# 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 MARC[1], Laetitia ADELARD[1], Daniel MADYIRA[2], Esther AKINLABI[2], Jean CASTAING-LASVIGNOTTES[1]**

[1] Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l’Energie, l’environnemeNt et le bâtimenT (PIMENT). Université de La Réunion
[2] Department of Mechanical Engineering Science. Université de Johannesbourg

$29^{e}$ Congrès français de thermique Belfort $1^{er}$ – 3 juin 2021

# Contexte

## Valorisation de la biomasse

Copeaux

Bagasse

Plaquette

Déchets

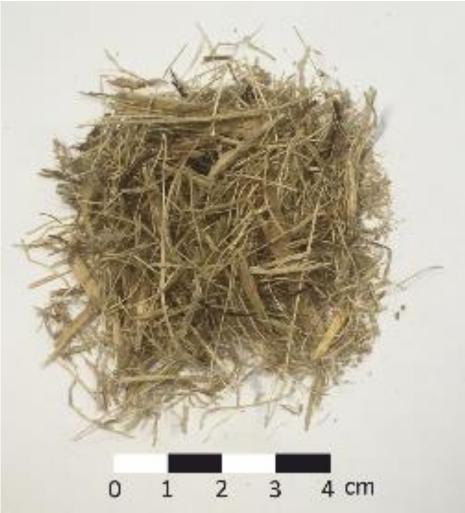
**Énergie**

**Matériaux**

**Séchage**

Combustion
Gazéification
Pyrolyse
…

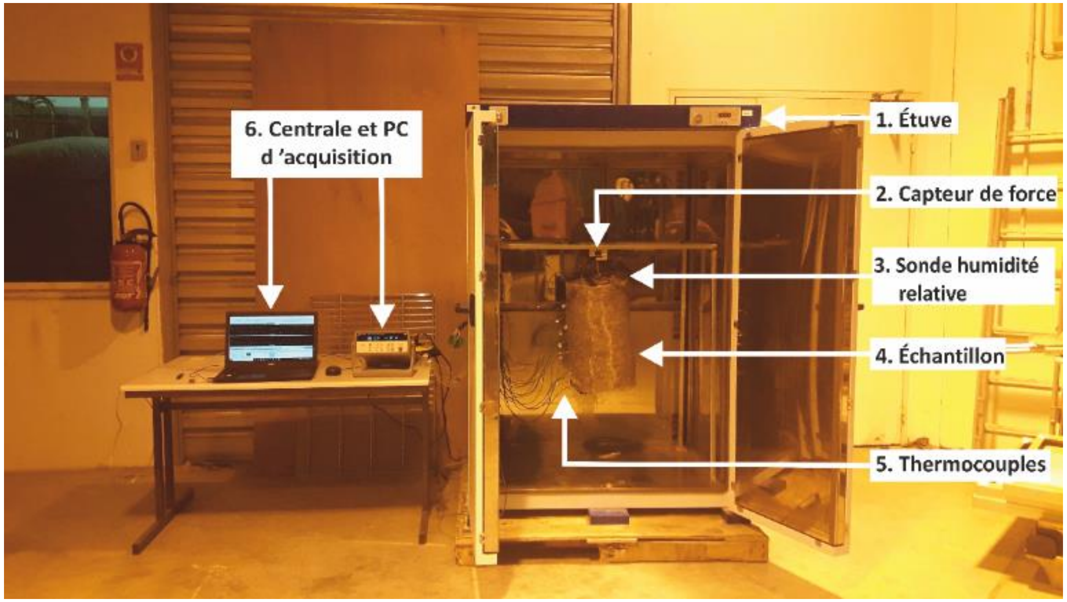
Paillage agricole
Isolant thermique/hydrique
Béton biosourcé
…

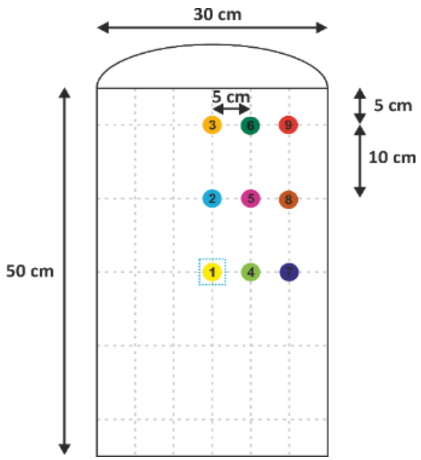


*Bagasse de canne à sucre*

- **Milieu poreux hétérogène**
- **Transferts couplés de masse et de chaleur**
- **Approche expérimentale et numérique**
- **Bagasse de canne à sucre**

