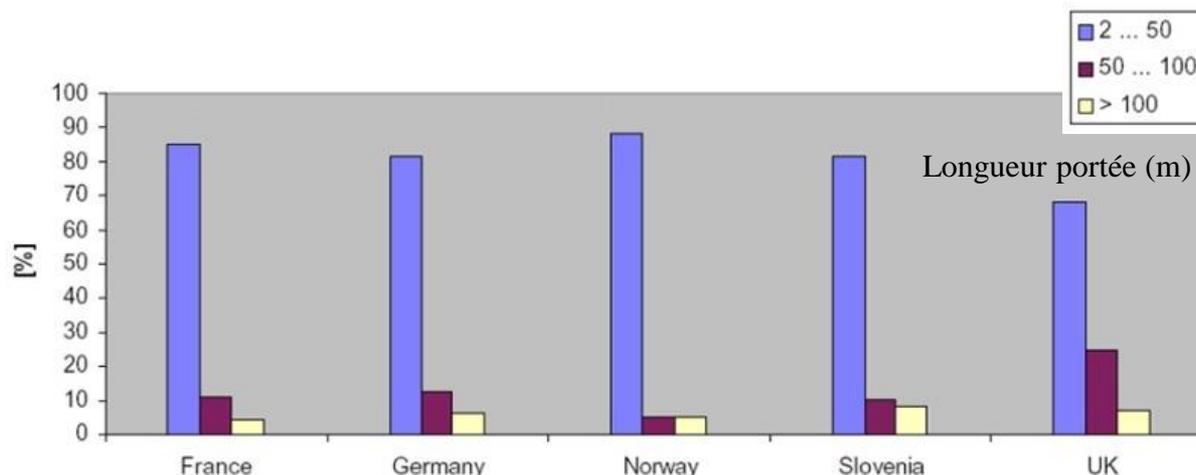


## Evaluation de la santé structurale des ouvrages d'art en bois

Présentation : Marianne PERRIN – Institut Clément Ader



- 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]

- 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**

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



## Passerelle piétonne

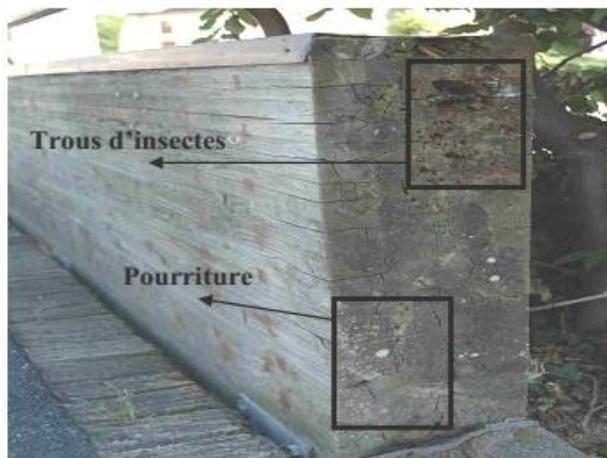
Passerelle de Vaires-sur-Marne (en **LC**) portée 50m  
(mise en place en 24h)  
[CNDB, 2005]



## Pont routier

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

- **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]

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

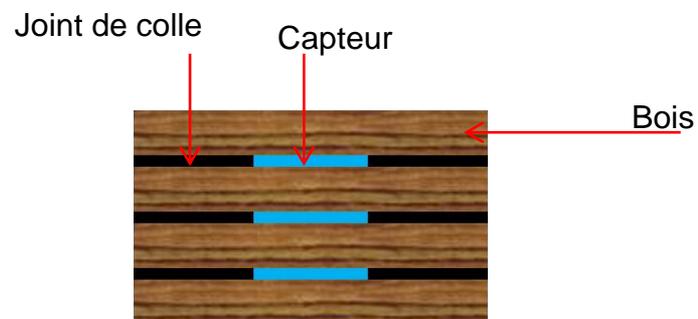
Doctorant : Hang LI

Directeur de thèse : Vincent GIBIAT

Encadrants : Marianne PERRIN, Florent EYMA, Xavier JACOB

- **Objectifs 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



- **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 »

- 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 »

## 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  $\approx 0,3 \text{ mm}$
  - Ne pas affecter la résistance du joint après l'intégration
  - Avoir un coût modéré



