

Variation d'humidité dans les assemblages de structure bois : modèle numérique pour l'actualisation des propriétés mécaniques du bois

Vahid ABBASI, Nicolas SAUVAT, Frédéric DUBOIS

Laboratoire 3MSGC, Centre Universitaire d'Egletons, Université de Limoges,
Boulevard Jacques Derche, 19300 Egletons, France
Nicolas.sauvat@unilim.fr

RESUME. Le comportement des assemblages de type tige dans les structures bois est dépendant de la portance locale du bois, capacité du matériau à reprendre les efforts de pression diamétrale. Comme toutes les propriétés mécaniques du bois, la portance locale est dépendante de la teneur en eau qui modifie les résistances, les rigidités, mais également l'équilibre global à rupture. Dans ce papier, le comportement local est modélisé par méthode aux éléments finis incrémentale non linéaire. La non linéarité vient géométriquement des grandes déformations et matériellement du comportement élastique non linéaire. Dans le cadre des grands déplacements une méthode de Lagrange actualisée est utilisée. Le bois est modélisé comme un matériau orthotrope. En service, le comportement de ce matériau peut être assouplissant ou rigidifiant. La procédure de calcul incrémental présentée utilise un modèle de Hooke dans le cas d'un comportement assouplissant et un modèle de Bazant dans le cas rigidifiant. Dans cette approche 2D, le comportement de la broche est modélisé par un matériau infiniment rigide. Le contact entre la broche et le bois est modélisé par une méthode de non-pénétration, le frottement entre la broche et la tige étant géré par un modèle de Coulomb.

ABSTRACT. The behavior of bolted joints in wood structures is dependent of dowel-bearing strength, capacity to support cylindrical pressure, Like other mechanical properties of wood, it is dependent on MC (Moisture Content) which modifies strengths, stiffness and rupture global equilibrium. In this paper, local joint behavior is modeled by an incremental non-linear finite element method. Non linearity concerns geometrically (large displacements) and materially elastic nonlinear behavior. For large displacement, an update LaGrange method is used. Wood is modeled by an orthotropic material. Used in external structures, wood displays either a softening behavior or an hardening behavior. The presented incremental procedure use Hook's model for softening behavior and Bazant's model for hardening. In this 2D simulation, behavior of bolt is modeled like a rigid material. The contact between bolt and wood is modeled by a non-penetration method. On the other hand friction between bolt and wood is considered by a simple coulomb model.

MOTS-CLÉS : effet de l'humidité, méthode incrémentale, analyse par éléments finis, assemblages bois.

KEYWORDS : moisture effect, Incremental method, finite element analysis, bolted timber joints.

1. INTRODUCTION

Les applications récentes dans des infrastructures de Génie Civil, au travers des ponts et passerelles notamment, posent de manière plus pointue le problème du comportement du bois dans des environnements à humidité variable. La perturbation du comportement mécanique du bois par l'humidité, les phénomènes de fluage, de mécanosorption et les risques de fissuration ainsi engendrés sont encore mal maîtrisés. Ces connaissances sont nécessaires aux Maîtres d'Ouvrages de leur constructions bois pour les guider dans leurs choix de conception et de maintenance.

Fluage, mécanosorption et fissuration sont des phénomènes souvent étudiés, avec quelques applications dans le cas des assemblages bois. L'étude des variations des propriétés mécaniques dues à l'humidité, très peu abordée par l'expérimentation, ne l'est pas, à l'heure actuelle, par la simulation. Cet article présente donc une nouvelle démarche en vue de la simulation de ce phénomène.

Le domaine d'étude est dans un premier temps, limité au comportement des structures en service. La structure subit une histoire de chargement mécanique variable qui peut être grandement perturbée par l'histoire hydrique. Ce phénomène supplémentaire va essentiellement entraîner des déformations

parasites. Le travail présenté ici a pour objectif final l'étude des assemblages de type tige (boulons, broches, pointes) dont le comportement est défini par un équilibre entre la portance locale du bois et la plastification des organes métalliques tout en considérant la variation de l'humidité sur les propriétés mécaniques de bois dans la rigidité des assemblage en service.

