

JOURNEE THESES DES BOIS

Bordeaux, Jeudi 2 Juillet 2015

Construction en bois : adaptation aux changements climatiques ? Effet des variations de l'humidité relative sur l'évolution de la fissuration

Ngoc Anh PHAN

Université de Bordeaux, I2M/Dépt. GCE

na.phan@i2m.u-bordeaux1.fr

Directeur de thèse: **Pr. Stéphane MOREL**

Co-encadrante : **Myriam CHAPLAIN**



Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux

UMR 5295 - Université de Bordeaux/ CNRS
créé le 1er janvier 2011

- Acoustique Physique (APY)
- Durabilité des Matériaux, des Assemblages et des Structures (DUMAS)
- **Génie Civil et Environnemental (GCE)**
- Ingénierie Mécanique et Conception (IMC)
- Matériaux, Procédés, Interactions (MPI)
- Fluides et Transferts (TREFLE)



Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M)
Dép. Génie Civil et Environnemental (GCE)
Resp. du Dép. : Pr. Denys BREYSSE

<http://i2m.u-bordeaux.fr/departements/genie-civil-et-environnemental-gce.html>

mécanique

GT1

Endommagement et phénomènes physiques associés

géosciences

GT2

Interactions : sol, sous-sol, eau et environnement

métrologie

GT3

De la mesure à la décision sous incertitude :
diagnostic, optimisation et fiabilité

modélisation de l'incertain

- Contexte et introduction
- Essais de rupture en mode d'ouverture de fissure (mode I)
- Modélisation de la propagation de fissure sous HR variable
- Conclusions et perspectives

- Contexte et introduction
- Essais de rupture en mode d'ouverture de fissure (mode I)
- Modélisation de la propagation de fissure sous HR variable
- Conclusions et perspectives

VS2C : **V**ulnérabilité des **S**tructures bois aux **C**hangements **C**limatiques : durée de vie et fiabilité des éléments structuraux sous sollicitations complexes.

I2M-GCE
Bordeaux
(Chaplain)

GEMH -GC&D
Egletons
(Dubois)

NOBATEK
Bordeaux
(Lopez)

FIBC
Paris
(Feret)

CODIFAB

SNBL

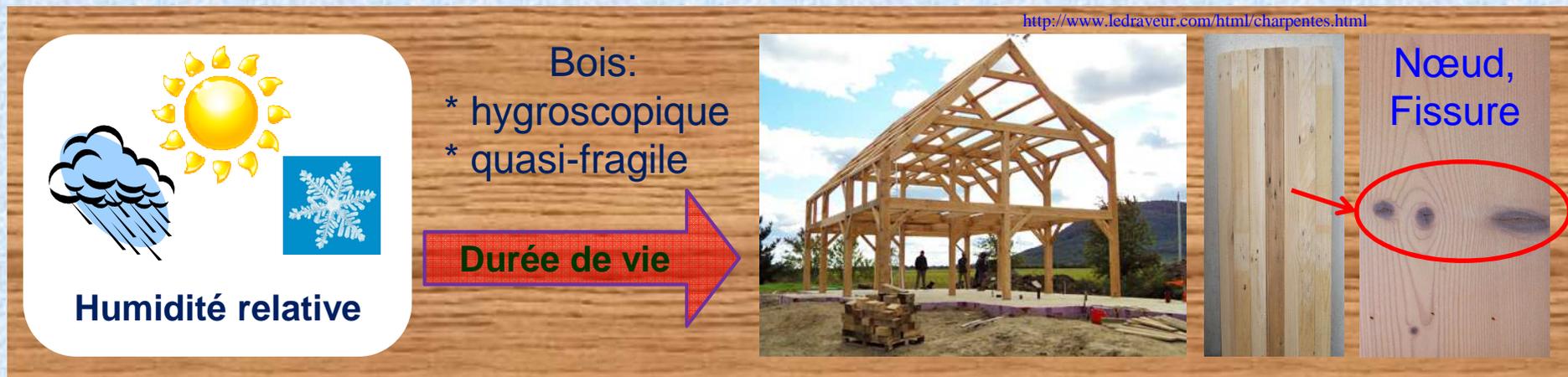
Labélisation Xylofutur / CREADh

Projet Recherche VS2C - CODIFAB - Conseil Régional d'Aquitaine



L'objectif:

- ***mieux quantifier la durée de service des composants bois soumis à des environnements réels***
 - ***fiabiliser le dimensionnement des ossatures bois***
 - ***promouvoir la construction bois*** par rapport aux modes de constructions françaises « traditionnelles » (béton armé, maçonnerie)
- ***Réglementation à améliorer*** vis-à-vis des conditions climatiques changeantes (prise en compte du changement climatique, effets des variations journalières, saisonnière, annuelles de l'humidité relative HR et de la température...)



Problématique : durabilité des constructions en bois sous les variations climatiques attendues:

- Concentration de contrainte au voisinage des singularités (nœud, fissure de séchage, entaille...)
- Couplage entre mécanique de la rupture et sollicitations climatiques

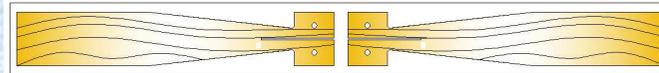
Objectif de thèse:

- prédire l'évolution de la fissuration jusqu'à la rupture sous des conditions d'humidités variables
- mieux quantifier la durée de vie des composants bois soumis à des environnements réels

- Contexte et introduction
- Essais de rupture en mode d'ouverture de fissure (mode I)
- Modélisation de la propagation de fissure sous HR variable
- Conclusions et perspectives

épreuve (a)
essai monotone

épreuve (b)
essai de fluage



épreuves jumelles

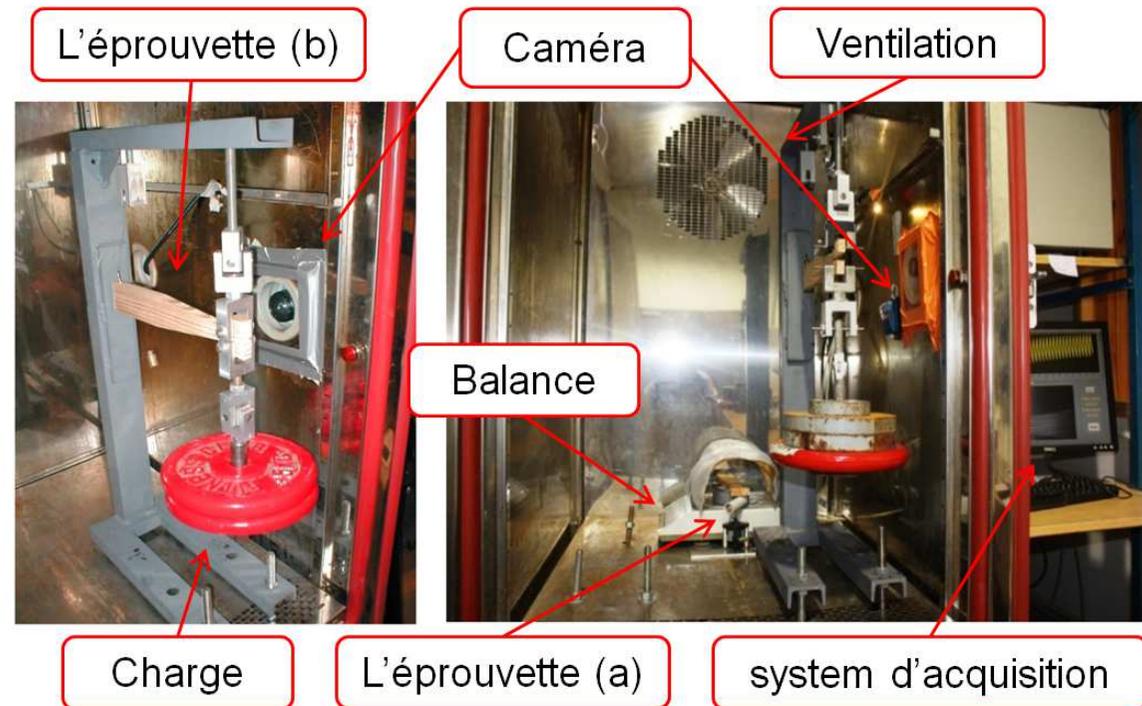
Essai monotone

10 teneurs en eau : 5%, 8%, 10%, 12%, 15%, 18%, 20%, 22%, 25%, 30%
(environ 300 épreuves)