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

## Méthodes électriques

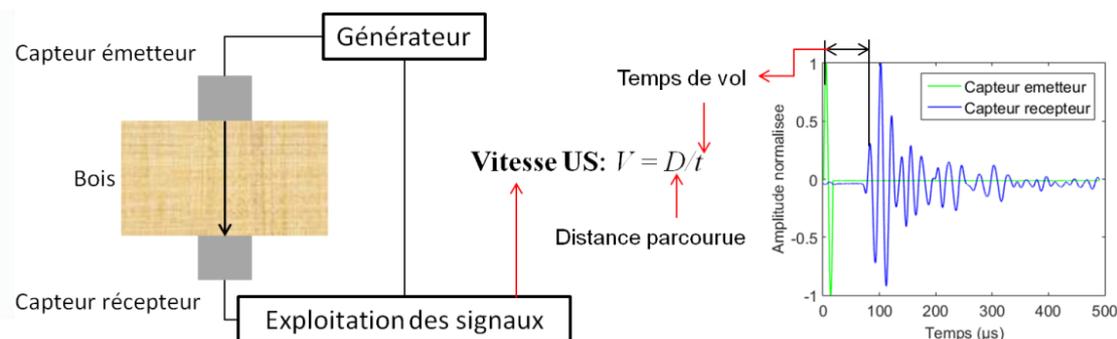


Humidimètre résistif



Humidimètre capacitif

## Méthodes ultrasonores



1<sup>ère</sup> étape: Identification des types de capteurs à tester



2<sup>ème</sup> étape: Développement de l'instrumentation associée



3<sup>ème</sup> étape: Vérification de la tenue en pression des capteurs

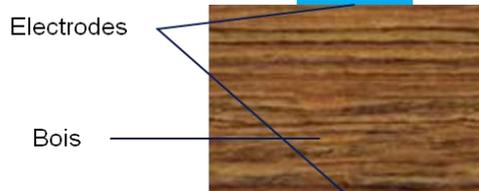


4<sup>ème</sup> étape: Identification de la réponse des capteurs aux changements d'humidité dans le bois

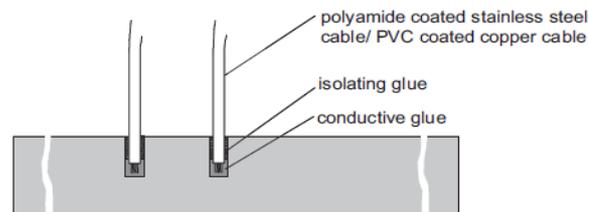
1<sup>ère</sup> étape: Identification des types de capteurs à tester

Mesures électriques : 2 types de capteurs, 4 configurations identifiées

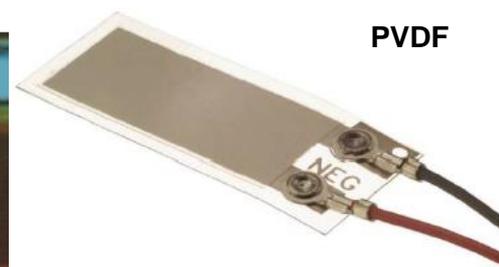
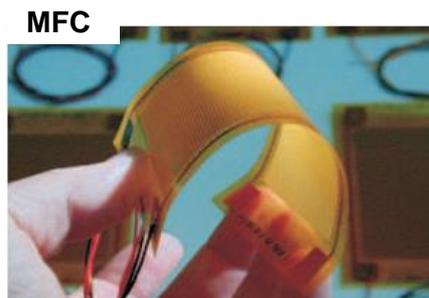
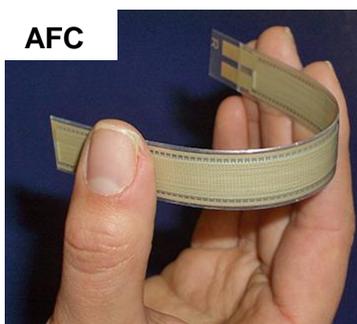
Capteurs « film »



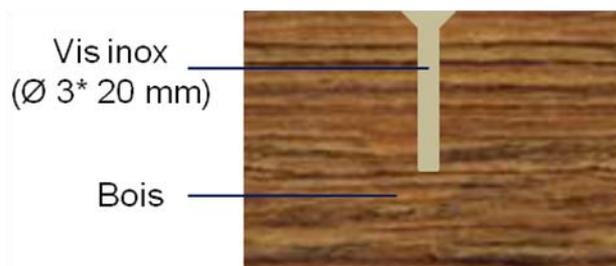
Capteurs « pointe »



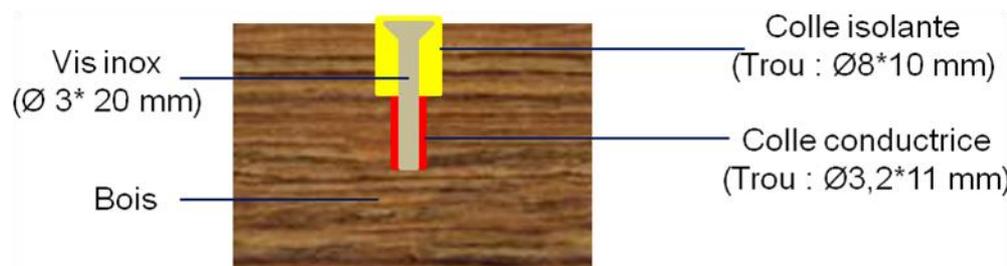
Mesures ultrasonores : 3 types de capteurs, 2 configurations identifiées



