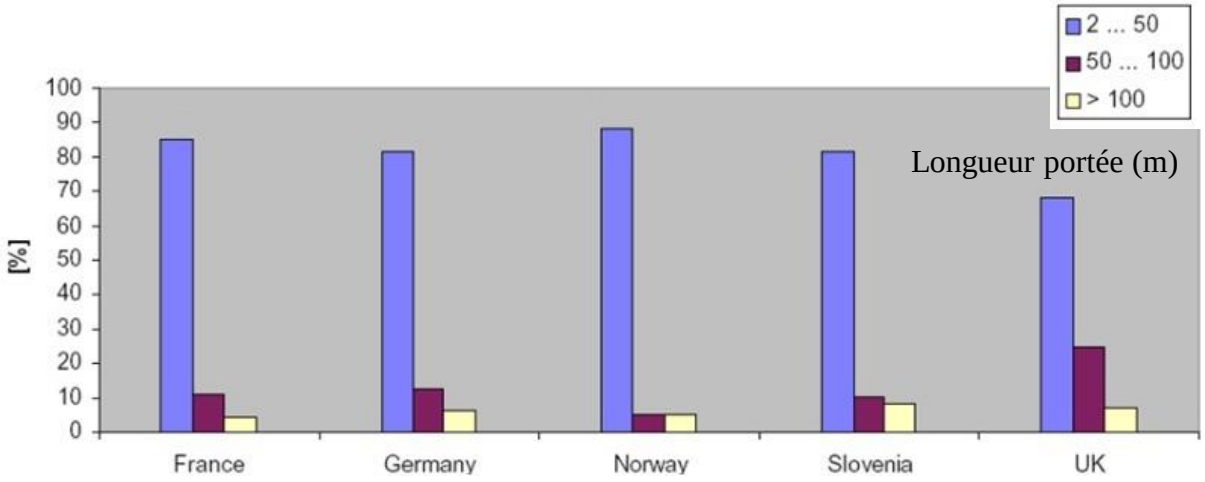
Evaluation de la santé structurale des ouvrages d'art en bois

Présentation : Marianne PERRIN – Institut Clément Ader

Contexte

- Pourquoi construire en bois ?
  - Pour répondre aux nouveaux challenges imposés par le « développement durable » *[Sétra 2006]*
  - Les politiques publiques exigent une quantité minimale de bois en construction *[Loi sur l'air 1996]*
  - Une forte proportion (> 80%) des ponts de longueur < 50 m *[Le Roy 2013]*



Répartition dimensionnelle des ouvrages d'art
[Le Roy 2013]

Contexte

- Développement de structures multi-matériaux à base de bois
  - Structures bois/béton
  - Renforcement composites

Ponts mixtes bois/béton

1. Pont de Cognin
2. Pont du Vallon du Riou de Lantosque
3. Pont de Lure

- Développement de matériaux bois « techniques » : le lamellé-collé

Bois lamellé-collé

Contexte

- Avantages :
  - Résistance mécanique plus élevée (purge des singularités ou renforcement par autre matériaux)
  - Possibilité de construire des ouvrages d'art de grandes portées

Passerelle piétonne

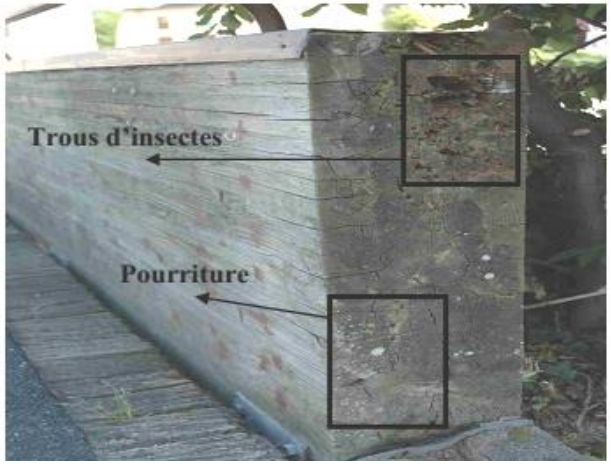
Passerelle de Vaires-sur-Marne (en LC) portée 50m (mise en place en 24h)
[CNDB, 2005]

Pont routier

Pont de merle : en LC ; portée 57m
[Barbier et Joineau 2006]

Pathologies des OA en bois

- Problème de durabilité sur les OA bois :
  - Pathologies liées aux cycles humidité/séchage
  - Méthodes de contrôle actuelles : contrôle visuel
    - Durée de vie d'un ouvrage bois 10-20 ans (ouvrage en béton 100 ans !!!)
    - On change l'ouvrage quand il est trop tard pour envisager d'autres solutions
- Solution ?
  - Transformer les structures bois en matériau « intelligent » par intégration et développement des systèmes de diagnostic



Attaque d'insectes et attaque fongique
[Doignon et al. 2009]

Délaminations, fissures et fentes
[Doignon et al. 2009]

Problématiques

Besoins : **méthodes de suivi de l'humidité**
Objectif : permettre l'identification des caractéristiques résiduelles de l'ouvrage
Action: Thèse de Hang LI soutenue en novembre 2017

Besoins : **méthode de diagnostic en temps réel**
Objectif : permettre la détection précoce des endommagements
Action : Thèse d'Imen Yahyaoui soutenue en décembre 2017

Optimisation des opérations de maintenance

Utilisation sécurisée du bois en structure

Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures

Cofinancement : 70% région Midi-Pyrénées - 30% CG Hautes Pyrénées - le Grand Tarbes – l'IUT de Tarbes

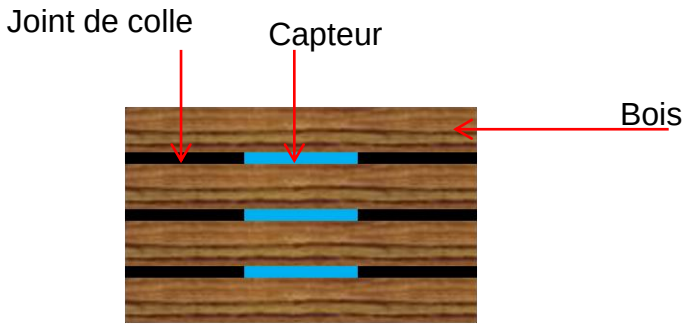
Doctorant : Hang LI

Directeur de thèse : Vincent GIBIAT

Encadrants : Marianne PERRIN, Florent EYMA, Xavier JACOB

Objectifs de travail

- Objectifs scientifiques
  - Développer des outils de diagnostics intégrés
  - Proposer un suivi en continu de l'état de santé structurale des ouvrages en bois et une évaluation de leur durée de vie résiduelle