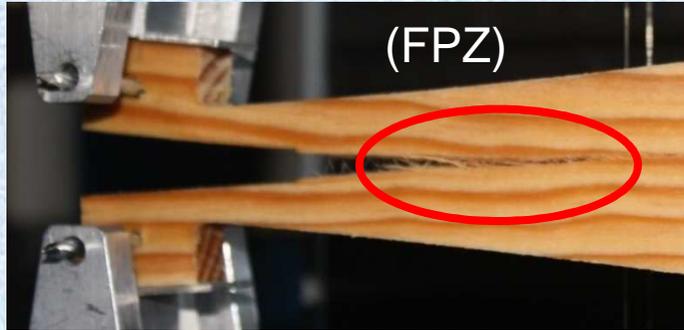


Essai de fluage (dans l'étuve)

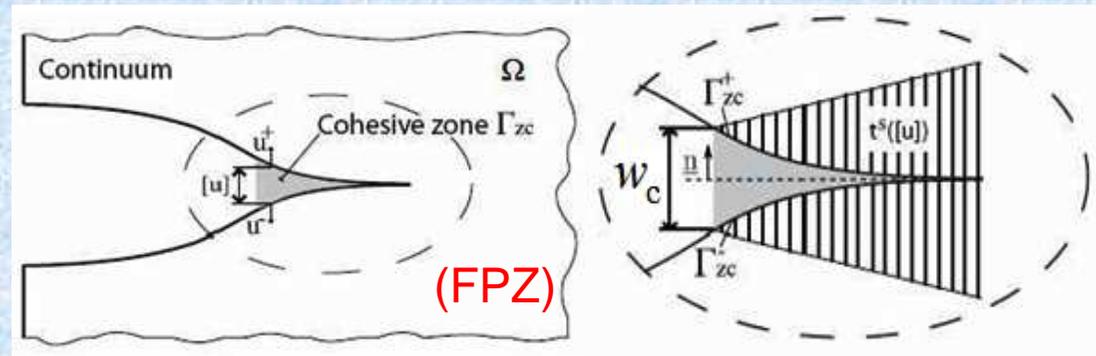
- Plusieurs niveaux de charge
- Charge constante : 55% - 90% F_{\max}
(F_{\max} obtenue lors de l'essai monotone)



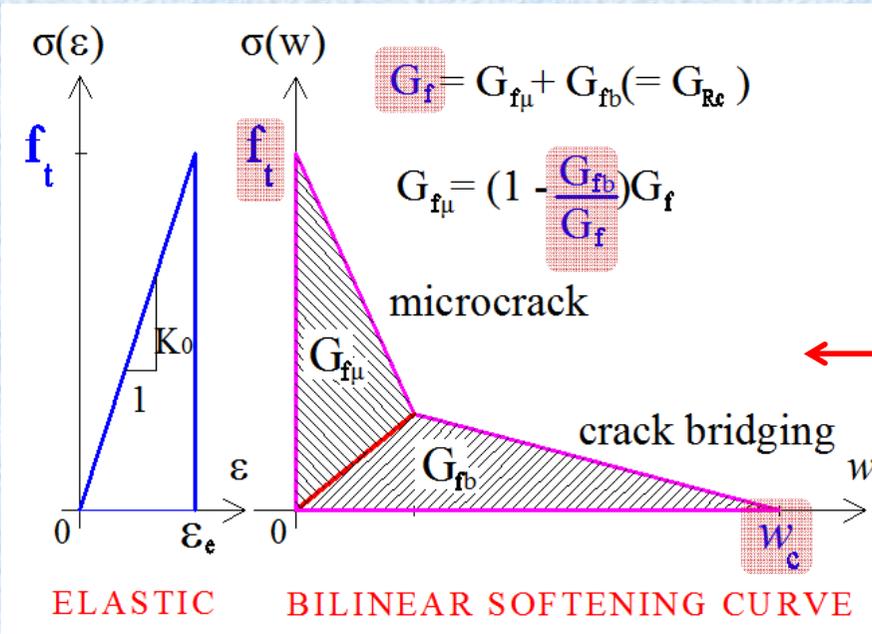
Fracture Process Zone



Joint element 2D, 3D

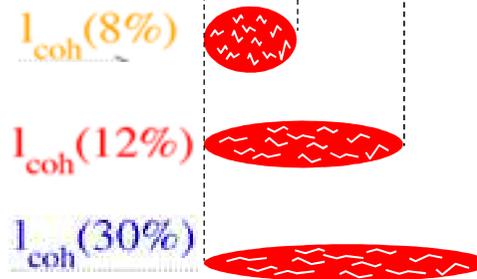
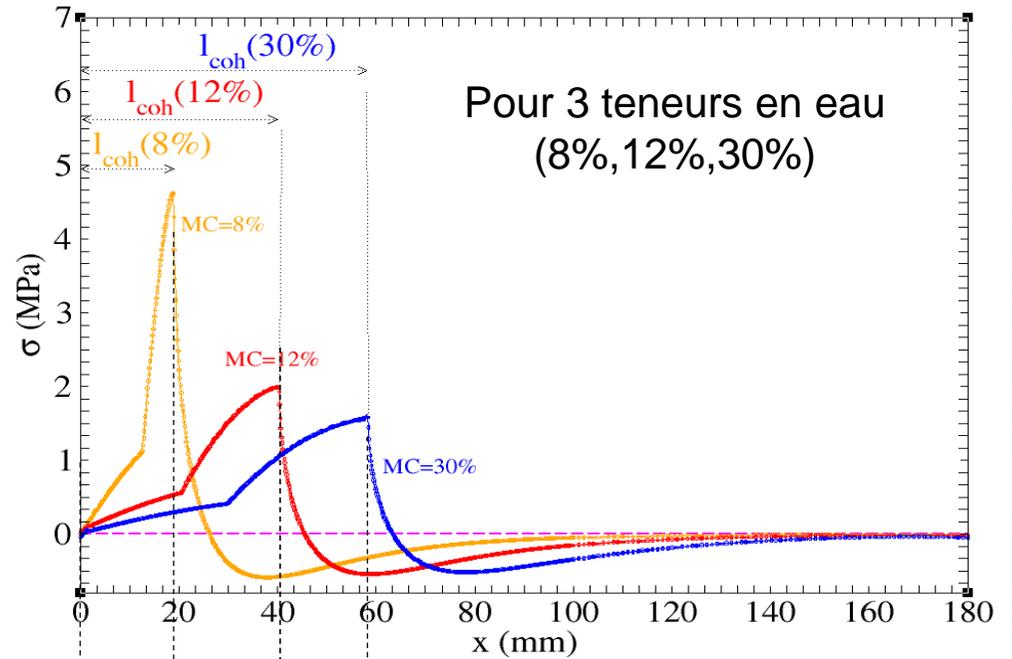
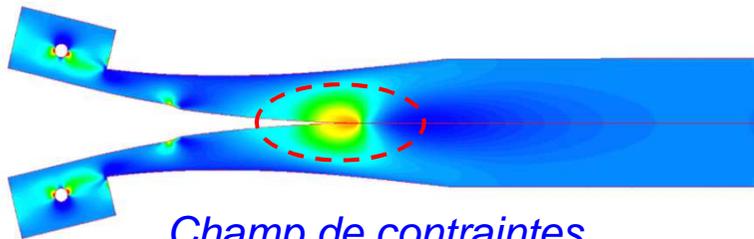
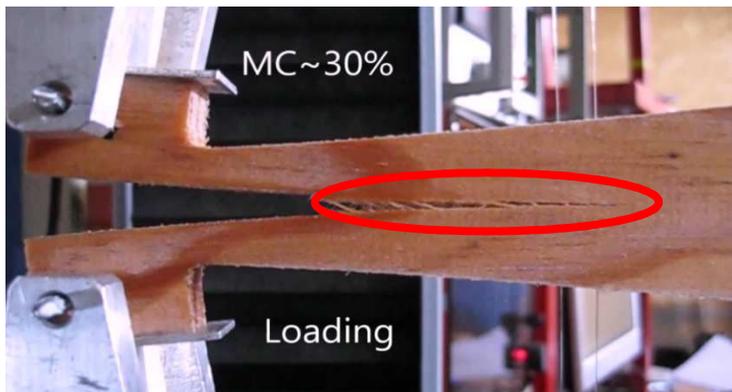
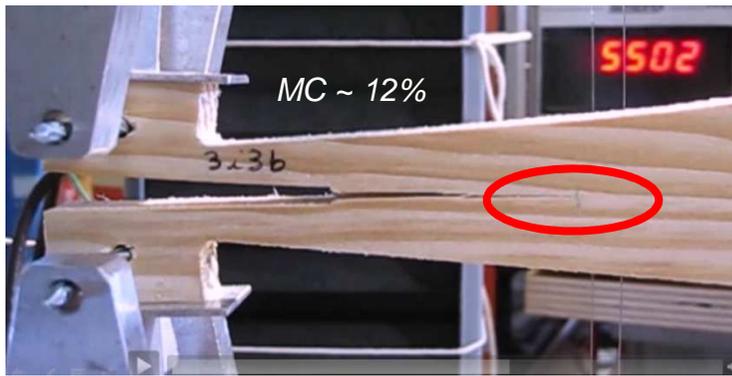