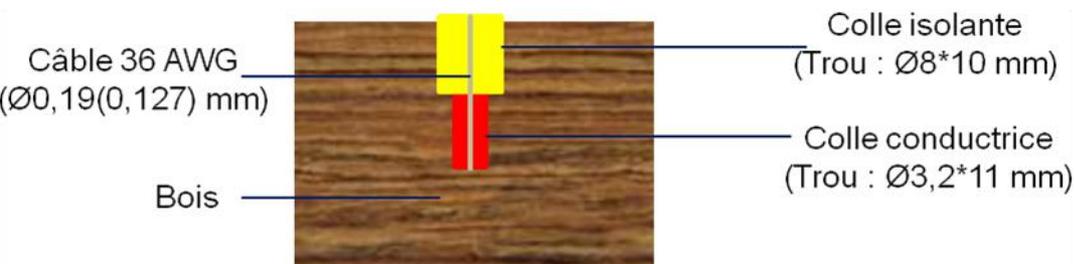
- Identification des 4 configurations de mesure
  - 3 configurations avec des électrodes « pointe »
  - 1 configuration avec des électrodes de « surface »



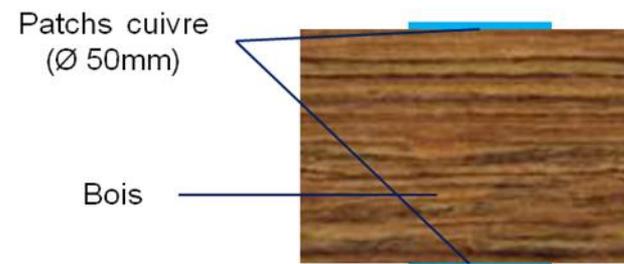
Configuration 1 :  
Vis inox fileté vissée dans le bois