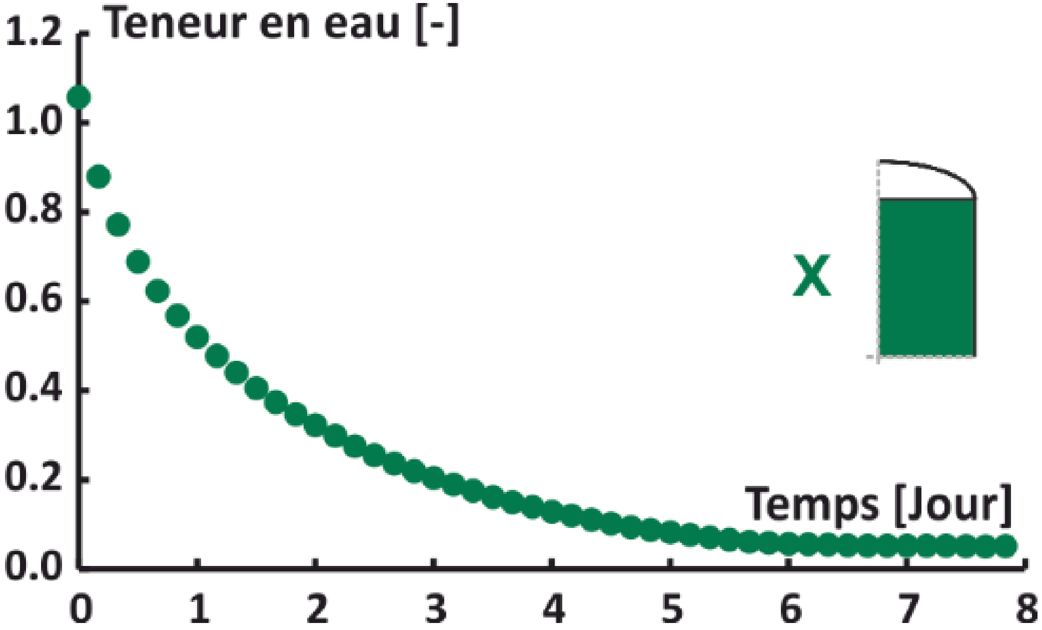
# Dispositif expérimental


6. Centrale et PC d'acquisition
1. Étuve
2. Capteur de force
3. Sonde humidité relative
4. Échantillon
5. Thermocouples


30 cm
5 cm
5 cm
10 cm
50 cm
3
6
9
2
5
8
1
4
7

- Bagasse conditionnée dans un cylindre (masse ~ 3,6 kg)
- 3 variables suivies : teneur en eau, humidité relative, température
- 1 capteur de force (suivi de la masse)
- 1 sonde d'humidité relative
- 9 thermocouples
- Acquisition des données toutes les 20 minutes
- 2 campagnes de séchages réalisées : 50°C et 60°C