Comportement adoucissant bilinéaire dans le MZC

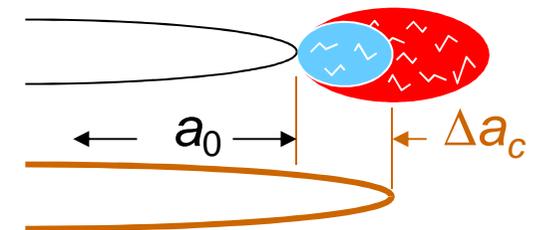


4 paramètres

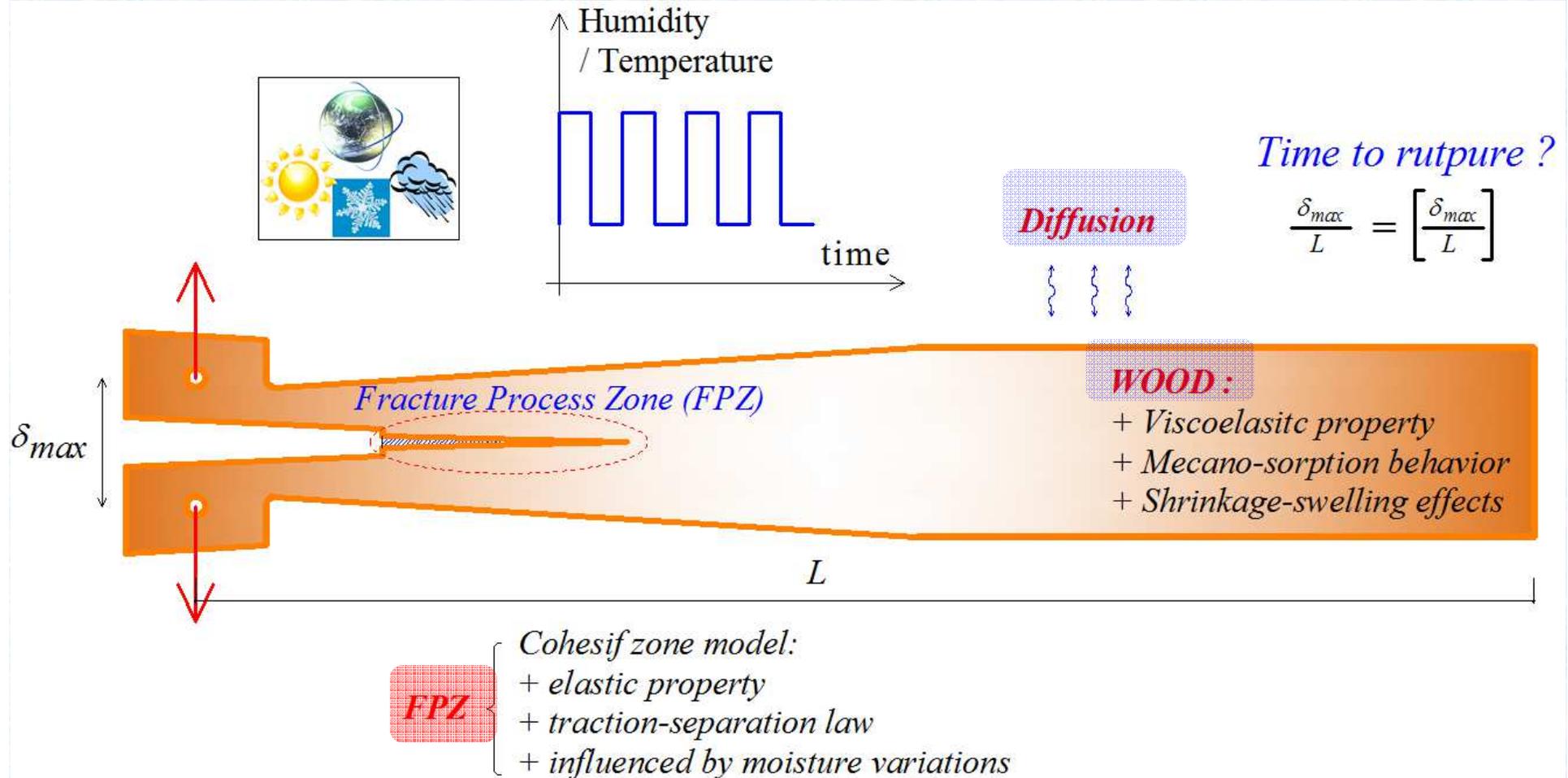
Expérimental:
essai monotone



Taille critique de la FPZ



- Contexte et introduction
- Essais de rupture en mode d'ouverture de fissure (mode I)
- **Modélisation de la propagation de fissure sous HR variable**
- Conclusions et perspectives

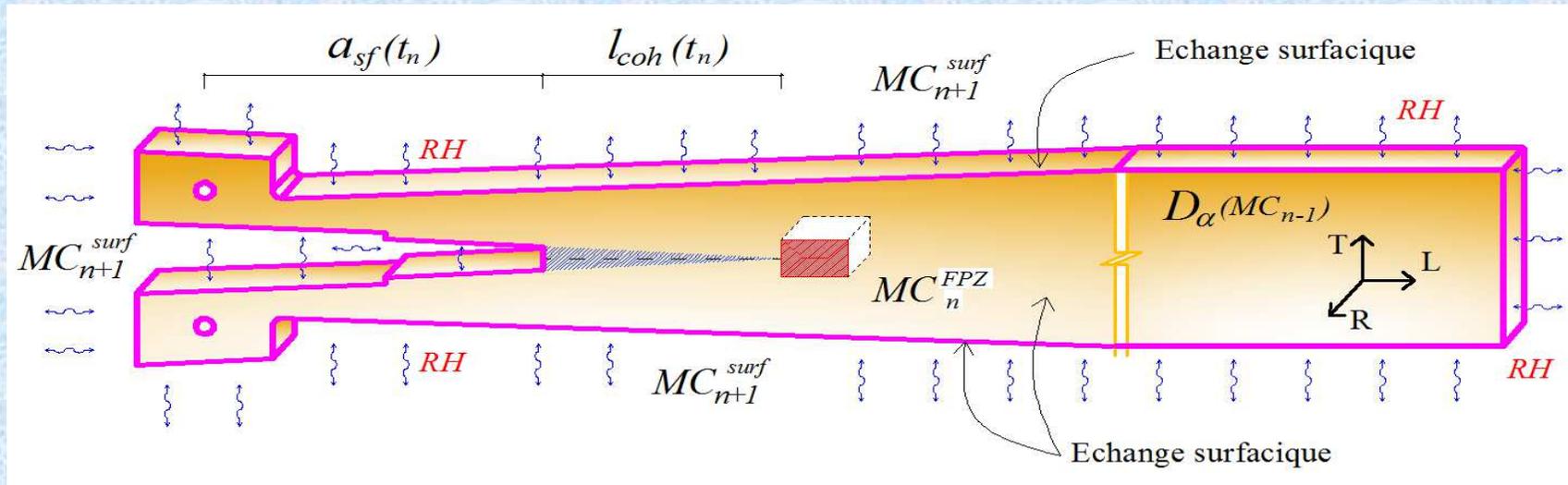


Phan N.A., Chaplain M., Morel S., Simulation of crack propagation in mode I of wood by integrating the rapid variation of moisture content into a new cohesive zone model, 12^{ème} Colloque national en calcul des structures, CSMA, Giens, 2015

