

---

# Construction en bois : adaptation aux changements climatiques ?

## Effet des variations de l'humidité relative sur l'évolution de la fissuration

**PHAN Ngoc Anh**

Université de Bordeaux, I2M/GCE, 351 cours de la libération-33405 Talence cedex France  
Email : na.phan@i2m.u-bordeaux1.fr

---

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

### RÉSUMÉ.

L'objectif de ce travail est de prédire l'évolution de la fissuration jusqu'à la rupture de poutres en bois sous des conditions extérieures (température et humidité relative HR) variables. Ce travail est basé sur la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture équivalente. Un modèle est développé dans le code de calcul par éléments finis Cast3M (source Esope); il repose principalement sur la théorie de la fissure cohésive. Ce modèle permet de prendre en compte l'influence de la teneur en eau sur la zone d'élaboration de fissure. Des essais de fissuration ont été réalisés sur du pin Maritime sous différentes teneurs en eau afin de déterminer les courbes de résistance (critère de propagation) et les paramètres du modèle de zone cohésive. Des essais de propagation sous charge constante sont aussi réalisés sous HR variables. La teneur en eau influant sur le comportement mécanique du bois, le transfert de masse est intégrée à la modélisation afin de déterminer la teneur en eau en tous points en fonction des conditions extérieures.

### ABSTRACT.

The aim of this work is to predict the evolution of crack until failure of wooden beams in the external conditions (temperature and relative humidity RH) variables. This work is based on Linear Elastic Mechanics equivalent Rupture. A model is developed in the finite element code Cast3M (source Esope); it is based on the theory of cohesive crack and allows taking into account the influence of moisture content on the fracture process zone. Fracture tests are performed on the Maritime pine under different moisture contents in order to determine resistance curves (propagation criterion) and parameters of cohesive zone model. Fracture tests under constant load are also performed under HR variables. The elastic behavior of wood is dependent on the moisture content. In addition, mass transfer is integrated in the modeling to determine the moisture content at all points of mesh as a function of humidity and of temperature.

*MOTS-CLÉS* : bois, courbe-R, modèle de zone cohésive, teneur en eau, diffusion, mécano-sorption.

*KEYWORDS* : wood, R-curve, cohesive zone model, moisture content, diffusion, mecano-sorption.

---

## 1. Introduction

L'approche mécanique de la rupture est de plus en plus utilisée afin d'estimer le temps à rupture de structures en bois. Dans cette approche, un modèle de zone cohésive (CZM) est utilisé avec succès pour les analyses de la propagation de la fissure. La zone cohésive représente la « fracture process zone » (FPZ) en fond de fissure et son comportement peut être défini en termes d'une loi de traction-séparation [BAZ 98]. Les avantages du CZM sont: i) il ne nécessite pas l'existence d'une longueur de la fissure prédéfinie, ii) la propagation de la fissure ne nécessite pas de remaillage, ceci permet d'éviter la discontinuité géométrique qui conduirait à des perturbations des champs mécaniques et hydriques.

Le bois est considéré comme un matériau complexe, hygroscopique dont les propriétés mécaniques dépendent fortement de la teneur en eau  $MC$  [GUI 87]. La variation de l'humidité relative ( $HR$ ) induit des contraintes internes qui peuvent entraîner la propagation de la fissure car la FPZ est directement soumise à la variation de  $MC$  [CHA 10]. Basé sur une approche thermodynamique en utilisant la méthode de l'état local, un modèle rhéologique avec un comportement mécanosorptif a été développé par Dubois et al [DUB 12] pour décrire le comportement du bois. Ce modèle introduit un couplage entre les variations de la teneur en eau et les propriétés mécaniques du bois. Dans ce modèle, le matériau possède un comportement se traduisant par des blocages de déformation durant les phases de séchage; et par une mémoire hydrique rappelée lors des phases

d'humidification. Ce comportement porte le nom d'hygro-verrou dans ce modèle. L'effet verrou introduit une dissociation de la contrainte interne en une contrainte mécanique et une contrainte mécanosorptive.

Dans notre étude, nous nous focalisons sur l'influence de l'humidité sur la FPZ au cours de la propagation de la fissure dans le bois. Basé sur la théorie de la zone cohésive, un modèle traduisant l'influence de la teneur en eau sur la zone cohésive, est proposé et implanté dans le code de calcul par éléments finis Cast3M. La simulation de la propagation de la fissure dans une poutre soumise à un chargement externe constant et à des variations de l'humidité relative est effectuée en tridimensionnel en utilisant un comportement mécanosorptif. Des essais expérimentaux sont réalisés afin de valider des résultats numériques

## 2. Essais expérimentaux

Des essais de rupture sont réalisés en mode d'ouverture de fissure (mode I) sur des éprouvettes mTDCB (modified Tapered Double Cantilever Beam) en pin Maritime. La figure 1 présente deux éprouvettes mTDCB jumelées pour deux types d'essais de rupture et leurs dimensions. Les éprouvettes (a) sont testées sous un chargement monotone sous différentes teneurs en eau afin de déterminer la courbe de résistance à la propagation (critère de propagation) et les paramètres du modèle CZM. Ensuite, des essais de propagation sur les éprouvettes (b) (essais de fluage) sont effectués dans une enceinte climatique sous variation de l'humidité relative à une température constante.