- Objectifs industriels
  - Proposer une gamme de matériaux de très haute technologie et à bas coût pour la création d'ouvrages innovants

Proposer des solutions technologiques innovantes

Intégration du Lamellé-collé dans de nouveaux secteurs d'activités

Accès à de nouvelles parts de marché

Démarche scientifique

- 1ère partie
  - **Objectif** : intégration des systèmes de suivi embarqués pour le contrôle de l'humidité des bois lamellé-collés
  - **Verrou technologique** : choix des capteurs, intégration pendant la fabrication des poutres, impact sur la résistance mécanique

- 2ème partie
  - **Objectif** : prédire la durée de vie résiduelle des ouvrages et optimiser les opérations de maintenance
  - **Verrou scientifique** : influence des cycles humidité/séchage sur la durée de vie résiduelle => création d'une base de données « durabilité »

Démarche scientifique

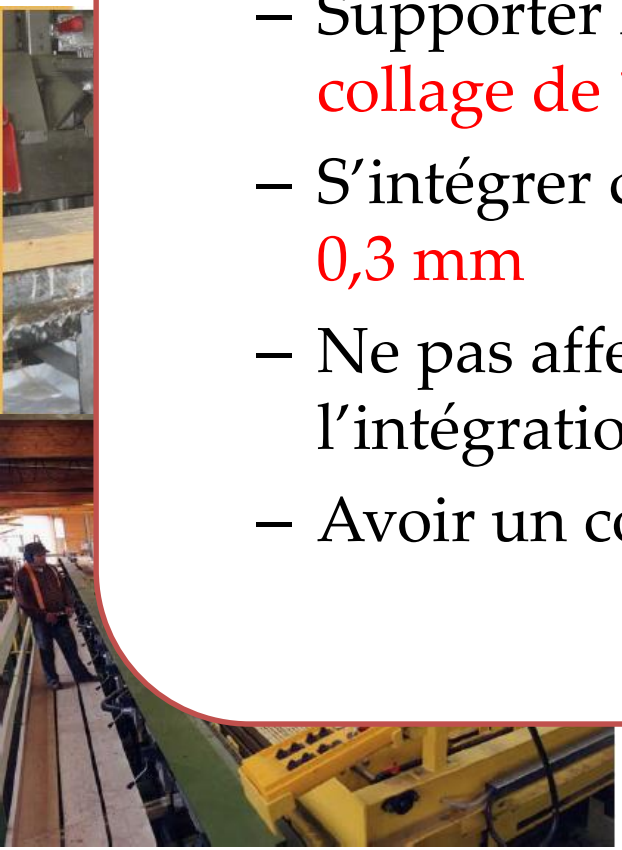
- 1ère partie
  - **Objectif** : intégration des systèmes de suivi embarqués pour le contrôle de l'humidité des bois lamellé-collés
  - **Verrou technologique** : choix des capteurs, intégration pendant la fabrication des poutres, impact sur la résistance mécanique

- 2ème partie
  - **Objectif** : prédire la durée de vie résiduelle des ouvrages et optimiser les opérations de maintenance
  - **Verrou scientifique** : influence des cycles humidité/séchage sur la durée de vie résiduelle => création d'une base de données « durabilité »

Fabrication du lamellé collé

Séchage du bois

- Cahier des charges : choix des capteurs
  - Supporter le processus de fabrication (pression de collage de 10 bar)
  - S'intégrer dans l'épaisseur du joint de colle, soit ≈ 0,3 mm
  - Ne pas affecter la résistance du joint après l'intégration
  - Avoir un coût modéré



Mesure de l'humidité

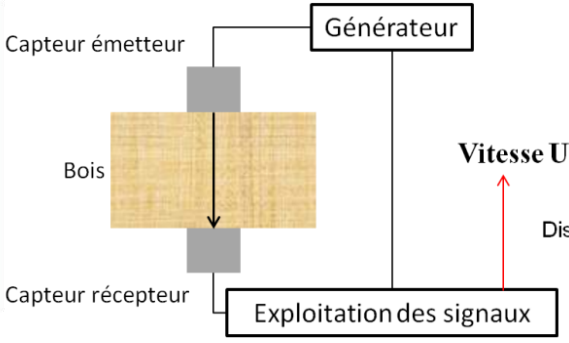
- Méthodes destructives
  - Dessiccation, Hygrométrique, Méthodes chimiques
- Méthodes non destructives
  - Radar, Micro-ondes, Thermographie Infrarouge, Radiographie, Résonance Magnétique Nucléaire, Méthodes électriques, Méthodes ultrasonores

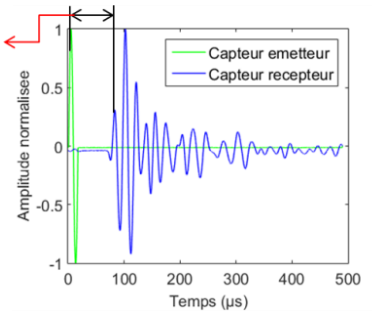
Méthodes électriques

Humidimètre résistif

Humidimètre capacitif

Méthodes ultrasonores





Programme expérimental

1ère étape: Identification des types de capteurs à tester

2ème étape: Développement de l'instrumentation associée

3ème étape: Vérification de la tenue en pression des capteurs

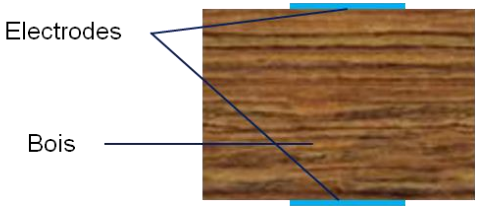
4ème étape: Identification de la réponse des capteurs aux changements d'humidité dans le bois

Programme expérimental

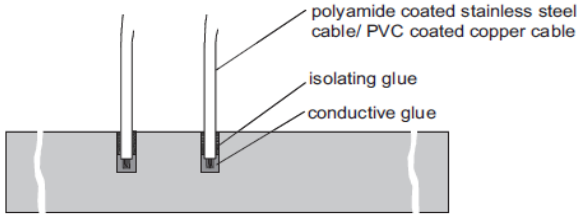
1ère étape: Identification des types de capteurs à tester

Mesures électriques : 2 types de capteurs, 4 configurations identifiées

Capteurs « film »