2. ETAT DE L'ART

Sous un chargement mécanique, lorsque le bois est soumis à une variation hydrique, les contraintes internes se relaxent et sa déformation différée s'accélère. Cela montre qu'il existe un couplage entre la contrainte mécanique et la variation de la teneur en eau du bois (Navi et Heger, 2005).

2.1. VARIATION DES PROPRIETES MECANQUES DU BOIS EN FONCTION DE L'HUMIDITE

De nombreuses études ont porté sur les effets de l'humidité sur le bois. Green et Kretschmann (Green et al., 1994) ont proposé une revue bibliographique, sur la plupart des propriétés du bois à différents taux d'humidité, complétée par une campagne expérimentale sur des pins du sud (*Pinus echinata* or *P.taeda*) sans défaut. Cette synthèse porte sur la résistance en traction, en compression figure 1-A, flexion, en cisaillement, le module d'élasticité et la résistance en rupture en Mode I et II. Il en résulte que dans le domaine de service des structures porteuses (entre le point de saturation et 7%-8% de la teneur en eau), toutes les propriétés du bois progressent quand le bois sèche. Mais une structure en extérieure dont l'humidité du bois oscille entre 12 et 20 % voit certaines de ces propriétés varier de presque 50 %. La Figure 2-B illustre toutefois que la dispersion des résultats, même dans une teneur en eau donnée, est considérable.

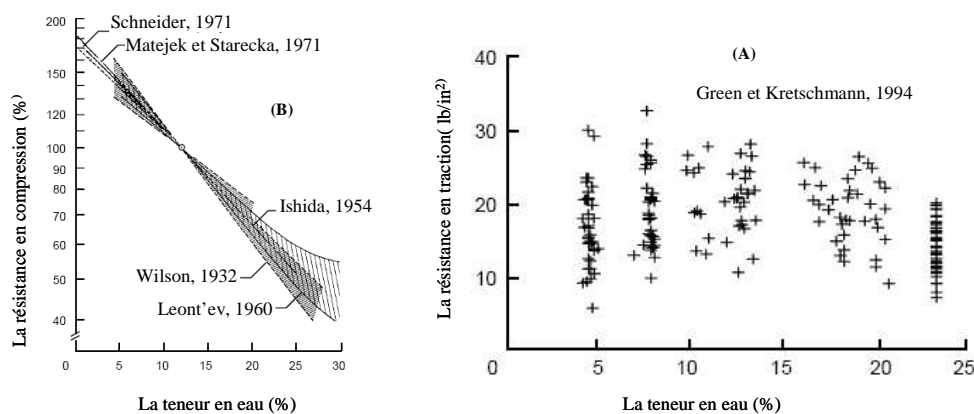


Figure 1 :A)La résistance en compression en fonction de la teneur en eau B)La résistance en traction en fonction de la teneur en eau

2.2. MODELISATION DU BOIS

Pour la modélisation de comportement du bois, deux approches différentes existent dans la littérature. Dans la première approche, le comportement macroscopique du bois se modélise par des cellules qui forment sa microstructure. La microstructure d'un tel matériau se modélise sous la forme d'un réseau de cellules hexagonales. Ce type de modélisation numérique a été étudié par de nombreux chercheurs comme (Astley et al, 1997) et (Alart et al, 2004). La deuxième approche considère le bois comme un matériau orthotrope et homogène dans un milieu continu sans considération de la complexité de la micro structure du bois (Bouchair, 1995), (William et al. 1999).

2.3. MODELISATION DU COMPORTEMENT DES ASSEMBLAGES

Dans la littérature, la modélisation des assemblages (Figure 2-A) est abordée de deux manières différentes. La première est une approche en 3D (Moses et al., 2003). Ces modèles sont très coûteux numériquement et se limitent souvent à l'étude d'assemblages mono-boulonnés.