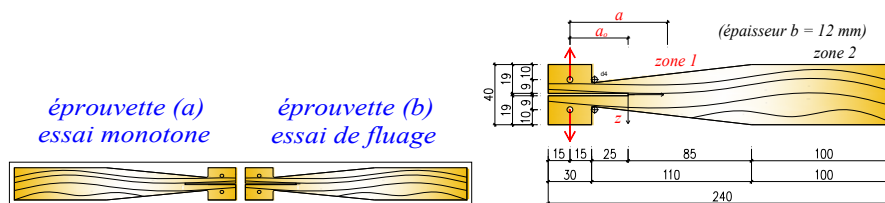


Figure 1. Dimension de l'éprouvette mTDCB

### 2.1. Essai monotone

Les essais sont réalisés sur les éprouvettes (a) sous dix MC différentes comprises entre 5% et 30% (nous supposons que MC=30% correspondant approximativement à la teneur en eau de saturation du bois, i.e., teneur en eau marquant la fin du comportement hygroscopique du bois). Les essais sont réalisés à un déplacement imposé : 1 mm/min pour  $MC \leq 22\%$  et 2 mm/min pour  $MC > 22\%$ .

### 2.2. Essai de propagation sous HR variables

Des essais de propagation de la fissure sous l'humidité variable sont réalisés sur l'éprouvette (b) dans une enceinte climatisée où la température est maintenue à 20°C et où l'humidité relative varie entre 40 % et 90% toutes les 3h (durée du changement 20 minutes) (Figure 2). La charge appliquée est constante et égale à 85% - 90% de la force maximale obtenue lors de l'essai monotone sur l'éprouvette jumelle. L'éprouvette (a) est déposée sur une balance placée au sein de l'enceinte pour mesurer l'évolution de la masse d'eau durant l'essai. Des images sont enregistrées toutes les 10 minutes par une caméra afin de déterminer l'évolution du déplacement  $\delta_f$  entre les points d'application de la force.

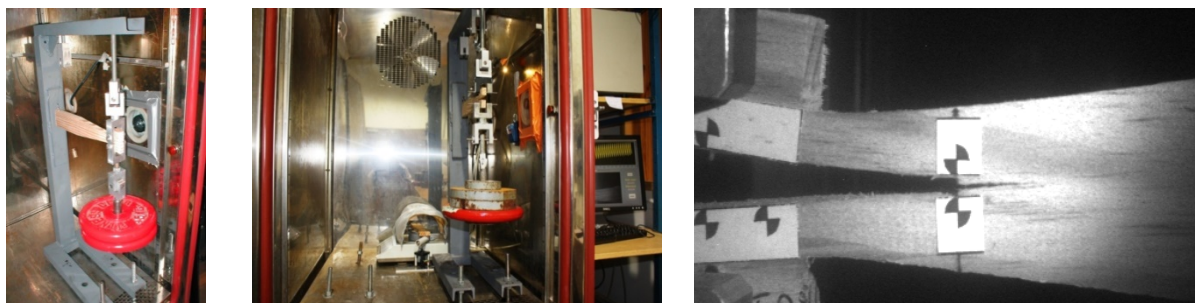


Figure 2. Enceinte climatisée et une image enregistrée durant l'essai

La difficulté pour distinguer le fond de la fissure réelle ne permet pas la détermination de la longueur de la fissure réelle. Donc, la longueur de la fissure équivalente est introduite et obtenue par le biais de la fonction complaisance de l'éprouvette basée sur l'approche Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture équivalente.

### 3. Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture équivalent et Modèle de Zone Cohésive (CZM)

#### 3.1. Courbe de résistance (courbe-R)

La Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture (MLER) ne s'applique pas directement aux matériaux quasi-fragiles compte tenu de la présence d'une zone d'élaboration de la rupture qui, avec une taille non négligeable, se développe au fond de la fissure [BAZ 98]. Donc, une adaptation de la MLER, connue sous le nom de MLER équivalente, est utilisée pour des matériaux quasi-fragiles [MOR 10]. Cette approche s'appuie sur la notion de *fissure élastique équivalente* correspondant de la fissure qui, dans un modèle élastique pur (i.e., au sens de la MLER), produira la même complaisance que celle du spécimen réel (i.e., avec sa fissure principale et sa zone d'élaboration) [MOR 10].

La courbe de résistance  $G_R$  traduit l'évolution de la résistance à la propagation (taux de restitution de l'énergie) en fonction de la longueur de la fissure élastique équivalente  $a$  (Fig. 3a). Cette évolution  $G_R(a-a_0)$  peut être exprimée par une loi puissance  $\beta$  suivant l'équation [1]:

$$G_R(\Delta a = a - a_0) = \frac{G_{Rc}}{(a_c - a_0)^\beta} \Delta a^\beta \quad [1]$$

Où  $a_0$  est la longueur de la fissure initiale et  $a_c$  correspond à la longueur de la fissure pour laquelle apparaît la résistance plateau  $G_{Rc}$ . Notons que  $\Delta a_c = a_c - a_0$  correspond à la longueur élastique équivalente de la zone d'élaboration. Sur la Fig. 3a,  $G(a, P_0)$  présente le taux de restitution d'énergie due à la force initiale  $P_0$  (i.e., 85%  $P_{max}$ );  $G^*(a)$  est le taux de restitution d'énergie dû aux parties mécanosorptive et viscoélastique.