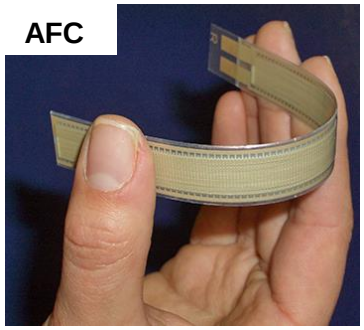


Capteurs « pointe »

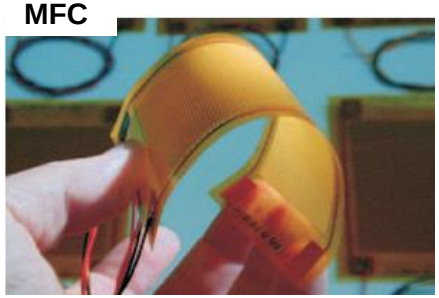


Mesures ultrasonores : 3 types de capteurs, 2 configurations identifiées

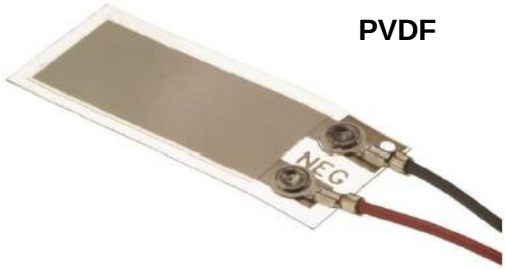
AFC



MFC

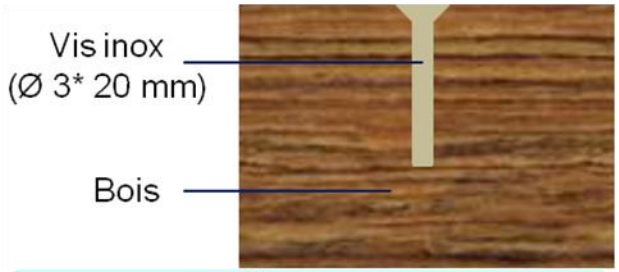


PVDF

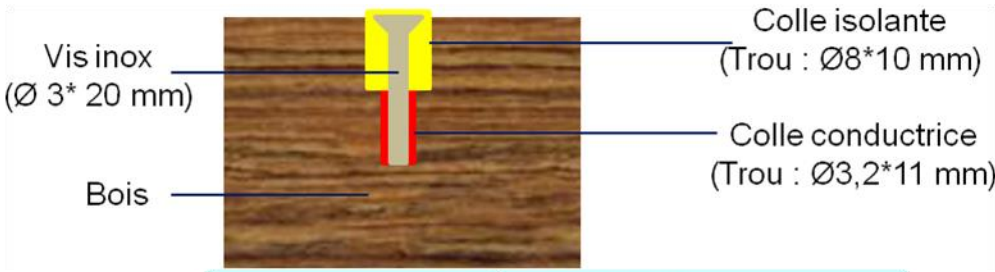


Mesures électriques

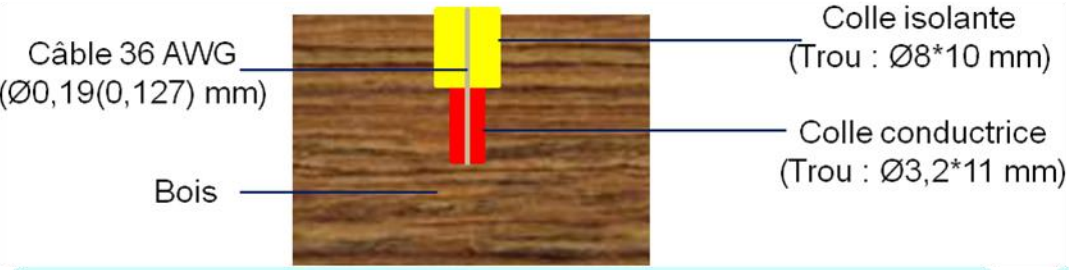
- Identification des 4 configurations de mesure
  - 3 configurations avec des électrodes « pointe »
  - 1 configuration avec des électrodes de « surface »



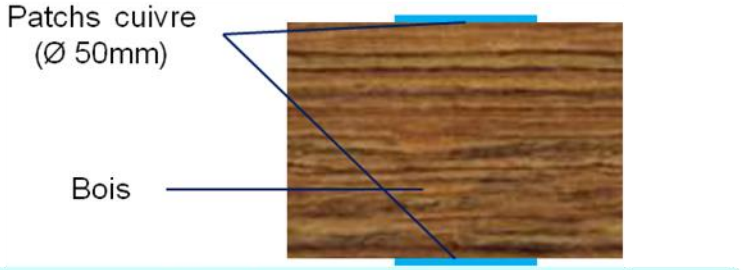
Configuration 1:
Vis inox filetée vissée dans le bois



Configuration 2 :
Vis inox filetée placée dans le trou percé



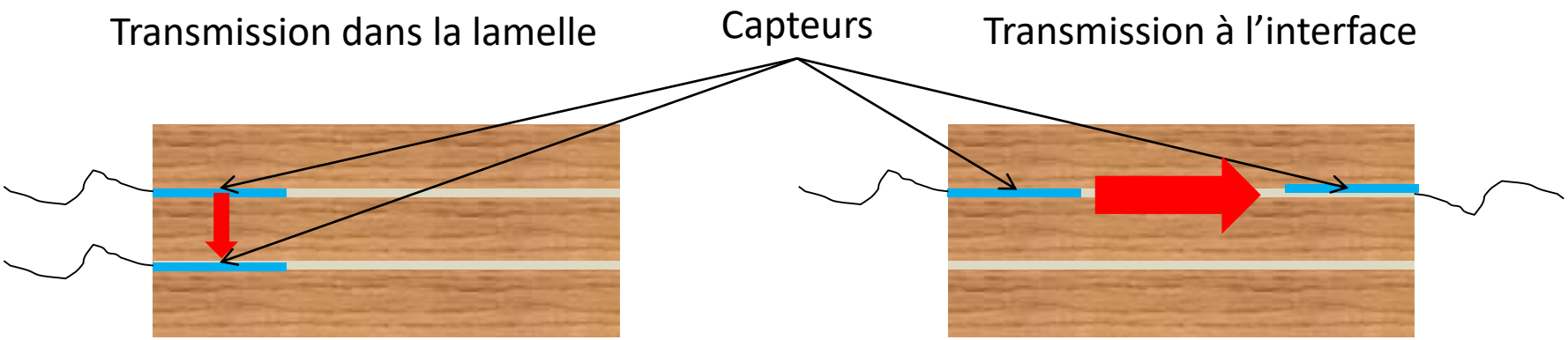
Configuration 3 :
Câble électrique (dénudé au bout) plié dans le trou percé