Les approches 2D diffèrent suivant le plan d'étude. Le premier consiste à modéliser les tranches perpendiculaires à l'axe de la tige (figure 2-B). Ce plan permet une modélisation la plus réaliste possible mais complexe de comportement du bois (Daudeville et al., 1999). Ce genre de modèle permet aussi la prise en compte du contact entre la tige et le bois. Le deuxième plan 2D est parallèle de la tige. Le comportement du bois est considéré comme un ressort bi, voir tri linéaire, dont le calage est limité et complexe. Dans ce type de modèle, le comportement de la tige est bien considéré. Par exemple, elle sera modélisée comme une barre déformable avec un comportement élastoplastique (figure 2-C) (Sawataet al., M., 2003). Dans ce type de modèle, en raison de la simulation du bois comme un matériau fictif représentant du comportement local du bois, la prise en compte de l'humidité est difficile.

La plupart des études ont pour objectif une prévision de la résistance à rupture à humidité constante. La modélisation de raideur des assemblages montre toutefois qu'elle n'est pas directement, (ou seulement) dépendante des propriétés mécaniques du bois (Bocquet, 1997) (William et al. 1999).

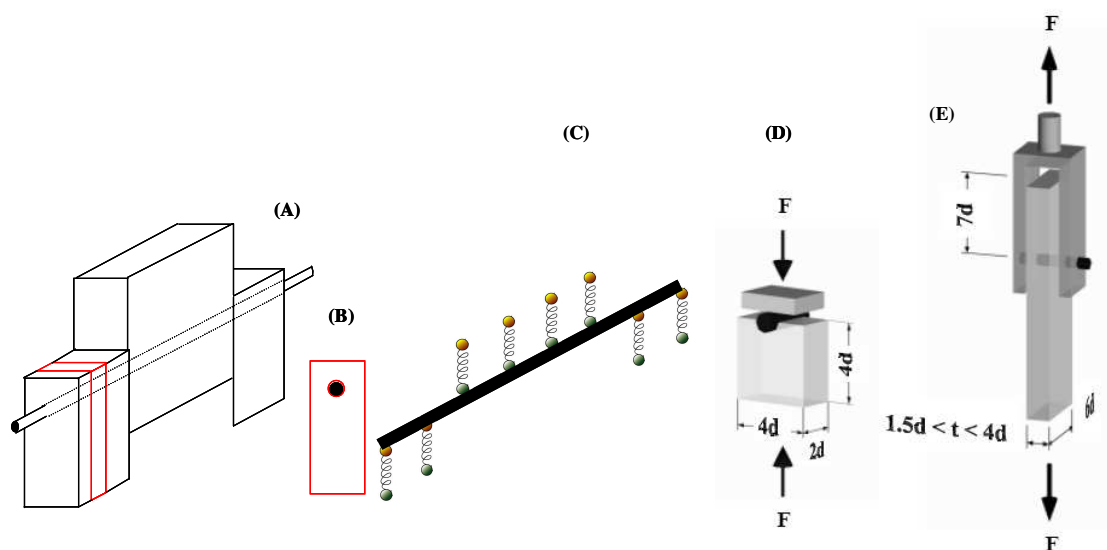


Figure 2 :A)assemblage B)plan perpendiculaire à la tige C)plan 2D parallèle à la tige D) Essai d'enfoncement ASTM E) Essai d'enfoncement CEN

2.4. ESSAIS D'ENFONCEMENT

2.4.1. Principe de l'essai

L'essai d'enfoncement permet de déterminer la limite de contrainte du bois sous un perçage chargé en compression par une tige. La procédure américaine ASTM D5767 est réalisée avec des éprouvettes dont la géométrie est illustrée en figure 2-D. En Europe, les éprouvettes se font avec un trou complet comme expliqué dans la norme EN 383 (figure 2-E). L'essai CEN est plus proche du comportement réel mais les flexions parasites de la tige doivent toutefois être limitées. L'essai ASTM est cependant le plus utilisé par sa simplicité.

