

Comportement Thermo-Hygro- Mécanique

*Relations Structure / Propriétés et
Diversité des Bois*

Frédéric Dubois

Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes

Département Génie Civil & Durabilité

Campus Universitaire de Génie Civil, Egletons



IMRO Egletons



Université
de Limoges

Comportement Thermo-Hygro-Mécanique

Relations Structure / Propriétés et Diversité des Bois

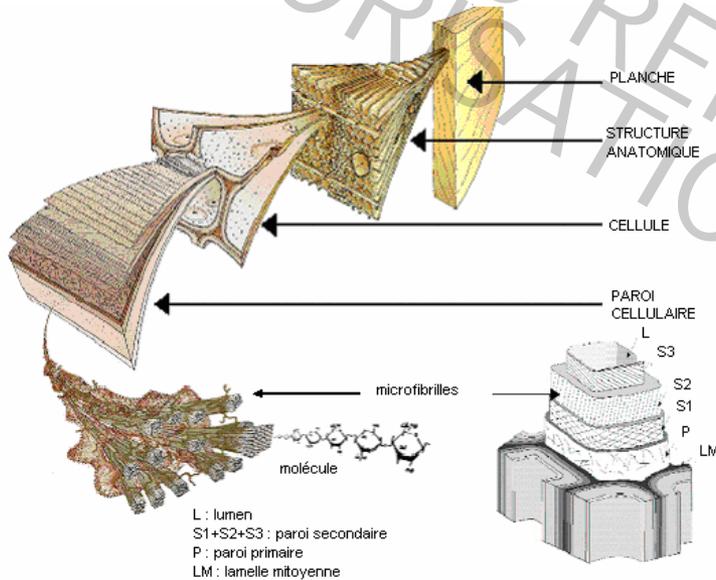
1- Contexte Scientifiques : Durabilité des Ouvrages en Service



Comportement Thermo-Hygro-Mécanique

Relations Structure / Propriétés et Diversité des Bois

2- Un matériau à différentes échelles



Comportement à l'échelle d'une structure

Comportement à l'échelle d'éléments

Comportement à l'échelle d'un VER

Comportement à l'échelle de la cellule

(Observations multi échelles: d'après Harrington, 1998)

Comportement Thermo-Hygro-Mécanique

Relations Structure / Propriétés et Diversité des Bois

3- Des structures Bois dans leur Environnement



Chargements mécaniques
Effets climatiques (température, humidité)
Interactions structures mixtes
Attaques biologiques



Effets différés (fluage, relaxation)
Retrait gonflement
Transfert de charge
Dégradation biologique



Déformations excessives
Fissuration
Endommagement



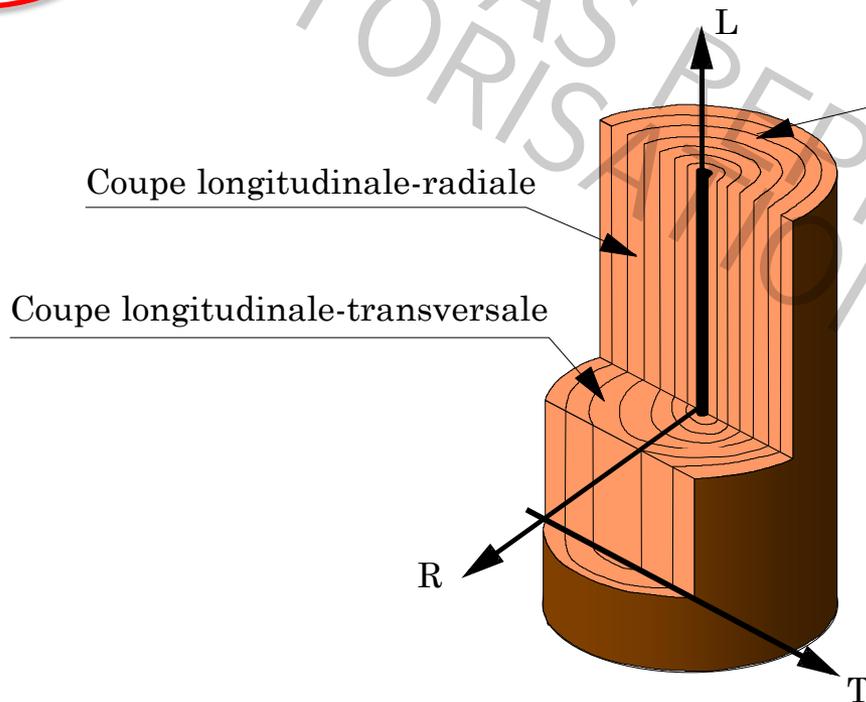
Comportement Thermo-Hygro-Mécanique

Relations Structure / Propriétés et Diversité des Bois

- Structuration
- Diffusion hydrique dans le domaine hygroscopique
- Comportement Mécano-sorptif
- Applications au Génie Civil Bois

Structuration

1- Macrostructure



3 directions privilégiées :

- direction longitudinale L
- direction radiale R
- direction transversale T

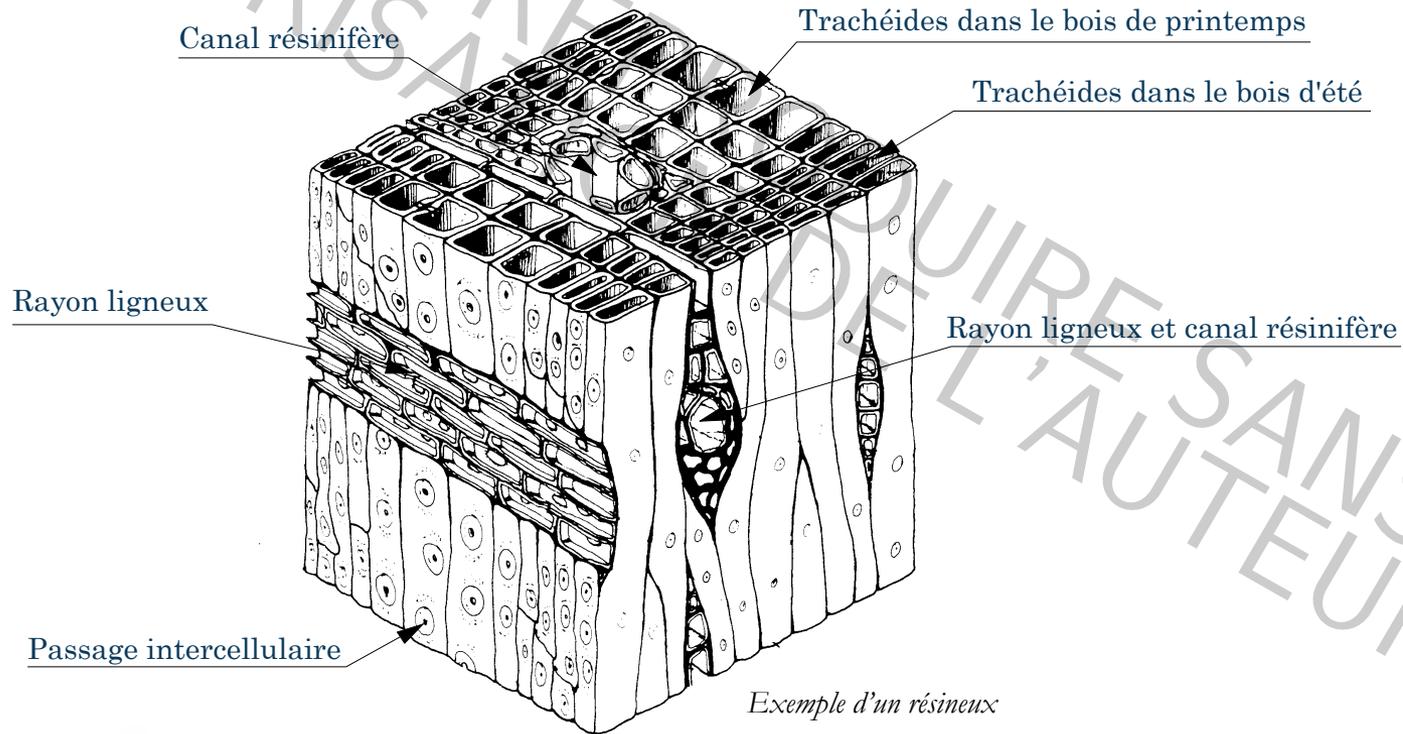
Essence	E_L^{12} (MPa)	E_T^{12} (MPa)	E_R^{12} (MPa)
Épicéa	10700	430	710
Pin	16500	570	1100
Douglas	16550	900	1300
Chêne	17500	1150	2090
Hêtre	14000	1150	2260
Frêne	16000	810	1520
Bouleau	16500	620	1120
Noyer	11300	630	1200

12% d'humidité

Structuration

2-

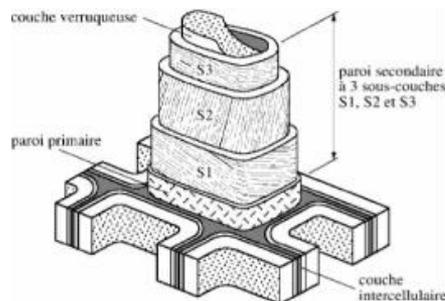
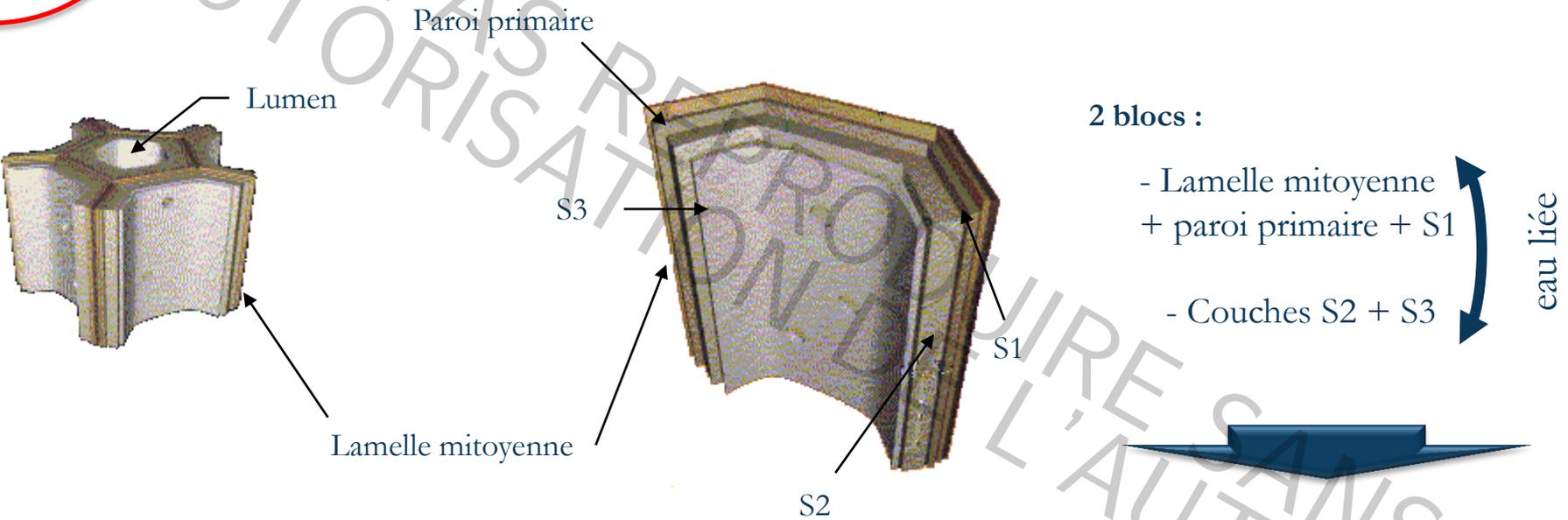
Microstructure



Structuration

3-

Ultra structure



Rôle de l'eau liée:

- Retrait-Gonflement par diffusion hydrique
- Couplage mécanique : mécano-sorption

Diffusion hydrique dans le domaine hygroscopique

1- Domaine hygroscopique

$$w = \frac{M_{H_2O}}{M_{anh}} = \frac{M_w - M_{anh}}{M_{anh}}$$

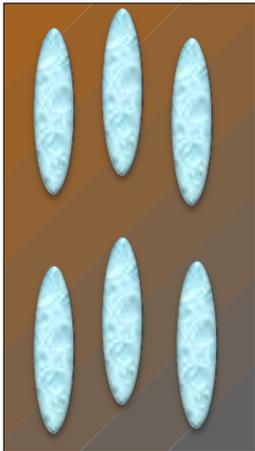
M_{anh} : Masse anhydre du bois

M_w : Masse humide du bois

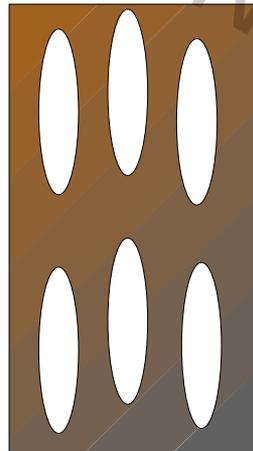
M_{H_2O} : Masse d'eau

3 états distincts :

Saturation complète

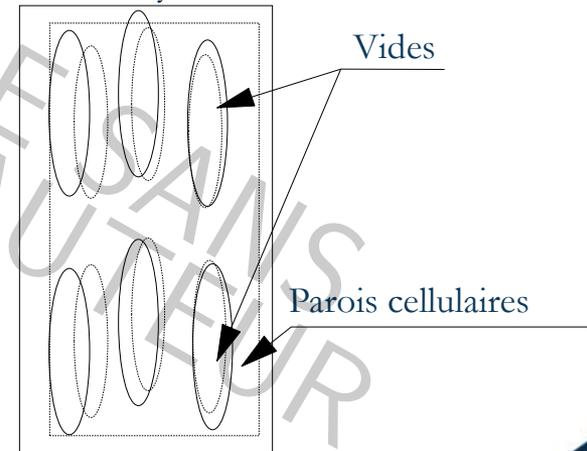


Saturation des fibres



Point de Saturation des
Fibres
 $w=30\%$

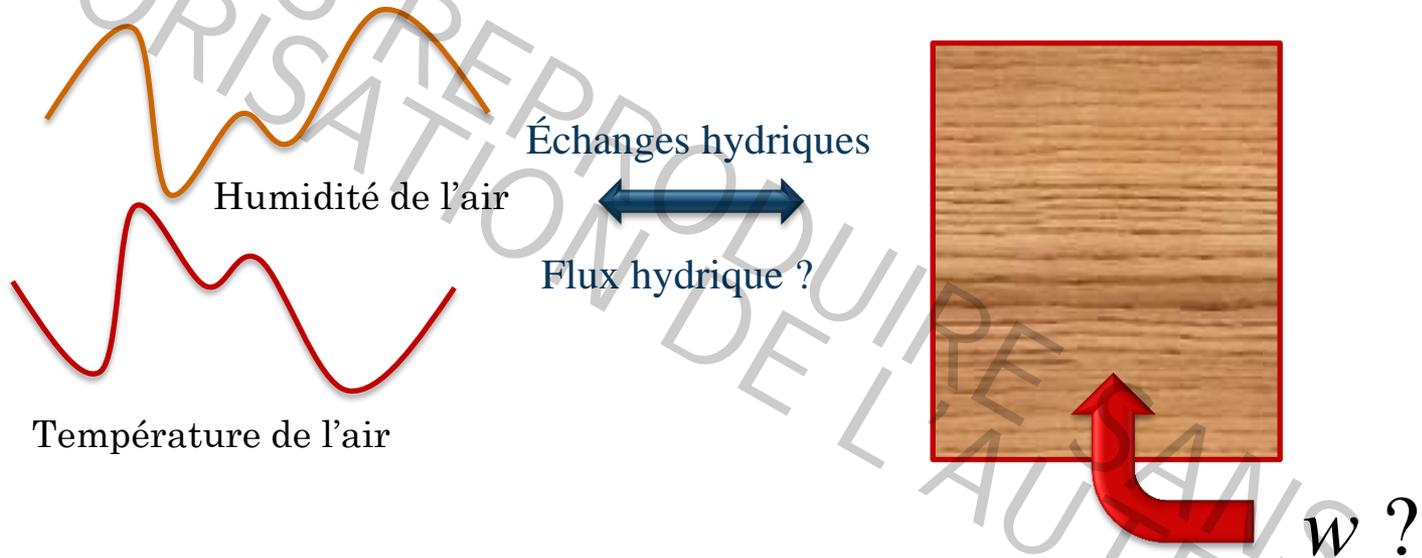
Etat anhydre



Domaine hygroscopique

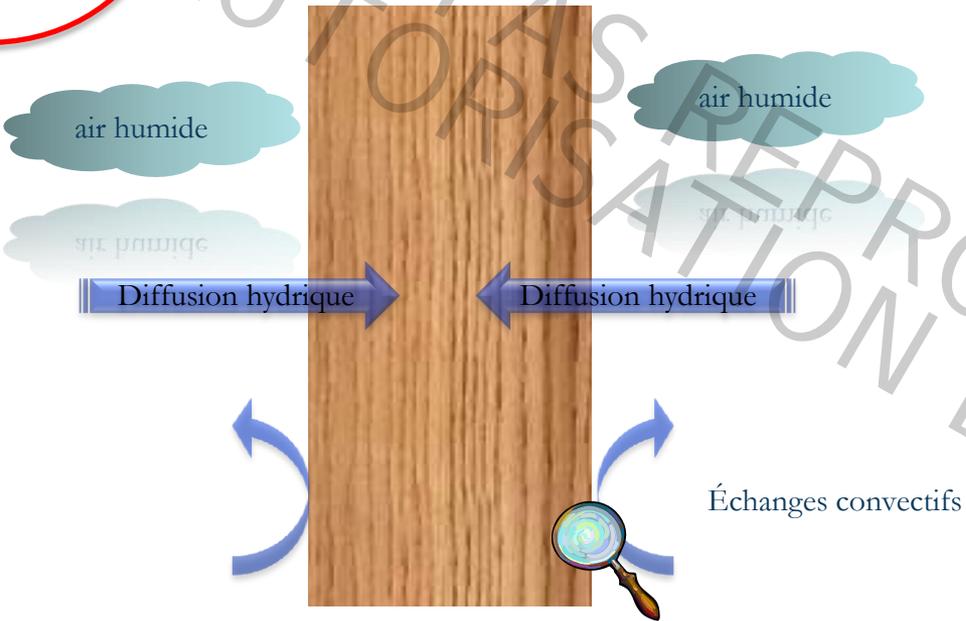
Diffusion hydrique dans le domaine hygrosopique

2- Problématique de la diffusion 1/2



Diffusion hydrique dans le domaine hygrosopique

2- Problématique de la diffusion 2/2

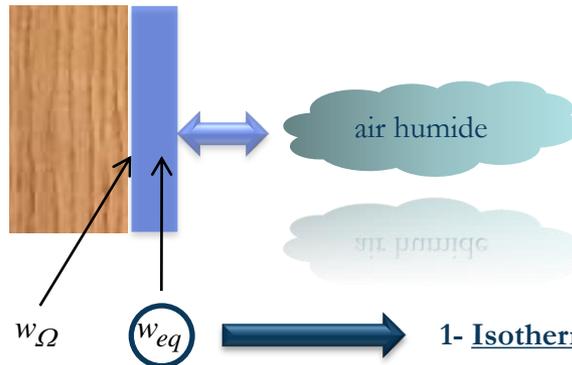


$$\frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\underline{D}_T \vec{\nabla} T + \underline{D}_{Tw} \vec{\nabla} w)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\underline{D}_w \vec{\nabla} w + \underline{D}_{wT} \vec{\nabla} T)$$

2- Paramètres de diffusion

$$-(\underline{D}_w \vec{\nabla} w) \cdot \vec{n} = S (w_\Omega - w_{eq})$$



1- Isotherme de sorption

Diffusion hydrique dans le domaine hygrosopique

3- Isotherme de sorption : Protocol expérimental 1/3

HR	11,3%	43,2%	65,0%	75,3%	84,3%	99,0%
sels	LiCl	NaBr	NaNO2	NaCl	KCl	H2O



2mm d'épaisseur



Cloche à vide

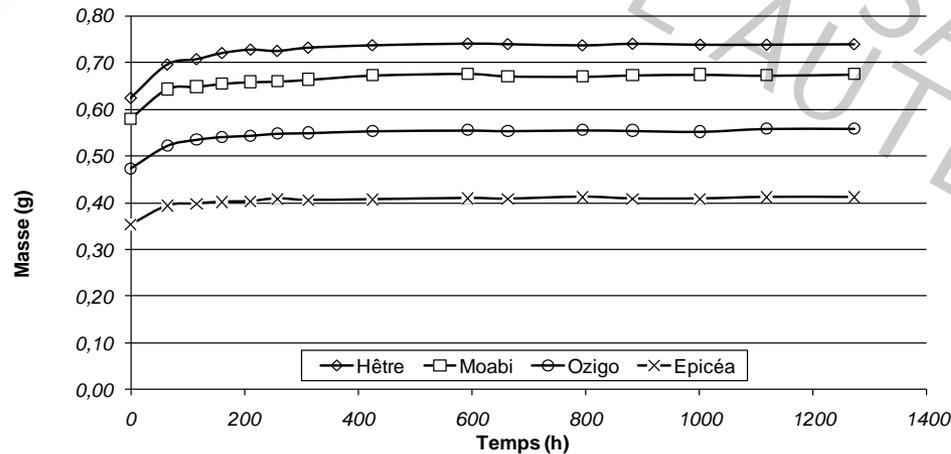
Mesure de la masse humide M_H



Passage en étuve à 103°C : Masse anhydre M_o

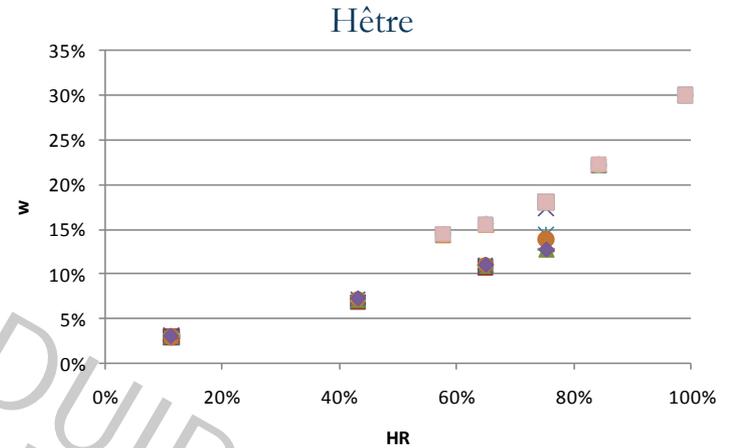
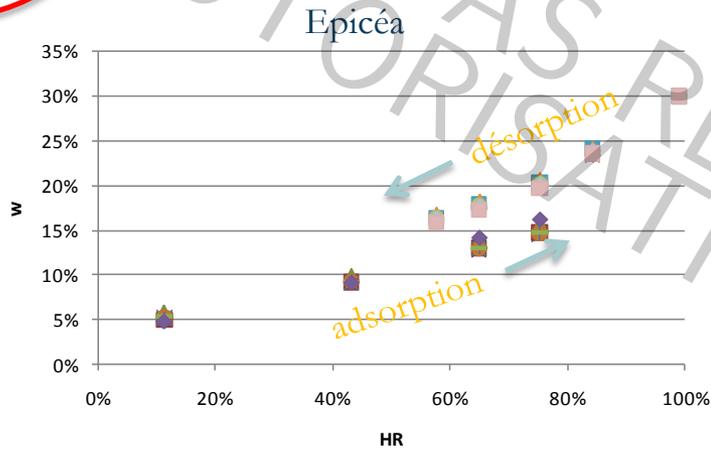


$$w_{eq} = \frac{M_H}{M_o}$$



Diffusion hydrique dans le domaine hygrosopique

3- Isotherme de sorption : Hystérésis 2/3



Diffusion hydrique dans le domaine hygrosopique

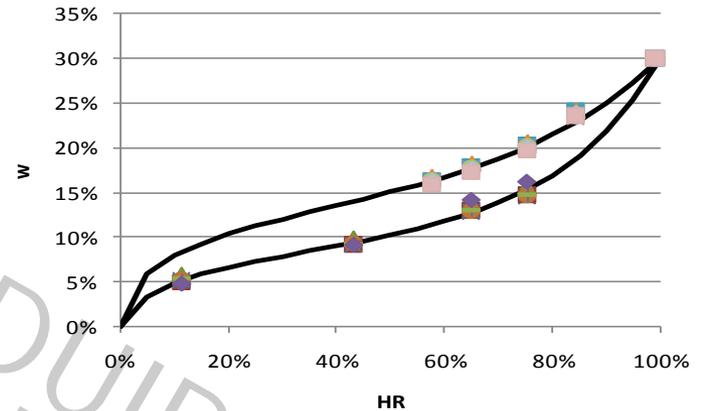
3- Isotherme de sorption : Modèle 3/3

Adsorption : $\ln \frac{w}{w_s} = \varphi_a \cdot \ln HR \cdot \exp(a_a \cdot HR)$

