différence de reconstruction est choisie parce qu'il a été montré dans des études précédentes qu'elle est très robuste et qu'elle est très rapide dans le calcul, ce qui la rend bien appropriée pour la surveillance en ligne de la teneur en eau au cours du processus du séchage.

3. MATERIELS ET METHODES

Au cours de cette expérience, 213.5 g de la Silice, formée par des grains quasi-sphériques dont le diamètre moyen est égal 4.25 mm et dont la teneur en eau initiale est égale à 24.99 % (à base sèche) sont placés dans un sécheur convectif dans le but de contrôler l'évolution de la teneur en eau du produit au cours du processus de séchage.

3.1 Equipement de la tomographie de capacitance électrique

La sonde de la tomographie de capacitance électrique utilisée dans ce travail est constituée d'une cuvette (réservoir) en plexiglas contenant le produit à sécher, trois vecteurs d'électrodes dont chaque vecteur contenant douze électrodes et un écran en cuivre engendrant la face externe de la cuvette.

Parmi les électrodes installées, il y a des électrodes qui servent à mesurer les capacitances électriques et d'autres qui sont mises à la terre. La cuvette est de forme cylindrique de diamètre 110 mm et de hauteur 300 mm. Notons que les électrodes sont

installées sur la surface externe de la cuvette (c'est-à-dire que les électrodes ne touchent jamais le produit). Plus d'informations sur l'installation des électrodes peuvent être trouvées dans ces références. [2, 7–9].

3.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans ce travail est présenté dans la figure 1. Il s'agit d'une chambre de séchage de forme cylindrique, alimentée de trois vecteurs d'électrodes dont chaque vecteur contenant douze électrodes est situé aux bords d'une section transversale du cylindre. Ce cylindre couvert par un écran en cuivre est équipé aussi de 14 thermocouples, installés de la même façon que les vecteurs d'électrodes afin de contrôler la température du produit dans différentes positions au cours de séchage.

Les vecteurs d'électrodes sont connectés à un système de tomographie de capacitance électrique (PTL300) avec un module d'acquisition des données DAM-200 qui permet de calculer et stocker les valeurs absolues de la capacitance électrique durant tout le processus de séchage.

Les mesures de la capacitance sont prises sur trois plans transversaux où les vecteurs d'électrodes sont installés. Le potentiel d'excitation utilisé dans ces mesures est fixé à 15 V et une fréquence égale 1.25 MHz.

La source de l'air séchant utilisée pour sécher la silice contenue dans le cylindre provient d'un pistolet à air chaud (HG 2310 LCD) à régularisation électronique permettant un réglage continu de la température et du débit d'air.

A la sortie du cylindre rempli de grains de la silice, un appareil de mesure du débit d'air volumique est installé afin de surveiller le débit d'air sortant du cylindre. Dans ce travail, la température du séchage utilisée pour sécher le produit est fixée à 65 °C et le débit volumique d'air sortant est fixé à 20 l/min.

Enfin, l'air chaud sortant de la chambre de séchage est ensuite véhiculé vers un aspirateur pour être dispersé dans le vide.



Fig. 1: Dispositif expérimental du séchoir convectif

Le dispositif est constitué d'une chambre de séchage (1), d'un système de tomographie de capacitance électrique (2), d'un pistolet à air chaud (3), d'un micro-ordinateur enregistrant les valeurs de températures détectées par l'ensemble des thermocouples installés (4), d'un contrôleur de débit volumique d'air sortant de la chambre de séchage (5), et d'un aspirateur (6).

3.3 Résolution numérique

Le problème inverse posé dans ce travail a été résolu par la méthode des éléments finis. La distribution du potentiel électrique (dans le problème direct) et celle de la

permittivité électrique (dans le problème inverse) ont été estimées dans une base de mailles linéaires.

Le problème direct a été résolu dans des mailles constituées de 178 176 nœuds et 1 024 647 éléments tétraédriques, alors que le problème inverse a été résolu dans des mailles constituées de 10 300 nœuds et 54 504 éléments tétraédriques. L'élément de volume d'une maille dans le problème inverse varie de 60mm³ à 370 mm³.

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 Etalonnage de la permittivité électrique

La figure 2 représente la fonction inconnue $\varepsilon(\chi)$ déduite de l'étalonnage fait pour un échantillon du produit pris chaque 10 min au cours de séchage et reliant la permittivité électrique à la teneur en eau volumique du produit. Cette courbe est lissée par un polynôme de degré 5 (courbe de tendance) [10].

Le polynôme déduit de cette figure est de la forme suivante:

$$\varepsilon(\chi) = 0.82681 + 0.21086 \times \chi - 0.0371 \times \chi^2 + 0.00352 \times \chi^3 - 1.52277 \cdot 10^{-4} \times \chi^4 + 2.42562 \cdot 10^{-6} \times \chi^5 \quad (11)$$

Le coefficient de corrélation de la courbe de tendance obtenue est: $R = 0.996$.

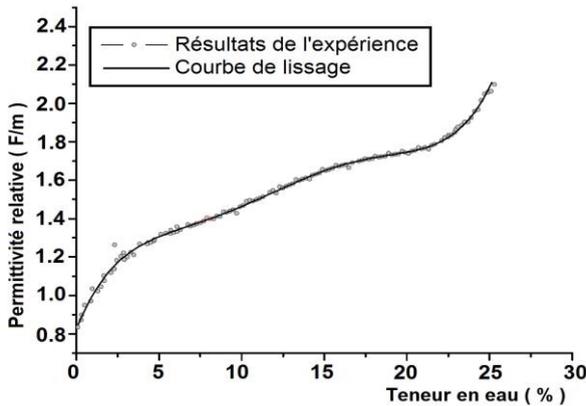


Fig. 2: Courbe d'étalonnage de la teneur en eau

Le polynôme de degré cinq obtenu à partir de cet étalonnage et reliant la teneur en eau volumique de la permittivité électrique moyenne du produit nous servira par suite à déterminer l'estimation de la distribution de la teneur en eau du produit toute en estimant la distribution de la permittivité dans le produit au cours du processus de séchage.