Afin d'illustrer de manière concrète le comportement du bois en présence d'un cylindre métallique une essai de l'enfoncement est effectué. Si la forme de l'éprouvette choisie dans cette étude suit la norme ASTM la procédure de chargement suit la norme EN 383. Une tige de 8 mm de diamètre est insérée dans une éprouvette de sapin de dimension 48*56*32 mm. Un perçage de 9 mm est pratiqué. Pour être le plus proche de la réalité des assemblage, aucun soin particulier n'est apporté aux deux surfaces. Le trou, perpendiculaire au fil du bois, est obtenu par perçage avec une mèche à bois. La mesure de déplacement est réalisée par un capteur LVDT installé sur le mors supérieur de la machine et mesurant le déplacement de la partie supérieure de bois, le plus loin possible de la zone de contact, zone non influencée par le chargement (Figure 3 B). La procédure de chargement est la suivante : un chargement jusque 40% de la chargement maximale estimé à la vitesse de 20 N/s, puis une décharge jusque 10% de la charge maximum estimée avec la même vitesse. Un chargement par déplacement imposé de 0.35 mm/min est ensuite appliqué jusqu'à rupture. L'évolution de l'effort en fonction de l'enfoncement de la tige est illustré Figure 3 A.

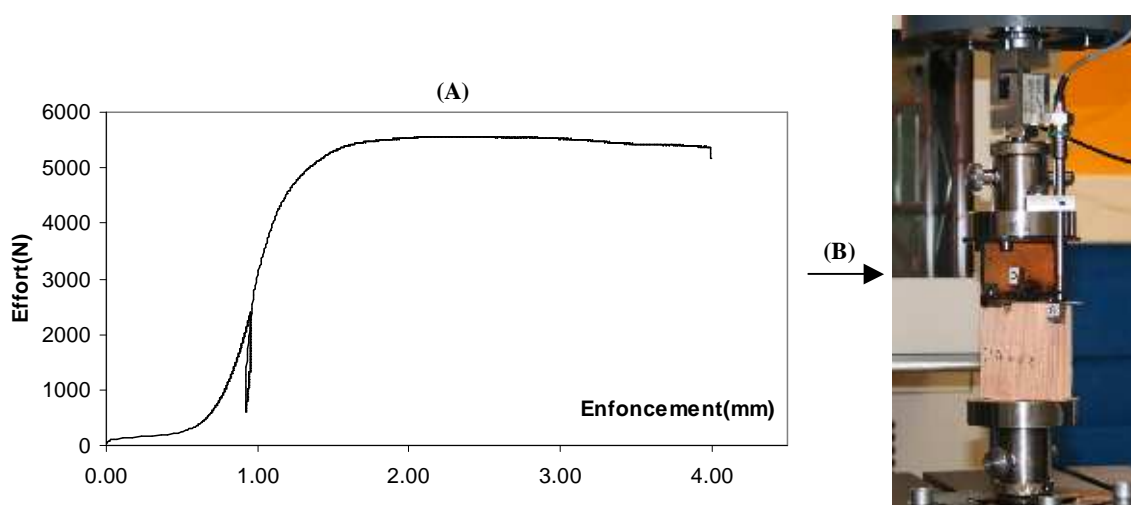


Figure 3 :A)Résultat d'essai enfoncement B)Dis positif de l'essai

Il est constaté que l'effort ne croît pas de manière linéaire avec l'enfoncement. Ce phénomène illustre une augmentation de rigidité qui résulte de l'accroissement de la surface de contact entre les deux corps. La fin de cette phase de mise en contact s'observe par l'atteinte d'une rigidité qui devient constante. Si à ce stade de chargement, une décharge est appliquée pour revenir à un effort de réaction quasi nul, la tige ne revient pas dans sa position initiale. Des déformations irréversibles sont déjà produites par matage du bois entraînant une augmentation de surface de contact, et une densification du matériau.