#### 3.2. Modèle de Zone Cohésive

A partir des courbes-R obtenues pour les différents teneurs en eau, les paramètres du modèle de zone cohésive (approximation bilinéaire du comportement adoucissant [MOR 10]) sont déterminés afin de décrire la rupture quasi-fragile. Dans ce modèle, il y a quatre paramètres à déterminer (Fig. 3b):  $G_f$  représente l'énergie de la rupture cohésive (somme des énergies relatives aux mécanismes de microfissuration  $G_{f\mu}$  et de pontage de fissure  $G_{fb}$ ),  $w_c$  est l'ouverture critique,  $f_t$  correspond à la résistance à la traction de l'interface cohésive et le ratio  $G_{f\mu}/G_f$  décrit la répartition d'énergie cohésive entre les deux mécanismes de microfissuration et de pontage de fissure.

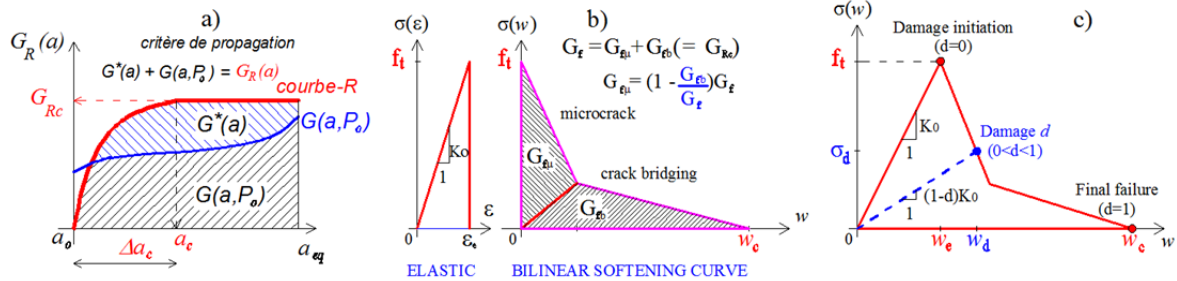


Figure 3. Courbe-R et modèle de la zone cohésive.

Théoriquement, dans ce modèle, l'endommagement  $d$  du joint à l'interface est défini par l'équation [2]. La contrainte normale  $\sigma$  dans la zone cohésive, est obtenue par l'équation [3].

$$d = 1 - \frac{w_e \sigma_d}{w_d f_t} \quad [2]$$

$$\begin{cases} \sigma = K_0 w & \text{if } w \leq w_e \\ \sigma = K_0 (1-d) w & \text{if } w_e < w < w_c \\ \sigma = 0 & \text{if } w \geq w_c \end{cases} \quad [3]$$

Où  $w_e$  est l'ouverture de la fissure (sur un joint) lorsque la contrainte  $\sigma$  atteint la résistance à la traction  $f_t$  de l'interface cohésive (Fig. 3c) (ensuite, l'élément joint commence à s'endommager ( $d > 0$ ) et à s'ouvrir). Pour un dommage  $d$  (Fig. 3c),  $\sigma_d$  et  $w_d$  sont respectivement la contrainte et l'ouverture maximales dans l'élément joint.

Figure 4 présente les résistances à la propagation et les paramètres de CZM en fonction de la teneur en eau. Les évolutions de  $G_{Rc}$  et  $w_c$  en fonction de la teneur en eau sont linéairement croissantes; par contre, les

évolutions de  $f_i$  et  $G_{fi}/G_f$  sont décroissantes jusqu'à la teneur en eau 25% (approximatif), en suite elles sont stables jusqu'à 30%.