# Résultat expérimental



$$X = \frac{m_{init} - m_{sec}}{m_{sec}} = \frac{m_{eau}}{m_{sec}}$$

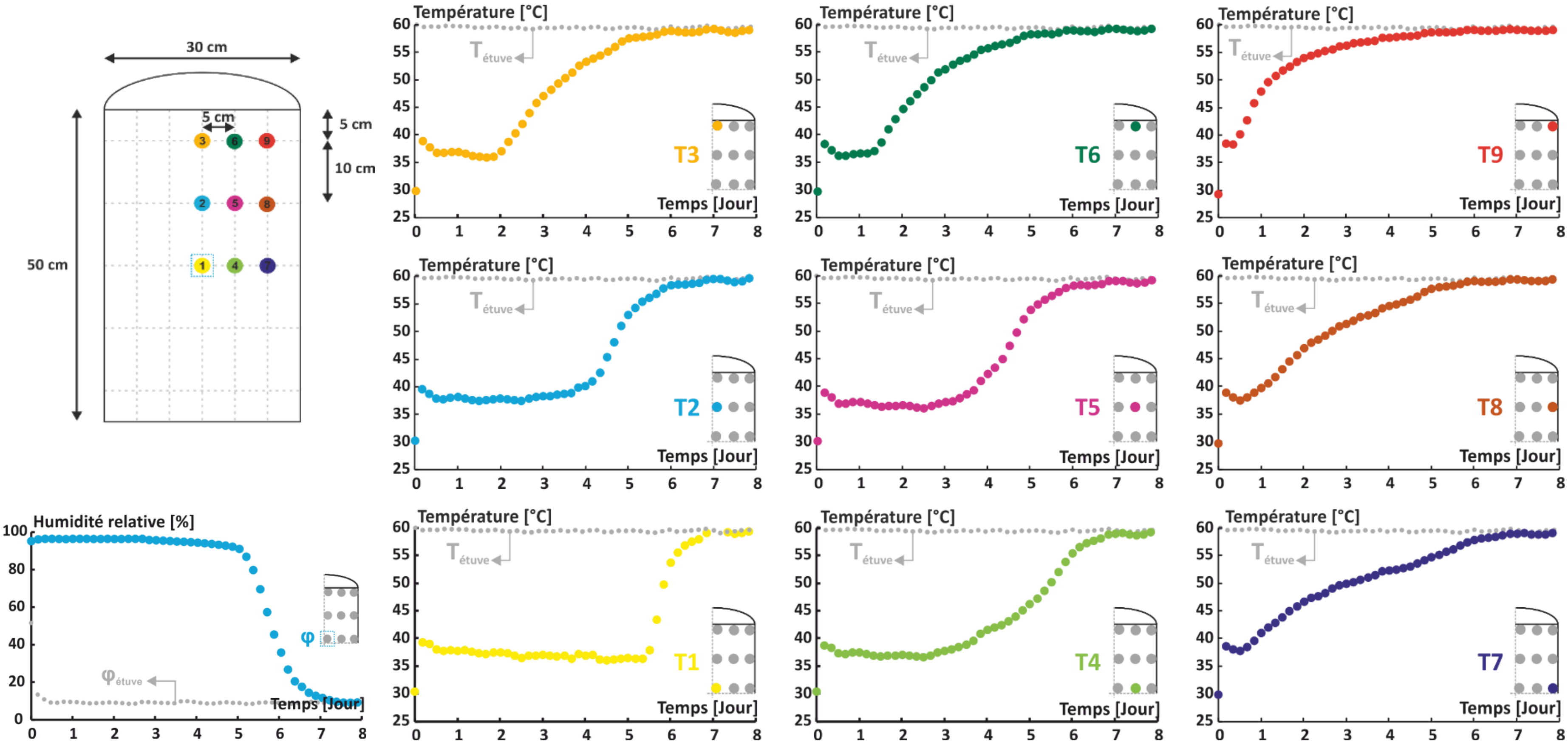
$$m_{init} = 3,65kg$$

$$X_{init} = 105,7\%$$

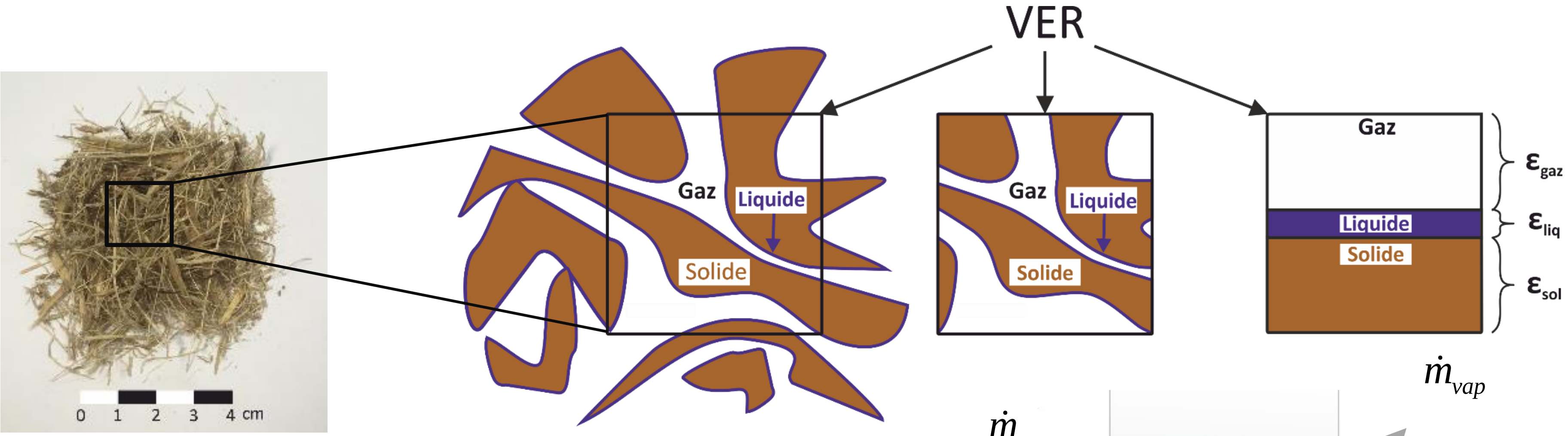
$$m_{fin} = 1,87kg$$

$$X_{fin} = 5,2\%$$

# Résultat expérimental



# Modélisation


0 1 2 3 4 cm
VER
Gaz
Liquide
Solide
Gaz
Liquide
Solide
Gaz
Liquide
Solide
$\varepsilon_{gaz}$
$\varepsilon_{liq}$
$\varepsilon_{sol}$