Configuration 4 :
Patchs cuivre collés de chaque côté d'une lamelle

Mesures ultrasonores

- Identification des 2 configurations de mesure
  - Transmission dans la lamelle
    - Analyse des ondes se propageant à travers de l'épaisseur d'une lamelle
  - Transmission à l'interface
    - Analyse des ondes se propageant le long des fibres du bois



Programme expérimental

2ème étape: Développement de l'instrumentation associée

Développement d'un boitier pour la mesure de résistivité
en collaboration avec le Département GEII

Programme expérimental

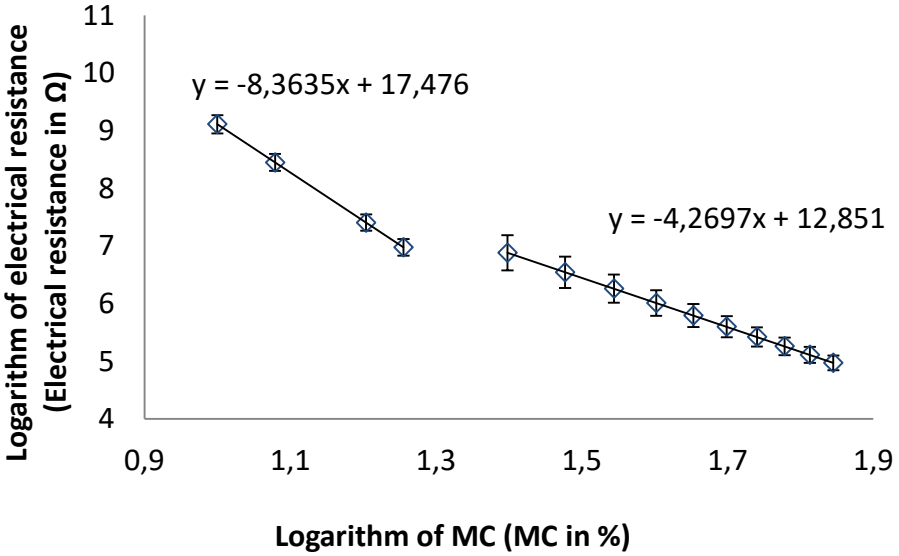
3ème étape: Vérification de la tenue en pression des capteurs

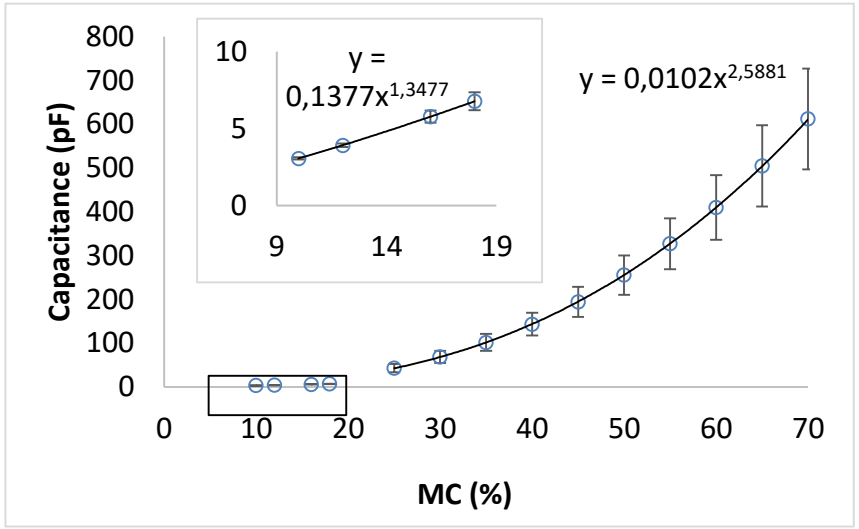
4ème étape: Identification de la réponse des capteurs aux changements d'humidité dans le bois

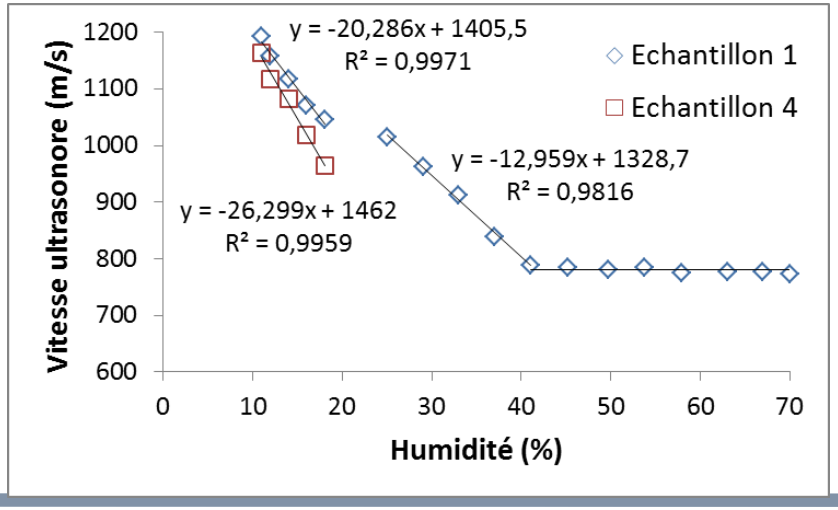
Mesures effectuées pour 13 humidités différentes

12%, 16, 20% (Conditionnement dans l'enceinte climatique)
25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70% (Immersion dans l'eau)

Résultats


y = -8,3635x + 17,476
y = -4,2697x + 12,851
Logarithm of electrical resistance (Electrical resistance in Ω)
Logarithm of MC (MC in %)


y = 0,0102x^2,5881
y = 0,1377x^1,3477
Capacitance (pF)
MC (%)


y = -20,286x + 1405,5
R² = 0,9971
y = -12,959x + 1328,7
R² = 0,9816
y = -26,299x + 1462
R² = 0,9959
Echantillon 1
Echantillon 4
Vitesse ultrasonore (m/s)
Humidité (%)

Conclusions

- 1ère partie
  - **Objectif** : intégration des systèmes de suivi embarqués pour le contrôle de l'humidité des bois lamellé-collés
  - **Verrou technologique** : choix des capteurs, intégration pendant la fabrication des poutres, impact sur la résistance mécanique

- 2ème partie
  - **Objectif** : prédire la durée de vie résiduelle des ouvrages et optimiser les opérations de maintenance
  - **Verrou scientifique** : influence des cycles humidité/séchage sur la durée de vie résiduelle => création d'une base de données « durabilité »

Perspectives et verrous

- Affiner les mesures d'humidité :
  - Influence des gradients d'humidité
  - Zone investiguée par le capteur
  - Impact des défauts du bois sur les mesures

- Impact de l'instrumentation sur la résistance mécanique?