La poursuite de l'expérience montre que la rigidité de décharge est suivie pour le rechargement jusqu'à l'atteinte du niveau maximum précédemment atteint. A partir de ce point, l'enfoncement retrouve sa rigidité initiale. Cette raideur caractérise la portance sous assembleur. La phase quasi linéaire se termine quand des fissurations entraînent la ruine de l'éprouvette.

2.4.2. Effet de l'humidité

L'effet de l'humidité sur la résistance à l'enfoncement a été étudié par (Rammer et al., 2001) sur 5 niveaux d'humidité (4%, 6%, 12%, 19%, et vert). La résistance à l'enfoncement de pins sud-américains est déterminée à partir d'une tige de diamètre 12.7 mm. Les 5 groupes d'éprouvettes (approximativement 40 par groupe) sont placés dans une chambre climatique jusqu'à l'obtention de

l'équilibre hydrique. Les résultats en termes de résistance à l'enfoncement en fonction de la teneur en eau sont montrés dans la figure 3. Ce résultat illustre, premièrement, la diminution de la résistance à l'enfoncement et, deuxièmement, la dispersion des résultats pour des teneurs en eau et des masses volumiques bien maîtrisée.

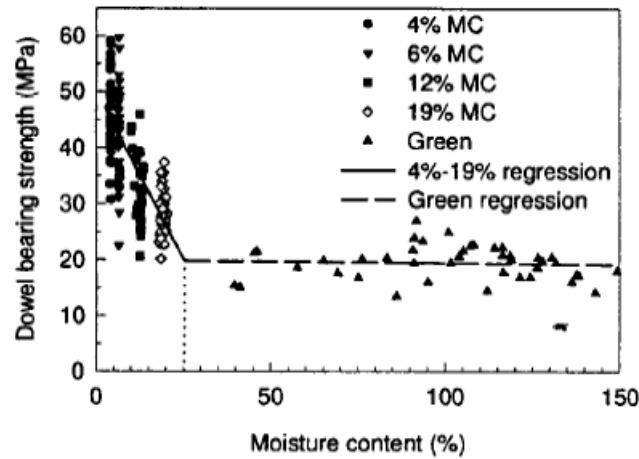


Figure 3 : Résistance à l'enfoncement en fonction de la teneur en eau (Rammer et al, 2001)

3. APPROCHE PROPOSEE

3.1. OBJECTIFS ET LIMITES DU MODELE PROPOSE

L'essai d'enfoncement est choisi pour la modélisation car les phénomènes locaux apparaissant dans cette zone pilotent le comportement global de l'assemblage. Le plan d'étude choisi est perpendiculaire à la tige. Pour une structure en extérieur, les variations d'humidités sont une alternance de séchages et d'humidifications, entraînant deux comportements mécaniques distincts : rigidification et assouplissement. A notre connaissance, il n'existe pas des modèles qui puissent modéliser ce comportement du bois. La méthode proposée est donc une méthode incrémentale et actualisable pour chaque niveau de contrainte. Les prises en compte de l'orthotropie de bois, ainsi que celle du frottement bois/tige sont indispensables. Le contact entre la tige et le bois est géré par la méthode de Coulomb.

Cependant, l'essai enfoncement n'est pas complètement modélisé. Une étape majeure reste à étudier : l'interaction des contraintes pour les grandes déformations sous l'effet de l'humidité.

3.2. PRINCIPE D'ACTUALISATION DE PROPRIETES MECANIQUES

Le bois est modélisé comme un matériau orthotrope. Le modèle est capable de modéliser deux comportements bien différents. Le premier est le comportement assouplissant du bois. Il apparaît lorsque le chargement croît et lorsque le bois s'humidifie. Le comportement assouplissant s'exprime par la loi de Hooke usuelle:

$$\varepsilon_e + \varepsilon_{an} = \frac{\sigma}{b\theta k_{ref}} \quad (1)$$

où, ε_e est la déformation élastique, ε_{an} la déformation anélastique et σ est le tenseur de contrainte. k_{ref} représente la rigidité déterminée pour un état de référence correspondant aux conditions environnementales durant l'identification des propriétés du matériau et $b\theta$ introduit une variable interne liée aux variation d'humidité.