Configuration 2 :  
Vis inox fileté placée dans le trou percé

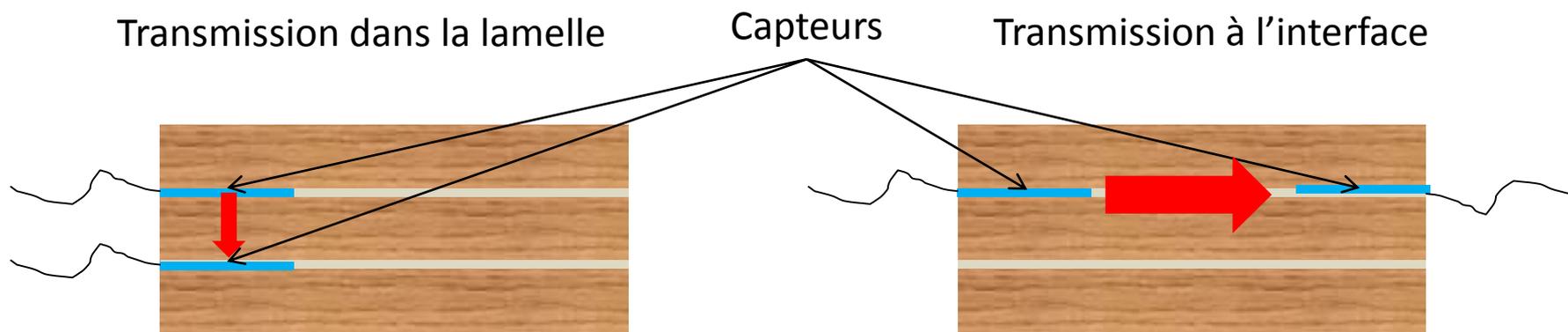


Configuration 3 :  
Câble électrique (dénudé au bout) plié dans le trou percé



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

- 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



2ème étape: Développement de l'instrumentation associée

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



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

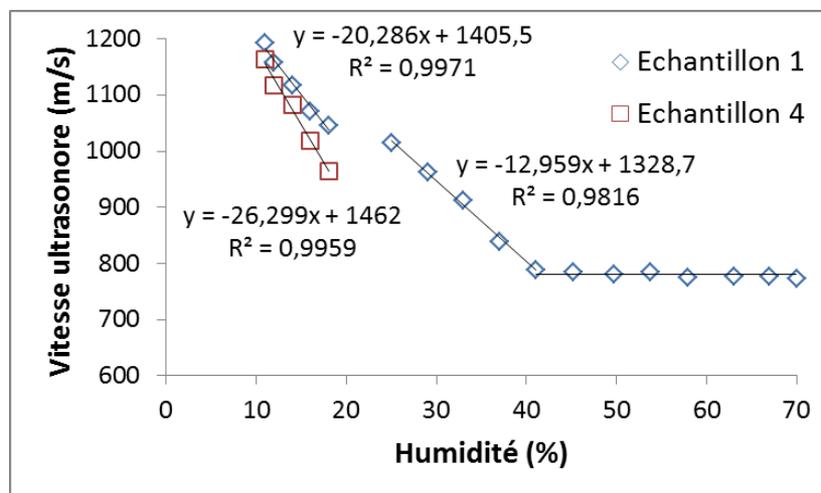
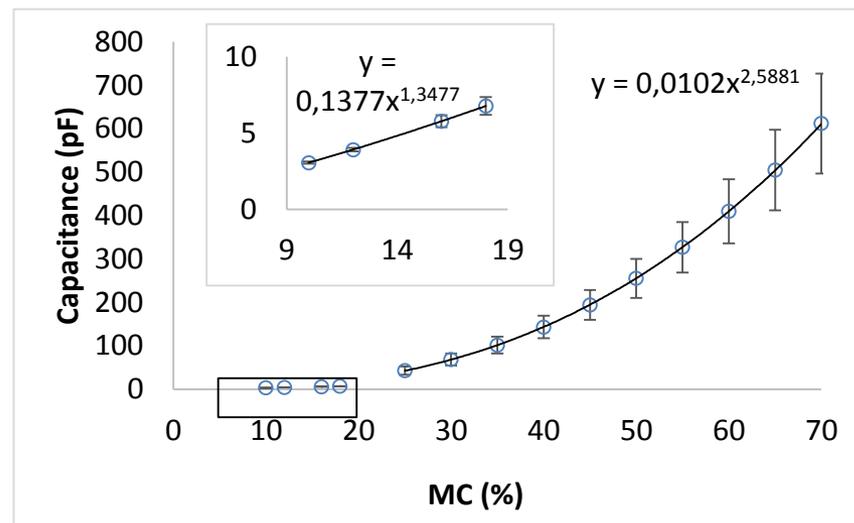
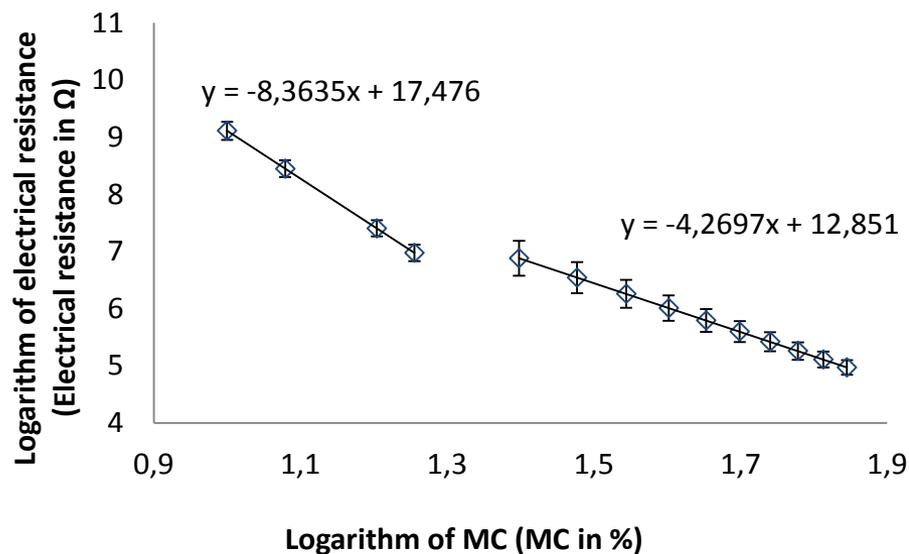


Mesures effectuées pour 13 humidités différentes



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

# Résultats



- 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 »

