

Transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux. Application au séchage de la bagasse de canne à sucre par comparaison numérique et expérimentale.

Paul GUILLOU^{1*}, Olivier MARC¹, Laetitia ADELARD¹, Daniel MADYIRA², Esther AKINLABI², Jean CASTAING-LASVIGNOTTES¹

¹Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l’Energie, l’environnement et le bâtiment (PIMENT). Université de La Réunion, 15 Avenue René Cassin, Sainte-Clotilde 97715, La Réunion

²Department of Mechanical Engineering Science, Faculty of Engineering and the Built Environment, University of Johannesburg, South Africa.

*paul.guillou@univ-reunion.fr

Résumé – La biomasse représente une ressource renouvelable et abondante pouvant faire l’objet de différentes valorisations (énergétique, matériaux de construction, paillage agricole par exemple) pour lesquelles le séchage peut représenter une étape nécessaire. Dans cette étude nous étudions la bagasse de canne à sucre pour une géométrie cylindrique en deux dimensions grâce à une approche expérimentale et numérique. Les variables suivies sont la teneur en eau globale, l’humidité relative locale et la température à 9 positions différentes dans l’échantillon au cours du temps. La comparaison des approches a permis l’identification de 4 coefficients de transferts du modèle et permet alors de simuler les dynamiques locales et globales lors du séchage.

Mots-clés : Séchage, Milieux poreux, Modélisation, Simulation, Expérimentation

Abstract – Biomass is a renewable and abundant resource that can be used in various ways (energy, building materials, agricultural mulching for example) for which drying can be a necessary process. In this study we study sugarcane bagasse for a two-dimensional cylindrical geometry using an experimental and numerical approach. The variables monitored are the global water content, the local relative humidity and the temperature at 9 different positions in the medium over time. The comparison of the approaches allowed the identification of 4 transfer coefficients of the model and then allows to simulate the local dynamics during drying.

Keywords: Drying, Porous media, Modeling, Simulation, Experimentation

Nomenclature

c	Concentration molaire, mol.m ⁻³	\dot{Q}	Flux de chaleur, W
C_p	Chaleur massique à pression constante, J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	S	Surface, m ²
dz	Hauteur, m	T	Température, K
D	Diffusivité massique, m ² .s ⁻¹	U	Énergie interne, J
dr	Épaisseur, m	X	Teneur en eau base sèche, kg _{eau} .kg _{sec} ⁻¹
dt	Pas de temps, s	<i>Symboles grecs</i>	
h	Enthalpie spécifique, J.kg ⁻¹	α_h	Coefficient d’échange thermique externe, W.m ⁻² .K ⁻¹
HR	Humidité relative, %	α_m	Coefficient d’échange massique externe, m.s ⁻¹
L_v	Chaleur latente de vaporisation, J.kg ⁻¹	λ	Conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹
M	Masse molaire, kg.mol ⁻¹	ε	Porosité
m	Masse, kg	<i>Indices et exposants</i>	
\dot{m}	Débit massique, kg.s ⁻¹	as	Air sec

eff Effectif
ext Extérieur
int Intérieur

liq Liquide
sol Solide
vap Vapeur d'eau

1. Introduction

Du fait des enjeux énergétiques et environnementaux mondiaux, la biomasse représente un matériau renouvelable et abondant pouvant faire l'objet de différentes utilisations. Bien que sa valorisation énergétique participe à 4,2 % de la consommation d'énergie primaire en France en 2019 [1], d'autres voies se développent comme par exemple l'intégration de matériaux biosourcés dans le béton [2] ou la fabrication de panneaux d'isolation thermiques et acoustiques [3, 4]. Pour l'ensemble de ces applications, cette biomasse doit généralement subir une étape de séchage. Ainsi l'étude de ce procédé doit permettre de mieux comprendre les transferts de masse et de chaleur ainsi que leur couplage dans un milieu poreux hétérogène. Par ailleurs, bien que les phénomènes de transferts soient bien documentés dans la littérature, il est indispensable d'effectuer une étape expérimentale afin de prendre en compte la spécificité du matériau étudié.