Le comportement rigidifiant a été largement étudié par Bazant (Bazant et al., 1999) et a été employé dans l'étude mécanique de la maturation du béton à jeune âge. La rigidification est due soit à une décharge, soit à un séchage du bois. Le comportement rigidifiant du bois s'exprime par la loi de Bazant suivante :

$$\dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_{an} = \frac{\dot{\sigma}}{b\theta k_{ref}} \quad (2)$$

Dans le cadre d'une modélisation mécanique dans un plan perpendiculaire à la tige, le comportement de la tige est considéré comme celui d'un matériau rigide. De fait que la modélisation des assemblages est fait dans le plan perpendiculaire à la tige.

Le contact est traité comme un problème de conditions aux limites non linéaire. En début d'essai (la mise en contact de la tige), la surface de contact et les forces transmises à travers cette surface changent. La contrainte normale est transmise dans la direction normale. L'existence de frottement fait que la contrainte de cisaillement est elle aussi transmise. Une méthode de non pénétration est choisie pour gérer cette non linéarité. La réalisation de ce type de contact nécessite de travailler sous l'hypothèse des grandes déformations. Le frottement est pris en compte par une loi de comportement simple de Coulomb.

3.3. IMPLANTATION NUMERIQUE

Pour l'implantation de l'approche proposée, la méthode aux éléments finis a été choisie. Elle permet de résoudre différents problèmes, notamment, les variables locales σ - ϵ , l'orthotropie et les problèmes de contact. L'organigramme d'implantation du modèle analytique dans CAST3M est illustré dans la figure 4.

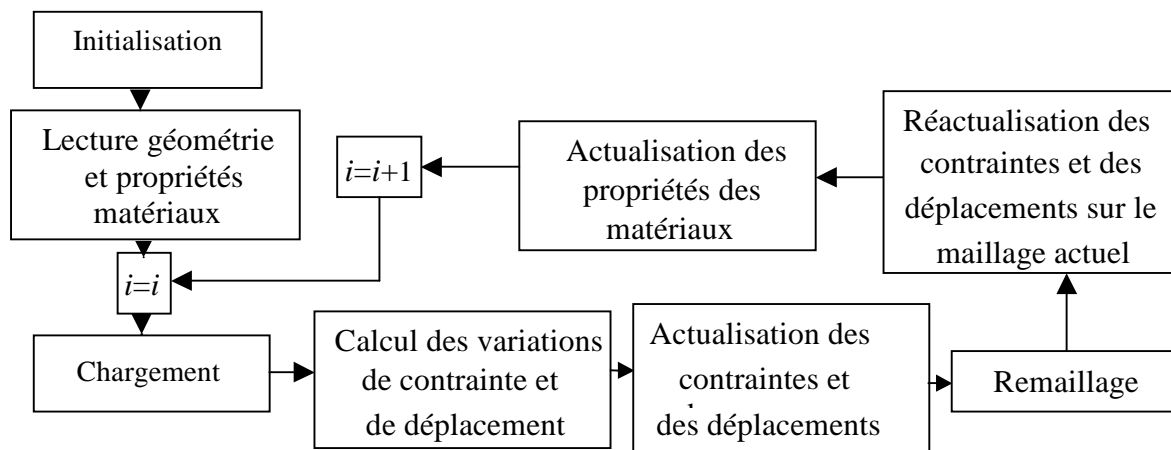


Figure 4. Organigramme de calcul incrémental

Le protocole numérique commence par la définition du maillage. Le maillage est fait avec des éléments quadratiques à quatre points de Gauss. Les conditions au contact sont définies par deux segments avec un point en commun. Le segment représentant la tige est bloqué pour empêcher tout mouvement. Ce blocage assure la rigidité de la tige. Les champs de contrainte sont connus par un calcul préliminaire. Les propriétés du bois considéré comme un matériau orthotrope sont alors définies. Les caractéristiques du matériau sont utilisées comme un état de référence. Toute cette démarche est appelée : initialisation.