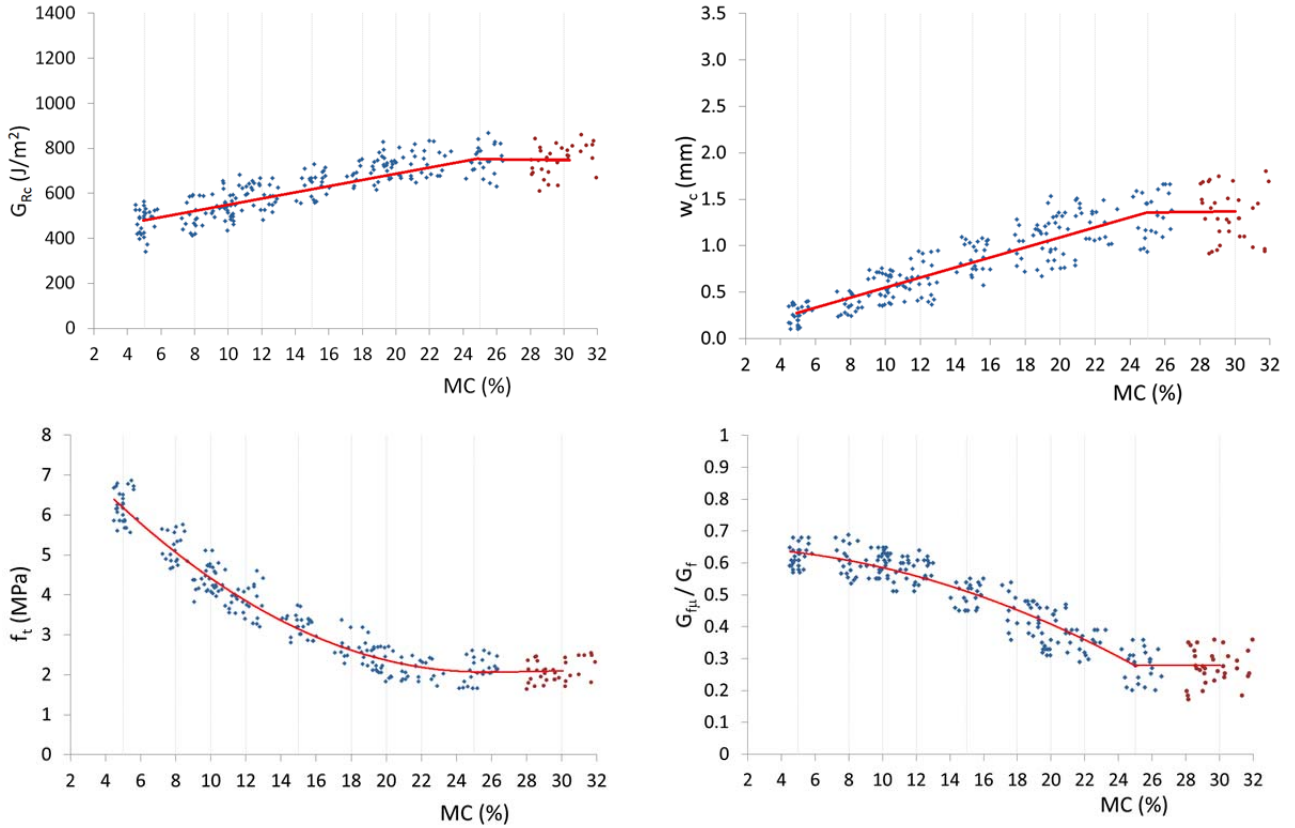


Figure 4. Evolutions des paramètres de CZM en fonction de la teneur en eau.

#### 4. Modélisation de la propagation de la fissure sous la variation d'humidité

##### 4.1. Diffusion de la teneur en eau dans le bois

Pour le transfert de masse en tridimensionnel, la loi de Fick est utilisée afin de résoudre le problème de la diffusion de la teneur en eau dans le bois (Eq. [4]) [MER 06].

$$\frac{\partial MC}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_x(MC) \frac{\partial MC}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_y(MC) \frac{\partial MC}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_z(MC) \frac{\partial MC}{\partial z} \right] \quad [4]$$

Dans le cas d'un processus de diffusion non linéaire, les coefficients de diffusion pour les directions longitudinale ( $D_L$ ), radiale ( $D_R$ ) et transversale ( $D_T$ ) sont en fonction de la teneur en eau (Eq. [5]) [MER 06]:

$$D_\alpha(MC) = D_\alpha^0 e^{K_0 MC} \quad \text{avec } \alpha \in (L, T, R) \quad [5]$$

Où  $D^0$  représente le coefficient de diffusion à l'état anhydre ;  $K_0$  est un coefficient constant correspondant à la direction  $\alpha$ .

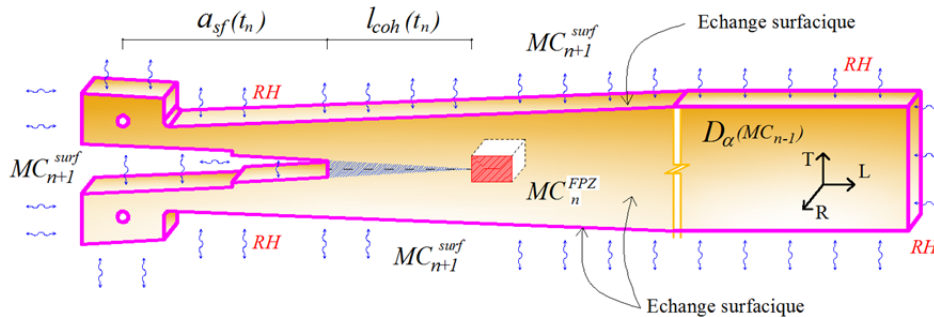


Figure 5. Paramètres utilisés pour la diffusion de la teneur en eau.

Sur la surface orientée par le vecteur  $\Omega$ , les conditions de convection hydrique s'écrivent [MER 06]:

$$-D_\alpha \frac{\partial MC}{\partial \Omega} = h_\Omega (MC_\Omega - MC_{surf}^{eq}) \quad \text{avec } \Omega \in (x, y, z) \quad [6]$$

Où  $MC_{surf}$  est la teneur en eau d'équilibre hygroscopique correspondant à  $HR$  de l'air ambiant;  $MC_\Omega$  est la teneur en eau en surface et  $h_\Omega$  désigne le coefficient d'échange surfacique. Dans notre étude, les axes  $(x, y, z)$  sont respectivement définis comme les directions suivantes  $(L, R, T)$ .