## Conservation

$$\frac{\partial m_{liq}}{\partial t} = -\dot{m}_{evap}$$

$$\frac{\partial m_{vap}}{\partial t} = \sum_{\text{frontières}} \pm \dot{m}_{vap} + \dot{m}_{evap}$$

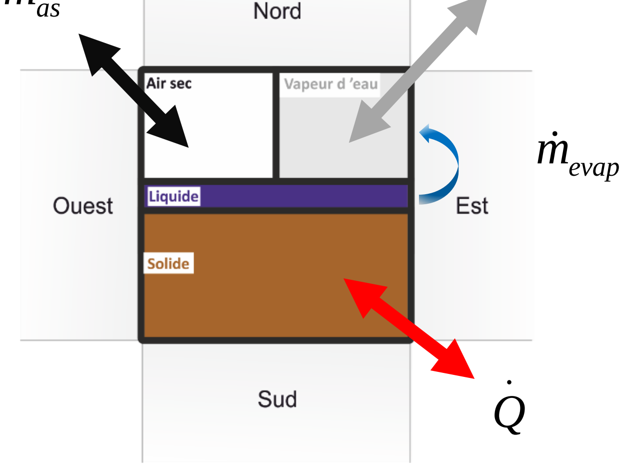
$$\frac{\partial m_{as}}{\partial t} = \sum_{\text{frontières}} \pm \dot{m}_{as}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \sum_{\text{frontières}} \left( \pm \dot{m}_{vap}.h_{vap} \pm \dot{m}_{as}.h_{as} \right) + \sum_{\text{frontières}} \dot{Q} - L_v.\dot{m}_{evap}$$

## Transferts

$$\dot{m}_i = -M_i.S.D_{eff}.\nabla c_i \qquad i=vap,as$$

$$\dot{Q} = -\lambda_{eff}.S.\nabla T$$

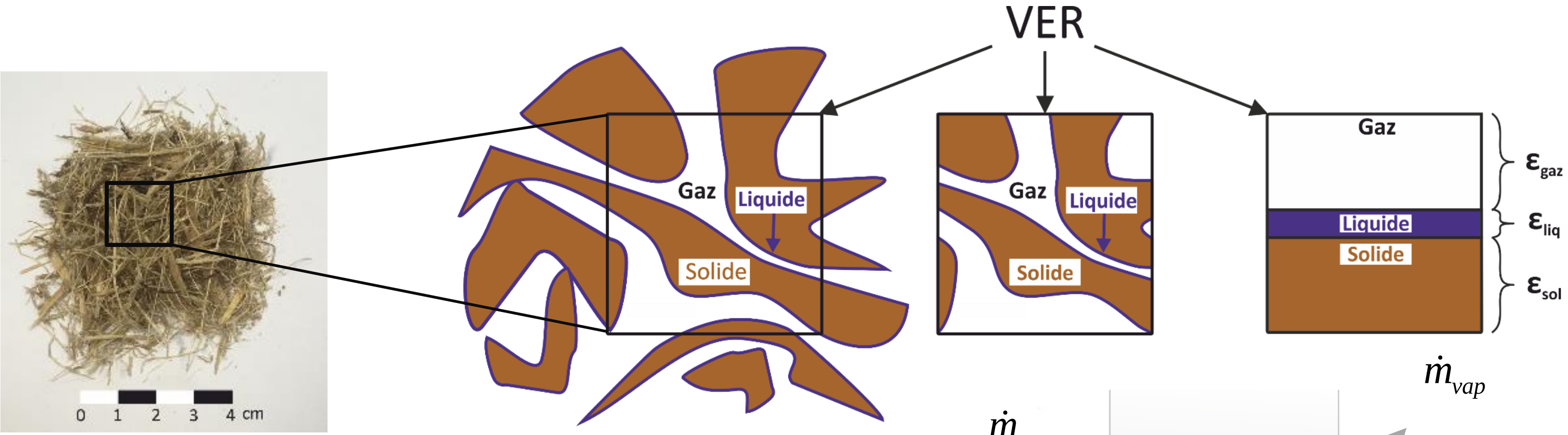

$\dot{m}_{vap}$
$\dot{m}_{as}$
Nord
Air sec
Vapeur d 'eau
Ouest
Liquide
Est
$\dot{m}_{evap}$
Solide
Sud
$\dot{Q}$