- Développement de l'instrumentation spécifique aux ouvrages, Durabilité de l'instrumentation?

- Stratégies d'instrumentation des OA?

- Comment estimer la durabilité d'un OA en bois à partir d'un suivi d'humidité?
  - Thèse de Placide Uwizeyimana, démarrage novembre 2017.

Contribution au suivi par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois

financement : ED MEGEP

Doctorant : Imen YAHYAOUI

Directeur de thèse : XJ. GONG

Encadrant : Marianne PERRIN

Etude de l'impact de l'essence et de la sollicitation sur la réponse acoustique

contexte

• Développement important des structures en bois (Bâtiments, ouvrages d'art)
• Plusieurs lois encouragent l'intégration du matériau bois dans la construction
- Loi sur l'air (1996)
- Le protocole de Kyoto (1997)

Utilisation limitée du matériau bois seul dans les structures:
- Forte anisotropie, hétérogénéités
- Propriétés mécaniques limitées
- Sensibilité à la variation de l'H% et de la T°

Ouvrages d'art en bois

1 Pont de Crest
2 Passerelle de Preuilly

Développement des structures multi-matériaux à base de bois
• Structures originales et mécaniquement prometteuses
• Allègement des structures
•Propriétés mécaniques intéressantes

- Comportement mécanique de mieux en mieux connu
- Pas le cas pour l'endommagement qui mène à la rupture

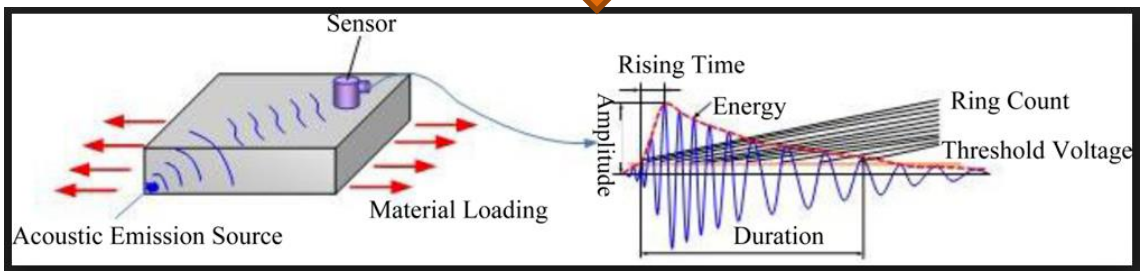
Ponts mixtes bois/béton

1 Pont de Cognin
2 Pont du Vallon du Riou de Lantosque
3 Pont de Lure

Intérêt d'utiliser une technique de CND permettant de prédire l'évolution de l'endommagement dans ces structures

Contexte

La technique de l'émission acoustique (EA) est une technique intéressante



Principe de l'émission acoustique (Gao et al. 2011)

Paramètres d'un signal d'EA (Gao et al. 2011)

- ✓ Suivi en temps réel de l'endommagement des structures
- ✓ Détermine de manière précoce les différents types d'endommagement
- ✓ Localise les sources acoustiques
- ✓ Identifie et caractérise les mécanismes d'endommagement
- ✓ Détermine la signature acoustique des différents mécanismes d'endommagement
- ✓ A déjà fait ses preuves sur des structures de génie civil (ponts en béton)

Ponts en béton suivi par EA (Golaski et al. 2002)

Contexte

- Structures multi-matériaux à base de bois sont composées de: bois+composite+ béton
- Pour réussir l'identification des mécanismes d'endommagement des structures mixtes, le suivi de chaque matériau isolé est primordial

Composite

(Benzeggagh et al. 1992, Kostopoulos et al. 2007, Godin et al. 2011, Huguet et al. 2012, Munoz 2015)

Béton

(Otsuka et Date 2000, Wu et al. 2001, Hadjab et al. 2004, Berbaoui 2010, Saliba 2012)

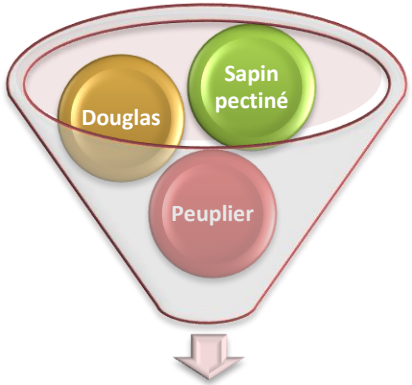
Tablier d'un pont mixte bois/béton/composite testé au LCPC (d'après Ben Mekki et al. 2007)

Bois

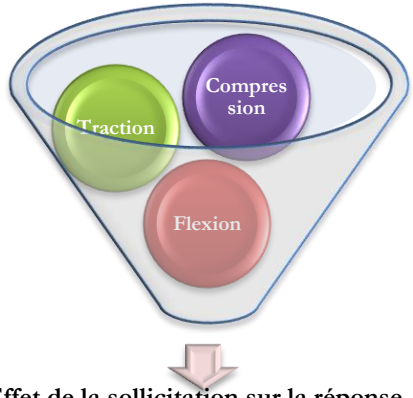
- Peu de travaux (généralement des anciens travaux)
- Une seule essence sollicitée pour un seul type de sollicitation
- L'analyse des signatures acoustiques corrélées aux mécanismes d'endommagement du matériau bois est peu étudiée (Baensch 2015, Lamy 2016, Diakhati et al. 2017)

Il est donc primordial de commencer par l'analyse du potentiel de la méthode de l'EA appliquée au matériau bois

Objectifs du travail



Effet de l'essence sur la réponse acoustique



Effet de la sollicitation sur la réponse acoustique

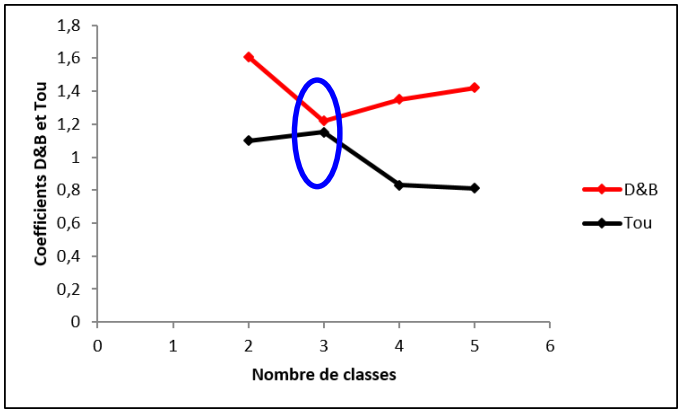
Pour chaque essence et chaque type d'essai

