

# Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois

Tuan Anh NGUYEN<sup>(1)</sup>, Nicolas ANGELLIER<sup>(1)</sup>, Sabine CARE<sup>(2)</sup>, Laurent ULMET<sup>(1)</sup>, Frédéric DUBOIS<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Université de Limoges, Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes, Département Génie Civil & Durabilité, Centre Universitaire de Génie Civil, Egletons  
<sup>(2)</sup> Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, ENPC, IFSTTAR, F-77455 Marne-la-Vallée

## PROBLEMATIQUE

- Mesure de l'humidité dans le bois = condition essentielle pour la connaissance de ses caractéristiques mécaniques et physiques  
 - La résistivité évolue en fonction de la teneur en eau

**Objectif : mesure 3D du champ d'humidité dans le bois par la méthode de résistivité électrique**

Cartographie hydrique dans des sections de poutres, de poteaux en bois

Monitoring, surveillance in-situ de l'humidité pour la durabilité des ouvrages d'art et des bâtiments en bois

## MODELE DE DIFFUSION NON LINEAIRE – METHODE D'IDENTIFICATION DES PARAMETRES

### Méthode des différences finies en 1D

Loi de diffusion  $\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial W}{\partial x} \right) \\ D = D_0 \exp(kW) \end{cases}$

### Equation aux dérivées partielles en 1D

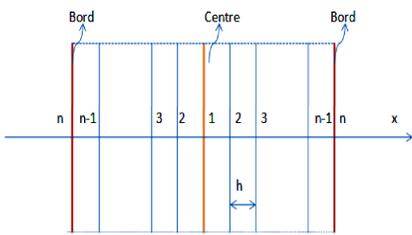
$$D = D_0 \exp(kW) \left[ k \left( \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right]$$

W: Teneur en eau  
 D: Coefficient de diffusion (m<sup>2</sup>/s)

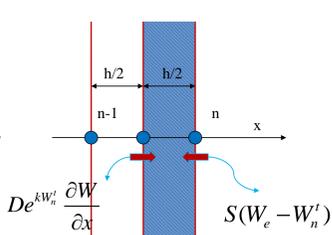
k: Coefficient non linéaire  
 S: Coefficient d'échange surfacique (m/s)

### Discretisation spatiale et temporelle

#### Partie courante



#### Partie de bord



$$W_i^{t+\tau} = W_i^t + \frac{k(W_{i+1}^t - W_{i-1}^t)^2}{4M} + \frac{W_{i+1}^t - 2W_i^t + W_{i-1}^t}{M}$$

$$M = \frac{h^2}{D_0 \tau \exp(kW^t)}$$

$$W_n^{t+\tau} = \frac{2\tau D e^{kW_n^t}}{h^2} W_{n-1}^t + \left(1 - \frac{2\tau D e^{kW_n^t}}{h^2} - \frac{2S\tau}{h}\right) W_n^t + \frac{2S\tau}{h} W_e$$

### Méthode de minimisation du Simplexe

Objectif : réduire l'écart entre les données expérimentales et numériques  
 Minimisation d'une fonction d'erreur f  
 → Identification des paramètres D<sub>0</sub>, S, k, et W<sub>lim</sub> (teneur en eau limite)

Choix de conditions initiales

Calcul de l'humidité moyenne pour chaque itération par le modèle en différences finies

Méthode du Simplexe

Interpolation de l'humidité correspondant aux temps expérimentaux

Calcul de la fonction d'erreur f

f > f<sub>n</sub>

$$f = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (W_{num}(i) - W_{exp}(i))^2}$$

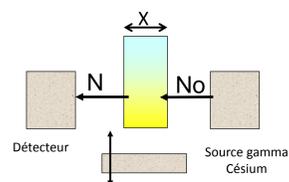
n: Nombre de points expérimentaux  
 f<sub>n</sub>: Critère d'arrêt

f < f<sub>n</sub>

Résultat de l'identification

## METHODES EXPERIMENTALES – PROFILS D'HUMIDITE

### Gammadensimétrie (laboratoire)

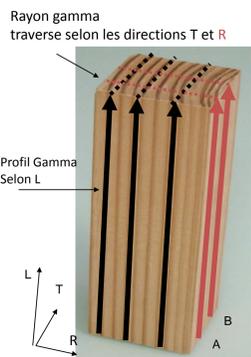


Loi de Lambert : N/No = exp(-Σ μ<sub>i</sub> ρ<sub>i</sub> x<sub>i</sub>)