Le calcul pas à pas permet des actualisations du matériau, du maillage, des conditions aux limites et du contact. Dans chaque pas de calcul, les contraintes de la loi de Hooke sont actualisées avec l'équation (3) :

$$\dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_{an} = \frac{\dot{\sigma}}{b\theta k_{ref}} - \frac{\dot{b}\theta\sigma}{b\theta k_{ref}} \quad (3)$$

Les contraintes de la loi de Bazant seront également déterminées en utilisant l'équation (2).

Le maillage est ensuite actualisé par l'intermédiaire des déplacements calculé au pas considéré. Cependant, les contraintes actualisées ne sont plus sur le même support géométrique (déformation du maillage en grand déformation). Les contraintes seront donc réactualisées par une transformation Piola-Kirchhoff de seconde espèce en un champ de contraintes de Cauchy. Le matériau, dépendant de l'état de contrainte, est lui aussi actualisé.

3.4. RESULTATS ACTUELS

La figure 5 présente deux exemples d'application du modèle. A la figure 5-B) sont comparés un essai de compression sur une éprouvette de Douglas de dimension 30×30×90 mm. La raideur obtenue expérimentalement est inférieure à la valeur attendue avec un module E_L de 12000 MPa. Cependant le déplacement mesuré est le déplacement global. Il est donc sensible aux conditions limites de l'essai de compression, très délicates à mettre en œuvre. La figure 5-A) présente les résultats d'essais d'enfoncement pour deux niveaux d'humidité : 13% et 26%, comparés au résultat d'une simulation de l'essai en considérant de bois comme un matériau orthotrope élastique linéaire ($E_L = 1.5E10 \text{ N/m}^2$, $E_R = E_T = G = 8E8 \text{ N/m}^2$, $\nu_{LT} = \nu_{LR} = 0.4$, $\nu_{TR} = 0.04$). Dans cette modélisation, le contact et le frottement ($\mu = 0.4$) sont pris en compte. Expérimentalement, l'influence de l'humidité sur la raideur et la résistance à l'enfoncement est très nette. La comparaison expérimentation/simulation met en évidence les difficultés de modélisation (mesure LVDT, condition de contact) de l'état mécanique localisé sous la tige.

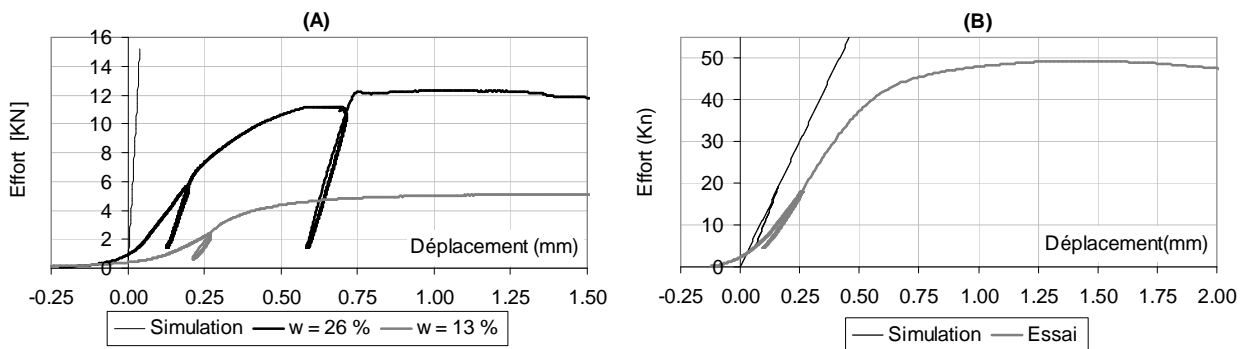


Figure 5 : A) Essai d'enfoncement : courbes expérimentales pour deux niveaux d'humidité ,et simulation avec un matériau orthotrope B) Essai de compression : expérimentation et simulation avec précharge.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le principe d'actualisation des propriétés mécaniques présenté dans cet article permet de modéliser tous les cas de chargement mécanique ou hydrique des structures bois en service : rigidification pour les effets de densification sous la tige et de séchage, assouplissement sous un accroissement de charge ou d'humidité. Les critères d'évolutions des propriétés mécaniques en fonction des états mécaniques et