Nous supposons que la teneur en eau de surface de l'éprouvette est égale à la teneur en eau d'équilibre obtenue à partir de la courbe de sorption ( $RH-MC$ ); et nous supposons que les coefficients d'échange surfacique sont similaires pour les trois directions (Figure 5). Lorsque la fissure se propage, la longueur de la fissure augmente, la distance  $a_{sf}$  varie et la limite d'échange surfacique de l'éprouvette change (Figure 5). Par conséquent, il est nécessaire de faire un remaillage de la nouvelle géométrie et une projection du champ hygrothermique avant la propagation de la fissure sur la nouvelle géométrie (avec la nouvelle longueur de la fissure). Dans notre étude, tous les coefficients de diffusion utilisés sont issus des travaux de Perré *et al* [AGO 01]. Le couplage entre les cinétiques de diffusion et l'état de contrainte n'ont pas été pris en compte.

#### 4.2. Intégration de la variation rapide de la teneur en eau dans le modèle de zone cohésive

Les propriétés élastiques du bois sont inversement proportionnelles à la teneur en eau. D'après les travaux de Dubois *et al* [DUB 12] sur la mécano-sorption, la loi de Hooke ne peut s'appliquer que dans la phase d'humidification (assouplissement, comportement adoucissant). Sous un chargement constant, lors du séchage, la déformation est bloquée et la contrainte mécanosorptive augmente; inversement, la contrainte mécanosorptive diminue lors des phases d'humidification. Cette contrainte est nulle tant que la rigidité reste inférieure à la valeur minimale de la raideur en mémoire du chargement hydrique. Sans variation hydrique, la contrainte mécanosorptive n'est pas influencée par les variations du chargement mécanique.

Dans des essais de propagation sous  $HR$  variables, nous observons lors du séchage que la fissure a tendance à s'ouvrir avec ou sans propagation. Au contraire, pour la phase d'humidification, la fissure a tendance à se refermer. Lors de la phase séchage/humidification, si le changement est rapide, l'effet de la viscosité dans le bois est supposé être négligeable. Dans la suite de ce travail, à partir du modèle d'hygro-verrou et de nos observations, nous proposons un nouveau modèle, basé sur le modèle de zone cohésive (Fig. 3), qui permettra de prendre en compte l'influence de la teneur en eau sur cette zone.

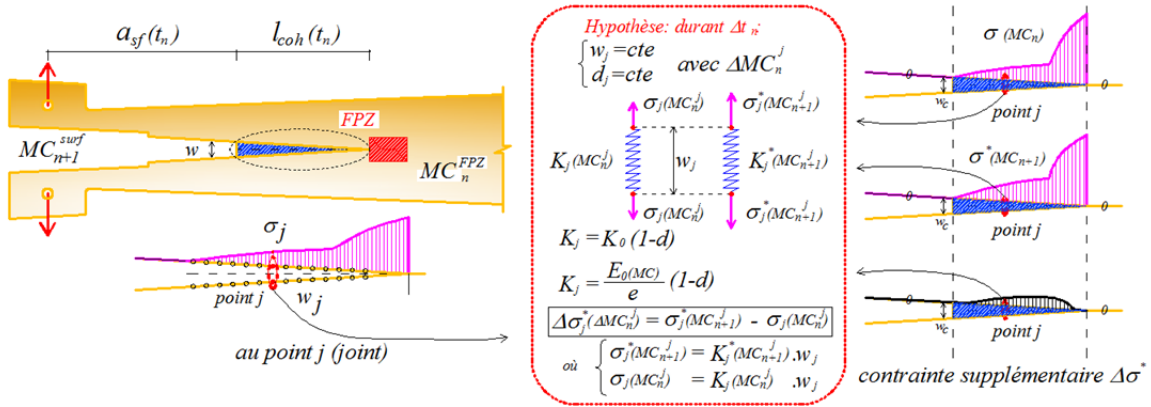


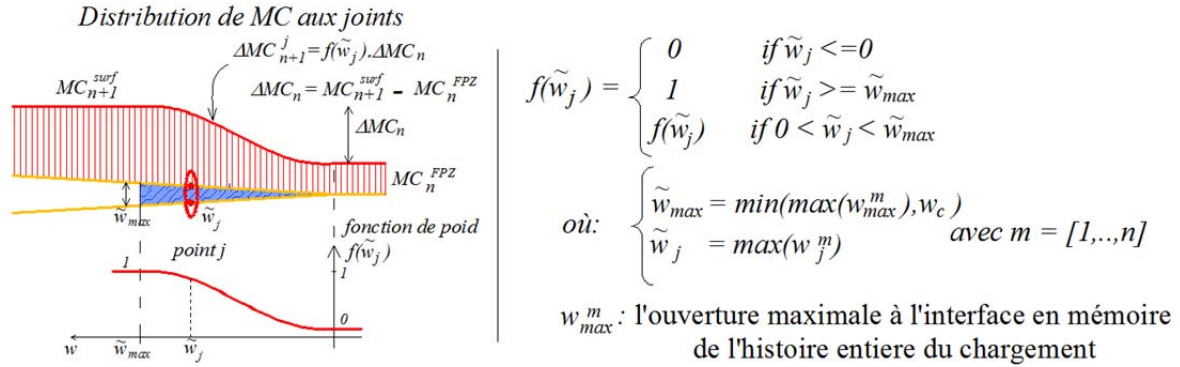
Figure 6. Présentation schématique de l'intégration des variations rapides de  $MC$  sur l'élément joint dans le CZM