- 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 YAHYAOUÏ

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°

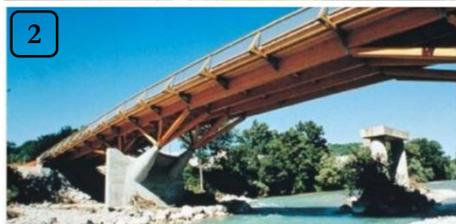


## Développement des structures multi-matériaux à base de bois

- 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



Ouvrages d'art en bois

- 1 Pont de Crest
- 2 Passerelle de Preuilley



Ponts mixtes bois/béton

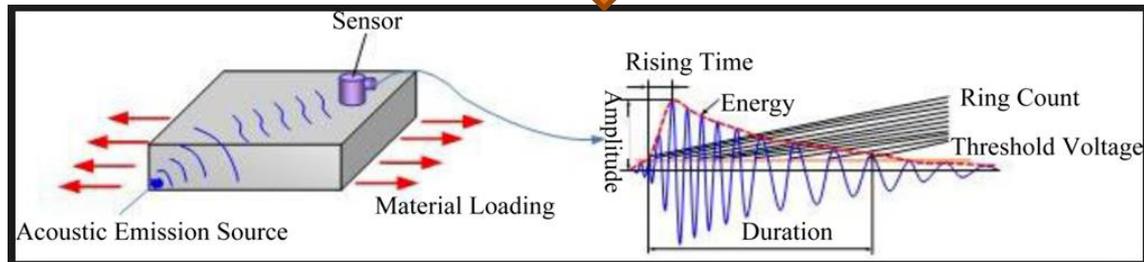
- 1 Pont de Cognin
- 2 Pont du Vallon du Riou de Lantosque
- 3 Pont de Lure



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)



Les avantages



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

- 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)

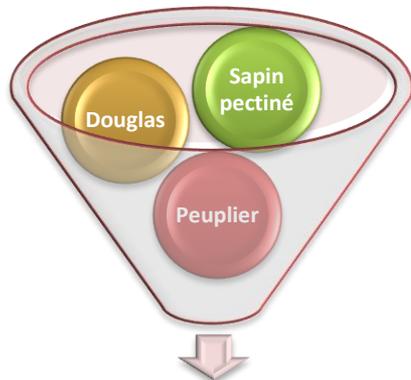
Tablier d'un pont mixte bois/béton/composite testé au LCPC  
(d'après Ben Mekki et al. 2007)

## Bois

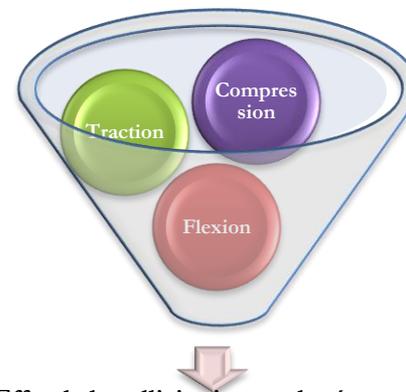
- Peu de travaux (généralement des anciens travaux)
- Une seule essence sollicitée pour un seul type de sollicitation
- L'analyse des signatures acoustiques corrélées aux mécanismes d'endommagement du matériau bois est peu étudiée (Baensch 2015, Lamy 2016, Diakhati et al. 2017)

**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



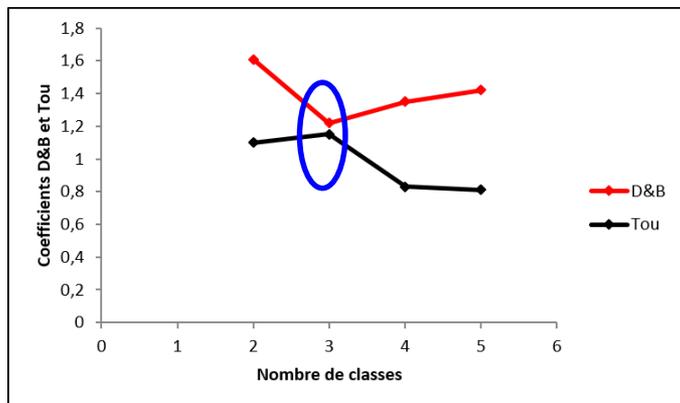
Effet de la sollicitation sur la réponse acoustique

Pour chaque essence et chaque type d'essai

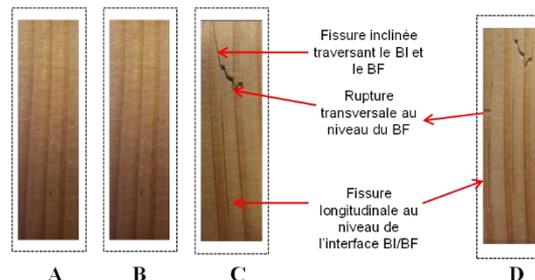
- Analyse de l'activité acoustique
- Classement des données acoustiques
- Identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement
- Détermination des scénarios d'endommagement

