

Séchage de copeaux de bois et de bagasse : simulation numérique et comparaison 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 – Les déchets issus de la biomasse représentent une ressource importante pouvant faire l’objet de diverses utilisations. Dans un certain nombre de cas (valorisation énergétique, isolation thermique), un séchage préalable peut être réalisé. Afin d’étudier les transferts couplés de masse et de chaleur dans ces matériaux lors du séchage, une comparaison de résultats expérimentaux et numériques est menée sur des copeaux de bois (*Cryptomeria japonica*) et de la bagasse, produits à La Réunion. Les évolutions de températures et d’humidité relatives ainsi que la teneur en eau globales sont comparés et ont permis l’identification de 4 coefficients de transferts apparents (thermique et hydrique).

Mots-clés : Milieu poreux ; Séchage ; Biomasse ; Modélisation ; Expérimentation.

Abstract – Biomass waste is an important resource that can be used in various ways. In a number of cases (energy recovery, thermal insulation), a previous drying can be realised. In order to study coupled heat and mass transfer in such materials during drying, a comparison of results from experiments and numerical simulations is conducted on wood chips (*Cryptomeria japonica*) and sugarcane bagasse, produced in Reunion Island. The changes in temperature and relative humidity as well as the global moisture content are compared and allowed the identification of 4 apparent transfer coefficients (heat and mass).

Keywords: Porous media; Drying; Biomass; Modelling; Experiment.

Nomenclature

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

1. Introduction

Le terme biomasse désigne à la fois les cultures énergétiques (plantes cultivées spécifiquement pour servir de combustible) et les déchets/sous-produits, tels que les résidus forestiers, la sciure de bois et une gamme d'autres déchets agricoles [1]. Dans un certain nombre d'utilisations (valorisation énergétique, isolation thermique), un séchage préalable peut être réalisé. Parmi les biomasses disponibles, deux font l'objet d'une attention particulière à l'île de La Réunion : la bagasse, co-produit résiduel de l'exploitation de la canne à sucre et, dans une moindre mesure, les copeaux de bois issus du *Cryptomeria japonica*. Le séchage de ces deux matériaux est relativement peu documenté bien que nécessaire pour toutes leurs applications. Aussi, pour compléter ces études nous avons choisi dans un premier temps une approche expérimentale consistant à sécher en étuve des quantités significatives (plusieurs centaines de grammes) de produit. Ce travail a été complété dans un deuxième temps par un modèle dynamique spécifique permettant de mieux en cerner le comportement. La modélisation fait apparaître 4 paramètres caractéristiques des transferts thermiques et massiques intervenants dans ces matériaux. Une première partie de ce travail présente le dispositif expérimental et les résultats obtenus. Le modèle numérique fait l'objet de la seconde partie. Enfin, la comparaison des évolutions mesurées et simulées en termes de température, d'humidité relative et de teneur en eau permet la détermination des 4 paramètres de transfert inconnus.

2. Protocole expérimental et matériels

Deux biomasses produites à l'île de La Réunion sont étudiées : des copeaux de bois de *Cryptomeria japonica* et de la bagasse. La première est le co-produit généré lors de l'usinage de grumes de bois pour la fabrication de mobiliers extérieurs. La deuxième est le résidu de l'exploitation de la canne à sucre utilisée, avec le charbon, comme co-combustible dans les deux centrales thermiques de l'île.

Pour chaque campagne de séchage, la biomasse est placée dans un cylindre réalisé en fibre de verre (Figure 2.a) d'une hauteur de 30 cm et d'un diamètre de 18 cm pour un volume de 7,63 litres. On positionne au centre, une sonde de température/humidité relative (Figure 2.a), permettant l'enregistrement des deux variables, toutes les 5 minutes, avec une précision de $\pm 0,4$ °C et de ± 2 %. L'ensemble est placé dans une étuve (Figure 2.b), à une température de consigne fixe, avec une précision de $\pm 0,2$ °C. Lors de la campagne de mesure, le cylindre est régulièrement pesé pour le suivi de la masse. Après environ 10 jours de séchage, lorsque la température, l'humidité relative et la masse sont stables, la température de consigne est fixée à 105°C, permettant d'obtenir la masse sèche [2].



a.



b.

Figure 2 : Dispositif expérimental de l'échantillon testé (ici, copeaux de bois de *Cryptomeria japonica*) placé dans le cylindre (a) puis dans l'étuve (b).