En considérant des variations rapides de  $MC$  sur la FPZ au cours de l'incrément de temps, l'ouverture de fissure  $w$  dans les éléments joints à l'interface est supposée rester constante; le dommage  $d$  des éléments joints est supposé être indépendant de  $MC$  (Figure 6). Une contrainte supplémentaire est appliquée dans la zone cohésive, elle est calculée en utilisant l'influence de l'humidité sur les propriétés mécaniques de la zone cohésive (telle que la raideur) [3]. L'évolution de la teneur en eau dans les éléments joints au long de l'interface est obtenue par le biais d'une fonction poids, cette fonction est présentée sur la figure 7.

Au moment de l'incrément de temps suivant, le champ de contraintes supplémentaires est converti en incrément de force externe à l'interface cohésive (Fig. 6). Lorsque la fissure se propage, l'élément joint au fond de la fissure commence à s'endommager; la loi de traction-séparation (LTS) correspondant à la teneur en eau

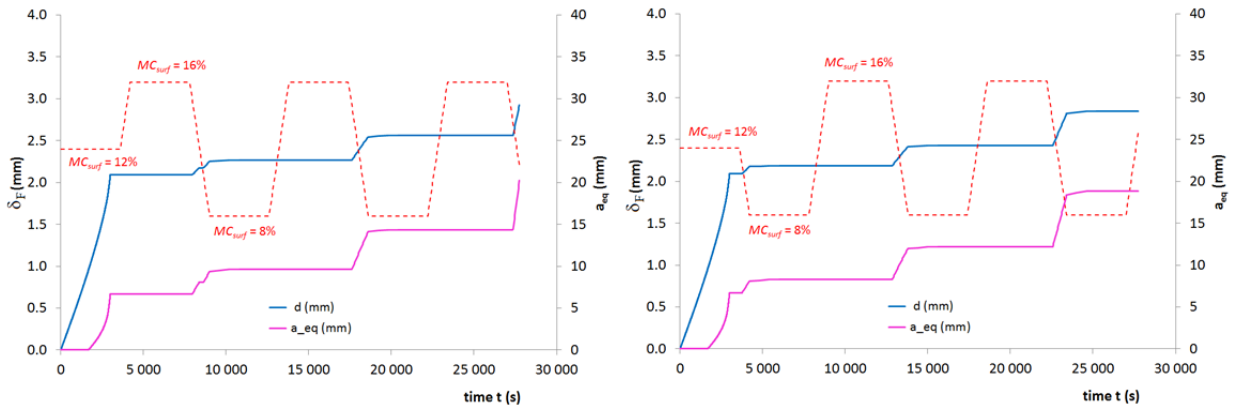


sur la FPZ à cet instant est utilisée. Pour cette nouvelle zone endommagée, la loi LTS ne changera plus dans les prochains processus de la propagation de la fissure. Ces calculs ont été mis en œuvre dans le code éléments finis.



**Figure 7.** Fonction poids de la distribution de MC sur l'élément joint à l'interface

Cette démarche est appliquée à l'éprouvette mTDCB sous des variations rapides de la teneur en eau de surface ( $MC_{surf}$ ); réalisation de cycles de  $MC_{surf}$  variant entre 8% et 16% (Fig. 8). L'éprouvette est soumise à une force de 180 N (85% de la force maximale). La teneur en eau au fond de fissure est toujours maintenue à 12%. La figure 8 présente les évolutions du déplacement  $\delta_F$  entre les points d'application de la force et de la longueur de la fissure  $a$  sous les variations de MC. Sur cette figure 8, nous constatons que lors de la phase de séchage, le déplacement  $\delta_F$  et la longueur de la fissure  $a$  augmentent; et pour la phase d'humidification, ils ne changent pas. Ceci est en accord avec les observations expérimentales.