Pour chaque type d'essai

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



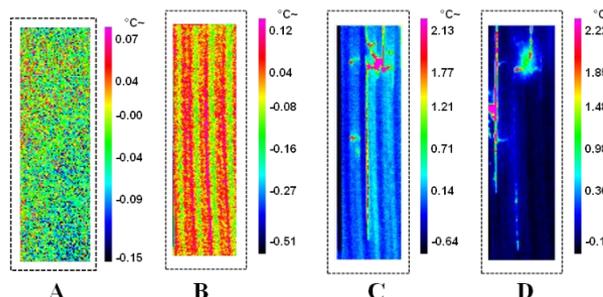
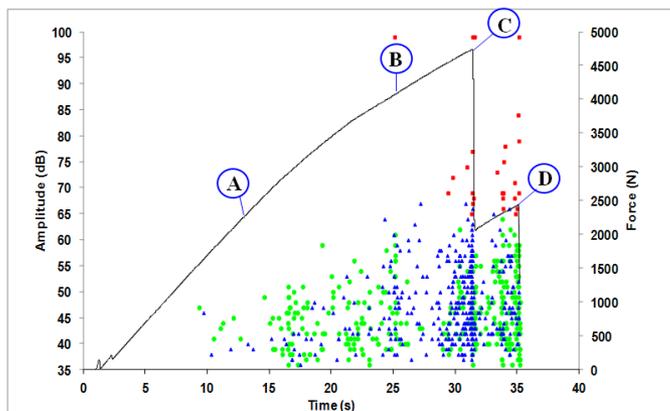
## Méthodes utilisées pour labelliser les classes



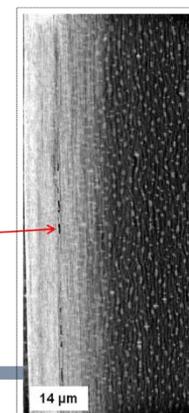
Images aux points particuliers extraites de vidéo

## Variation des critères de validation

- 3 classes de signaux

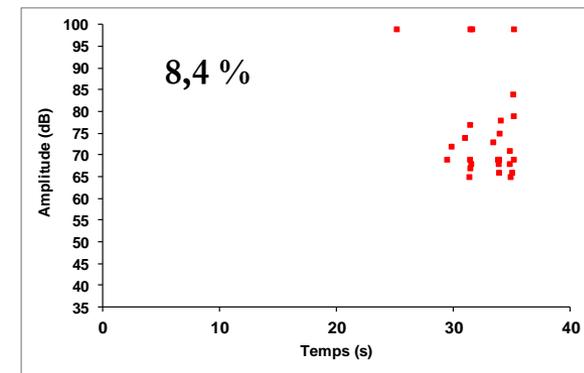
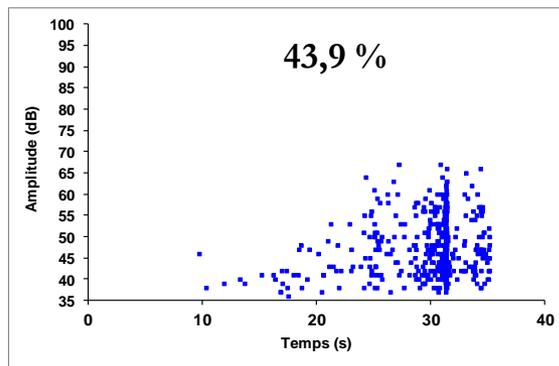
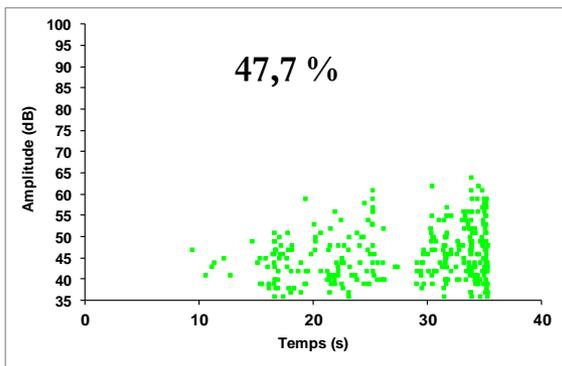


Thermogrammes aux points particuliers extraits du film thermique



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

## Résultats de classification



## Classe verte: microfissuration longitudinale

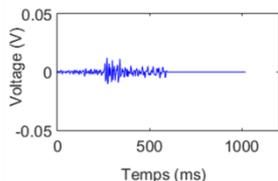
- temps de montée moyen
  - courte durée
- faible amplitude
- faible énergie
- pic fréquentiel plus faible (<50 kHz)

## Classe bleue: microfissuration transversale

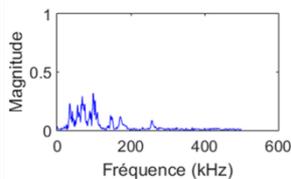
- temps de montée faible
  - courte durée
- faible amplitude
- faible énergie
- pic fréquentiel plus élevé (>80 kHz)

## Classe rouge: rupture de fibres

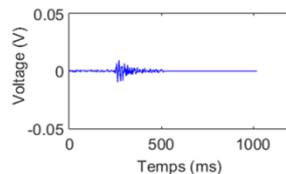
- temps de montée important
  - longue durée
- haute amplitude
- forte énergie
- pic fréquentiel <50 kHz