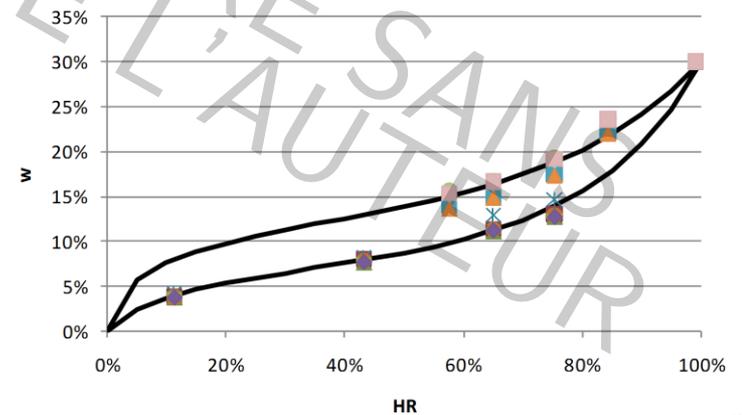
Désorption : $\ln \frac{w}{w_s} = \varphi_d \cdot \ln HR \cdot \exp(a_d \cdot HR)$

	Epicéa	Hêtre	Moabi	Ozigo
w_s	30%	30%	30%	30%
φ_a	0,67	0,89	0,64	0,77
a_a	1,68	1,50	1,68	1,67
φ_d	0,50	0,51	0,42	0,51
a_d	1,37	1,67	1,52	1,55

Epicéa



Ozigo



Diffusion hydrique dans le domaine hygrosopique

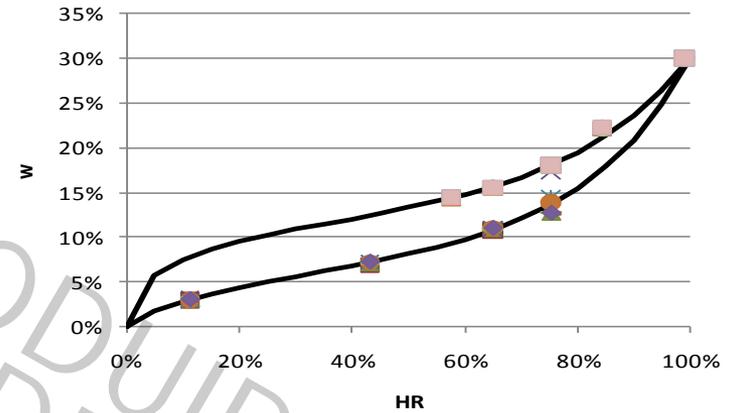
3- Isotherme de sorption : Modèle 3/3

Adsorption : $\ln \frac{w}{w_s} = \varphi_a \cdot \ln HR \cdot \exp(a_a \cdot HR)$

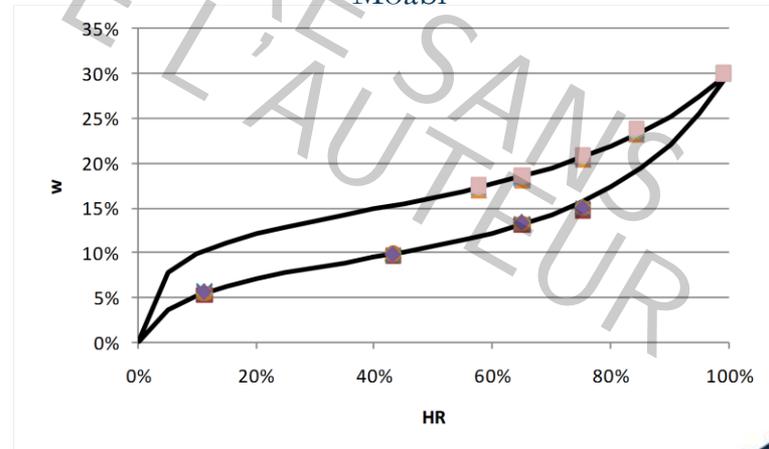
Désorption : $\ln \frac{w}{w_s} = \varphi_d \cdot \ln HR \cdot \exp(a_d \cdot HR)$

	Epicéa	Hêtre	Moabi	Ozigo
w_s	30%	30%	30%	30%
φ_a	0,67	0,89	0,64	0,77
a_a	1,68	1,50	1,68	1,67
φ_d	0,50	0,51	0,42	0,51
a_d	1,37	1,67	1,52	1,55

Hêtre



Moabi



Diffusion hydrique dans le domaine hygroscopique

4- Diffusion : orthotropie et non linéarité 1/4

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \underline{\underline{D_w}} \vec{\nabla} w$$

$$-\left(\underline{\underline{D_w}} \vec{\nabla} w\right) \cdot \vec{n} = h \cdot (w_{\Omega} - w_{eq})$$

Diffusion non linéaire :

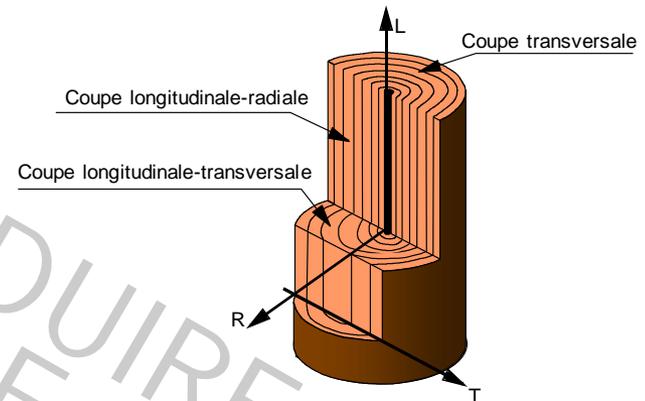


$$D_w^L(w) = D_o^L \cdot \exp(k_L \cdot w)$$

$$D_w^R(w) = D_o^R \cdot \exp(k_R \cdot w)$$

$$D_w^T(w) = D_o^T \cdot \exp(k_T \cdot w)$$

Orthotropie du matériau bois :



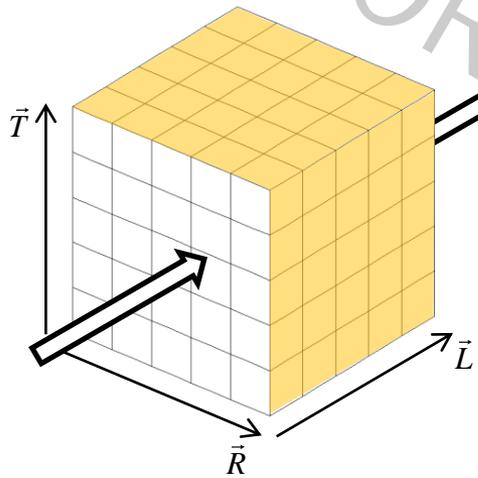
Tenseur de diffusion orthotrope

$$\underline{\underline{D_w}}_{\{\vec{L}, \vec{R}, \vec{T}\}} = \begin{bmatrix} D_w^L & 0 & 0 \\ 0 & D_w^R & 0 \\ 0 & 0 & D_w^T \end{bmatrix}$$

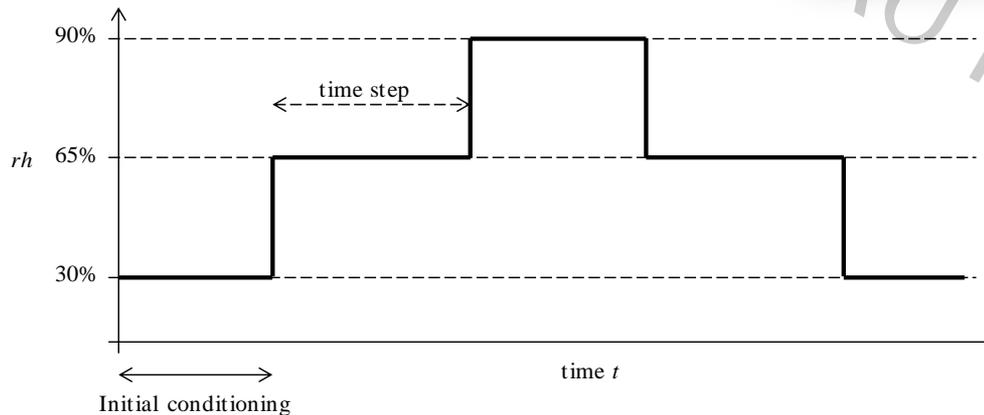
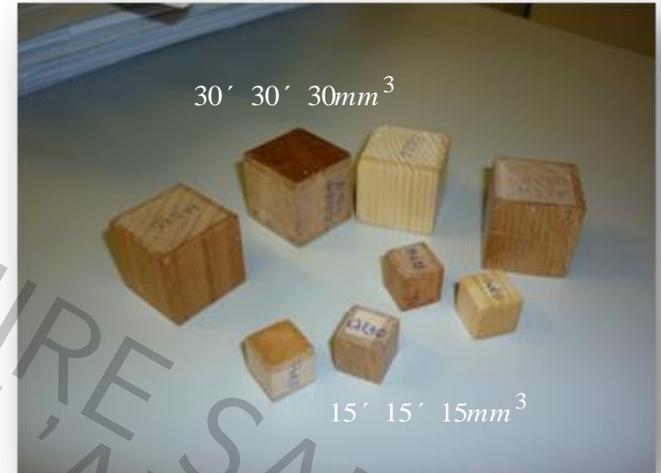
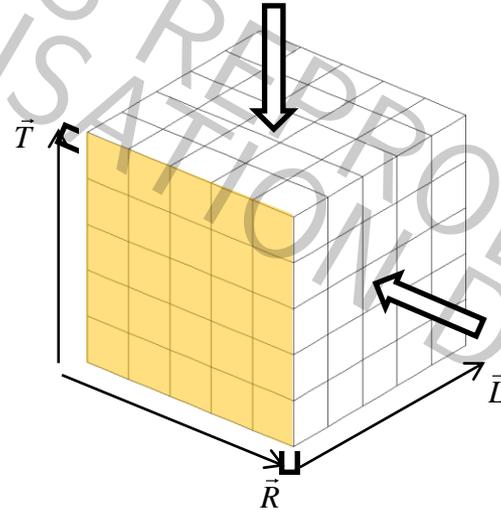
Diffusion hydrique dans le domaine hygroscopique