La loi de Fick pour le transfert de masse en tridimensionnel:

$$\frac{\partial MC}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{MC}(MC) \frac{\partial MC}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{MC}(MC) \frac{\partial MC}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{MC}(MC) \frac{\partial MC}{\partial z} \right)$$

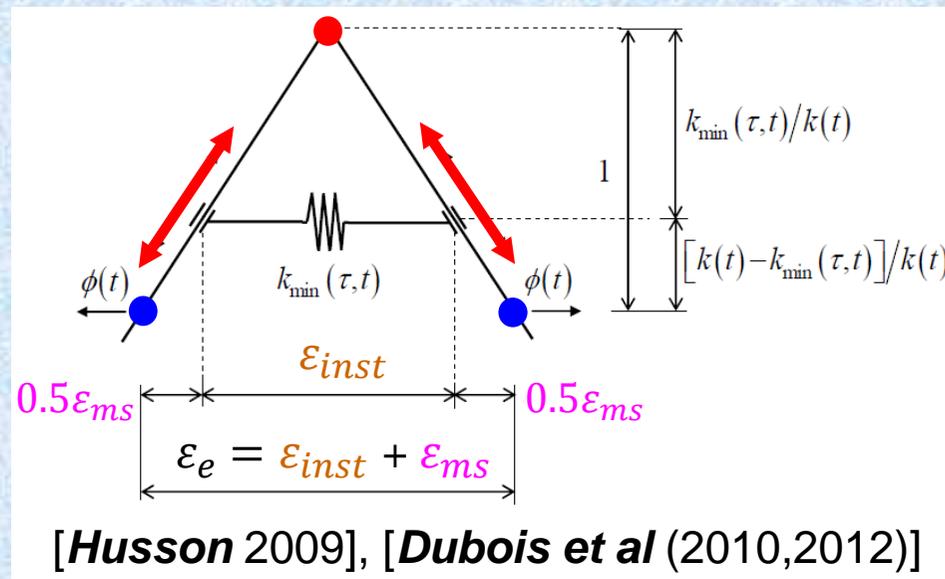
où $D_{MC}^{\alpha}(MC) = D_{\alpha} \cdot e^{\kappa_0 \cdot MC}$ avec $\alpha \in (L, R, T)$.



Teneur en eau de surface = Teneur en eau d'équilibre obtenue à partir de la courbe d'équilibre (RH-MC)

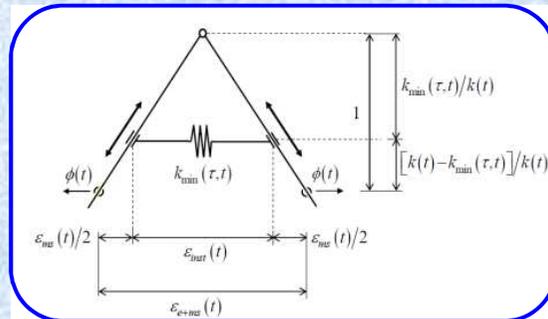
L'effet **hygro-verrou** et la mémoire de l'humidité **reflètent la capacité du matériau** à:

- mobiliser son énergie libre pour le blocage de la déformation lors du séchage sous chargement
- libérer cette déformation après le déchargement lors d'humidification

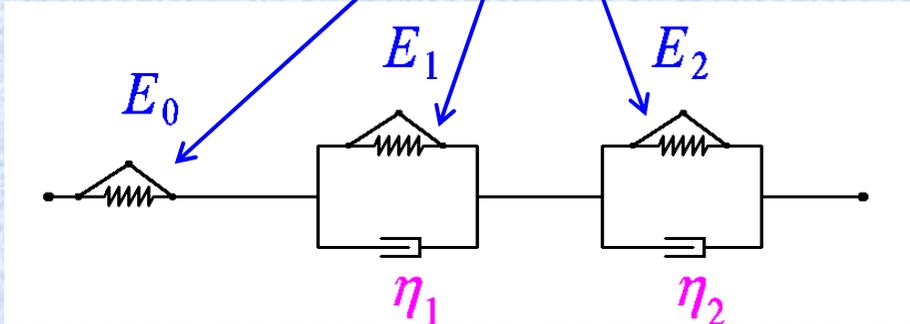


$$k(t) = k(MC(t)) \text{ with } \begin{cases} \dot{MC} \geq 0 \rightarrow \dot{k} \leq 0 \\ \dot{MC} \leq 0 \rightarrow \dot{k} \geq 0 \end{cases}$$

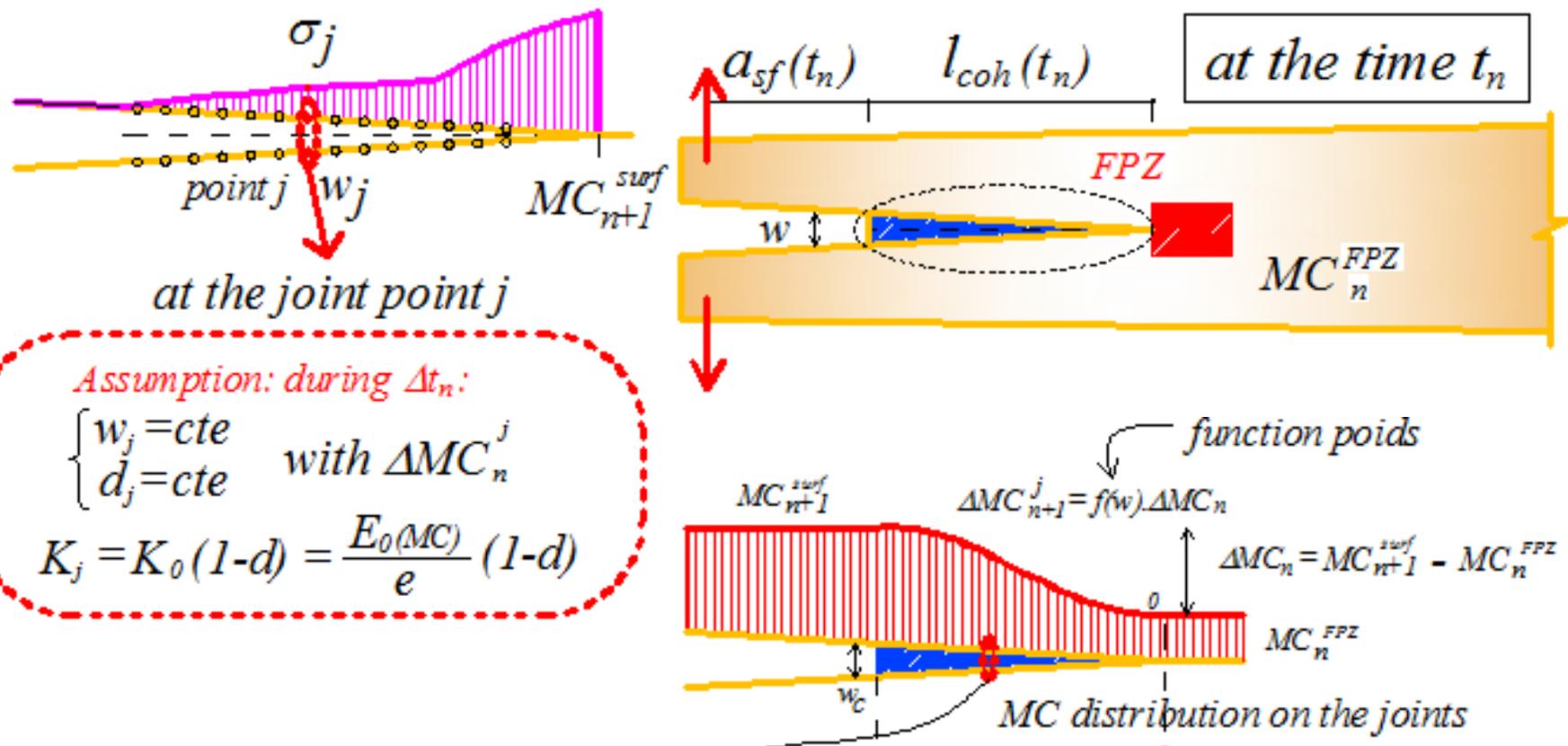
[Husson 2009], [Dubois et al (2010,2012)]