Parmi les biomasses disponibles, la bagasse est le résidu fibreux issu de l'exploitation de la canne à sucre et permet d'assurer près de 8 % de la production électrique de l'île de La Réunion. Bien qu'il existe des études sur le séchage de la bagasse de canne à sucre, cette dernière est généralement étudiée à partir de modèles empiriques en couche mince [5]–[8]. Ces modèles sont construits à partir des courbes expérimentales de séchage sur lesquelles sont identifiés les paramètres du modèle. Généralement les auteurs s'intéressent uniquement à la dynamique globale de l'échantillon à travers le suivi de la teneur en eau de l'échantillon [9], sans prise en compte de la température, et pour des quantités de biomasse relativement faibles (100 grammes maximum). Cela suppose que la résistance aux transferts internes est négligeable devant les transferts externes. Lorsque les dimensions de l'échantillon augmentent, les gradients thermiques et hydriques présents dans l'échantillon influencent les dynamiques de séchage et il est alors nécessaire d'avoir recours à une analyse spatiale [10]. C'est dans cette démarche que s'inscrit cette étude grâce à la comparaison de résultats expérimentaux et numériques.

L'approche expérimentale a nécessité le développement d'un dispositif pour le suivi de la teneur en eau globale, de l'humidité relative au centre de l'échantillon et de la température pour 9 positions dans l'échantillon de bagasse. Parallèlement, un modèle dynamique en volume fini a été développé afin de suivre les variables mesurées expérimentalement. A partir des données recueillies pour deux campagnes de séchage et du modèle développé, nous procédons à l'identification des 4 paramètres de transferts du modèle.

2. Expérimentations

La bagasse utilisée dans ces travaux a été prélevée dans une des deux usines thermiques de l'île de La Réunion et a été placée dans des sacs hermétiques pour le transport jusqu'à son utilisation. La Figure 1 présente le dispositif expérimental qui permet de mesurer les évolutions temporelles des principales variables, à savoir la température, l'humidité relative et la teneur en eau d'un échantillon. Ce dispositif est composé : (1) d'une étuve de séchage thermorégulée avec une stabilité de la régulation inférieure 0,2°C ; (2) d'un capteur de force pour la mesure en continu de la masse de l'échantillon avec une précision de ± 2 g ; (3) d'une sonde d'humidité relative de type capacitif d'une précision de ± 2 % ; (4) de l'échantillon de bagasse de géométrie cylindrique, d'une hauteur de 50 cm pour un diamètre de 30 cm et réalisé en treillis d'aluminium avec des mailles carrées de 1 mm ; (5) de 9 thermocouples chemisés de type K avec une précision de $\pm 0,5$ °C ; (6) d'une centrale d'acquisition et d'un ordinateur pour l'enregistrement

des données. Deux campagnes de séchage ont été réalisées sur la bagasse de canne à sucre. La première est effectuée à une température de consigne fixe de 50°C et la deuxième à 60°C. Pour chaque campagne de séchage, la bagasse est extraite des sacs de stockage et est introduite dans le cylindre jusqu'à mi-hauteur sans tassement. La sonde d'humidité relative est disposée au centre tandis que les 9 thermocouples sont implantés dans l'échantillon aux 9 positions renseignées sur la Figure 1. L'échantillon ainsi instrumenté est introduit dans l'étuve de séchage, qui a préalablement été chauffée à la température de consigne. Lorsque le régime permanent est atteint, les instruments de mesures sont retirés et la température de consigne est placée à 105°C afin d'obtenir la masse sèche de l'échantillon testé.