4- Diffusion : Protocol expérimental 2/4

Diffusion axiale



Diffusion transverse



Diffusion hydrique dans le domaine hygrosopique

4- Diffusion : Analyse inverse 3/4

Modèle Eléments Finis / Différences Finies

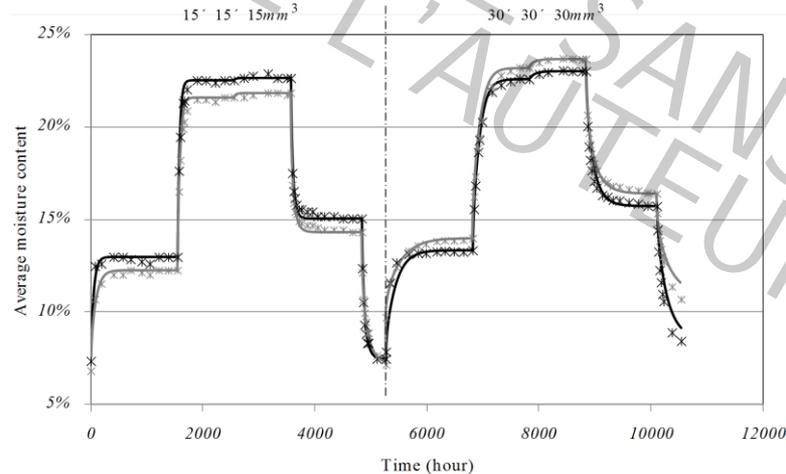
Minimisation d'erreur :

$$f = \frac{1}{N} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (\bar{w}_{num}(t_i) - \bar{w}_{exp}(t_i))^2}$$

Algorithme Simplex

Moabi

Mesures expérimentales de l'humidité moyenne



— Simulation L x Experimentation L — Simulation RT x Experimentation RT

Diffusion hydrique dans le domaine hygrosopique

4- Diffusion : Analyse inverse 3/4

Modèle Eléments Finis / Différences Finies

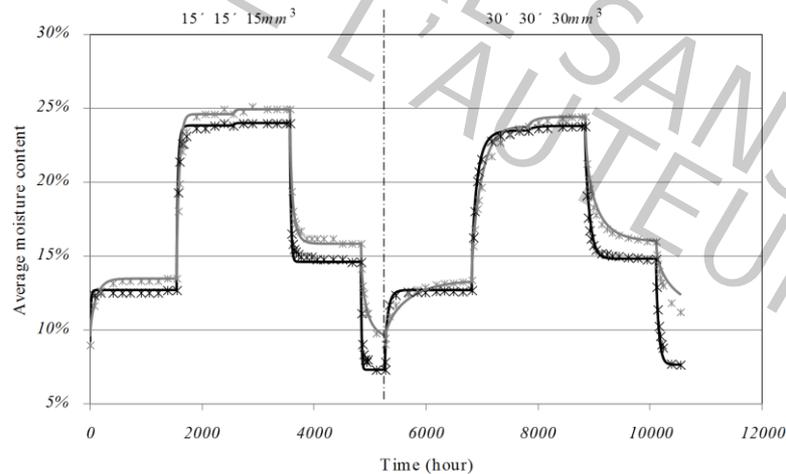
Minimisation d'erreur :

$$f = \frac{1}{N} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (\bar{w}_{num}(t_i) - \bar{w}_{exp}(t_i))^2}$$

Algorithme Simplex

Ozigo

Mesures expérimentales de l'humidité moyenne

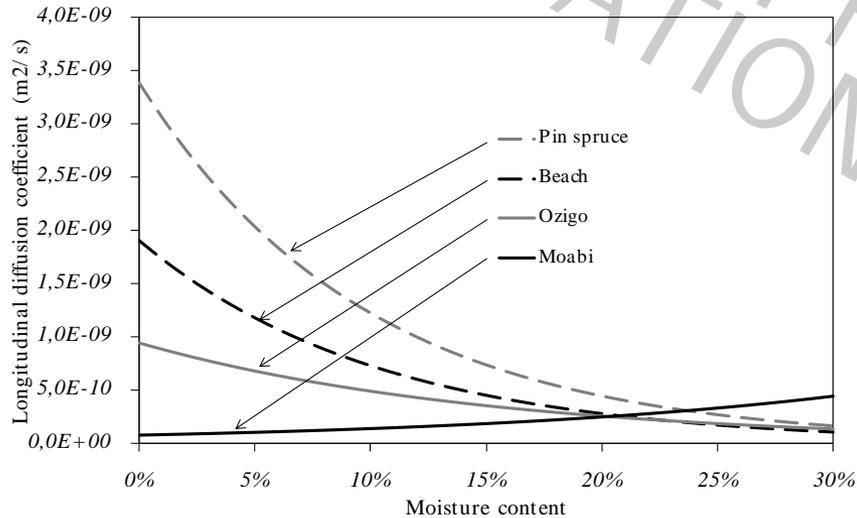


— Simulation L × Experimentation L — Simulation RT × Experimentation RT

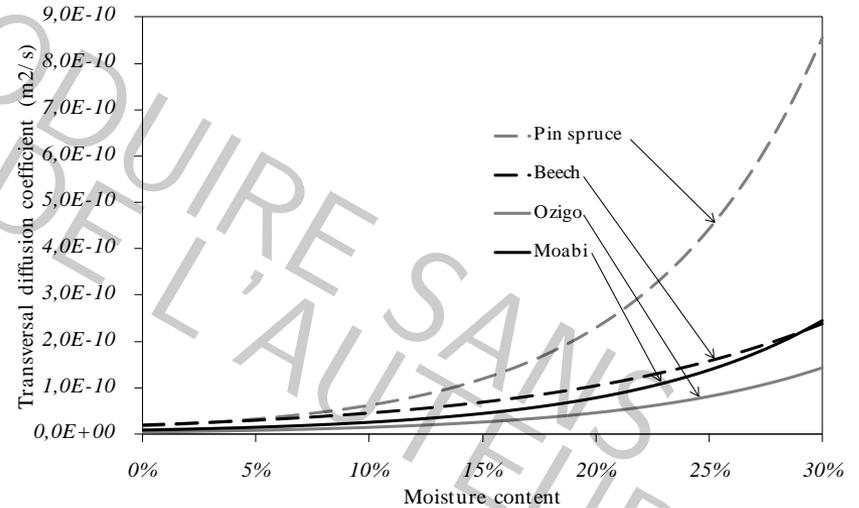
Diffusion hydrique dans le domaine hygrosopique

4- Diffusion : Diversité des essences 4/4

Coefficient de diffusion longitudinal

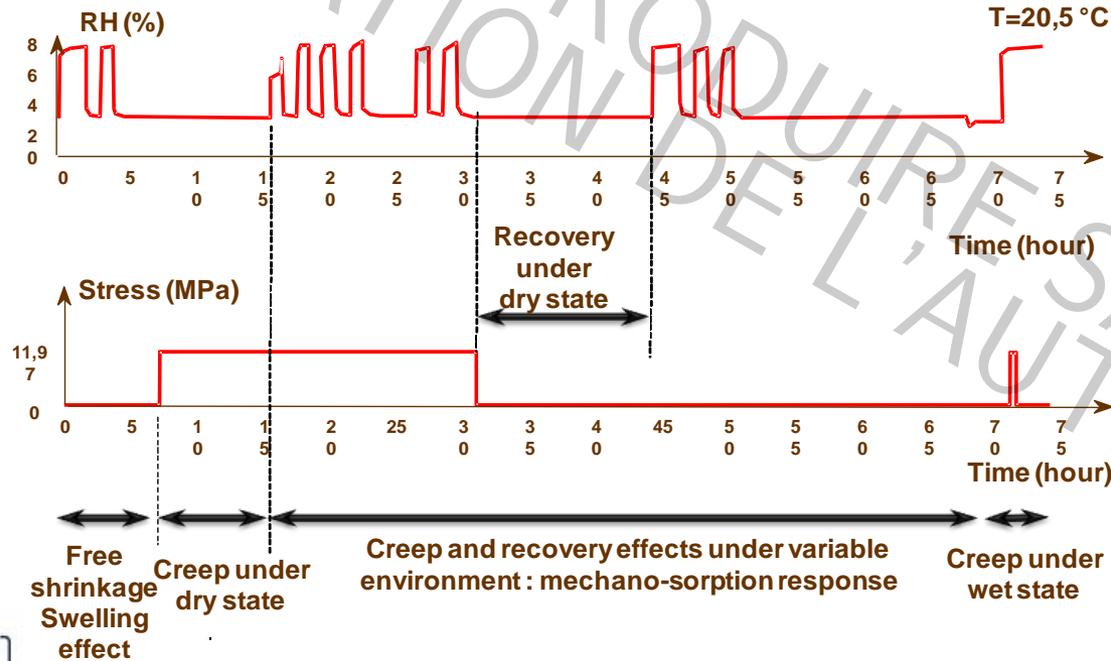
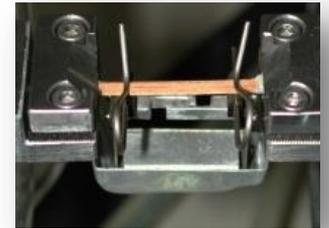
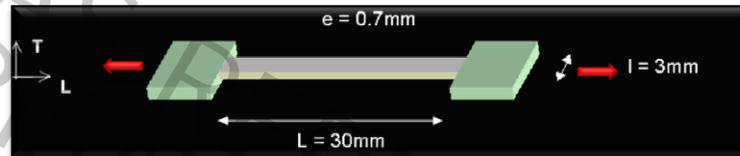


Coefficient de diffusion transversal



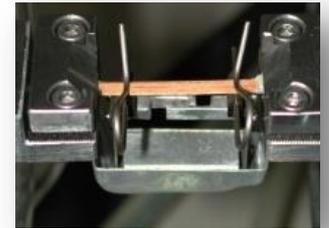
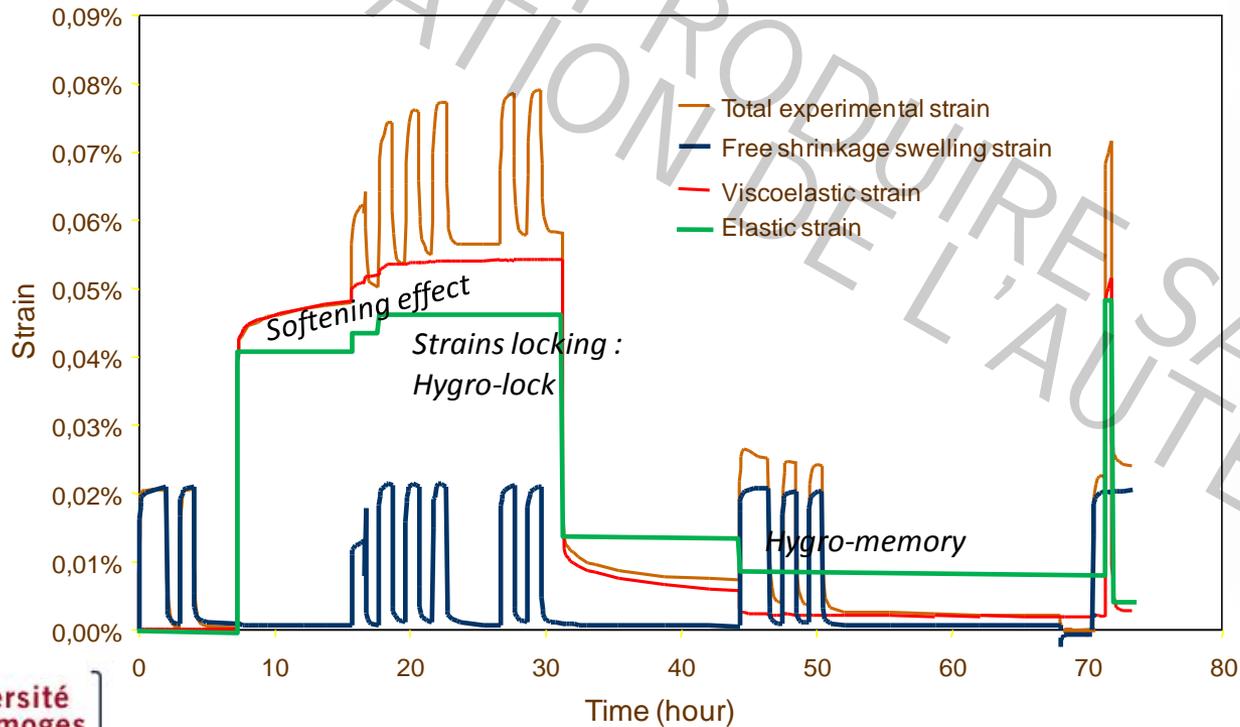
Comportement Mécano-sorptif