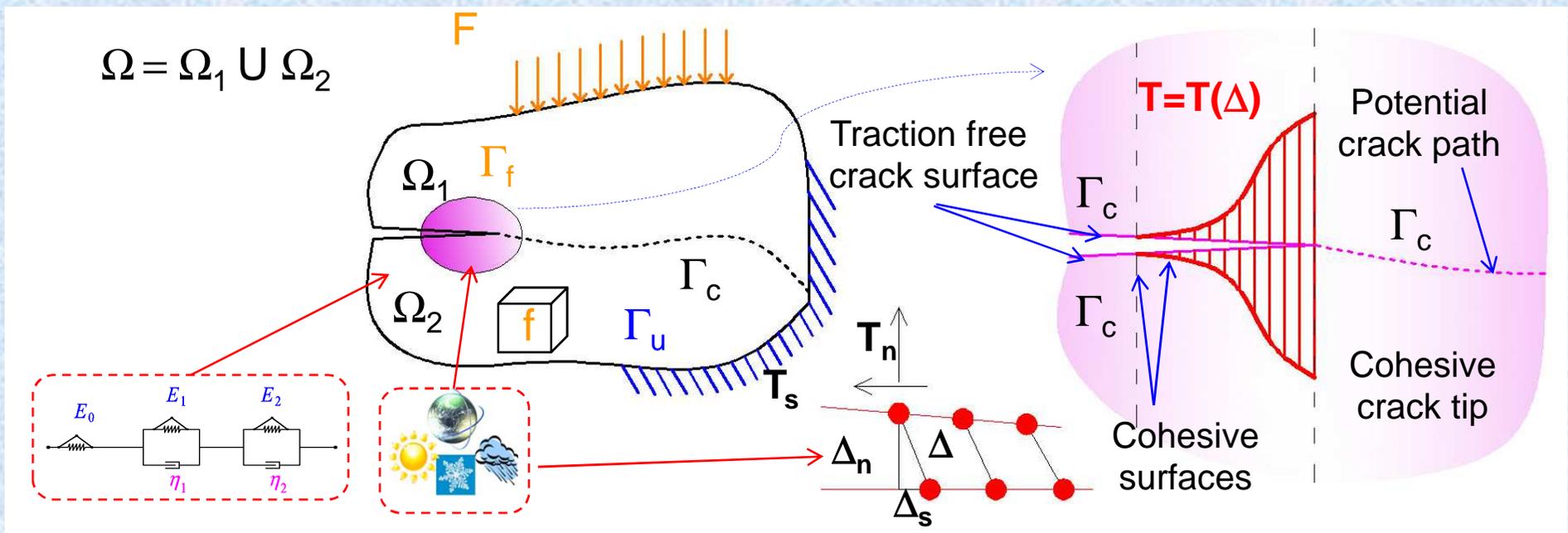


Dans cette étude:



- $E_0 = 1.35E4 (1. - 0.015 \text{ (MC - 12.)})$
- $E_1 = 2.99E5 (1. - 0.024 \text{ (MC - 12.)})$
- $E_2 = 1.83E5 (1. - 0.039 \text{ (MC - 12.)})$
- $\eta_1 = 6.27E6 (1. + 0.004 \text{ (MC - 12.)})$
- $\eta_2 = 6.92E4 (1. + 0.012 \text{ (MC - 12.)})$





Bilan énergétique

$$\underbrace{\frac{1}{2\rho} \int_{\Omega} k(t) (\varepsilon_{inst}^2 + \varepsilon_{ms}^2) dV}_{\text{strain energy (internal energy)}} + \underbrace{\int_{\Gamma_c} T(1 + \alpha(t)) \delta \Delta d\Gamma_c}_{\text{dissipated energy}} = \underbrace{\int_{\Omega} f \delta u dV + \int_{\Gamma_f} F \delta u d\Gamma_f}_{\text{external work}}$$

strain energy
(internal energy)

$$k(t) = k(MC(t))$$

$$\text{with } \begin{cases} \dot{MC} \geq 0 \rightarrow \dot{k} \leq 0 \\ \dot{MC} \leq 0 \rightarrow \dot{k} \geq 0 \end{cases}$$

dissipated energy

$$\text{with } \begin{cases} \dot{MC} \geq 0 \rightarrow \alpha \leq 0 \\ \dot{MC} \leq 0 \rightarrow \alpha \geq 0 \end{cases}$$

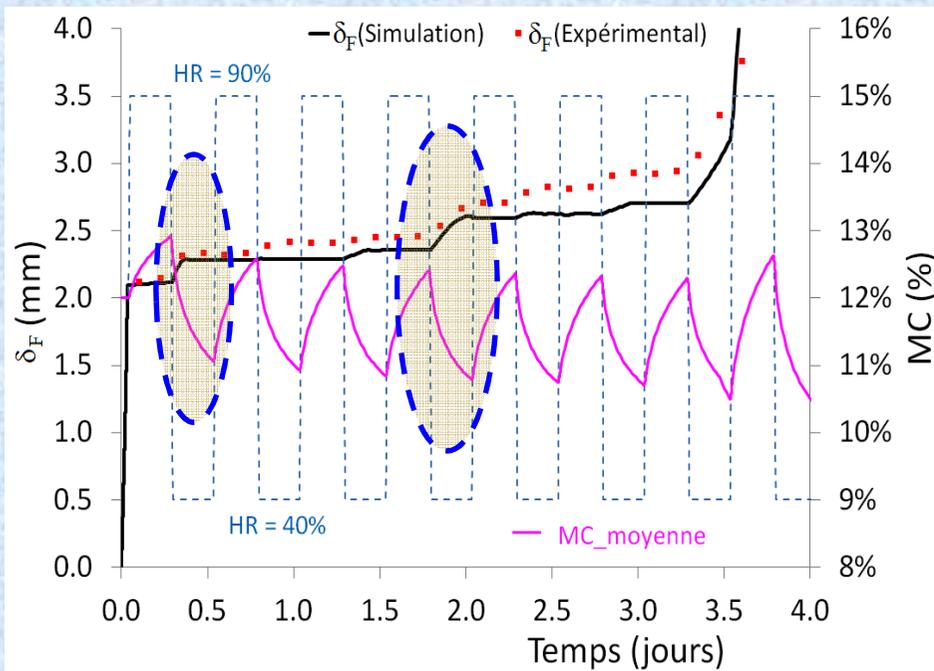
$$\Delta \sigma_j^*(\Delta MC_n^j) = \left(\frac{E_o(MC_{n+1}^j)}{E_o(MC_n^j)} - 1 \right) \sigma_j(MC_n^j)$$