- Analyse de l'activité acoustique
- Classement des données acoustiques
- Identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement
- Détermination des scénarios d'endommagement

Pour chaque type d'essai

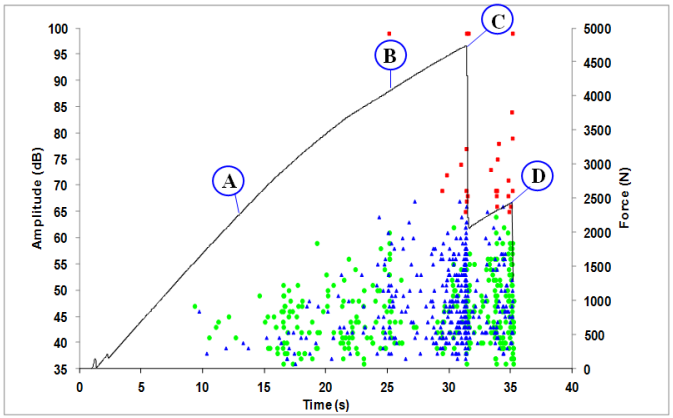
- Comparaison entre les réponses acoustiques des trois essences
- Comparaison entre les réponses acoustiques des trois essais

Essai de traction sur Douglas



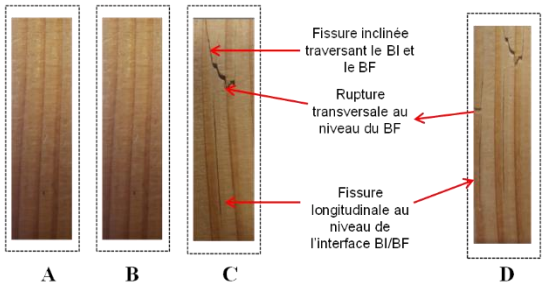
Variation des critères de validation

- 3 classes de signaux

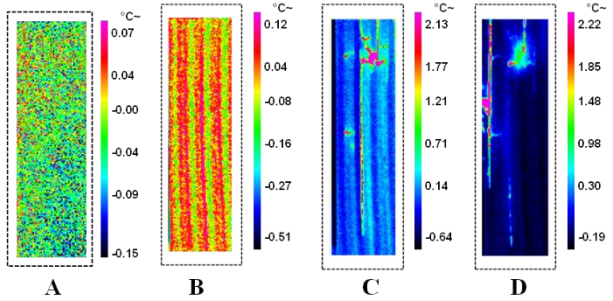


Résultats de classification

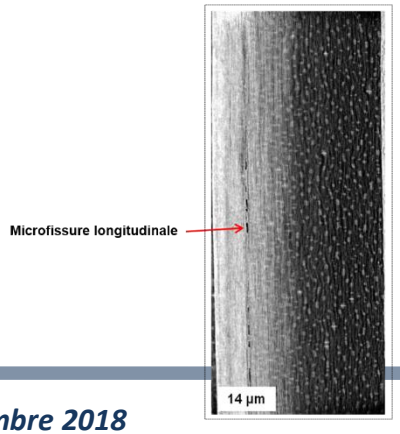
Méthodes utilisées pour labelliser les classes



Images aux points particuliers extraites de vidéo

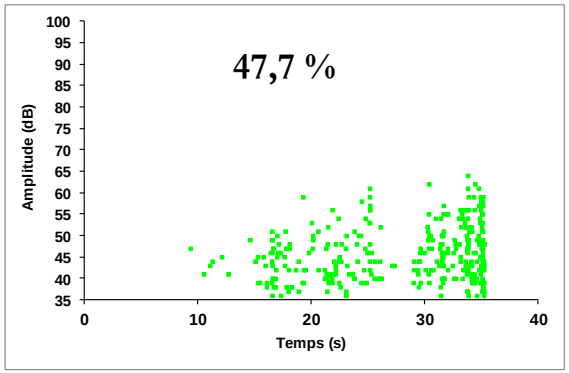


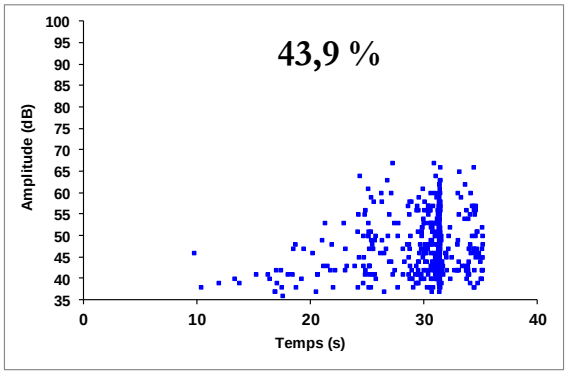
Thermogrammes aux points particuliers extraits du film thermique

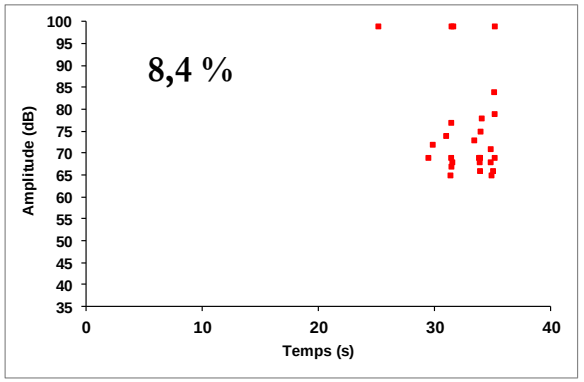


Tomographe obtenu après un arrêt au point B (Scan local avec une résolution de 14µm)

Essai de traction sur Douglas







Classe verte: microfissuration longitudinale

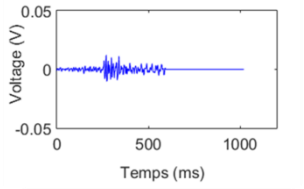
- temps de montée moyen
- courte durée
- faible amplitude
- faible énergie
- pic fréquentiel plus faible (<50 kHz)