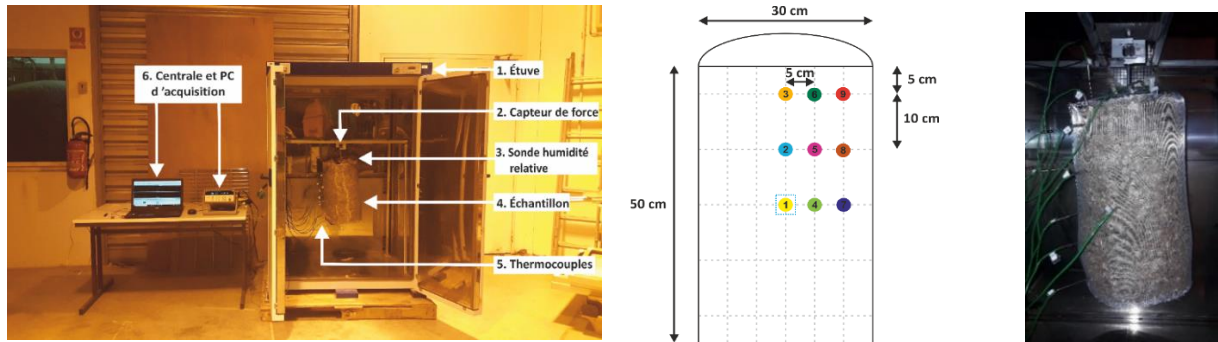


Figure 1 : Dispositif expérimental pour le séchage de la biomasse (gauche), avec le schéma d'implantation des thermocouples et de la sonde d'humidité relative (centre) ainsi que l'implantation expérimentale (droite) dans l'échantillon.

3. Modèle

Afin d'utiliser les résultats expérimentaux obtenus nous avons développé un modèle inspiré des travaux de Whitaker [11]. Le point de départ est de considérer qu'en n'importe quel point de la biomasse, un volume élémentaire représentatif (VER) peut être construit, au sein duquel trois phases sont considérées : solide, liquide et gazeuse. Sur chaque VER les différentes quantités sont moyennées. La Figure 4 présente le passage du milieu réel (a), à la représentation d'un VER (b) pour obtenir une représentation moyennée des différentes phases considérées (c).

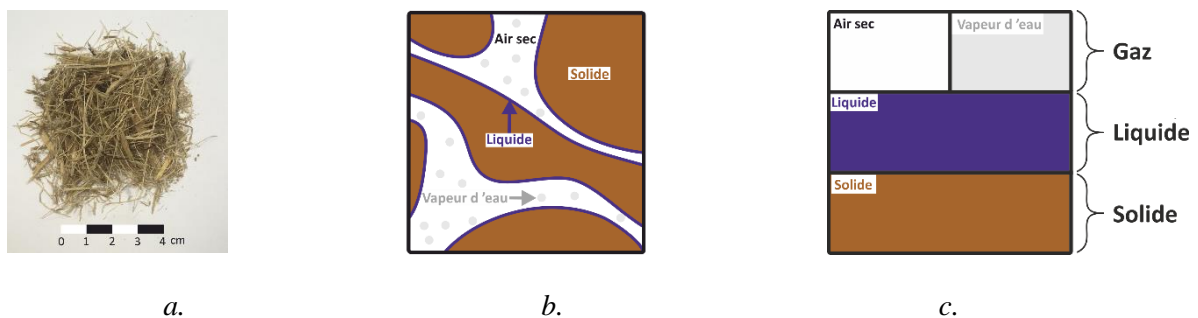


Figure 2 : La bagasse réelle (a), schématisée en présence des 3 phases (b) et la représentation moyennée (c).

Les équations de conservation de la masse des différentes phases sont établies sur chacun des VER et sont présentées dans le Tableau 4. L'eau liquide possède un terme source due à son évaporation. La vapeur d'eau possède ce même terme source évaporatif ainsi qu'un terme de transfert diffusif. L'air sec possède également un terme de transport.

Liquide	Vapeur d'eau	Air sec
$\frac{\partial m_{liq}}{\partial t} = -\dot{m}_{evap}$	$\frac{\partial m_{vap}}{\partial t} = \sum_{frontières} \pm \dot{m}_{vap} + \dot{m}_{evap}$	$\frac{\partial m_{as}}{\partial t} = \sum_{frontières} \pm \dot{m}_{as}$

Tableau 1 : équations de conservation massique.