external work

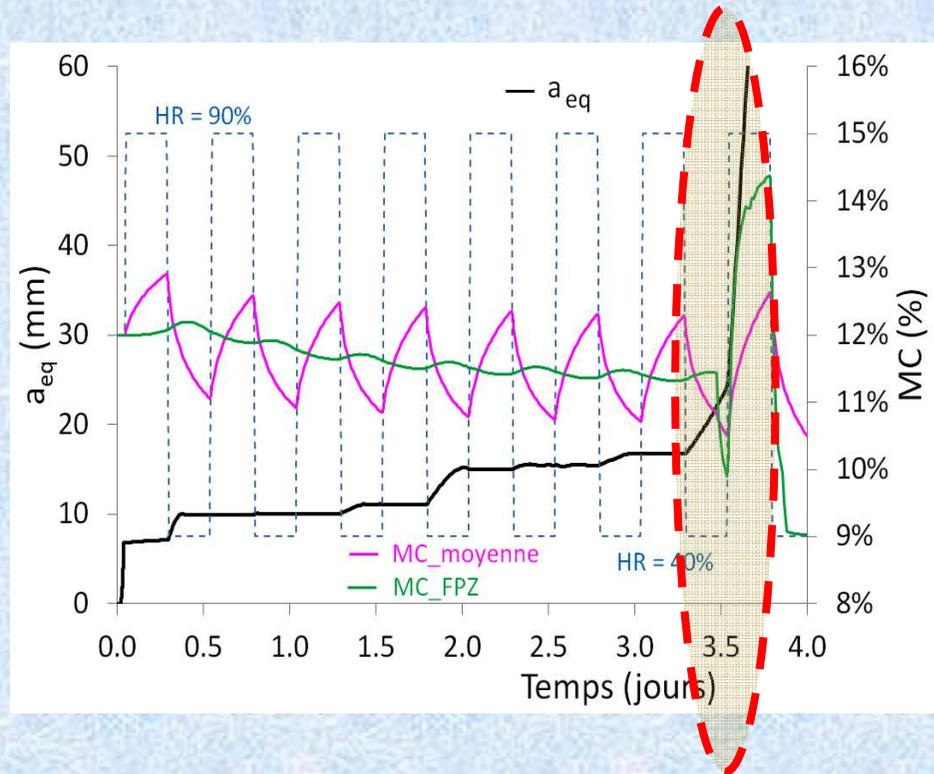
Phan N.A., Morel S., Chaplain M., On the development of a cohesive model for crack propagation in wood under relative humidity variations, the fourth International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures, CFRAC, Paris, 2015

Niveau de charge : **85% F_{max}** + **cycles d'humidification/séchage**

Evolution de déplacement

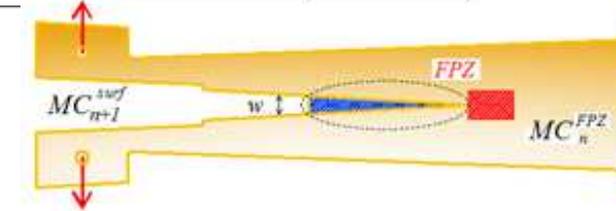
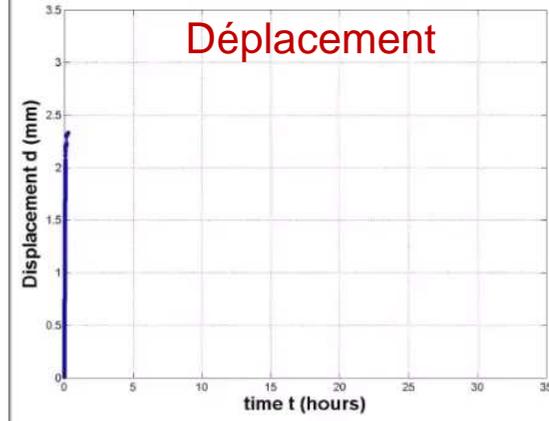


Evolution de la longueur de fissure

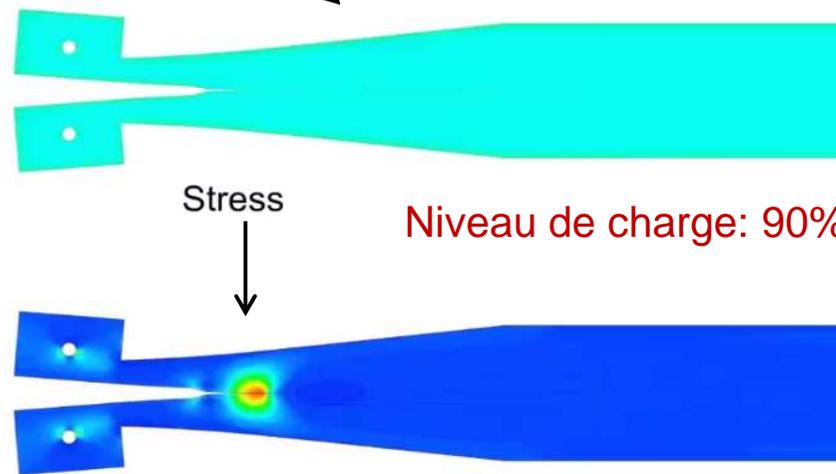


- **Phase de séchage:** δ_F augmente ou reste stable
- **Phase d'humidification:** δ_F ne change pas ou diminue légèrement

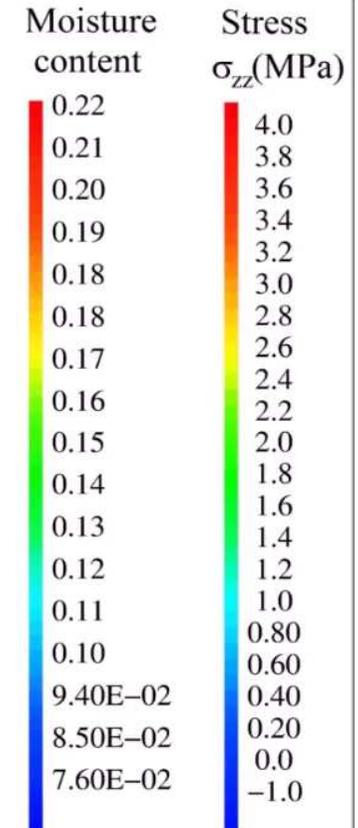
A l'instant $t = 3.5$ jours, la propagation devient instable et entraîne la rupture
 → **Le temps à rupture**



Moisture content



Stress



Section transversale de l'éprouvette mTDCB

- Contexte et introduction
- Essais de rupture en mode d'ouverture de fissure (mode I)
- Modélisation de la propagation de fissure sous HR variable
- **Conclusions et perspectives**

- ✓ Les paramètres du modèle de zone cohésive **dépendent de la teneur en eau**
 - $MC \nearrow \rightarrow G_f \nearrow \quad w_c \nearrow \quad f_t \searrow \quad G_{fb}/G_f \searrow$
- ✓ Développement d'un modèle qui traduit **l'influence de la teneur en eau sur la zone cohésive**
 - $\Delta MC < 0 \rightarrow \Delta a \geq 0$
 - $\Delta MC > 0 \rightarrow \Delta a \sim 0$ ou $\Delta a < 0$

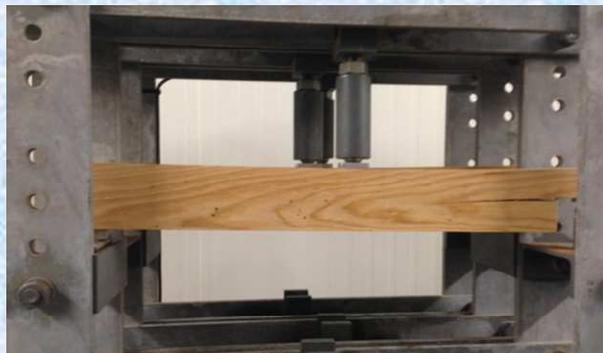
a: la longueur de la fissure
- ✓ Ce modèle permet de modéliser la propagation de la fissure **sous des variations d'humidité**
 - ➔ *Les prévisions de la durée de vie sont **satisfaisantes***

- Prédire le temps à rupture d'éléments de structures en bois sous des conditions environnementales simulées à partir d'un modèle développé à l'I2M / GCE (Breysse *et al*, 2014).
- Projet VS2C : amélioration de la réglementation à l'aide de **coefficients correctifs** minorant la résistance selon la durée de charge et l'état d'exposition à l'humidité (utilisation d'un coefficient modérateur k_{mod} dans l'**Eurocode 5**).