1- Essais expérimental type



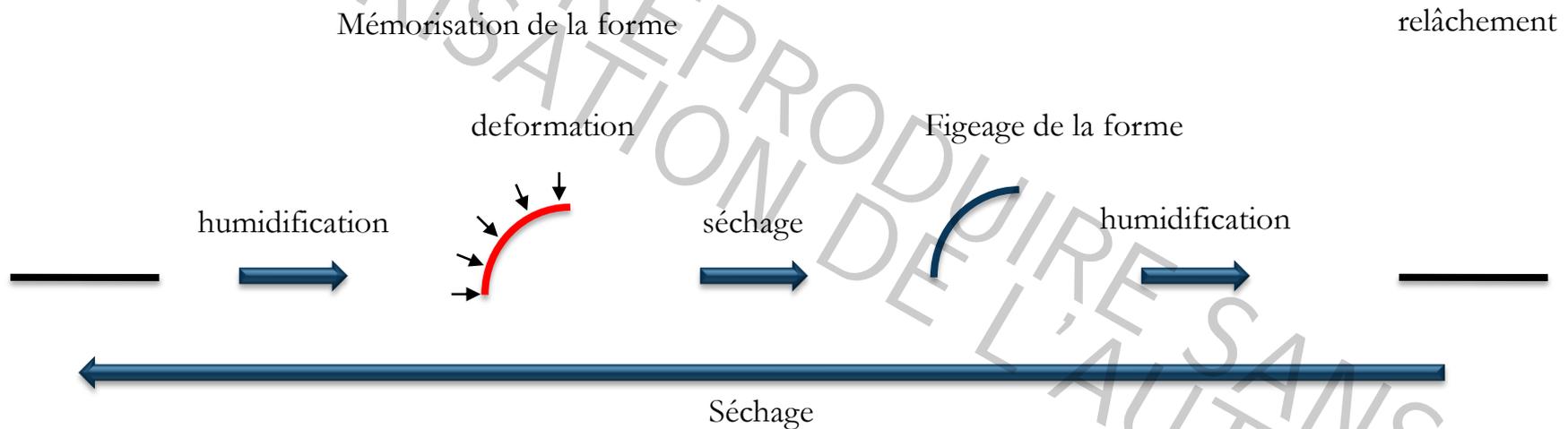
Comportement Mécano-sorptif

2- Mise en évidence



Comportement Mécano-sorptif

3- Effet mémoire de forme

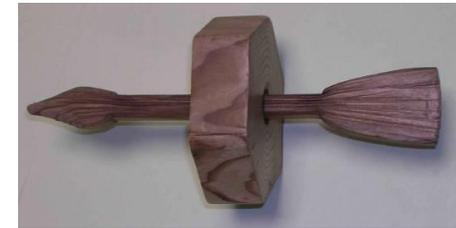


4- Exemples de blocage de forme

Flèche de Cupidon

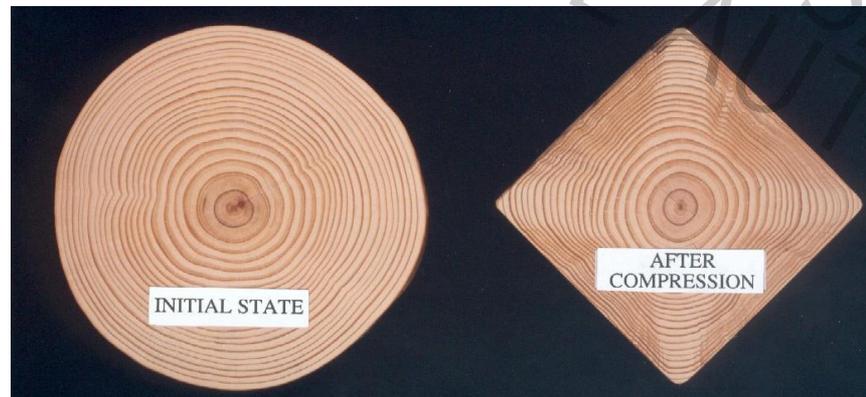


Inoue (1982)



Tanahashi (2001)

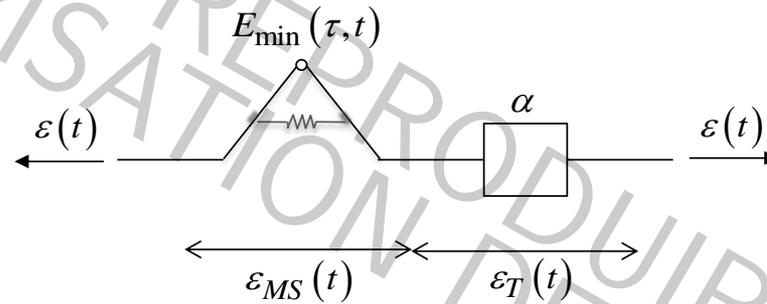
Tronc mis au carré



Karaj (2005)

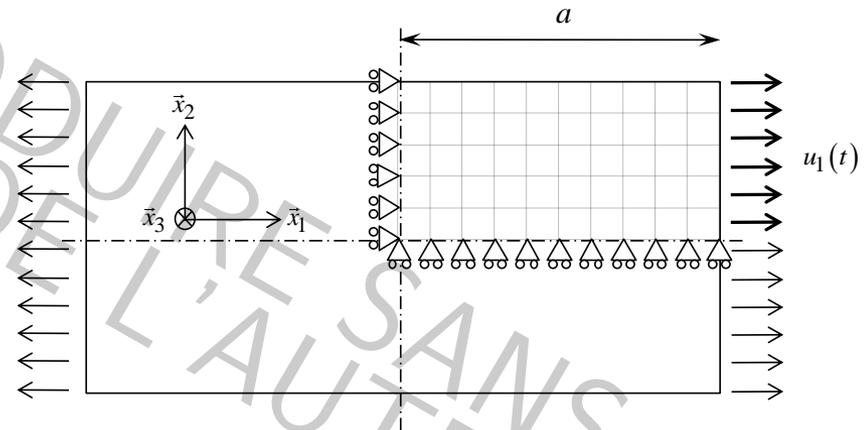
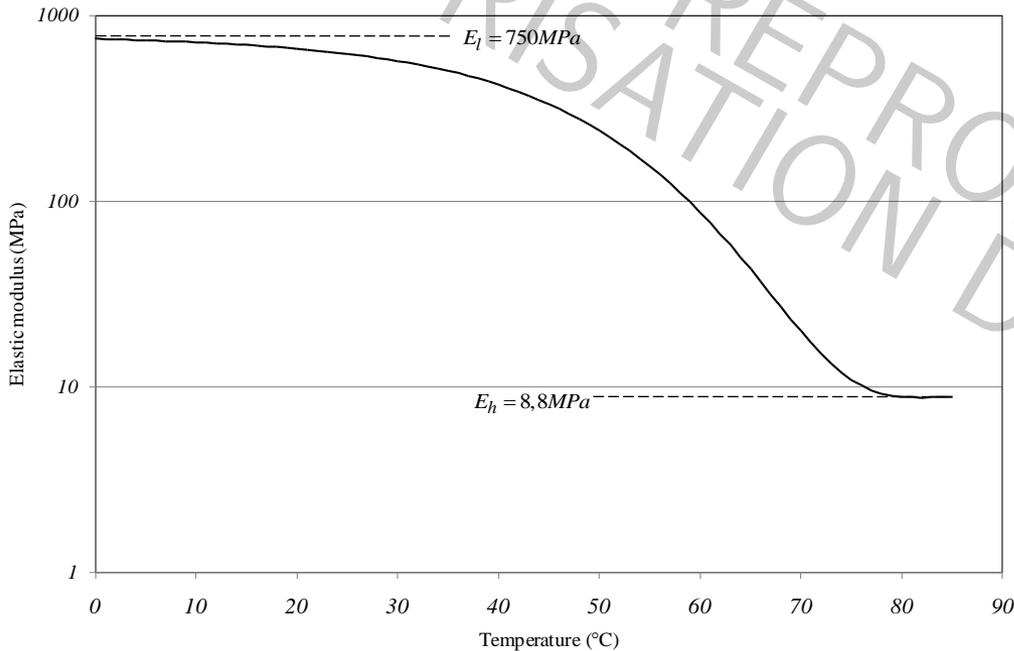
5-

Analogie en thermo élasticité : Modèle hydro-verrou 1/4



$$\epsilon(t) = \int_{0^-}^t \frac{1}{E_{\min}(\tau, t)} \cdot \frac{\partial \sigma_M}{\partial \tau} d\tau + \int_{0^-}^t \alpha(\tau) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau$$

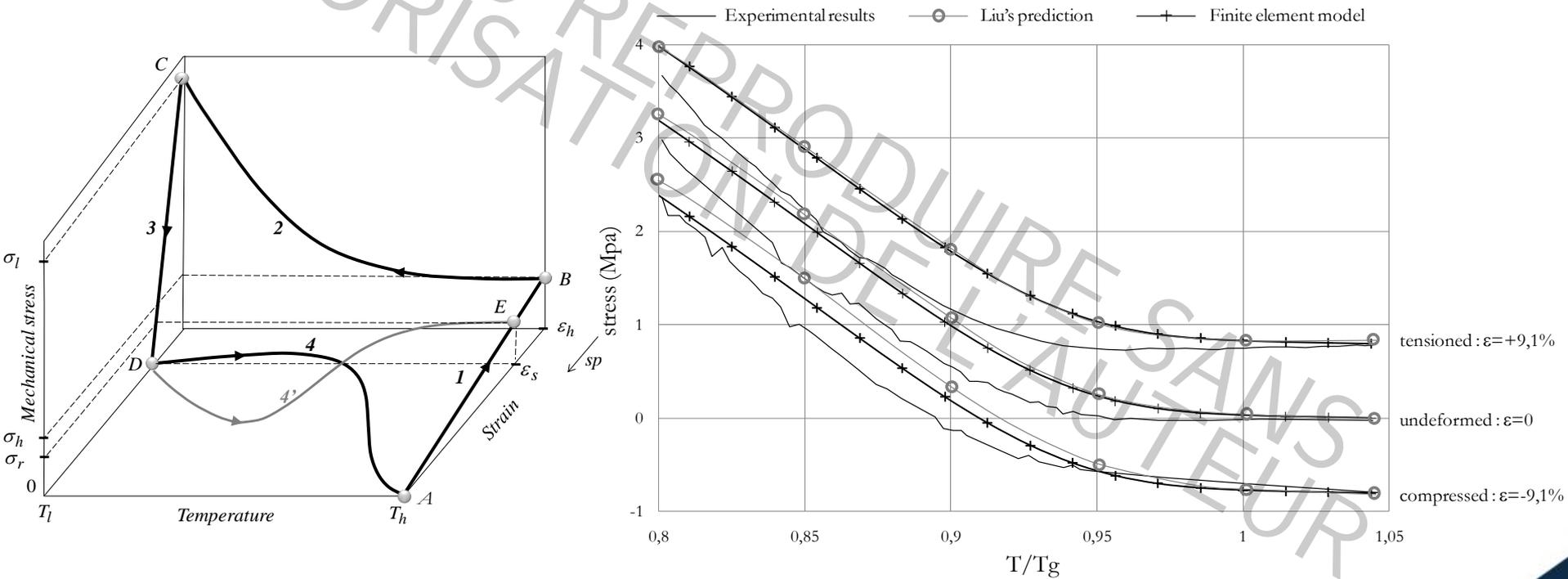
5- Analogie en thermo élasticité : Alliages à mémoire de forme 2/4