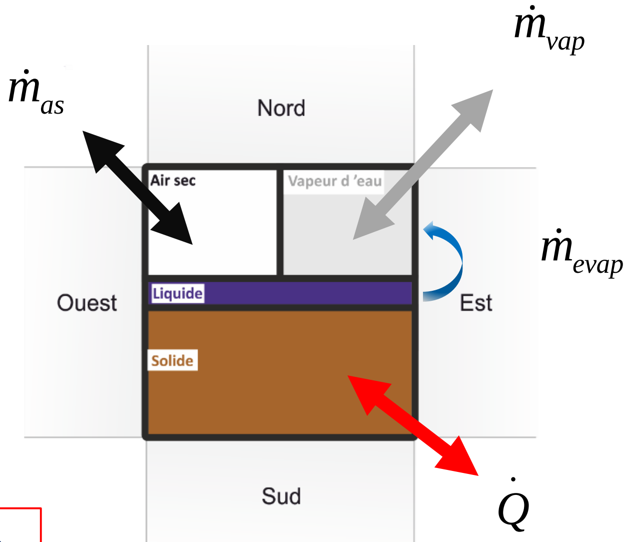
## Conditions aux limites

$$\dot{m}_i = -M_i.S.\alpha_m.\left(c_{surf} - c_{ext}\right) \qquad i=vap,as$$

$$\dot{Q} = -\alpha_h.S.\left(T_{surf} - T_{ext}\right)$$

# Modélisation


VER
0 1 2 3 4 cm
Gaz
Liquide
Solide
Gaz
Liquide
Solide
Gaz
Liquide
Solide
$\varepsilon_{gaz}$
$\varepsilon_{liq}$
$\varepsilon_{sol}$


$\dot{m}_{vap}$
$\dot{m}_{as}$
Nord
Air sec
Vapeur d 'eau
Ouest
Est
Liquide
Solide
$\dot{m}_{evap}$
Sud
$\dot{Q}$

## Conservation

$$\frac{\partial m_{liq}}{\partial t} = -\dot{m}_{evap}$$

$$\frac{\partial m_{vap}}{\partial t} = \sum_{\text{frontières}} \pm \dot{m}_{vap} + \dot{m}_{evap}$$

$$\frac{\partial m_{as}}{\partial t} = \sum_{\text{frontières}} \pm \dot{m}_{as}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \sum_{\text{frontières}} \left( \pm \dot{m}_{vap}.h_{vap} \pm \dot{m}_{as}.h_{as} \right) + \sum_{\text{frontières}} \dot{Q} - L_v.\dot{m}_{evap}$$