Essais : 3 mois → 2 ans

Dispositifs d'essais de fluage-fatigue en flexion dans une chambre climatisé (25m²) (I2M/GCE)



JOURNEE THESES DES BOIS

Bordeaux, Jeudi 2 Juillet 2015

Merci pour votre attention!



Remerciement

- Ce travail est financé par le Conseil Régional d'Aquitaine et par le CODIFAB (Projet VS2C). Nos remerciements vont également à l'Agence nationale de recherche française (ANR) qui a financé la plateforme d'essais Xyloplate (Equipex Xyloforest (ANR-10-EQPX-16)). Merci à l'équipe du MCIA de l'université de Bordeaux pour la mise à disposition d'un cluster de calcul puissant.
- Merci à Monsieur Dubois (Université de Limoges, GEMH-GCE) pour sa participation au projet VS2C et le partage de ses connaissances et modélisations sur la diffusion et sur le comportement mécanosorptif.

JOURNEE THESES DES BOIS

Bordeaux, Jeudi 2 Juillet 2015

Construction en bois : adaptation aux changements climatiques ? Effet des variations de l'humidité relative sur l'évolution de la fissuration

Ngoc Anh PHAN

Université de Bordeaux, I2M/Dépt. GCE

na.phan@i2m.u-bordeaux1.fr

Directeur de thèse: **Pr. Stéphane MOREL**

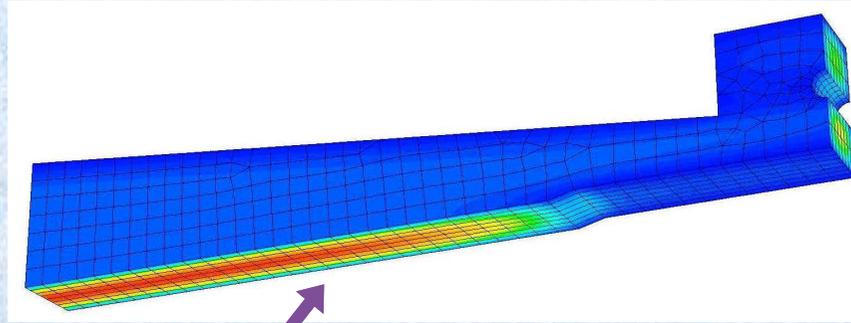
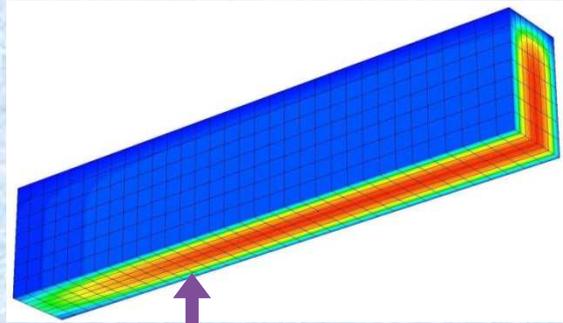
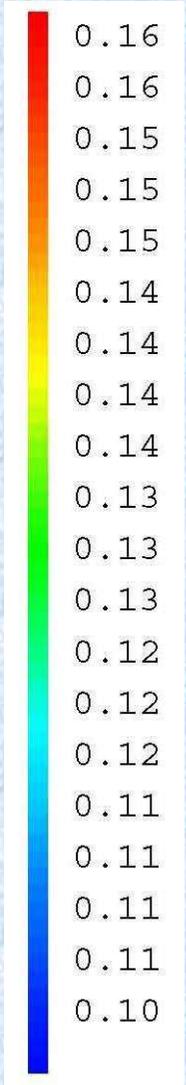
Co-encadrante : **Myriam CHAPLAIN**

Distribution de la teneur en eau dans le bois

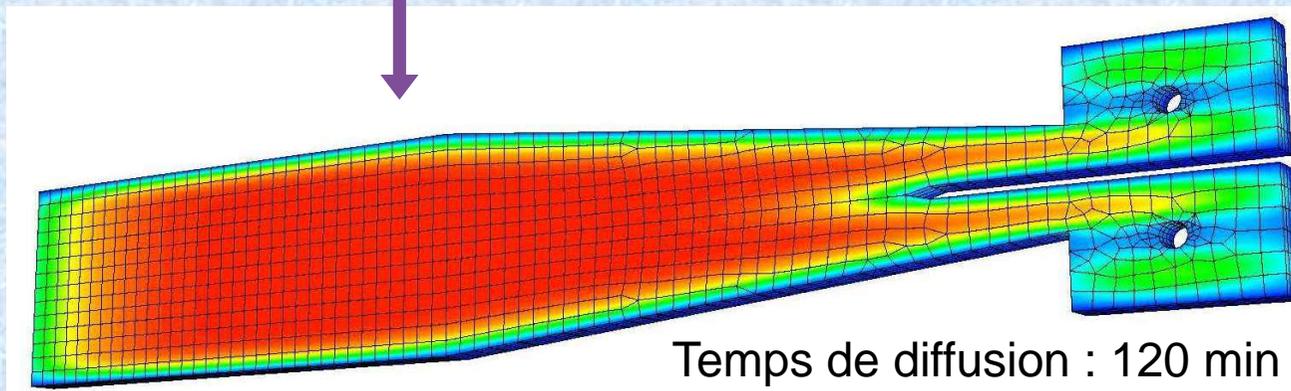
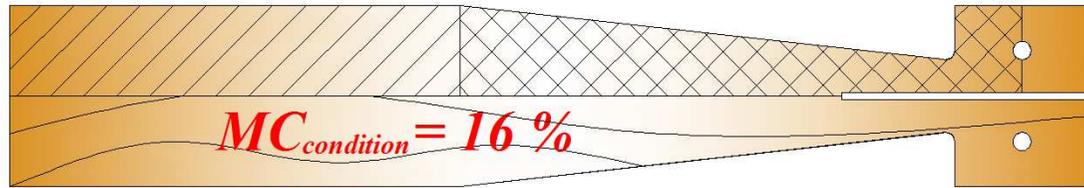
La loi de Fick pour le transfert de masse en tridimensionnel:

$$\frac{\partial MC}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{MC}(MC) \frac{\partial MC}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{MC}(MC) \frac{\partial MC}{partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{MC}(MC) \frac{\partial MC}{\partial z} \right)$$