La conservation de l'énergie est établie en considérant le VER à l'équilibre thermique [9], [12] et s'écrit :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \sum_{frontières} (\pm \dot{m}_{vap} \cdot h_{vap} \pm \dot{m}_{as} \cdot h_{as}) + \sum_{frontières} \dot{Q} - L_v \cdot \dot{m}_{evap} \quad (1)$$

Les transferts de masse (vapeur d'eau et air sec) et de chaleur sont supposés suivre la loi de Fick et de Fourier respectivement :

Diffusion	Conduction
$\dot{m}_i = -M_i \cdot S \cdot D_{eff} \cdot \nabla c_i \quad i=vap,as$	$\dot{Q} = -\lambda_{eff} \cdot S \cdot \nabla T$

Tableau 2 : équations de transferts.

Les équations d'équilibre concernent le couple liquide/vapeur d'eau et solide/vapeur. Le premier est établi selon l'ASHRAE [13] tandis que le deuxième est représenté à partir du modèle d'isotherme de sorption de Smith modifié [14]. Enfin, le Tableau 3 représente les conditions aux limites établies pour le transfert de masse et de chaleur avec un coefficient d'échange constant [15] (α_m et α_h) :

Masse	Chaleur
$\dot{m}_i = -M_i \cdot S \cdot \alpha_m \cdot (c_{surf} - c_{ext}) \quad i=vap,as$	$\dot{Q} = -\alpha_h \cdot S \cdot (T_{surf} - T_{ext})$

Tableau 3 : conditions aux limites.

Du fait de la symétrie de révolution de notre géométrie cylindrique, l'ensemble du domaine est discrétisé par la méthode des volumes finis en deux dimensions (hauteur et rayon). Chaque VER possède quatre surfaces d'échanges (nord, sud, est et ouest) avec les volumes adjacents sur lesquels sont évalués les flux de matière et d'énergie.

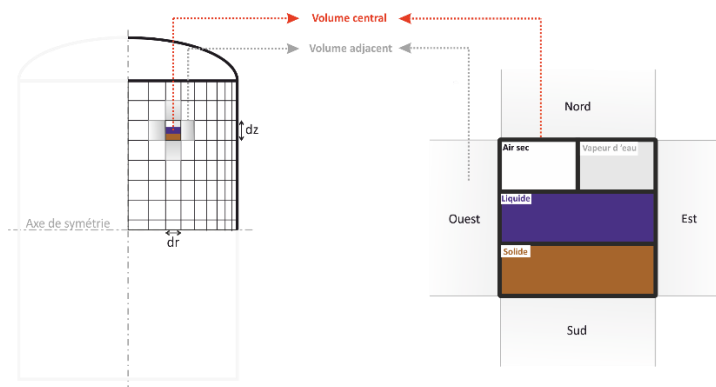


Figure 3 : discrétisation spatiale du domaine cylindrique (gauche) et composé de plusieurs VER (droite).

4. Résultats

Le modèle fait intervenir 4 paramètres qu'il est nécessaire de déterminer pour évaluer les flux thermiques et massiques et ainsi rendre compte des évolutions temporelles et spatiales des trois variables suivies à savoir la température, l'humidité relative et la teneur en eau. Les deux premiers paramètres sont qualifiés d'effectifs et concernent la conductivité de la bagasse (λ_{eff}) et la diffusion de la vapeur d'eau (D_{eff}). Les deux derniers concernent le transfert externe de chaleur (α_h) et de masse (α_m) avec l'environnement en convection naturelle.