3. Modèle

La biomasse est généralement considérée comme un milieu poreux, non-isotropique et multiphasique [3]. Le processus de séchage est complexe et fait intervenir des transferts thermiques et massiques couplés [4]. Différentes approches peuvent-être utilisées pour modéliser ce processus en fonction de l'échelle d'étude et de l'objectif visé [5]. Nous avons choisi ici l'approche locale de Whitaker [5]–[7]. Elle consiste à moyenner les quantités des différentes phases et espèces sur un volume élémentaire représentatif (VER) sur lequel sont établies les équations de conservation, de transfert, d'état et d'équilibre.

Ainsi, les deux milieux poreux étudiés sont constitués de 3 phases : solide, liquide et gazeuse. La première est composée de la partie ligneuse de la biomasse. La deuxième est l'eau adsorbée sur cette matrice solide. La troisième phase est constituée d'air sec et de vapeur d'eau. La porosité du milieu est définie comme le rapport volumique de la phase gazeuse (vapeur d'eau et air sec) sur le volume total.

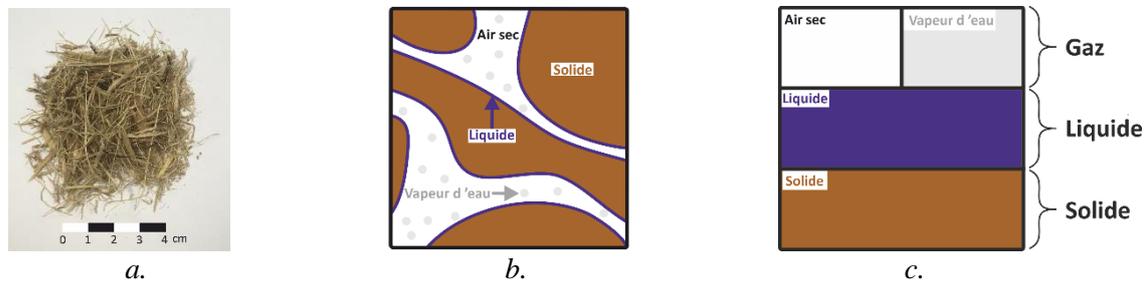


Figure 3 : La bagasse réelle (a), schématisée en présence des 3 phases (b) et la représentation moyennée (c).

La figure 3 représente l'approche choisie, avec comme exemple la bagasse. Le milieu réel (Figure 3.a) peut-être schématisé par la figure 3.b où sont représentés les 3 phases (solide, liquide et gazeuse (air sec et vapeur d'eau)). La représentation moyennée de celles-ci est schématisée sur la figure 3.c. Afin d'appliquer cette approche à notre géométrie cylindrique et du fait de la symétrie de révolution (Figure 4), le domaine est discrétisé en volumes finis [8] selon deux dimensions, représentés par une hauteur élémentaire (dz) et un rayon élémentaire (dr). La figure 4.b représente un élément au sein de l'échantillon qui possède quatre surfaces communes aux volumes adjacents (Nord, Sud, Est, Ouest).

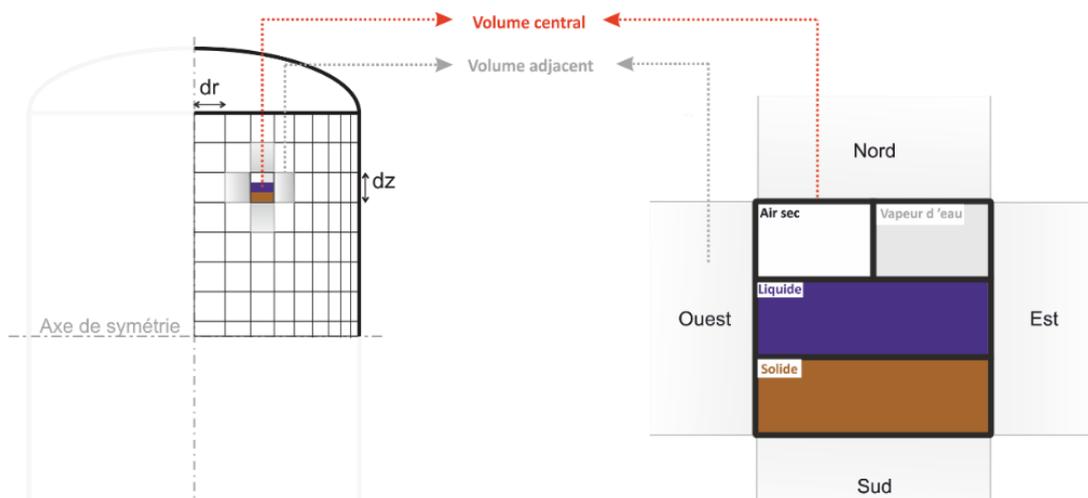


Figure 4 : Discrétisation spatiale du domaine cylindrique (gauche) et composé de plusieurs VER (droite).