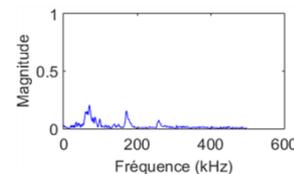
Forme d'onde



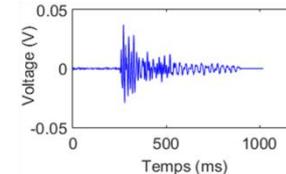
Transformée de Fourier



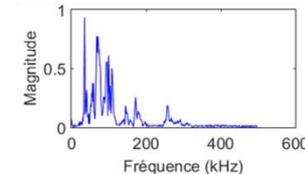
Forme d'onde



Transformée de Fourier

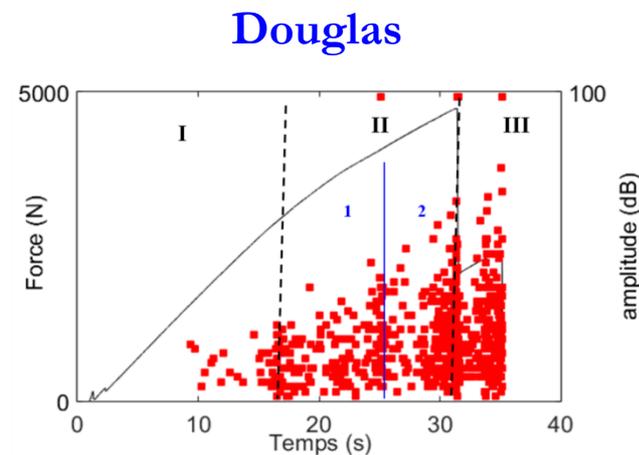
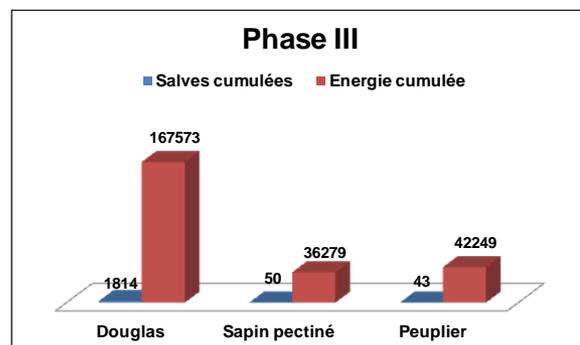
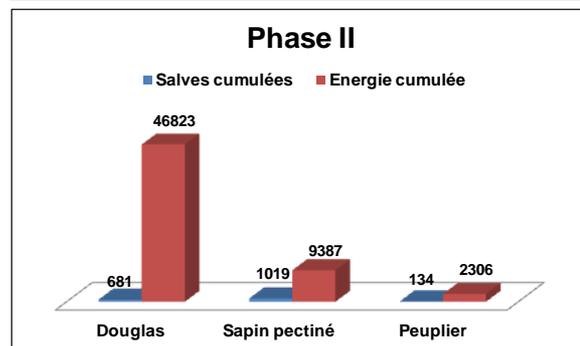
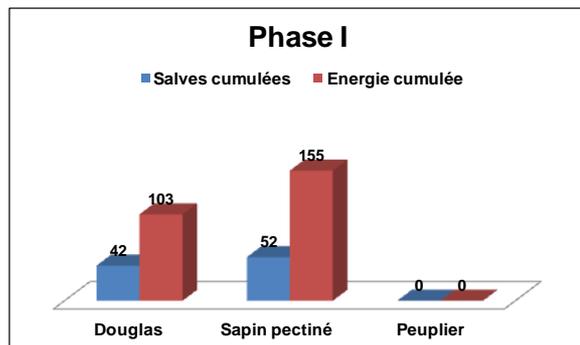