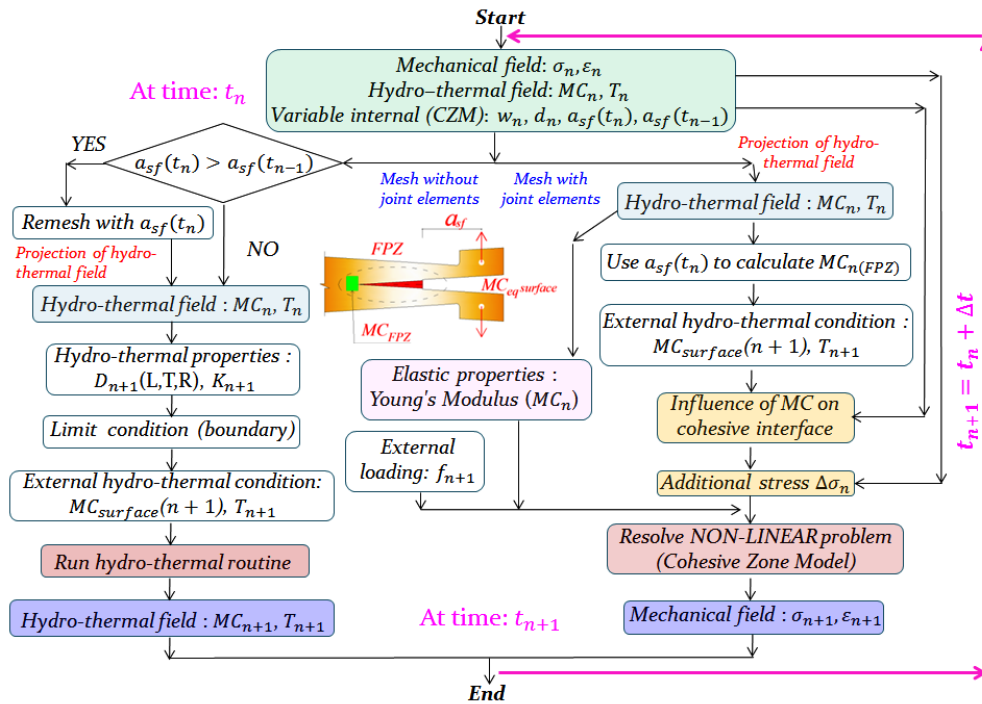


**Figure 8.** Simulations des évolutions du déplacement des points d'application de la force et de la longueur de la fissure sous une variation rapide de MC.

### 4.3. Modélisation et validation

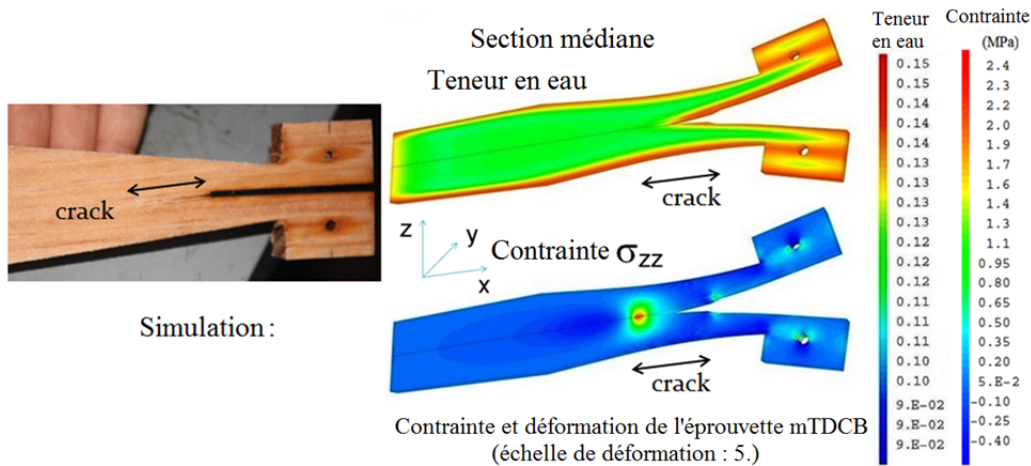
Dans la suite de ce travail, pour obtenir l'évolution de la propagation de la fissure et prédire le temps à rupture, des éprouvettes mTDCB sont modélisées sous HR variable en utilisant notre modèle de zone cohésive ainsi que la loi de Fick pour la diffusion dans l'éprouvette et le comportement mécanosorptif pour le substrat bois.

Au début du pas de temps de calcul, la distribution de la teneur en eau dans l'éprouvette est déterminée et les propriétés élastiques en fonction de la teneur en eau dans toute l'éprouvette sont mises à jour. Dans ce travail, nous considérons que le substrat de bois a un comportement mécanosorptif (pas de viscosité). De plus, la modélisation de la déformation de retrait – gonflement a été intégrée dans la procédure de ce comportement. A partir des résultats des essais monotones à dix teneurs en eau, il est possible de déterminer les paramètres de CZM pour toutes les valeurs de MC ( $5\% < MC < 30\%$ ) (Fig. 4) en faisant l'hypothèse simplificatrice de linéarité de l'évolution des paramètres entre les deux teneurs en eau les plus proches connues. L'algorithme programmé dans le code de calcul par éléments finis est présenté sur la figure 9.



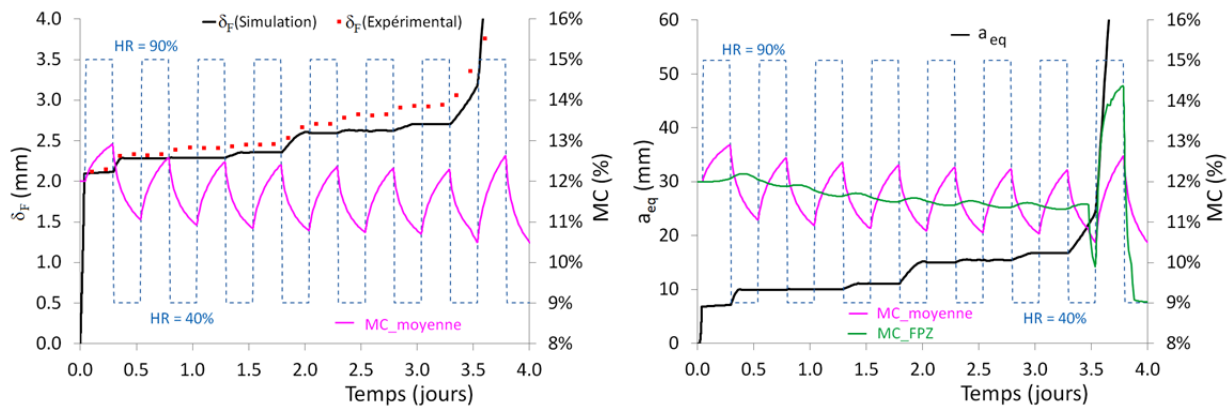
**Figure 9.** Algorithme de la modélisation de la propagation de la fissure sous la variation d'humidité