4.2 Cinétiques de séchage de la silice

La figure 3 représente l'évolution de la teneur en eau, ainsi que de la vitesse de séchage au cours du processus de séchage. Dans cette figure, on remarque qu'au début du séchage (les sept premières minutes), il existe une période dite période d'initialisation ou période de mise en contact durant laquelle l'humidité contenue dans les pores du produit migre des interstices internes de chaque particule vers la surface de contact grain-air sous l'effet du gradient de température.

Ensuite, une deuxième période de séchage est lancée. Cette période qui dure presque 01h 28min est caractérisée par une vitesse de séchage très élevée indiquant l'évaporation de l'eau contenu dans le produit.

Après 1h 35min du séchage, une troisième période caractérisée par une vitesse de séchage constante est lancée. Pendant cette période, la température du solide reste constante et égale à la température humide de l'air.

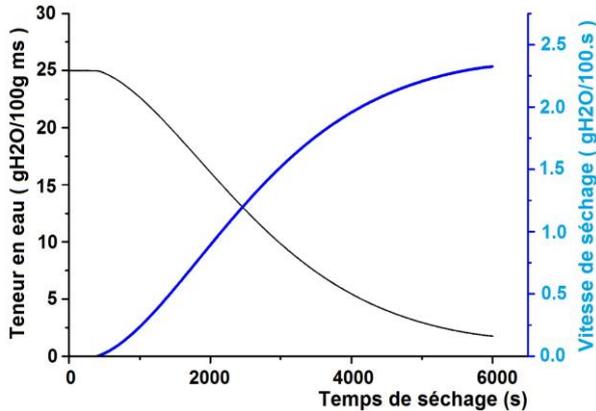


Fig. 3: Cinétiques de séchage de la silice

5. CONCLUSION

Les résultats présentés dans ce papier sont obtenus avec une bonne précision à partir de la résolution du problème inverse de la permittivité électrique. Il a été montré d'après ces résultats que la technique de la tomographie de capacitance électrique peut contribuer parfaitement à la surveillance en ligne de la teneur en eau contenue dans un produit à sécher.

Les résultats obtenus ont permis d'expliquer les transferts de masse et de chaleur qui se produisent au cours du processus de séchage.

REFERENCES

- [1] D. Vervloet, J. Nijenhuis and J.R. Van Ommen, 'Monitoring a Lab-Scale Fluidized Bed Dryer: A Comparison between Pressure Transducers, Passive Acoustic Emissions and Vibration Measurements', Powder Technology, Vol. 197, N°1-2, pp. 36 - 48, 2010.
- [2] G. Chaplin, T. Pugsley and C. Winters, 'Application of Chaos Analysis to Pressure Fluctuation Data from a Fluidized Bed Dryer Containing Pharmaceutical Granule', Powder Technology, Vol. 142, N°2-3, pp. 110 - 120, 2004.
- [3] L. de Martín, K. van den Dries and J.R. van Ommen, 'Comparison of Three Different Methodologies of Pressure Signal Processing to Monitor Fluidized-Bed Dryers/Granulatorst', Chemical Engineering Journal, Vol. 172, N°1, pp. 487 - 499, 2011.
- [4] M. Wormsbecker and T. Pugsley, 'The Influence of Moisture on the Fluidization Behaviour of Porous Pharmaceutical Granule', Chemical Engineering Science, Vol. 63, N°16, pp. 4063 - 4069, 2008.

- [5] M. Wormsbecker, T. Pugsley and H. Tanfara, '*Interpretation of the Hydrodynamic Behaviour in a Conical Fluidized Bed Dryer*', Chemical Engineering Science, Vol. 64, N°8, pp. 1739 - 1746, 2009.
- [6] J.P. Kaipio, V. Kolehmainen, E. Somersalo and M. Vauhkonen, '*Statistical Inversion and Monte Carlo Sampling Methods in Electrical Impedance Tomography*', Inverse Problems, Vol. 16, N°5, pp. 1487 - 1522, 2000.
- [7] G. Chaplin, T. Pugsley, L. van der Lee, A. Kantzas and C. Winters, '*The Dynamic Calibration of an Electrical Capacitance Tomography Sensor Applied to the Fluidized Bed Drying of Pharmaceutical Granule*', Measurement Science and Technology, Vol. 16, N°6, pp. 1281 - 1290, 2005.
- [8] H. Tanfara, T. Pugsley and C. Winters, '*Effect of Particle Size Distribution on Local Voidage in a Bench-Scale Conical Fluidized Bed Dryer*', Drying Technology, Vol. 20, N°6, pp. 1273 - 1289, 2002.
- [9] T. Pugsley, H. Tanfara, S. Malcus, H. Cui, J. Chaouki and C. Winters, '*Verification of Fluidized Bed Electrical Capacitance Tomography Measurements with a Fiber Optic Probe*', Chemical Engineering Science, Vol. 58, N°17, pp. 3923 - 3934, 2003.
- [10] V. Rimpiläinen, L.M. Heikkinen and M. Vauhkonen, '*Moisture Distribution and Hydrodynamics of Wet Granules During Fluidized-Bed Drying Characterized with Volumetric Electrical Capacitance Tomography*', Chemical Engineering Science, Vol. 75, pp. 220 - 234, 2012.