Grâce au modèle développé et aux données expérimentales recueillies sur les deux campagnes, nous déterminons ces coefficients par identification grâce à la méthode de Nelder-Mead [16]. Le critère à minimiser est la somme des écarts quadratiques entre les valeurs numériques et expérimentales pour la température, l'humidité relative et la teneur en eau :

$$Ecart = \left(\frac{T_{\text{exp}} - T_{\text{mod}}}{T_{\text{exp}}} \right)^2 + \left(\frac{\varphi_{\text{exp}} - \varphi_{\text{mod}}}{\varphi_{\text{exp}}} \right)^2 + \left(\frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{mod}}}{X_{\text{exp}}} \right)^2 \quad (2)$$

Les valeurs expérimentales sont celles obtenues à partir du banc développé avec un pas de temps de sauvegarde de 20 minutes. Les propriétés thermo-physiques sont considérées constantes (Tableau 4) et le maillage retenu est composé de 16 éléments selon la direction radiale et 26 éléments selon la hauteur. Pour résoudre le système d'équations différentielles ordinaires nous avons utilisé la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

	ρ_{bag}	ε_{bag}	$C_{p\text{bag}}$	$C_{p\text{liq}}$	$L_{v\text{liq}}$	$C_{p\text{vap}}$	$C_{p\text{as}}$
Unité	kg.m ⁻³	-	J.kg.K ⁻¹	J.kg.K ⁻¹	kJ.kg ⁻¹	J.kg.K ⁻¹	J.kg.K ⁻¹
Valeur	125	0,51	1400	4180	2257	1826	1006

Tableau 4 : Propriétés thermo-physique de la bagasse, de l'eau liquide, de la vapeur d'eau et de l'air sec utilisés lors des simulations.

4.1. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

Les résultats présentés sur la Figure 4 et Figure 5 concernent le séchage de la bagasse de canne à sucre pour une température de consigne de 50°C. La masse de bagasse humide initiale est de 3,68 kg, soit une teneur en eau de 1,065, avec une température de 30,4°C tandis que le milieu est saturé en vapeur d'eau. Les résultats de simulations ont été obtenus après identification des coefficients de transferts présentés dans le Tableau 5 :

	D_{eff}	λ_{eff}	α_m	α_h
	m ² .s ⁻¹	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	m.s ⁻¹	W.m ⁻² .K ⁻¹
Bagasse	3.10 ⁻⁵	0,061	0,091	6,05

Tableau 5 : Coefficients de transferts identifiés pour la bagasse.

La Figure 4 représente l'évolution de la teneur en eau globale de l'échantillon ainsi que l'humidité relative au centre de l'échantillon. Au début du séchage, la perte en eau de l'échantillon est localisée à la surface de l'échantillon où la vapeur d'eau générée est directement évacuée dans le milieu extérieur tandis que le centre de l'échantillon reste à la saturation. Globalement, les deux dynamiques sont bien reproduites par le modèle, avec une quasi superposition des courbes expérimentales et numériques.

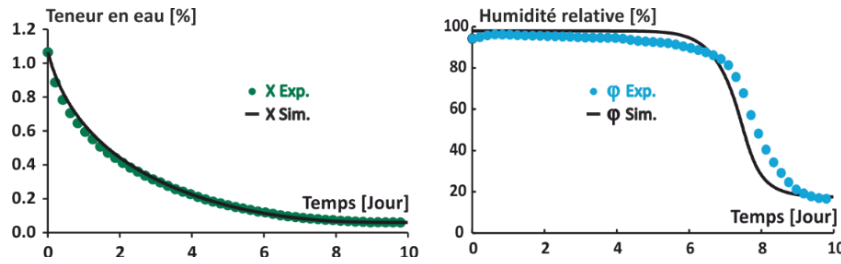


Figure 4 : Teneur en eau globale (gauche) et humidité relative au centre de l'échantillon (droite).