hydriques atteints doivent toutefois être précisés. Seule la campagne expérimentale actuellement en cours permettra de maîtriser les variations de rigidité d'enfoncement dues à l'humidité, et de caler ainsi les critères manquants.

5. BIBLIOGRAPHIE

- R.J Astley, J.J Harrington, K.A Stol, Mechanical modelling of wood microstructure, an engineering approach, *IPENZ Transactions*, 24(1), 21-29,1997.
- P. Alart, M. Barboteu, J. Gril, A numerical modelling of non linear 2D-frictional multicontact problems: application to post-buckling in cellular media'' *Computational Mechanics* 34, 298–309,2004.
- Bocquet, J., F., Modélisation des déformations locales du bois dans les assemblages brouchés et boulonnés, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II, France, 1993.
- Bouchair, A., Modélisation non linéaire du comportement local des assemblage bois, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II, France, 1993.
- Bazant Z. P., Huet C., Thermodynamic functions for ageing viscoelasticity : integral form without internal variables, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, pp. 3993-4016, 1999.
- Daudeville, L., Davenne, L., Yasumura, M., Prediction of the load carrying capacity of bolted timber joints, *Wood Science and Technology* 33, 15-29, 1999.
- Green, D.W., Kretschmann, D. E., Moisture content and the properties of clear Southern Pine, Res. Pap. FPL-RP-531.Madison, WI:U.S. Department of agriculture, Forest Service, Products Laboratory, 1994.
- Ishida, S., the effect temperature on the strength of wood. *Hokkaido University Research Bull., College Experimental Forestry*, 17(1):1-14, 1954, [In Japanese]
- Kretschmann, D.E., Green, D. W., Moisture Content–Specific Gravity Relationships for Clear Southern Pine, *Proceedings of the international wood engineering conference*, New Orleans, LA. Baton Rouge, LA. Louisiana, State University, Vol. 2: 536-542,1996
- Leont'ev, N.L., The strength of wood at varying moisture content.*Derev.Prom.*4:14-15, 1960, [In Russian]
- Matejek, R.S, Starecka, D., Influence of the freezing process with wood on ist compressive strength, *Holztechnologie*.12(3): 144-146, 1971, [In German].
- Moses, D.M., Prion, H.G.L., A three-dimensional model for bolted connections in wood, *Can. J. Civ. Eng./Rev. can. génie civ.* 30(3): 555-567, 2003
- Navi, P., Heger, F., Comportement thermo-hydromécanique du bois, application techniques et dans structures, *Presses polytechniques et universitaires romandes*, CH-1015 Lausanne, 2005.
- Ostman, B.A.L., Wood tensile strength at temperatures and moisture contents simulating fire conditions. *Woos and Science Technology*. 19:103-116, 1985.
- Schniewind, A.P., Investigations on influence of heat treatments with a range of temperatures from 100 to 200 C on the modulus of elasticity, maximum crushing strength, and impact work of pine sapwood and beechwood. *Holz Roh- Werkst.* 29(11):431-440, 1971, [In German].
- Rammer, D.R., Winistorfer, S.G., Effect of Moisture Content on Dowel-Bearing Strength, *Wood and Fiber Science*, pp. 126-139, 2001.
- Sawata, K., Yasumura, M., Estimation of yield and ultimate strengths of bolted timber joints by nonlinear analysis and yield theory, *J Wood Sci* ,49:383–391, 2003.
- Wilson, T.R.C., 1932, Strength-moisture relations for wood. *Tech.Bull.*282.Washinton, DC: U.S. Department of agriculture.