Comportement Mécano-sorptif

5-

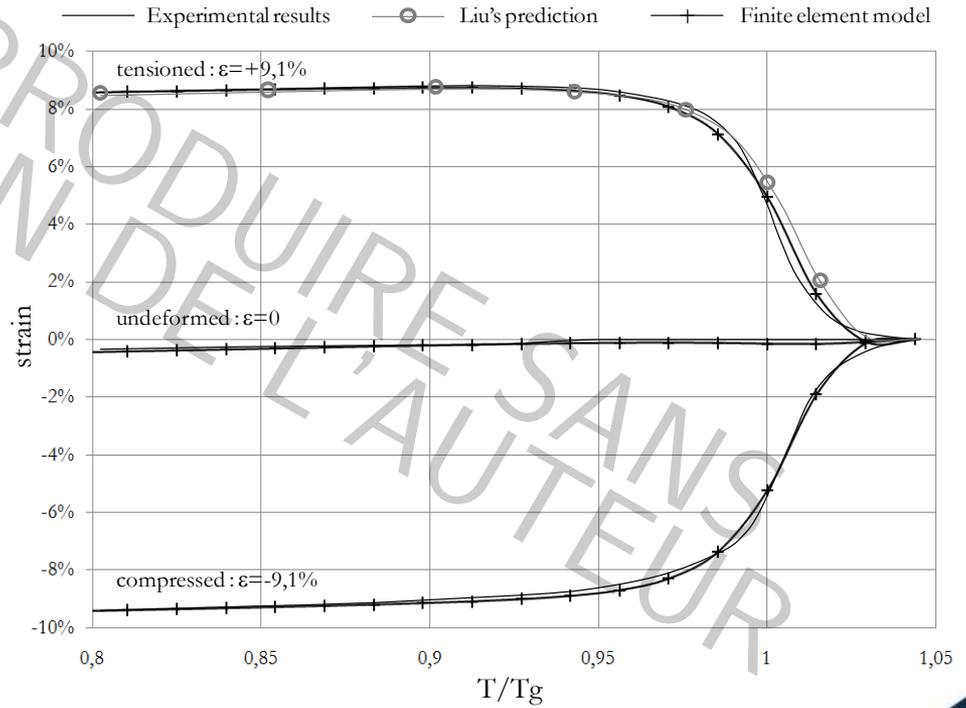
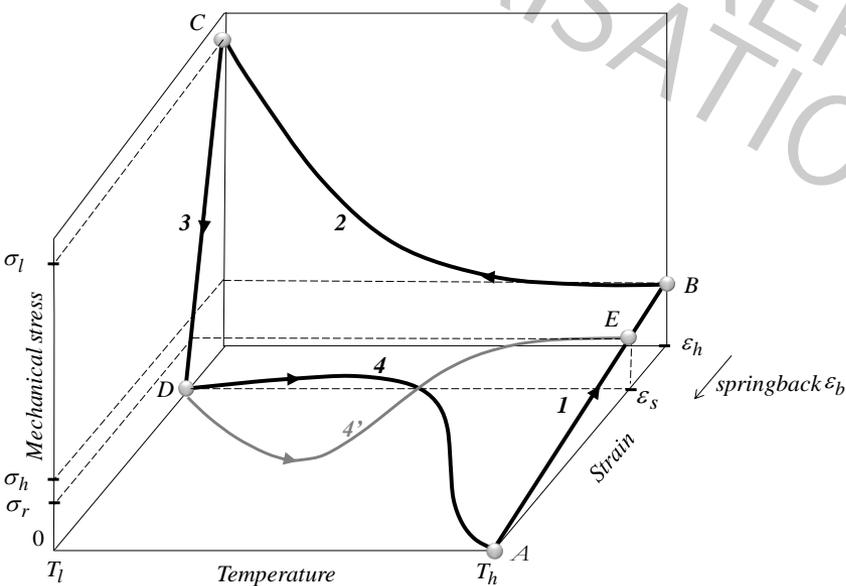
Analogie en thermo élasticité : Alliages à mémoire de forme 3/4



Comportement Mécano-sorptif

5-

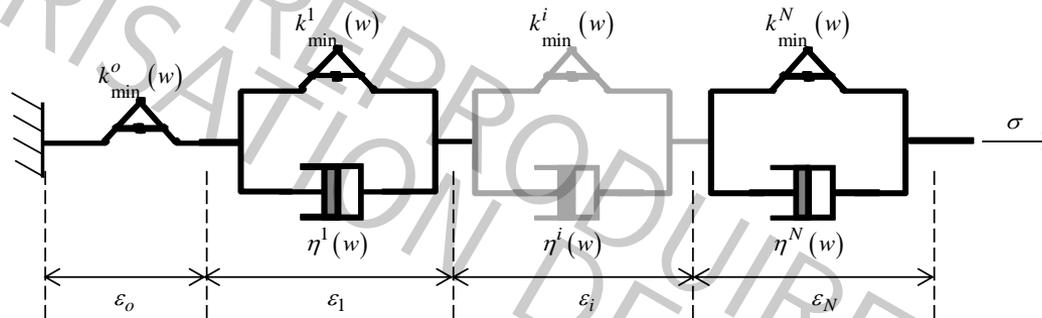
Analogie en thermo élasticité : Alliages à mémoire de forme 4/4



6-

Généralisation au comportement différé (Viscoélasticité) 1/2

Modèle de Kelvin Voigt Généralisé avec Hygro-verrous



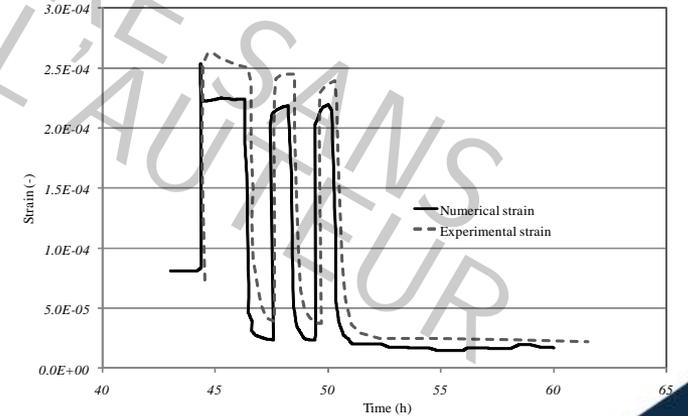
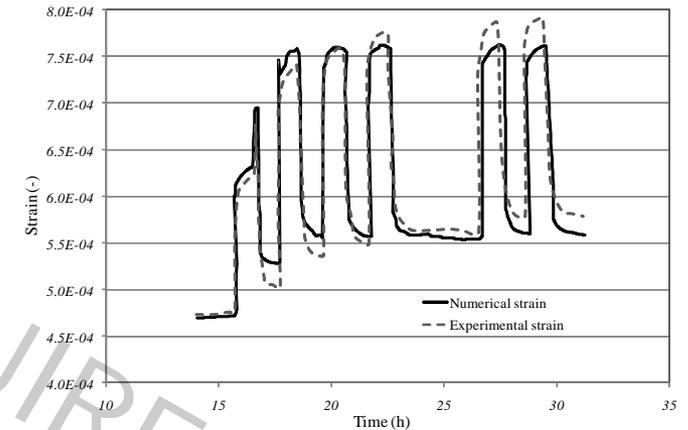
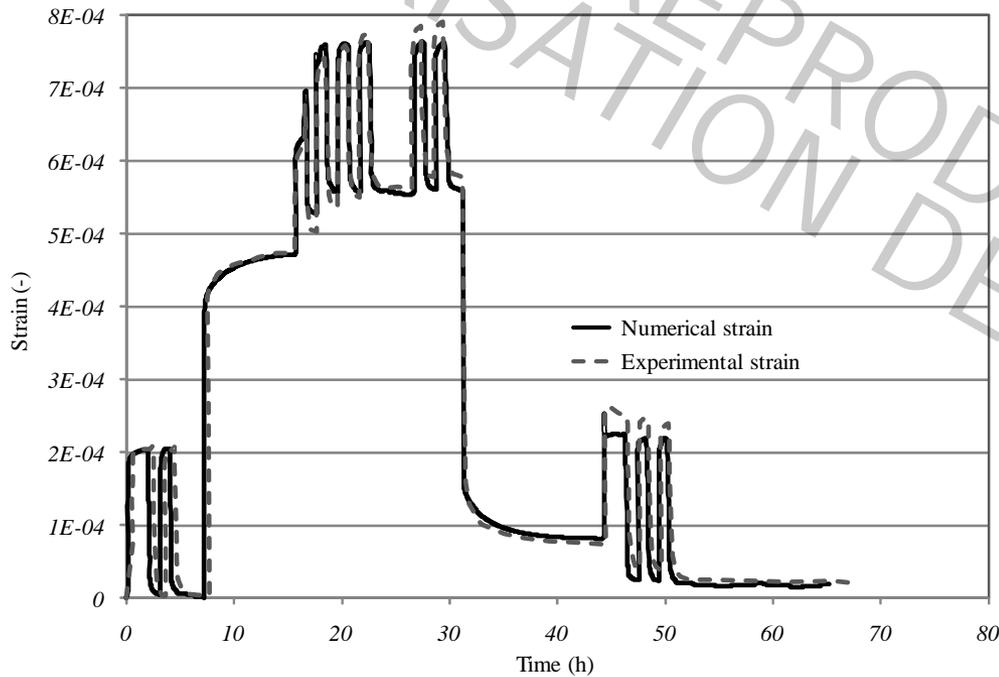
$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t, \tau) \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{1}{k_{\min}^0(\tau, t)} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau + \sum_{i=1}^N \int_0^t \frac{1}{\eta^i(\vartheta)} \cdot \exp\left[-\int_{\tau}^t \frac{g k_{\min}^i(\alpha, t)}{\eta^i(\alpha)} d\alpha\right] d\vartheta \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau$$