La Figure 5 représente l'évolution des températures pour les différentes positions dans l'échantillon. Lors du séchage, deux flux thermiques sont en compétition et sont responsables des évolutions de températures observées. Le premier est le flux de chaleur fourni par l'air de séchage qui est transmis par convection puis conduction à l'échantillon et qui tend à augmenter la température du milieu. Le second est le flux évaporatif, qui tend à diminuer la température du milieu. Ainsi, l'ensemble de l'échantillon subit d'abord une élévation de sa température d'environ 5°C en moins d'une heure. Lorsque la quantité d'eau à la surface diminue, un front de séchage apparaît et délimite deux zones. La première est la zone humide, représentée par une température d'environ 32°C et un air saturé en vapeur d'eau. La deuxième est la zone partiellement sèche qui voit sa température augmenter sous l'effet de l'apport de chaleur de l'air extérieur et de la diminution du flux évaporatif. Ce front est matérialisé par la rupture de pente entre la phase descente/stagnation de la température et celle croissante. Il est naturellement atteint en premier par les positions périphériques (n°3, 6, 7, 8, 9) après environ 2 à 3 jours de séchage. Ensuite, lorsqu'il se propage vers le centre de l'échantillon, la résistance aux transferts internes de masse (diffusion) et de chaleur (conduction) augmente et le centre de l'échantillon n'atteint ce front qu'à partir du 6^{ème} jour.

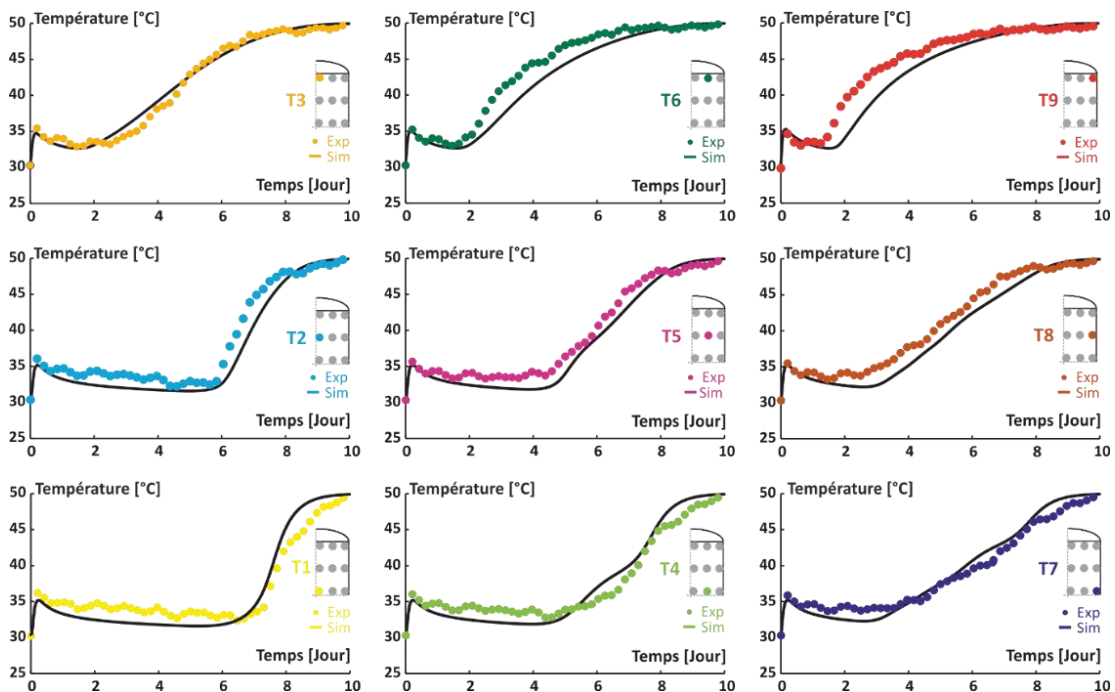


Figure 5 : Evolution de la température pour 9 positions dans l'échantillon de bagasse. Campagne de séchage avec une température de consigne de 50°C.

Les Figure 6 et Figure 7 présentent la comparaison des résultats numériques et expérimentaux pour une température de consigne de 60°C afin de valider les coefficients

précédemment identifiés. Pour cette campagne, la masse de bagasse humide initiale est de 3,65 kg, soit une teneur en eau de 1,057, et une température de 30 °C.