Sur chaque VER les équations de conservation, de transfert, d'état et d'équilibre sont établies. Celles du tableau 2 représentent la conservation de l'eau adsorbée, de la vapeur d'eau et de l'air sec. La variation de l'eau adsorbée est exclusivement due au terme source d'évaporation. La vapeur d'eau peut recevoir ou perdre de la matière aux frontières du volume (1^{er} terme de droite) et possède ce même terme source due à l'évaporation de la phase liquide (2^{ème} terme de droite). Enfin, la variation de la masse d'air sec est exclusivement due aux flux de matière traversant les frontières du volume élémentaire.

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 2 : Équations de conservation massique.

La conservation de l'énergie est établie en négligeant l'énergie cinétique et potentielle, le travail des forces extérieures de pression, les dissipations visqueuses ainsi que les échanges radiatifs. Le milieu est considéré à l'équilibre thermique local [4], [7] (température identique au sein d'un VER pour l'ensemble des phases) permettant d'obtenir l'équation de conservation de l'énergie sous cette forme, qui s'applique à l'ensemble des VER :

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

Les variations d'énergie sont dues au transfert diffusif (Fick) de la vapeur d'eau et d'air sec, au transfert de chaleur par conduction (Fourier) et au terme source lié à l'évaporation.

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

Tableau 3 : Équations de transferts.

La phase gazeuse est considérée comme un mélange idéal de gaz parfait et composée de vapeur d'eau et d'air sec. L'équation d'équilibre liquide/vapeur de l'eau est issue de l'ASHRAE [9] et nous avons choisi l'isotherme de sorption de Smith modifié [10] pour représenter l'équilibre solide/vapeur.

Aux frontières du cylindre, les conditions aux limites sont établies pour le transfert de masse et de chaleur avec un coefficient d'échange constant [11] (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 4 : Conditions aux limites.

Le modèle fait apparaitre 4 paramètres spécifiques à la biomasse. On trouve au sein de l'échantillon : la conductivité apparente λ_{app} et la diffusivité apparente D_{app} (tableau 3). Ces grandeurs sont qualifiées d'apparente car elles représentent le transfert global au sein du lit de biomasse. Aux bornes de l'échantillon, les deux autres paramètres, α_m et α_h , sont caractéristiques des transferts de masse et de chaleur avec l'environnement. Bien que des ordres de grandeurs existent dans la littérature, la valeur de ces quatre paramètres est principalement

liée au type de biomasse et à son conditionnement. Dans notre cas, la détermination de ces valeurs est réalisée par identification comme nous le verrons par la suite.

4. Résultat

4.1. Campagnes de mesures

Les résultats concernent le séchage des copeaux de bois et de la bagasse soumis à une température fixe de 50°C. Ils sont présentés sur la figure 5 avec l'évolution, de la température et de l'humidité relative dans les échantillons et dans l'étuve, ainsi que de leur teneur en eau globale. Lorsque les biomasses sont introduites dans l'étuve, elles possèdent une température de 26°C et une humidité relative de 100%. Initialement les copeaux de bois ont une teneur en eau 0,92 et une masse de 0,576 kg. La bagasse possède une teneur en eau de 0,99 et une masse de 0,927 kg.