Comportement Mécano-sorptif

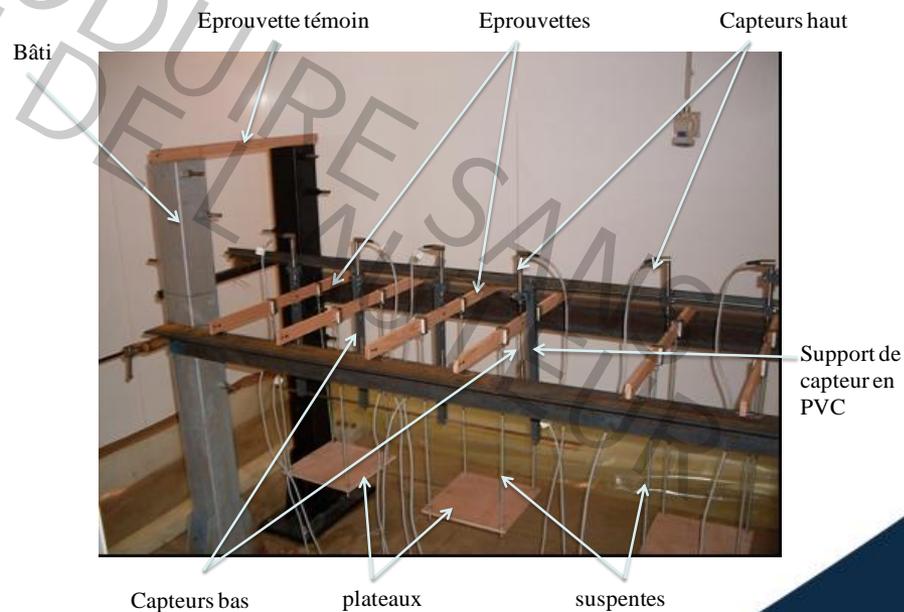
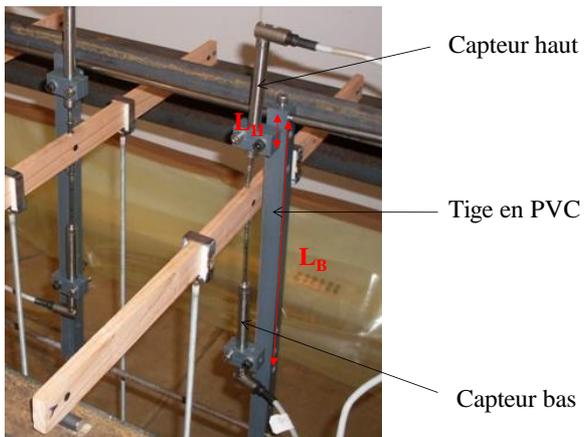
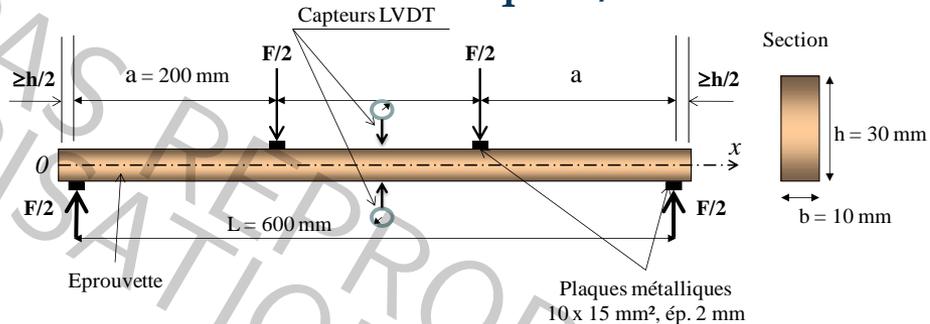
6-

Généralisation au comportement différé (Viscoélasticité) 2/2



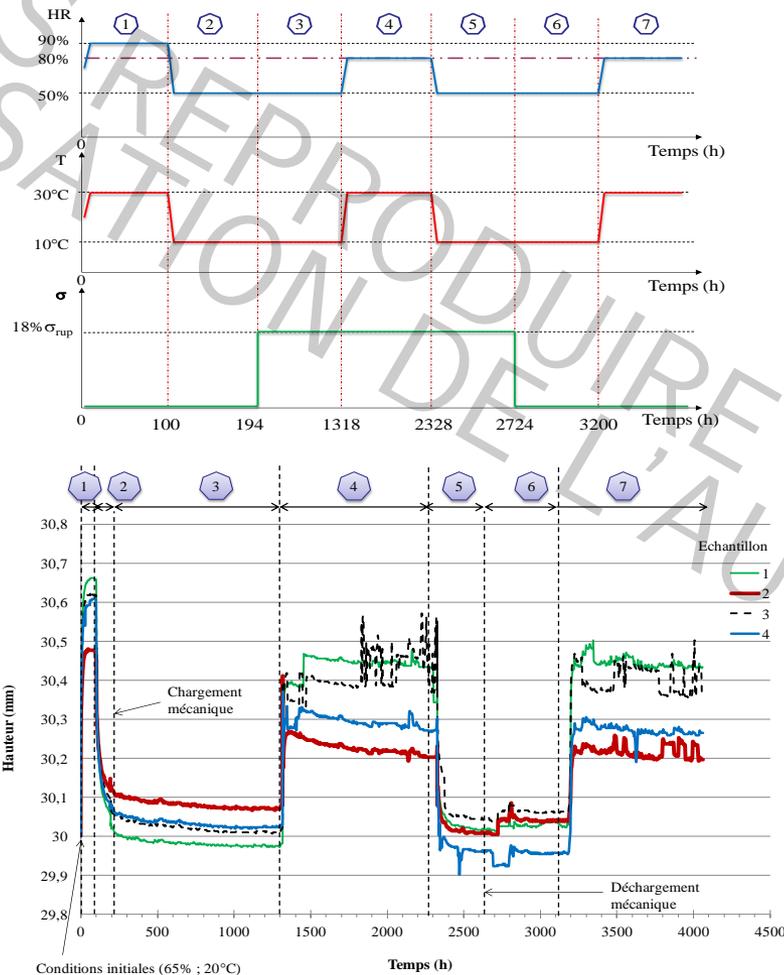
Applications au Génie Civil Bois

1- Poutres en Flexion en chambre climatique 1/2



Applications au Génie Civil Bois

1- Poutres en Flexion en chambre climatique 2/2



Applications au Génie Civil Bois

2- Poutres en service : 3 classes de service 1/3

Intérieur climatisé



a. Disposition

b. Vue d'ensemble



a. Ambiance extérieure abritée

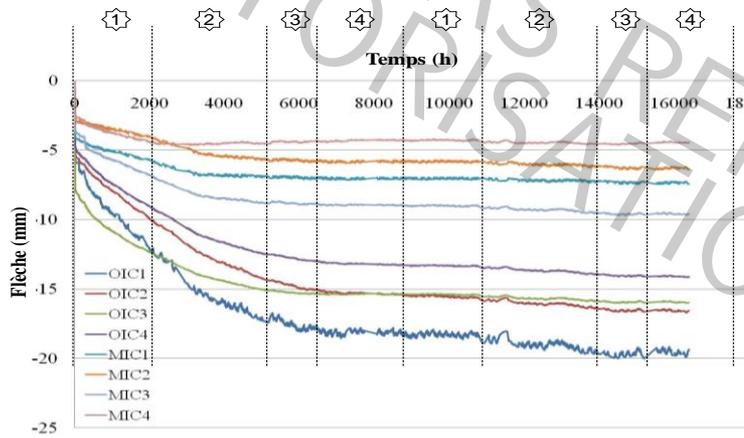
b. Vue d'ensemble

Applications au Génie Civil Bois

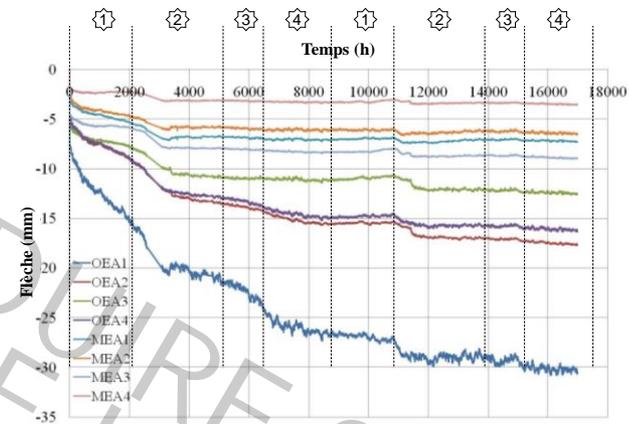
2-

Poutres en service : comportement à long terme 2/3

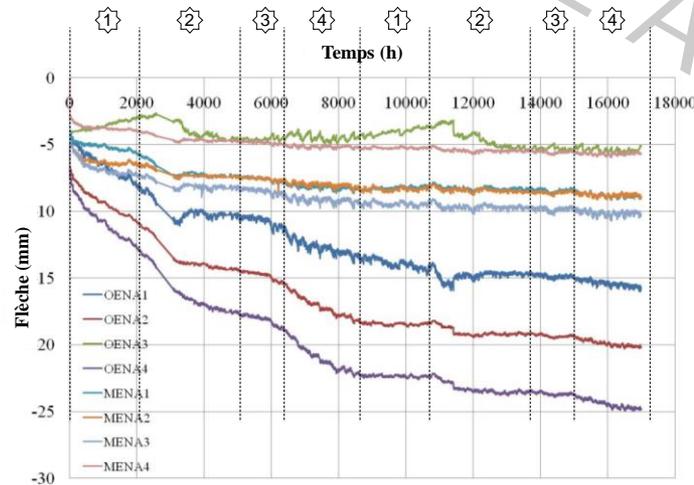
Intérieur climatisé



Extérieur abrité

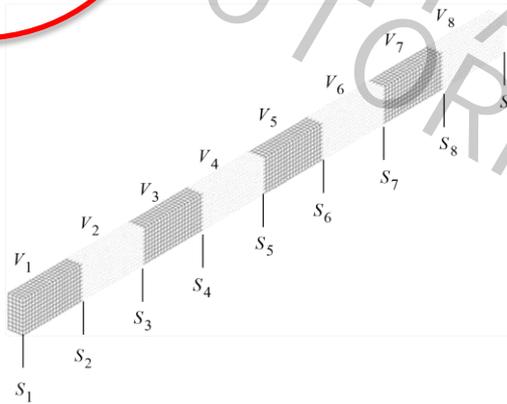


Extérieur non abrité

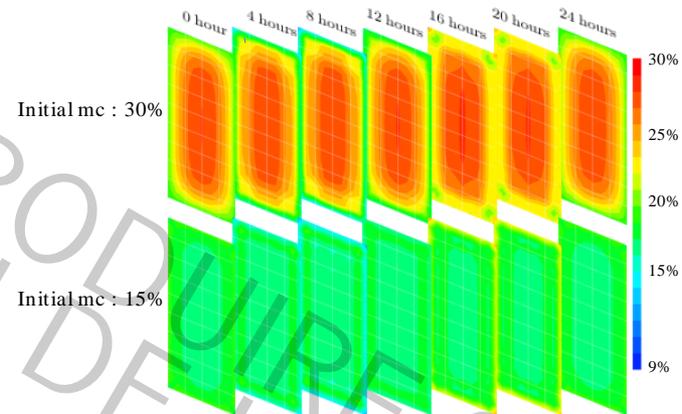


Applications au Génie Civil Bois

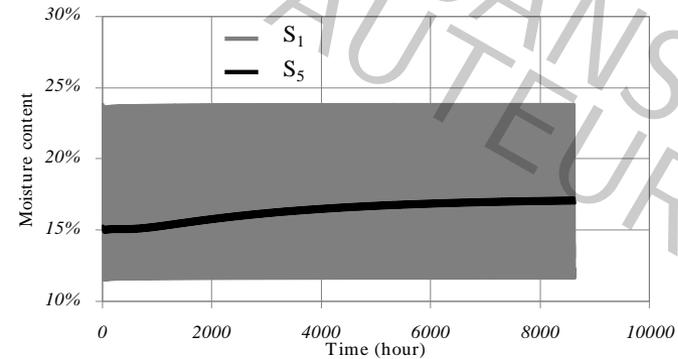
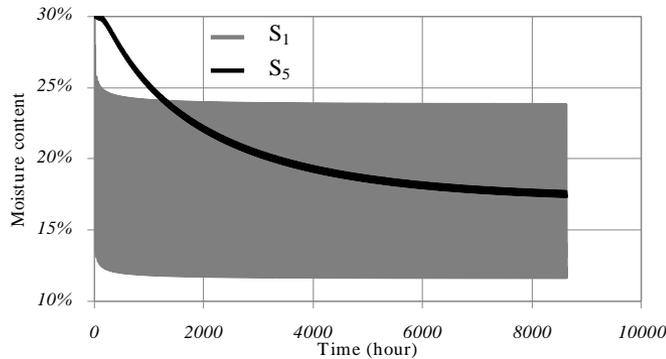
2- Poutres en service : comportement hydrique 3/3