## Transferts

$$\dot{m}_i = -M_i.S.\boxed{D_{eff}}.\nabla c_i \qquad i = vap, as$$

$$\dot{Q} = -\boxed{\lambda_{eff}}.S.\nabla T$$

4 coefficients à identifier

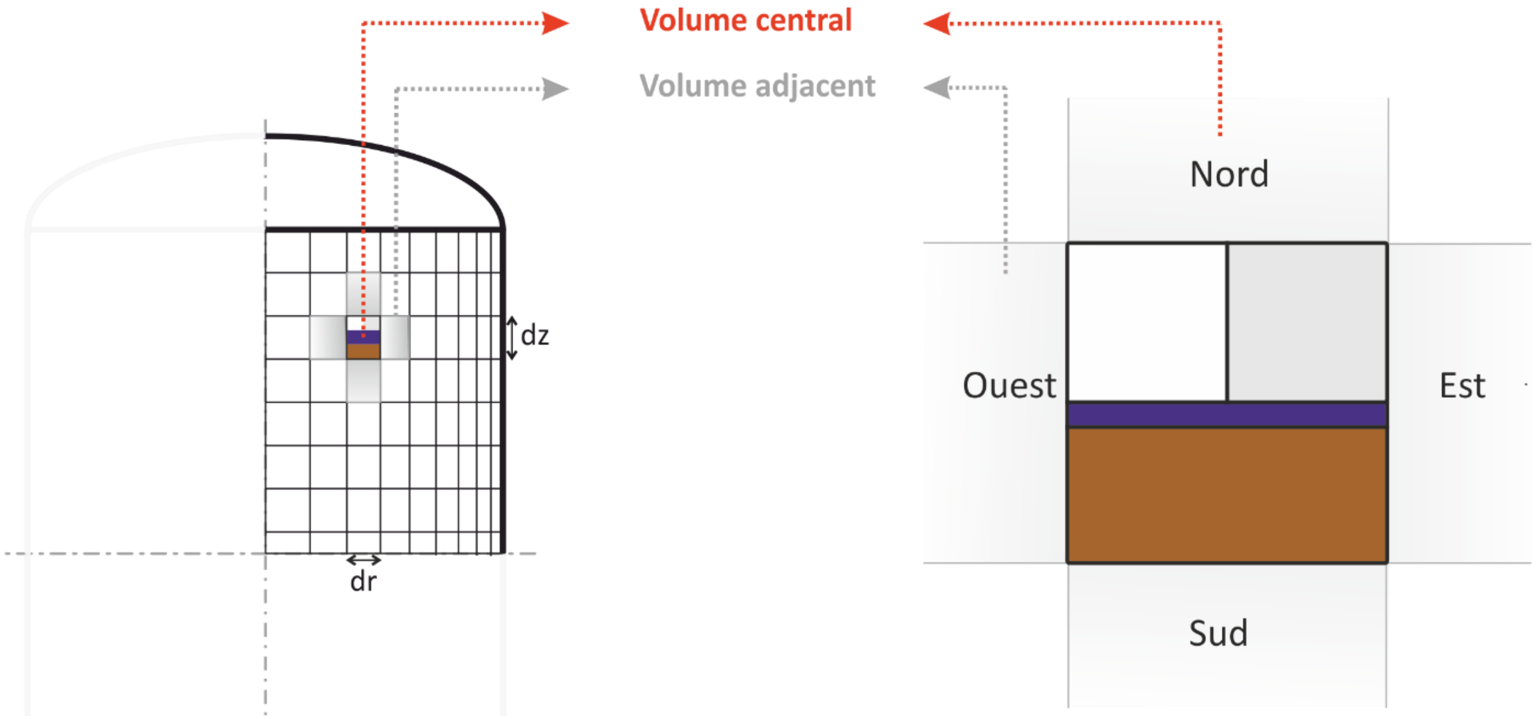
## Conditions aux limites

$$\dot{m}_i = -M_i.S.\boxed{\alpha_m}.\left(c_{surf} - c_{ext}\right) \qquad i = vap, as$$

$$\dot{Q} = -\boxed{\alpha_h}.S.\left(T_{surf} - T_{ext}\right)$$

# Simulation

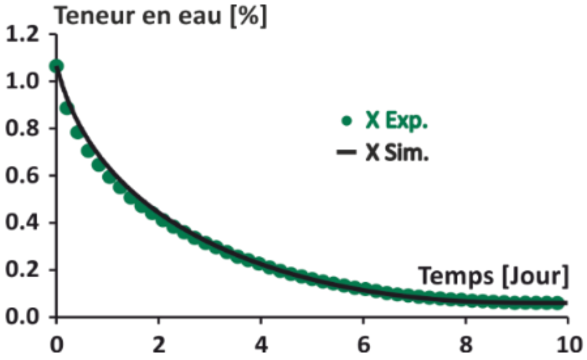
Méthode des volumes finis
Géométrie cylindrique en 2D