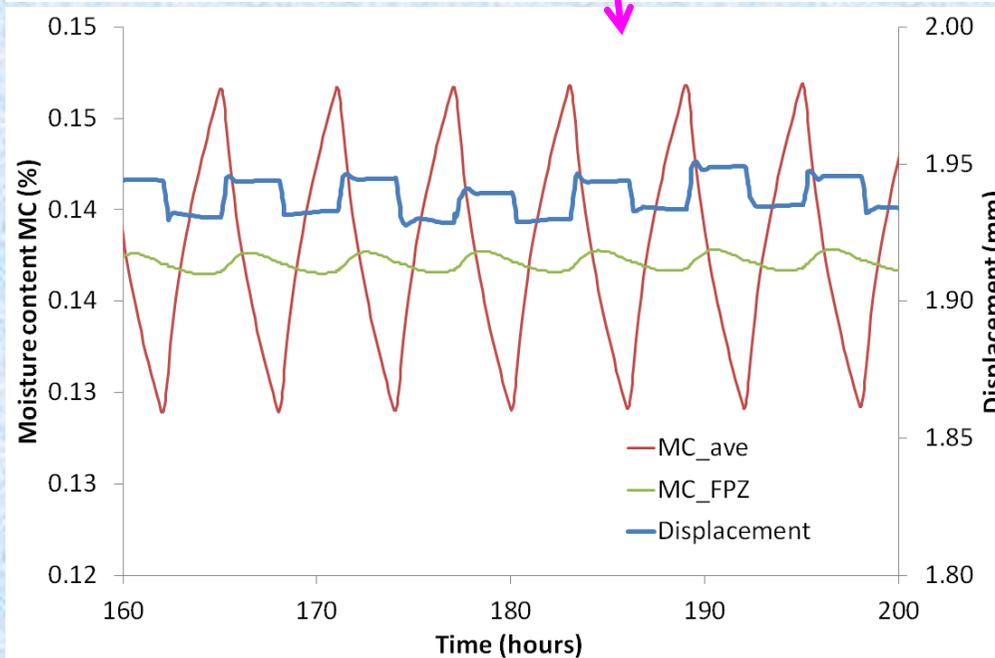
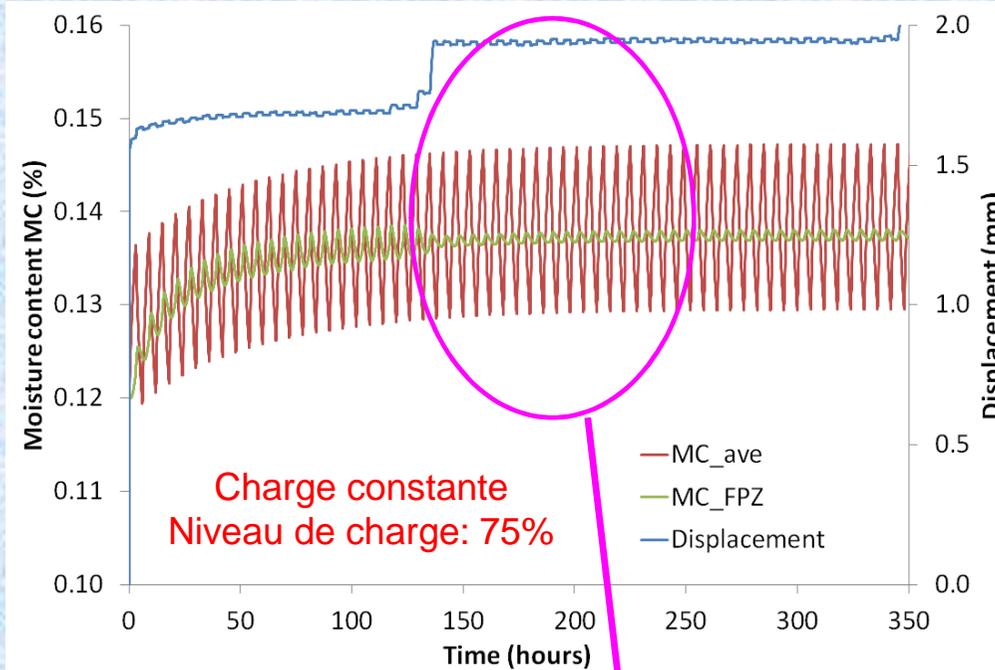
Teneur en eau



$MC_{surface} = 10\%$



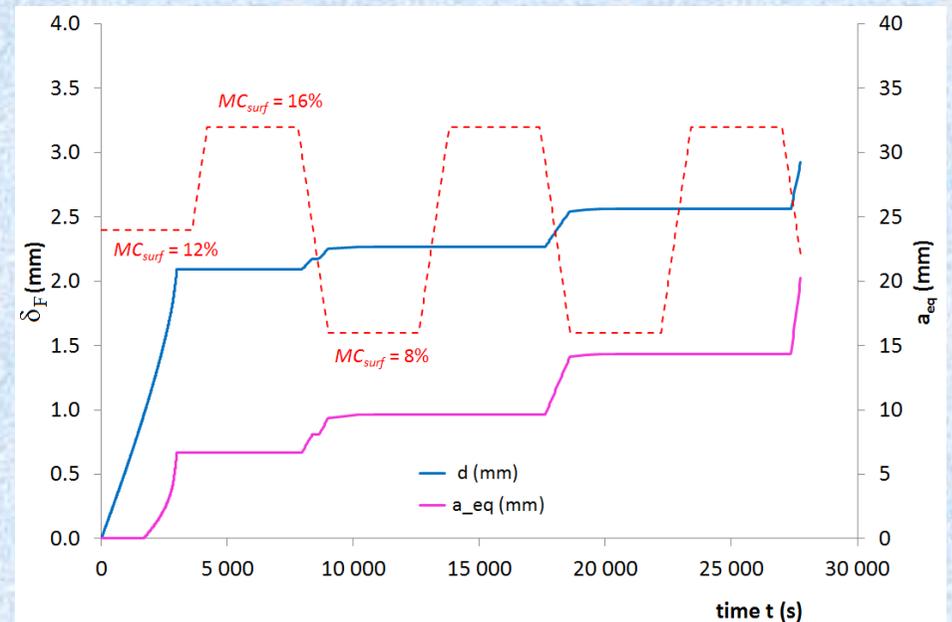
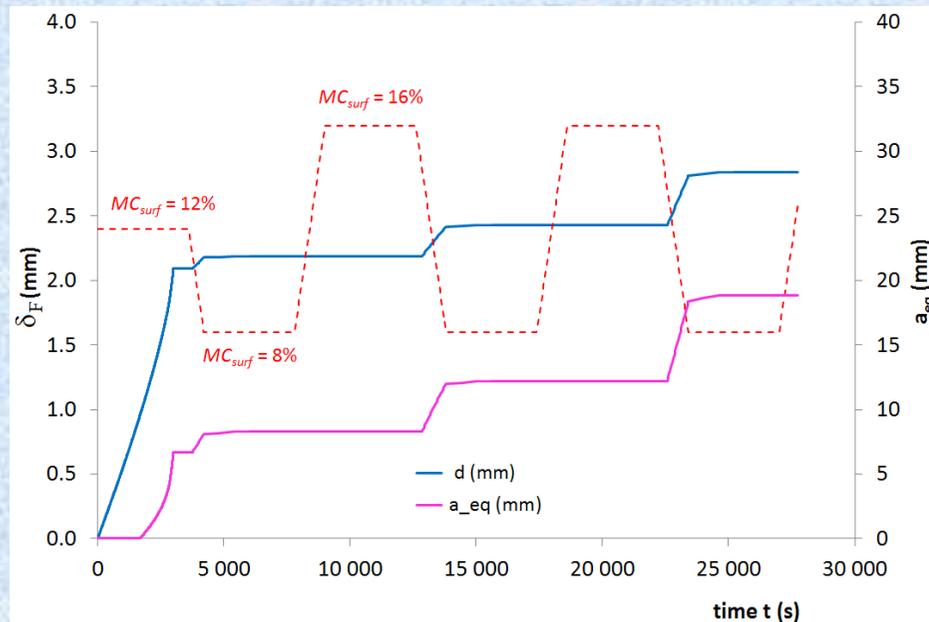
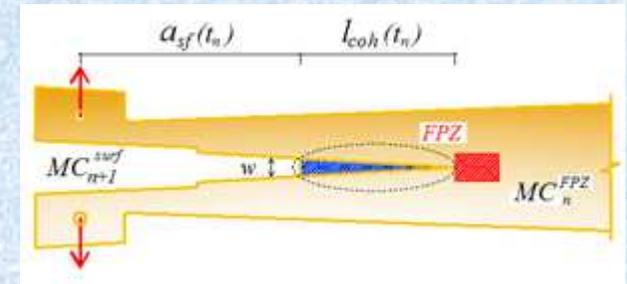
Temps de diffusion : 120 min



Intégration de la variation rapide de MC dans CZM

32

- Réalisation de cycles : MC_{surf} varie entre 8% et 16% .
- Charge : 180 N ($\sim 85\%F_{max}$)
- La teneur en eau en fond de fissure (MC_{FPZ}) est toujours maintenue à 12%.
- Pas de diffusion dans le bois



Résultat:

- **Phase de séchage:** le déplacement δ_F et la longueur de la fissure a augmentent
- **Phase d'humidification:** δ_F et a ne changent pas.

Distribution de la teneur en eau aux joints