Afin de comparer résultats des simulations avec les data expérimentaux sous HR variables, les éprouvettes mTDCB souissent à une charge de 85%  $F_{max}$  sont modélisées sous des cycles d'humidification/séchage (Figure 10). L'évolution du déplacement numérique  $\delta_F$  est comparable aux résultats expérimentaux (figure 11a). Pour chaque cycle d'humidification/séchage, le déplacement  $\delta_F$  a tendance à augmenter lors de la phase de séchage (il s'agit du développement de l'énergie à dissiper dans la FPZ, la propagation de la fissure entraine l'augmentation des déplacements, et l'effet hygro-verrou du comportement mécanosorptif); pour la phase d'humidification, le déplacement ne change pas ou diminue légèrement (c'est-à-dire que l'énergie dans la FPZ a tendance à rester stable voire diminuer et la fissure ne se développe pas).



**Figure 10.** Distribution de la teneur en eau et la contrainte obtenue au 5ème jour.

Basée sur la fonction de complaisance, la longueur de la fissure équivalente  $a_{eq}$  est estimée par une méthode de dichotomie et tracée sur la figure 11b. Au début de la phase de séchage, la longueur de la fissure  $a_{eq}$  et le déplacement  $\delta_F$  augmentent et puis lors de la phase d'humidification, ils se stabilisent ou se referment. Les évolutions de la teneur en eau moyenne dans l'éprouvette ( $MC_{moyenne}$ ) et de celle au fond de la fissure ( $MC_{FPZ}$ ) sont également présentées dans la figure 11b. A l'instant  $t = 3.5$  jours (Fig. 11b), la propagation devient instable et entraine la rupture immédiate de l'éprouvette car la vitesse de propagation est infiniment grande. Le temps à rupture correspondant à 85%  $F_{max}$  est déterminé lors de l'apparition de la rupture instable.



**Figure 11** Evolutions du déplacement, de la longueur de la fissure et de la teneur en eau en fonction du temps

## 5. Conclusion

Dans ce travail, les essais de rupture en mode I sont réalisés sur l'éprouvette mTDCB sous différentes teneurs en eau constantes. Les résistances à la propagation et les paramètres de CZM dépendent de la teneur en eau. En fonction de la teneur en eau, la résistance au plateau et l'ouverture critique sont linéairement croissantes; mais, la résistance à la traction et le ratio de la répartition d'énergies cohésives sont décroissantes.

Un nouveau modèle qui traduit l'influence de la teneur en eau sur la zone cohésive est proposé et implanté dans le code de calcul par éléments finis. Basées sur ce modèle, des modélisations de la propagation de la fissure sous des variations de l'humidité sont effectuées en utilisant un comportement mécanosorptif afin de prédire le temps à rupture. Nos résultats numériques sont comparés avec les résultats expérimentaux qui montrent que : lors de la phase de séchage, la fissure a tendance à se propager; et pour la phase d'humidification, la fissure ne se développe pas ou se referme.

En perspective, en prenant en compte du comportement mécanosorptif viscoélastique du bois, notre méthodologie proposée sera utilisée pour prédire le temps à rupture des éléments de structures en bois sous des conditions environnementales simulées à partir d'un modèle développé à l'I2M / GCE.

## 6. 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.

## 7. Bibliographie

- [AGO 01] Agoua E, Zohoun S., Perre P., A double climatic chamber used to measure the diffusion coefficient of water in wood unsteady-state conditions: determination of the best fitting method by numerical simulation. *Int J Heat Mass Transf* 44:3731–3744, 2001.
- [BAZ 98] BAZANT ZP., PLANAS J., *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. CRC Press, 1998.
- [CHA 10] CHAPLAIN M., VALENTIN G., Effects of relative humidity conditions on crack propagation in timber: experiments and modelling. *World Conf. Timber Eng.* pp 1–8, 2010.
- [DUB 12] DUBOIS F., HUSSON J-M., SAUVAT N., MANFOUMBI N., Modeling of the viscoelastic mechano-sorptive behavior in wood. *Mech Time-Dependent Mater* 16:439–460. doi: 10.1007/s11043-012-9171-3, 2012.
- [GUI 87] GUITARD D., *Le bois, matériau d'ingénierie, chapitre III: Comportement mécanique du bois*, 1987.
- [MER 06] MERAKEB S., *Modélisation des structures en bois en environnement variable*. Thèse, Université de Limoges, 2006.
- [MOR 10] MOREL S., LESPINE C., COUREAU J.L., Planas J., Dourado N. (2010), Bilinear softening parameters and equivalent LEFM R-curve in quasi-brittle failure, *International Journal of Solids and Structures* 47 (2010) 837–850.