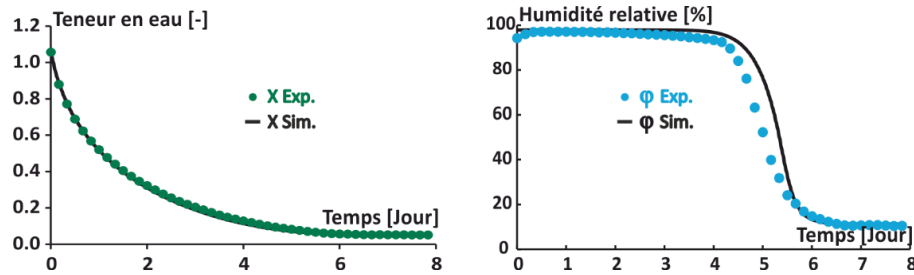


Figure 6 : Teneur en eau globale (gauche) et humidité relative au centre de l'échantillon (droite).

La Figure 7 présente les évolutions de température pour les 9 positions de l'échantillon. Les dynamiques expérimentales sont bien reproduites par le modèle pour les coefficients identifiés.

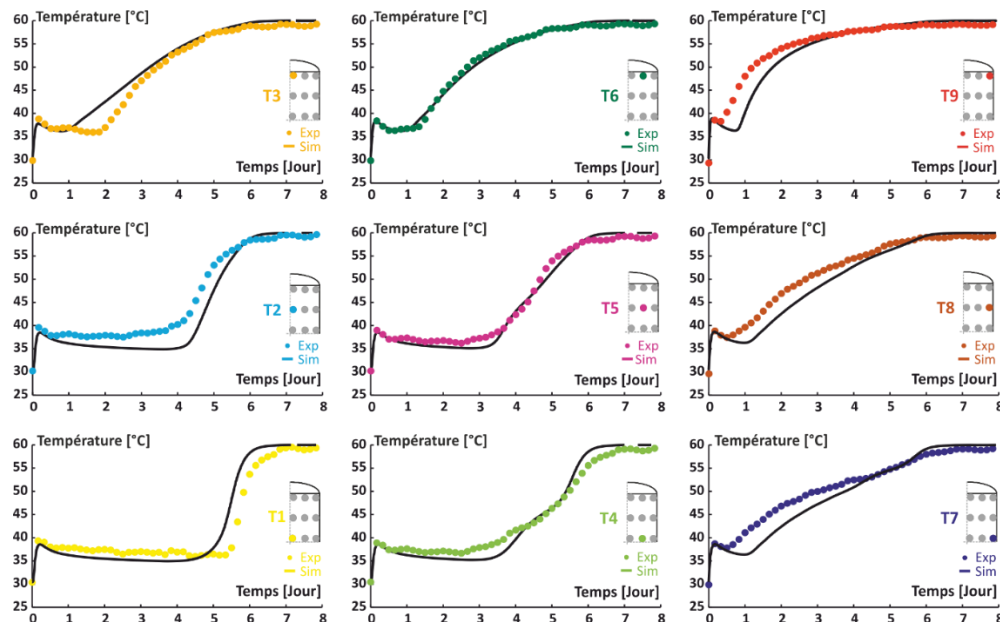


Figure 7 : Evolution de la température pour 9 positions dans l'échantillon de bagasse.

5. Conclusion

Cette étude concerne le séchage de la bagasse de canne à sucre grâce à une approche expérimentale et numérique. Pour la première, un banc expérimental a été développé pour une géométrie cylindrique. Il permet de mesurer la masse de l'échantillon, l'humidité relative au centre et la température pour 9 positions réparties dans la bagasse. La deuxième approche a permis le développement d'un modèle local de séchage dynamique afin de suivre les différentes variables mesurées expérimentalement. La comparaison des deux approches a permis l'identification puis la validation des 4 coefficients de transferts intervenant dans le modèle. Les simulations présentent des comportements thermiques et hydriques satisfaisant pour les 9 positions renseignées. Ainsi le modèle développé peut être un outil prédictif pour l'évaluation des évolutions temporelles et spatiale lors du séchage en convection naturelle de la bagasse de canne à sucre.

Références

- [1] Ministère de la transition écologique, Chiffres clés de l'énergie - Édition 2020, p. 80.