Si X = x<sub>s</sub> + x<sub>e</sub> + x<sub>a</sub>  
 N/No = exp(-μ<sub>s</sub> ρ<sub>s</sub> x<sub>s</sub> - μ<sub>e</sub> ρ<sub>e</sub> x<sub>e</sub>)  
 ρ<sub>e</sub> = 1000 kg/m<sup>3</sup>, μ<sub>e</sub> = 0,0857  
 ρ<sub>s</sub> = 1520 kg/m<sup>3</sup>, μ<sub>s</sub> = 0,0819

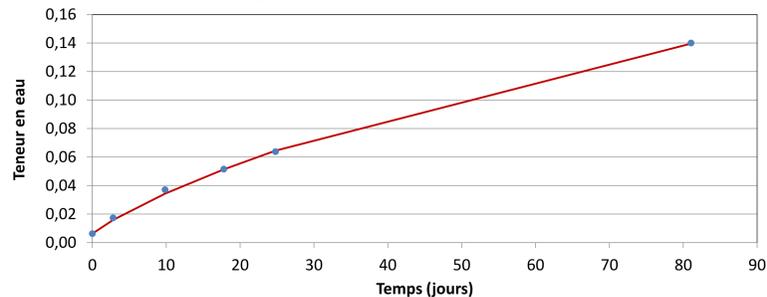
Teneur en eau : W(t) = ρ<sub>e</sub> x<sub>e</sub>(t) / ρ<sub>s</sub> x<sub>s</sub>

Faisceau gamma : Ø=5 mm (un point tous les 5 mm)  
 Parafilm sur les faces latérales (profil 1D, selon L)



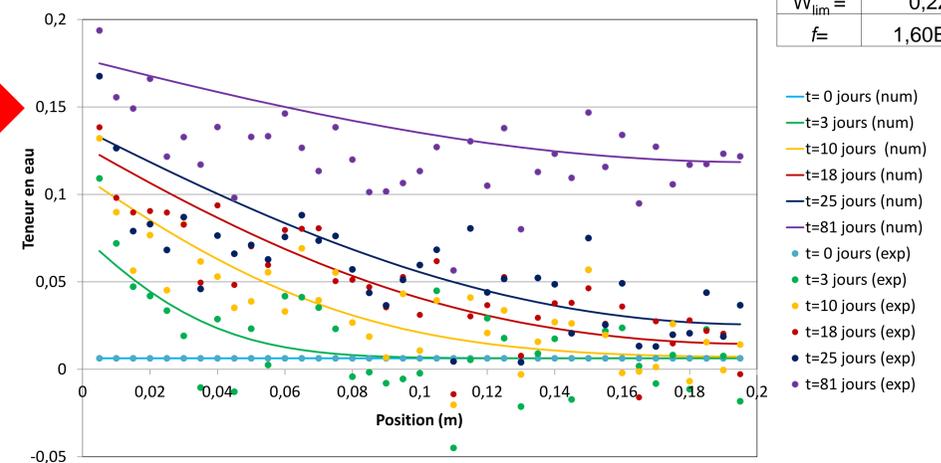
### Résultats d'identification couplée sur des profils d'humidité indépendants

#### Profil standard global W(t) par pesée



Paramètres identifiés	
D <sub>0</sub> =	3,27E-09 (m <sup>2</sup> /s)
S =	4,73E-08 (m/s)
k =	1,94
W <sub>lim</sub> =	0,225
f =	1,60E-03

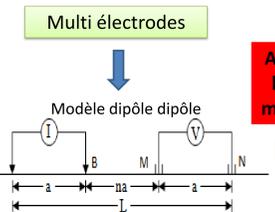
#### Profils spatiaux W(x) par gammadensimétrie sur la longueur



### Résistivité (in-situ)

Résistivimètre SYSCAL Junior 48

Géophysique

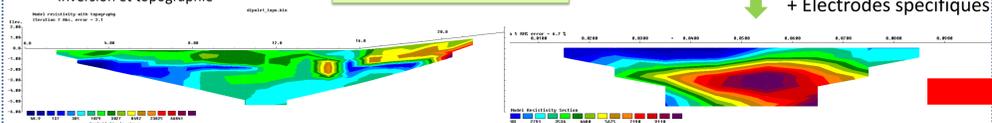


Adaptation à l'échelle du matériau bois



Faisceaux de câbles + Electrodes spécifiques

Résistivités



Obtention de la section des résistivités interprétées (après plusieurs itérations)

Mesures préliminaires: cartographie de résistivité

## PERSPECTIVES

- Campagne expérimentale sur des échantillons jumeaux : mesures en parallèle dans des conditions identiques en gammadensimétrie (Laboratoire Navier) et en résistivité (Laboratoire GEMH)
- Calibrer des profils d'humidité à partir de cartographies de résistivité
- Développer une méthode hybride permettant de coupler la méthode résistive au modèle de diffusion pour identifier les paramètres de diffusion qui compléteront les informations inaccessibles expérimentalement.