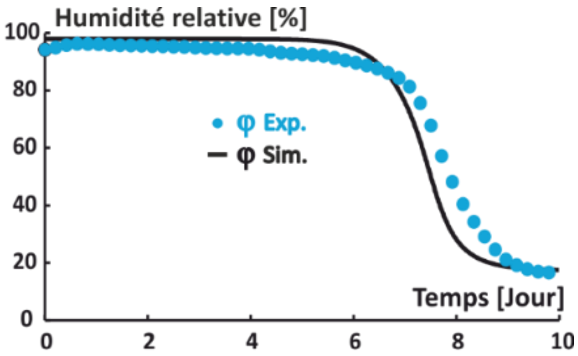

Volume central
Volume adjacent
dz
dr
Nord
Ouest
Est
Sud

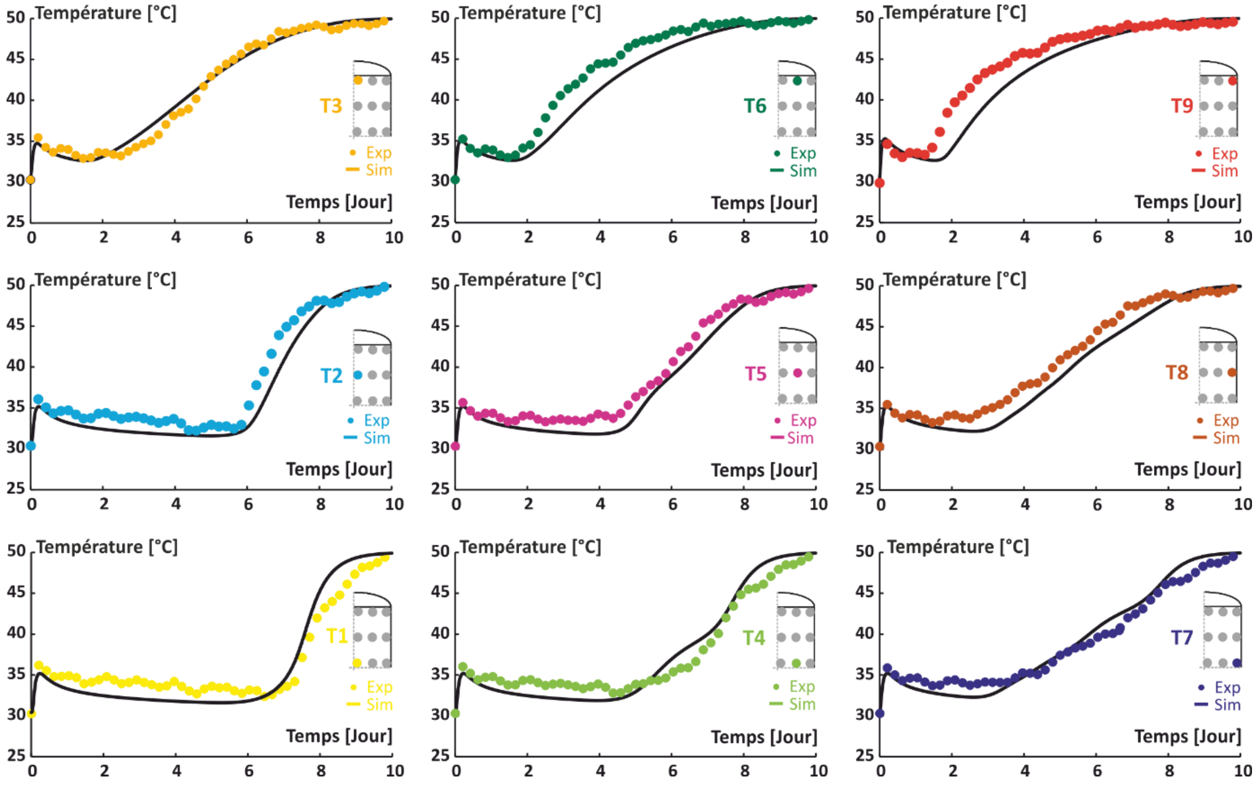
| | $\rho_{bag}$ | $Cp_{bag}$ | $Cp_{liq}$ | $Lv_{liq}$ | $Cp_{vap}$ | $Cp_{as}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Unité** | $kg.m^{-3}$ | $J.kg.K^{-1}$ | $J.kg.K^{-1}$ | $kJ.kg^{-1}$ | $J.kg.K^{-1}$ | $J.kg.K^{-1}$ |
| **Valeur** | 125 | 1400 | 4180 | 2257 | 1826 | 1006 |

# Identification

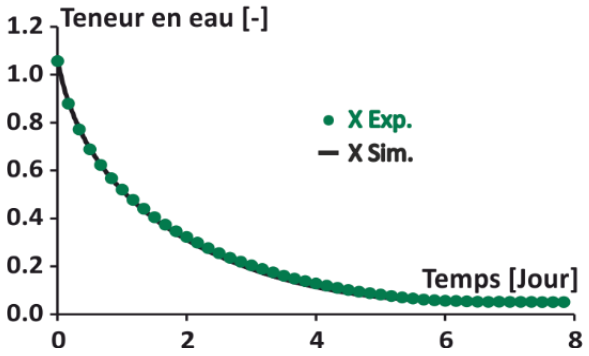
$$Ecart = \left(\frac{T_{\exp} - T_{\mathrm{mod}}}{T_{\exp}}\right)^2 + \left(\frac{\varphi_{\exp} - \varphi_{\mathrm{mod}}}{\varphi_{\exp}}\right)^2 + \left(\frac{X_{\exp} - X_{\mathrm{mod}}}{X_{\exp}}\right)^2$$