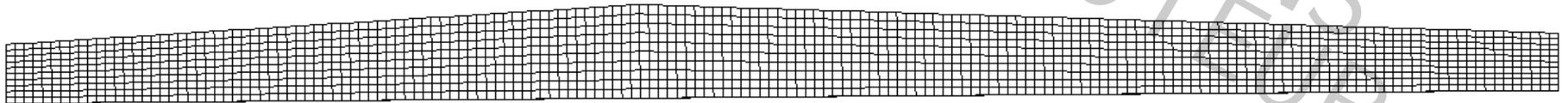
Comportement journalier



Comportement saisonnier

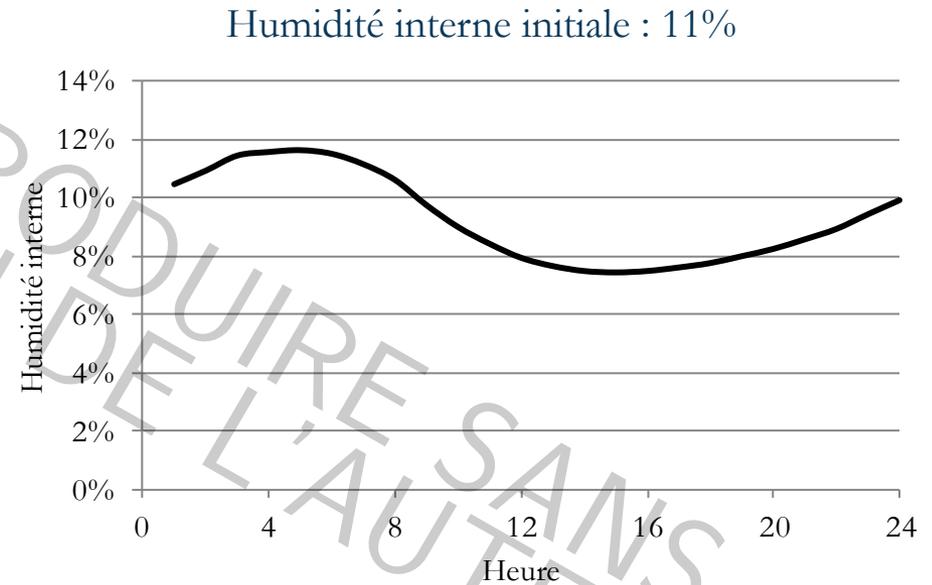
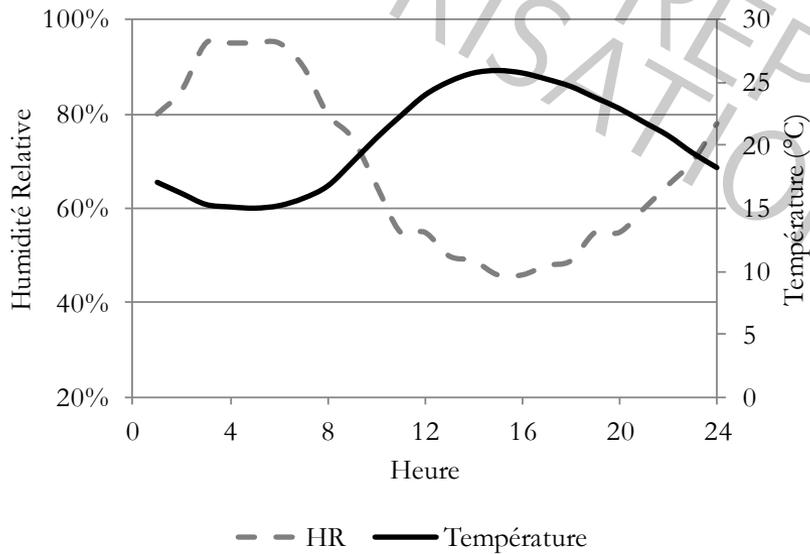


3- Risques de fissuration 1/4

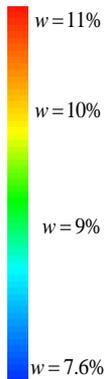


Applications au Génie Civil Bois

3- Risques de fissuration : scénario climatique 2/4

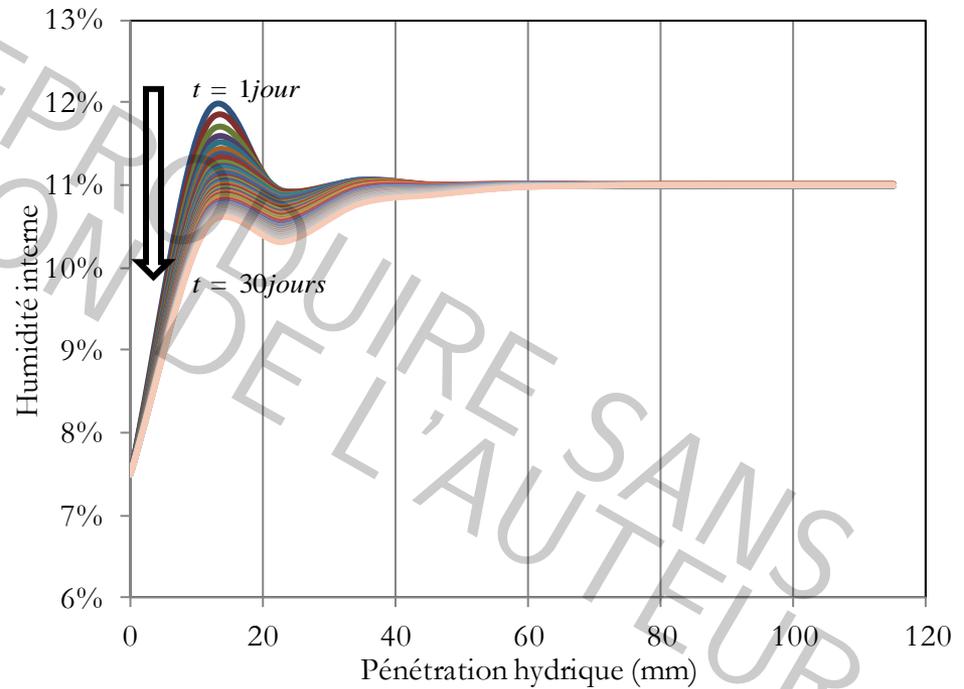


3- Risques de fissuration : champ hydrique 3/4

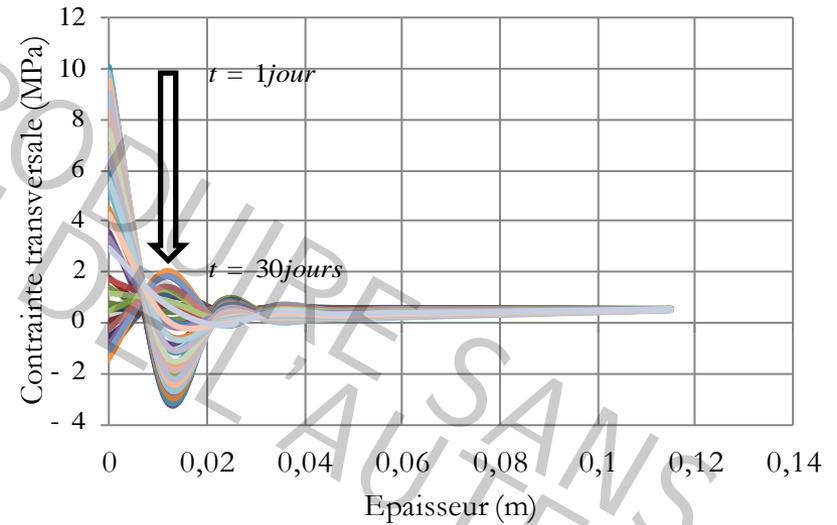
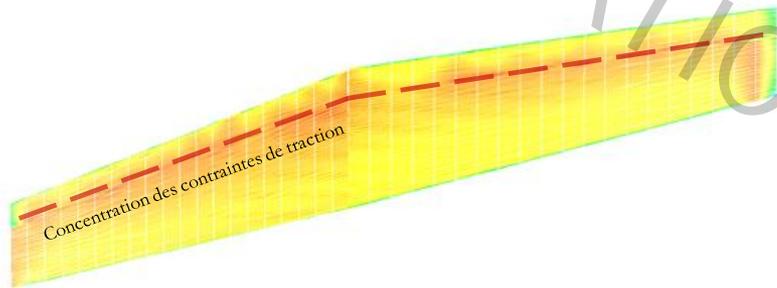


Face exposée

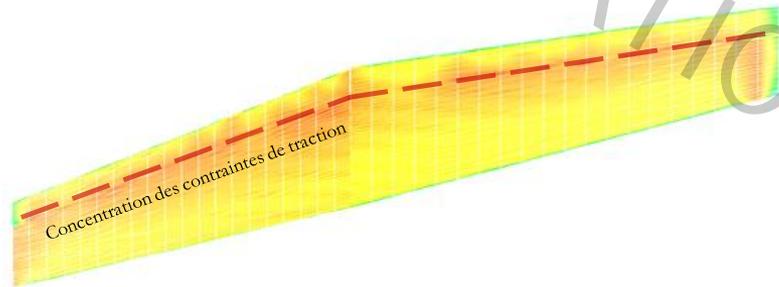
Face intérieure



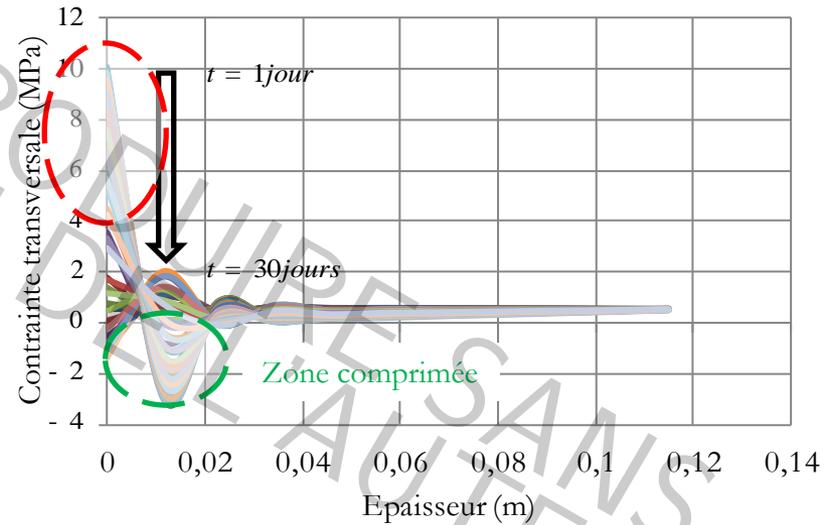
3- Risques de fissuration : champ hydrique 4/4



3- Risques de fissuration : champ hydrique 4/4



Zone tendue : fissuration superficielle



Conclusions et Perspectives

- Matériau bois réagissant avec l'environnement climatique
- Couplage mécanique et hydrique
- Comportement Mécano-sorptif difficilement appréhendable
- Ingénierie complexe et mal maîtrisée

Conclusions et Perspectives

- Matériau bois réagissant avec l'environnement climatique
 - Couplage mécanique et hydrique
 - Comportement Mécano-sorptif difficilement appréhendable
 - Ingénierie complexe et mal maîtrisée
-
- Développer des modèles de dimensionnement réalistes
 - Développer des stratégies de diagnostic
 - Développer des outils de suivi (monitoring hydrique et mécanique)
 - Développer des procédures de maintenance

IMRO Egletons


Comportement Thermo-Hygro- Mécanique

*Relations Structure / Propriétés et
Diversité des Bois*

Frédéric Dubois

Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes

Département Génie Civil & Durabilité

Campus Universitaire de Génie Civil, Egletons



IMRO Egletons



Université
de Limoges