Classe bleue: microfissuration transversale

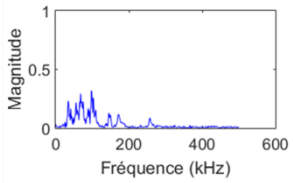
- temps de montée faible
- courte durée
- faible amplitude
- faible énergie
- pic fréquentiel plus élevé (>80 kHz)

Classe rouge: rupture de fibres

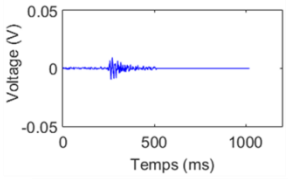
- temps de montée important
- longue durée
- haute amplitude
- forte énergie
- pic fréquentiel <50 kHz



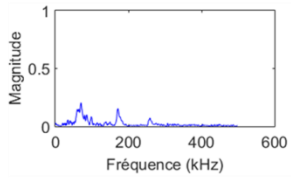
Forme d'onde



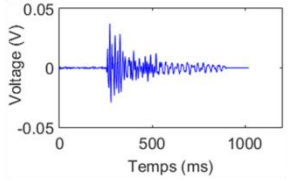
Transformée de Fourier



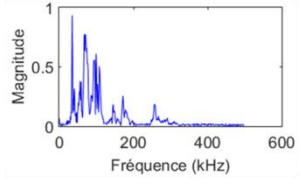
Forme d'onde



Transformée de Fourier

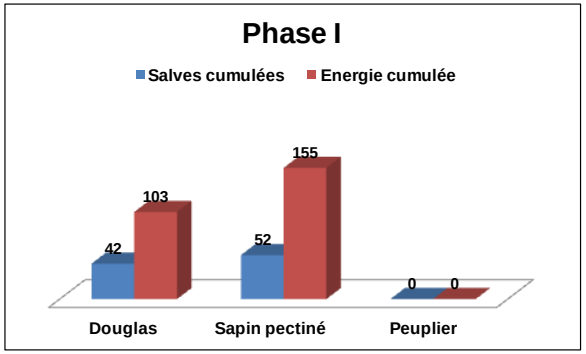


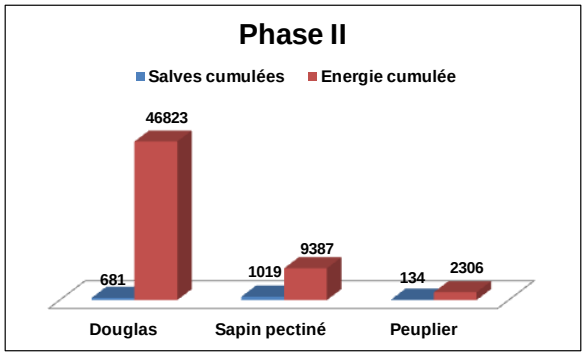
Forme d'onde

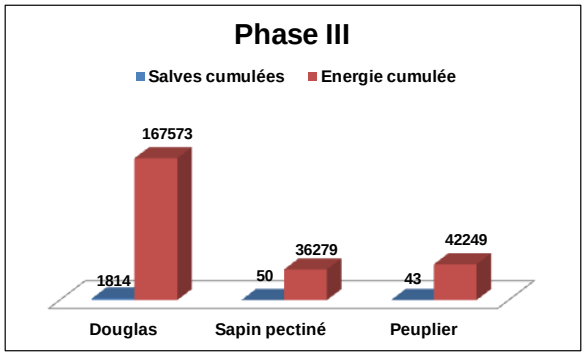


Transformée de Fourier

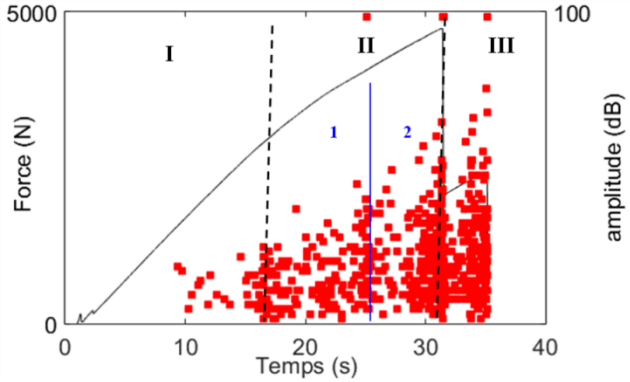
Comparaison entre les trois essences (essais de traction)







Douglas



- L'activité acoustique dépend de l'essence testée
- Les signaux générés par le Douglas dans les trois phases sont plus énergétiques que les signaux générés par les deux autres bois
- Le Douglas génère plus de signaux que le sapin pectiné et le peuplier respectivement

Impact de l'essence sur la réponse acoustique

Emissivité:
Douglas > Sapin pectiné > Peuplier

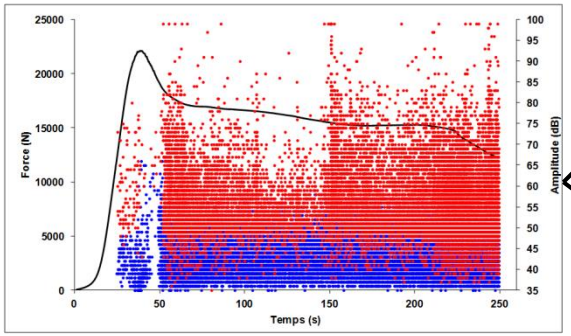
Mécanismes d'endommagement identifiés:
similaires pour les trois essences

La signature acoustique est différente d'un mécanisme à l'autre et d'une essence à l'autre

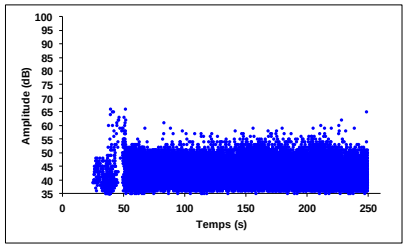
Signatures acoustiques de différents mécanismes:
proches pour les deux résineux

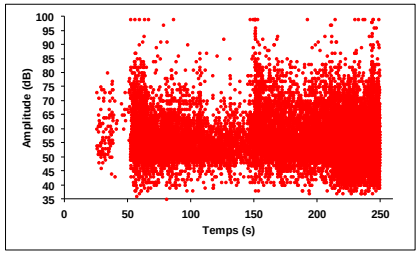
Essais de compression sur Douglas

Douglas



1er Classement





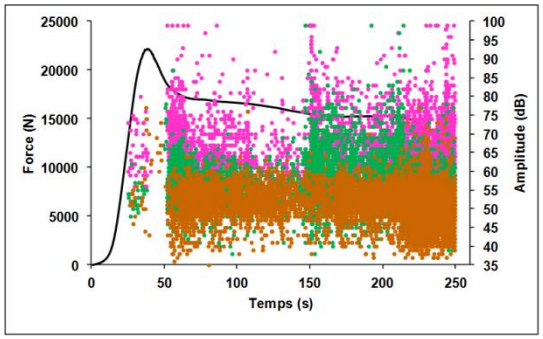
- Faible amplitude, faible énergie, durée moyenne
- Evolution importante et constante durant le développement de la bande de cisaillement