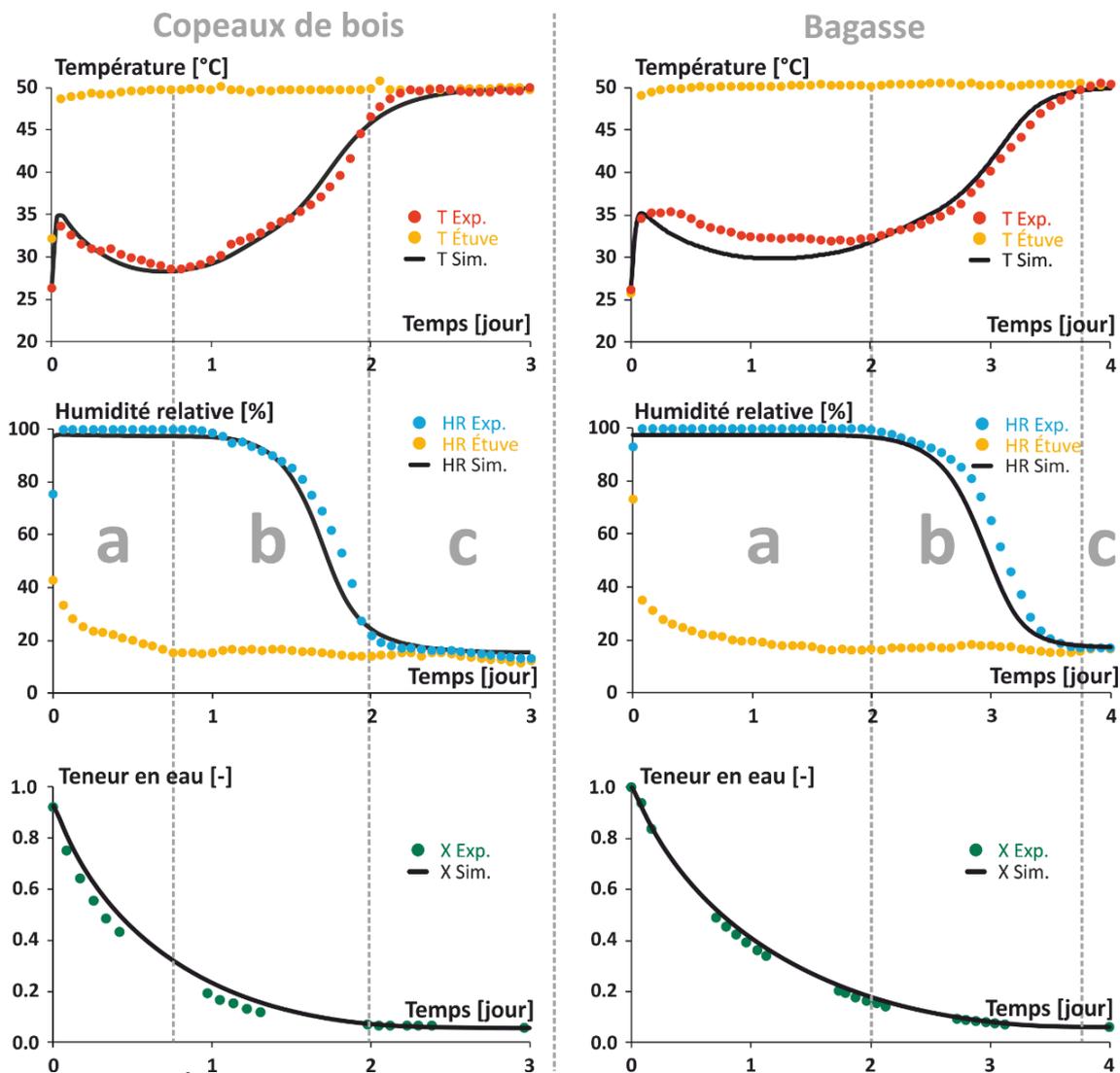


Figure 5 : Évolution de la température, de l'humidité relative et de la teneur en eau pour les copeaux de bois de *Cryptomeria japonica* (gauche) et la bagasse (droite) en fonction du temps.

Sur la figure 5 on observe trois phases de séchage (a, b, c). Lors de celles-ci, deux principaux flux thermiques sont en compétition. Le premier est un apport thermique de l'extérieur vers l'intérieur, par convection puis conduction qui tend à augmenter la température du milieu. Le

deuxième est l'évaporation de l'eau adsorbée, phénomène endothermique, qui tend à diminuer la température du milieu.

Lors de la première phase (a), l'apport de chaleur permet la mise en température du milieu jusqu'à 35°C en environ 1h30 pour les deux biomasses. Ensuite, l'évaporation l'emporte sur le transfert thermique et se traduit par une baisse de la température jusqu'à atteindre un pallier en température situé aux alentours de 28°C pour les copeaux de bois et 32°C pour la bagasse. La production de vapeur d'eau correspondante étant supérieure au flux pouvant être extrait de l'échantillon par diffusion, l'humidité relative reste constante et égale à 100%. La deuxième phase (b) débute lorsque le rapport des deux phénomènes thermiques (conduction et évaporation) s'inverse. La quantité d'eau restante à évaporer diminue et l'apport thermique permet une élévation de la température en environ 1,25 jours pour les copeaux de bois et 1,8 jours pour la bagasse. La production de vapeur d'eau diminue également et devient inférieure au flux capable d'être extrait par diffusion, conduisant à la baisse de l'humidité relative. Finalement, la dernière phase (c) correspond à la fin du séchage où les différentes variables tendent asymptotiquement vers les conditions extérieures. Par la suite, le passage de la température de consigne de l'étuve à 105°C permet de mesurer la masse sèche des échantillons : 0,2994 kg pour les copeaux de bois et 0,4635 kg pour la bagasse. Par conséquent, la teneur en eau finale atteinte est de 0,057 pour les copeaux de bois et de 0,047 pour la bagasse.