- [2] C. Onésippe, N. Passe-Coutrin, F. Toro, S. Delvasto, K. Bilba, et M.-A. Arsène, Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, n° 4, p. 549-556, avr. 2010, doi: 10.1016/j.compositesa.2010.01.002.
- [3] M. Krishpersad, R. Dale, K. Gurmohan, et H. Subhas, Biodegradable fibrous thermal insulation, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 28, n° 1, p. 3, 2005.
- [4] A. G. Carvalho, R. F. Mendes, S. L. Oliveira, et L. M. Mendes, Effect of Post-production Heat Treatment on Particleboard from Sugarcane Bagasse, *Materials Research*, vol. 18, n° 1, p. 78-84, févr. 2015, doi: 10.1590/1516-1439.270814.
- [5] F. B. Scheufele, C. Ribeiro, A. N. Módenes, F. R. Espinoza-Quiñones, R. Bergamasco, et N. C. Pereira, Assessment of drying temperature of sugarcane bagasse on sorption of reactive blue 5G dye, *Fibers and Polymers*, vol. 16, n° 8, p. 1646-1656, août 2015, doi: 10.1007/s12221-015-5087-2.
- [6] J. R. Ramirez et L. M. Lagunas, Engineering properties of sugarcane fibres, *International sugar journal*, vol. 27, p. 11, 2010.
- [7] B. Vijayaraj, R. Saravanan, et S. Renganarayanan, Studies on thin layer drying of bagasse, *International Journal of Energy Research*, vol. 31, n° 4, p. 422-437, mars 2007, doi: 10.1002/er.1237.
- [8] J. M. G. Costa, J. L. G. Corrêa, B. E. Fonseca, F. M. Borém, et S. V. Borges, Drying and Isotherms of Sugar Cane Bagasse, *REVENG*, vol. 23, n° 2, p. 128-142, avr. 2015, doi: 10.13083/1414-3984/reveng.v23n2p128-142.
- [9] K. Zhang et C. You, Experimental and Numerical Investigation of Lignite Particle Drying in a Fixed Bed, *Energy & Fuels*, vol. 25, n° 9, p. 4014-4023, sept. 2011, doi: 10.1021/ef200759t.
- [10] P. Guillou, O. Marc, L. Adelard, D. Madyira, E. Akinlabi, et J. Castaing-Lasvignottes, Séchage de copeaux de bois et de bagasse : simulation numérique et comparaison expérimentale, Société Française de Thermique, 2020, p. 8.
- [11] S. Whitaker, Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: A theory of drying, Academic Press., vol. 13. J.P. Hartnett and T.F. Irvine, Jr, 1977, ISBN 978-0-12-020013-9.
- [12] A. Erriguible, P. Bernada, F. Couture, et M. Roques, Simulation of Convective Drying of a Porous Medium with Boundary Conditions Provided by CFD, *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 84, n° 2, p. 113-123, févr. 2006, doi: 10.1205/cherd.05047.
- [13] American Society of Heating, Refrigerating and air conditioning engineers, Psychrometrics: Theory and Practice. 1996, ISBN 1-883413-39-7.
- [14] M. Simo-Tagne, A. Zoulalian, Y. Rogaume, R. Rémond, et B. Bonoma, Modélisation des isothermes de sorption, caractérisation des propriétés thermodynamiques et détermination des humidités d'équilibre d'usage des bois tropicaux, *Revue des énergies renouvelables*, vol. 19, n° 1, p. 79-96, 2016.
- [15] P. Perré, Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes : séchage du bois à basse et à haute température, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 33, n° 11, 1990, doi: 10.1016/0017-9310(90)90004-E.
- [16] N. A. John et M. Roger, A simplex method for function minimization, *The Computer Journal*, vol. 7, n° 4, p. 308-313, 1965, doi: 10.1093/comjnl/7.4.308.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la Région Réunion, les Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) pour leur participation financière à ces travaux et également Jérôme Vigneron pour son assistance technique lors de l'élaboration du dispositif expérimental.