Glissement entre l'éprouvette et les plateaux de montage

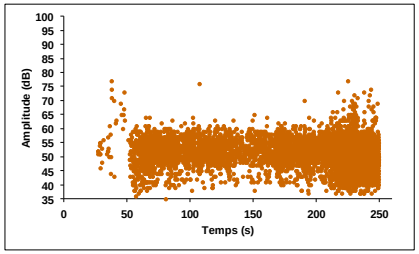
- Très forte énergie, amplitude moyenne, très longue durée

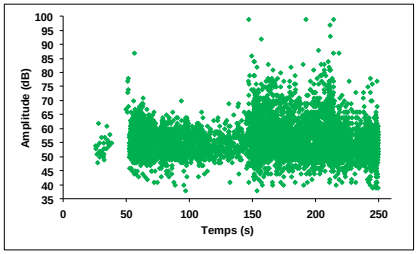
Ensemble des mécanismes d'endommagement

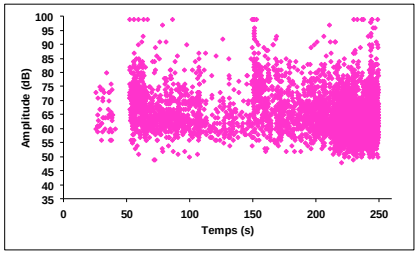
Reclassement dans la classe rouge



2ème Classement







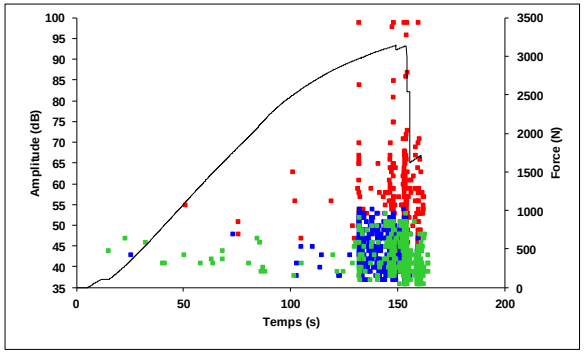
Microfissuration longitudinale

Microfissuration transversale

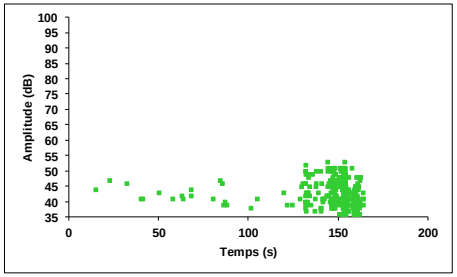
Rupture des fibres

Essais de flexion sur Douglas

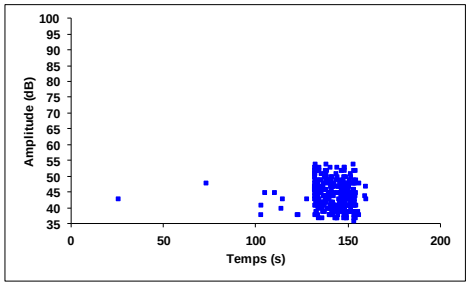
Douglas



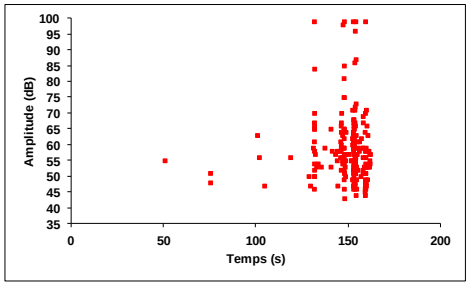
Résultat de classification



Microfissuration de type (TL)
- Face latérale de l'éprouvette

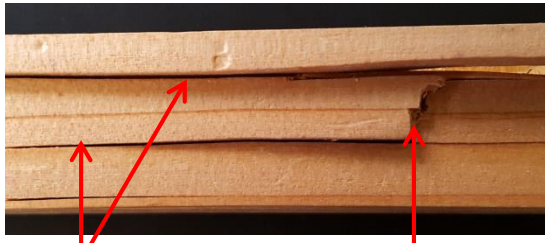


Microfissuration de type (RL)
- Interface BI/BF
- Face tendue



Rupture de fibres
- Microfissurations transversales de type (LT) et (LR)

Partie tendue



Fissure de type (RL)

Fissure de type (LR)

Face latérale

Fissure de type (TL)

Fissures de type (LT)

Impact de la sollicitation sur la réponse acoustique

Effet du type de sollicitation sur l'activité acoustique

• Emissivité des essences testées

En traction: Douglas > sapin pectiné> peuplier

En compression: Douglas> peuplier> sapin pectiné

En flexion: peuplier> Douglas> sapin pectiné

•Rupture des fibres en compression moins énergétique qu'en traction et en flexion

Conclusion, verrous et perspectives

- Impact de l'essence et du type de sollicitation sur la signature acoustique identifiée

- Classification des signaux basée sur des observations visuelles et thermiques réalisée :
  - Nécessité de développer des essais originaux couplés à d'autres méthodes de caractérisation pour valider et développer la base de données des signatures acoustiques
- Caractérisation des éléments d'influence des signatures acoustiques : propagation, défauts, géométries, types de sollicitation, structures anatomiques…

- Application aux ouvrages d'art :
  - Miniaturisation de l'instrumentation
  - Intégration de l'instrumentation
  - Identification de critères d'alarmes pertinents

Conclusion

Besoins : méthodes de suivi de l'humidité
Objectif : permettre l'identification des caractéristiques résiduelles de l'ouvrage
Résultats : développement de la méthode de suivi
Suite : Thèse P. Uwizeyimana

Besoins : méthode de diagnostic en temps réel
Objectif : permettre la détection précoce des endommagements
Résultats: Identification du potentiel de l'EA pour détecter et reconnaitre précocement les endommagements
Suite : Thèse CSC?

Optimisation des opérations de maintenance

Utilisation sécurisée du bois en structure