4.2. Résultats de simulation

Pour les simulations, les conditions aux limites imposées sont celles de l'étuve de séchage en termes de température et d'humidité relative. Les propriétés thermo-physiques utilisées sont prises constantes et présentées dans le tableau 4. Le maillage retenu est constitué de 9 éléments selon la hauteur et 15 éléments selon le rayon. Le système d'équations différentielles ordinaires est résolu par la méthode de Runge-Kutta 4 avec un pas de temps fixe de 0,01 secondes.

	ρ_{bag}	ϵ_{bag}	C_{pbag}	ρ_{cpx}	ϵ_{cpx}	C_{pcpx}	C_{peau}	L_{veau}	C_{pvap}	C_{pas}
Unité	kg.m ⁻³	-	J.kg.K ⁻¹	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	415	0,91	1500	4180	2257	1826	1006

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

Afin de déterminer la valeur des coefficients de transferts apparents intervenant dans les équations de transferts (Tableau 3) et dans les conditions aux limites (Tableau 4), la méthode Nelder-Mead [12] a été choisie. Le critère à minimiser est l'écart entre les valeurs expérimentales et numériques pour la température, l'humidité relative et la teneur en eau selon :

$$Ecart = \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2 + \left(\frac{\Delta HR}{HR} \right)^2 + \left(\frac{\Delta X}{X} \right)^2 \quad (2)$$

Les coefficients de transferts apparents identifiés sont présentés dans le tableau 5 :

	D_{app}	λ_{app}	α_m	α_h
	m ² .s ⁻¹	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	m.s ⁻¹	W.m ⁻² .K ⁻¹
Copeaux de bois	0,00011	0,051	0,089	6,1
Bagasse	0,00007	0,055	0,089	6,1

Tableau 5 : Coefficients de transferts identifiés pour les copeaux de bois et la bagasse.

Globalement, comme on peut le voir sur la figure 5, les simulations présentent des évolutions de température, d'humidité relative et de teneur en eau cohérentes avec celles obtenues expérimentalement.

5. Conclusion

Cette étude traite du séchage de copeaux de bois de *Cryptomeria japonica* et de la bagasse à travers une approche expérimentale et numérique. La première consiste à sécher les deux biomasses à 50°C et à mesurer l'évolution de la température, de l'humidité relative et de la teneur en eau des échantillons au cours du temps. La deuxième approche a permis le développement d'un modèle de séchage en volumes finis prenant en compte la conduction thermique, la diffusion moléculaire de la phase gazeuse (air sec et vapeur d'eau) ainsi que de l'évaporation au sein du milieu poreux. La comparaison des résultats expérimentaux et issus des simulations ont permis l'identification de quatre coefficients de transferts propres aux biomasses étudiées permettant une bonne représentation des trois phases de séchage. D'autres campagnes expérimentales sont actuellement menées avec des quantités de biomasse plus importantes (quelques kilogrammes) et équipées d'une dizaine de thermocouples afin de mieux appréhender le comportement local et les transferts internes intervenant dans ces matériaux.

Références

- [1] R. Shuma et D. M. Madyira, Production of Loose Biomass Briquettes from Agricultural and Forestry Residues, *Procedia Manufacturing*, vol. 7, p. 98-105, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2016.12.026.
- [2] Organisation internationale de normalisation, Biocombustibles solides - Dosage de la teneur en humidité - Méthode de séchage à l'étuve - Partie 1: Humidité totale - Méthode de référence, Norme ISO 18134-1:2015.
- [3] J. Colin, Séchage en continu du bois énergie comme moyen de préconditionnement en vue de sa conservation thermochimique : approches expérimentale et numérique, Thèse de doctorat, AgroParisTech, 2011.
- [4] 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.
- [5] T. Defraeye, Advanced computational modelling for drying processes – A review, *Applied Energy*, vol. 131, p. 323-344, oct. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.06.027.
- [6] S. Whitaker, Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: A theory of drying. 1977.
- [7] 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.
- [8] V. S. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow. 1980, ISBN 0-017-048740-5.
- [9] ASHRAE, Psychometrics: Theory and Practice. 1996, ISBN 1-883413-39-7.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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 ainsi qu'aux Fonds Européen de Développement Régional (FEDER). Les auteurs souhaitent également remercier Jérôme Vigneron pour son assistance technique lors de l'élaboration du dispositif expérimental.