Forme d'onde



Transformée de Fourier

# Comparaison entre les trois essences (essais de traction)



- 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

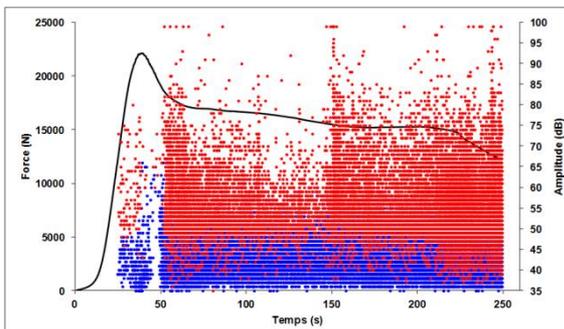
## Douglas

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

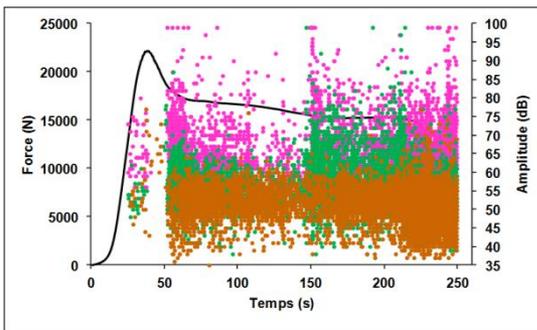
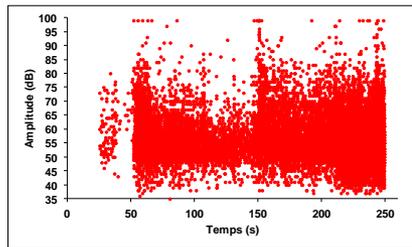
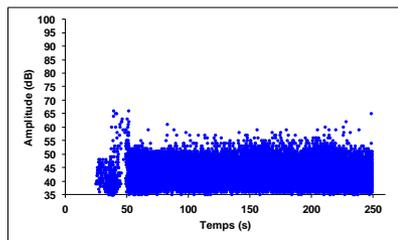
**Glissement entre l'éprouvette et les plateaux de montage**

**Ensemble des mécanismes d'endommagement**

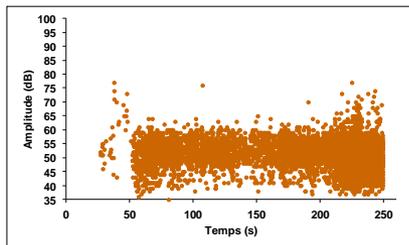
Reclassement dans la classe rouge



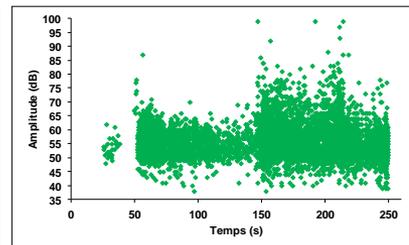
1<sup>er</sup> Classement



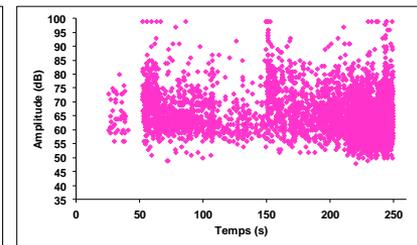
2<sup>ème</sup> Classement



Microfissuration longitudinale

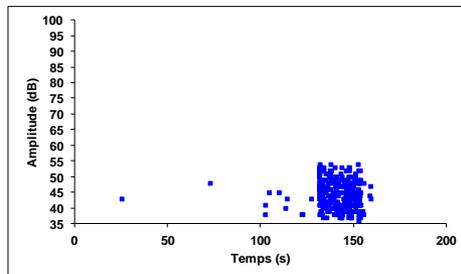
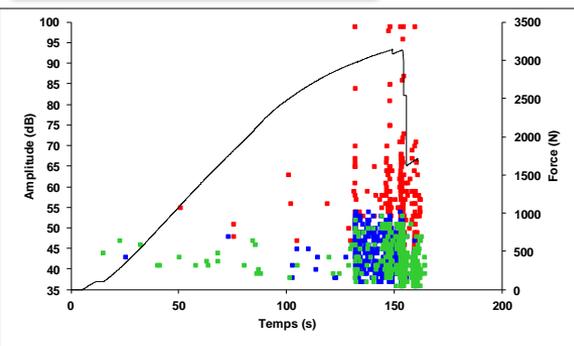


Microfissuration transversale



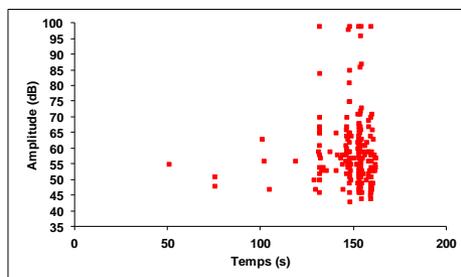
Rupture des fibres

## Douglas



### Microfissuration de type (RL)

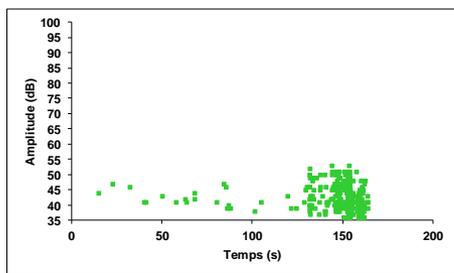
- Interface BI/BF
- Face tendue



### Rupture de fibres

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

### Résultat de classification



### Microfissuration de type (TL)

- Face latérale de l'éprouvette

Partie tendue

Face latérale



Fissure de type (RL)

Fissure de type (LR)



Fissure de type (TL)

Fissures de type (LT)

## 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

- 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

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 reconnaître précocement les endommagements**  
Suite : Thèse CSC?



Optimisation des opérations de maintenance



Utilisation sécurisée du bois en structure