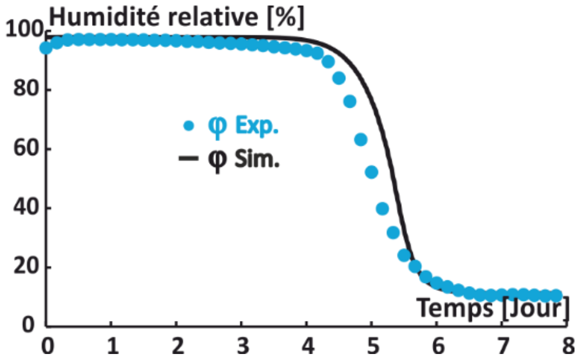


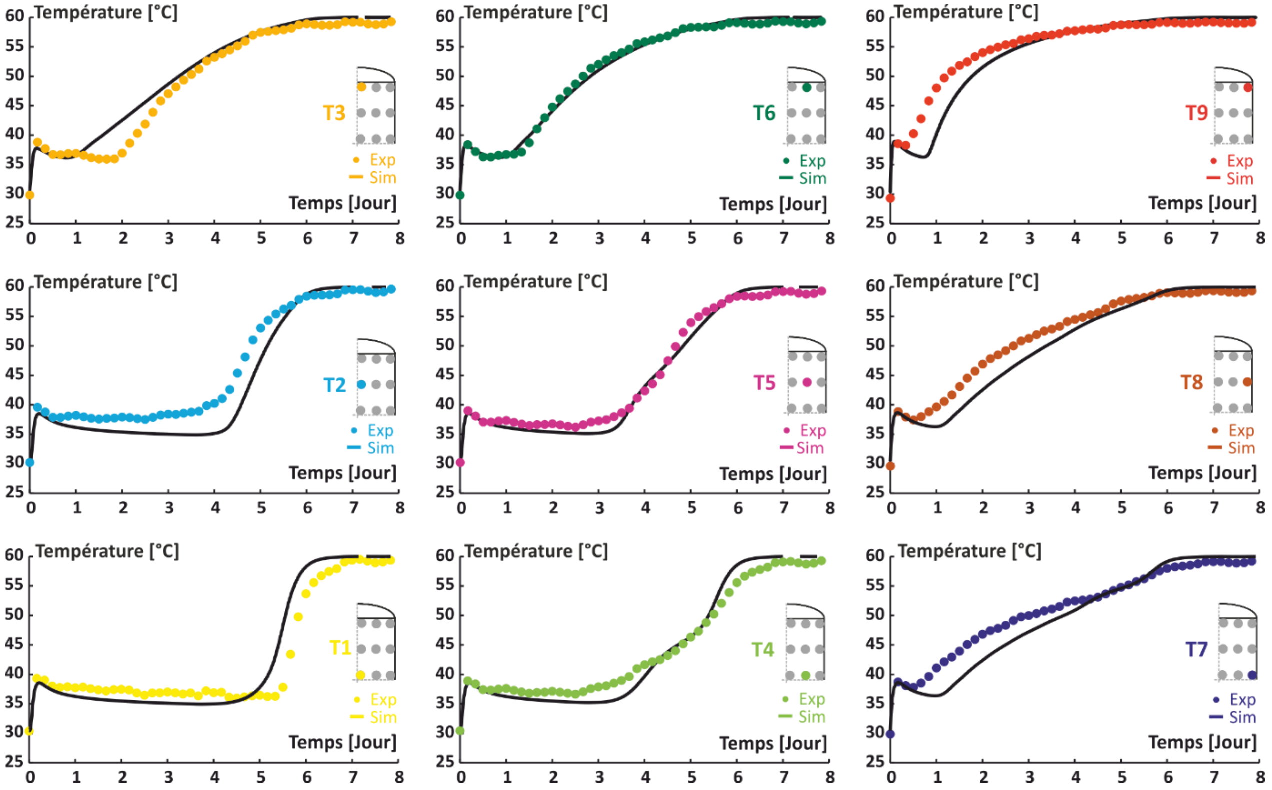




# Validation







| | $D_{eff}$ | $\lambda_{eff}$ | $\alpha_m$ | $\alpha_h$ |
|---|---|---|---|---|
| | $m^2.s^{-1}$ | $W.m^{-1}.K^{-1}$ | $m.s^{-1}$ | $W.m^{-2}.K^{-1}$ |
| **Bagasse** | $3.10^{-5}$ | 0,061 | 0,091 | 6,05 |

# Conclusion et perspectives

- Application à d'autres biomasses (copeaux de bois de *Cryptomeria japonica*)
- Application aux transferts thermiques et hydriques dans les parois d'habitation en milieu tropical chaud et humide

Société Française de Thermique

# 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 MARC[1], Laetitia ADELARD[1], Daniel MADYIRA[2], Esther AKINLABI[2], Jean CASTAING-LASVIGNOTTES[1]**

[1] Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l’Energie, l’environnemeNt et le bâtimenT (PIMENT). Université de La Réunion
[2] Department of Mechanical Engineering Science. Université de Johannesbourg