

CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE ET ULTRASONORE DES PRODUITS BOIS ET COMPOSITES

Soutenance pour l'obtention du diplôme
d'Habilitation à Diriger des Recherches

Loïc Brancheriau

Chargé de Recherche au CIRAD
Unité Production et valorisation des bois tropicaux et méditerranéens

Travaux présentés le 22 janvier 2013

Plan de l'exposé

1. Formation et parcours professionnel
2. Synthèse des travaux de recherche
3. Conclusions et projet scientifique

Formation

⦿ Domaine des sciences du bois

- Ingénieur des industries du Bois (ESB)

Fin étude Canada (séchage)

- DEA en Sciences du Bois

CIRAD (Flexion statique 3 points \Leftrightarrow 4 points), publication ASF

- Doctorat en mécanique, option acoustique

FCBA, LMA, CIRAD (Caractérisation du bois par méthode acoustique)

Formation

- Sciences du bois

Spécificité en mécanique du matériau

Ingénieur

RDM



DEA

MMC



Doctorat

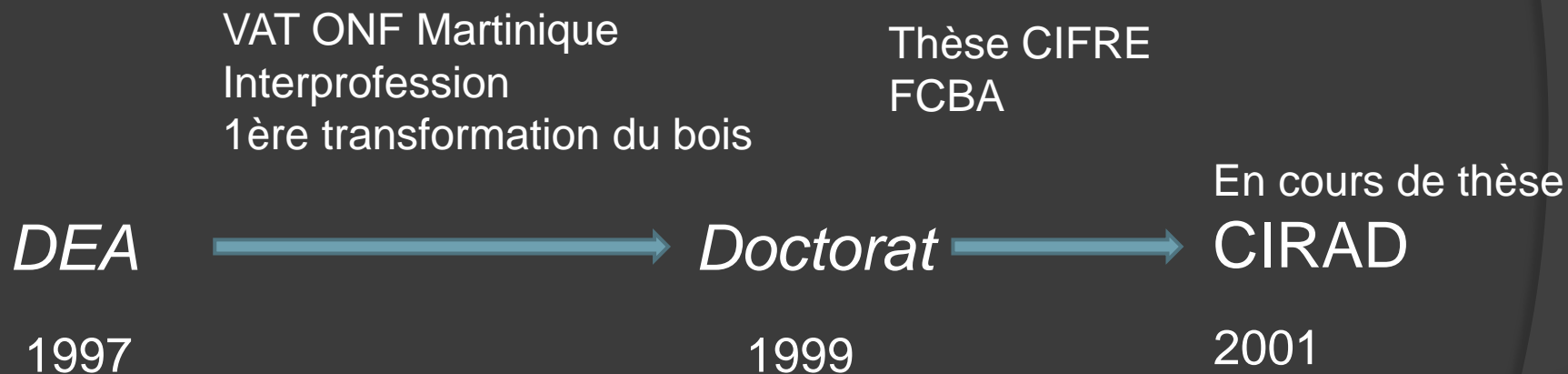
Dynamique

- Formation continue

- Statistiques (multivariée quantitative - qualitative, discriminante, classification)
- Mathématiques appliquées dont traitement du signal
- Programmation logicielle (Pascal)

Parcours professionnel

- Aide au développement, R&D

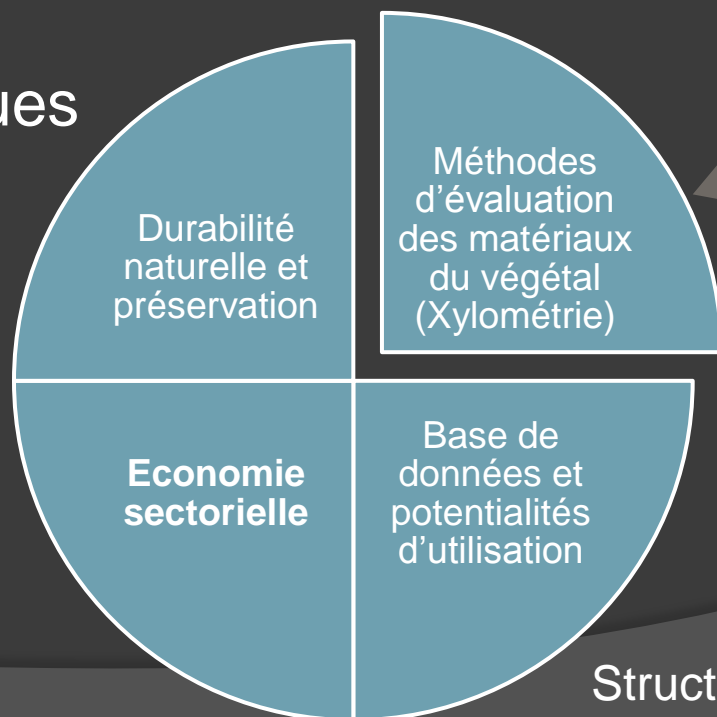


Positionnement actuel

UR Production et valorisation des bois tropicaux

Améliorer la connaissance des bois tropicaux et méditerranéens pour optimiser leurs modalités de transformation et leur utilisation

4 thématiques



2001-2012
Depuis 2006
Responsable équipe

Structure 2011

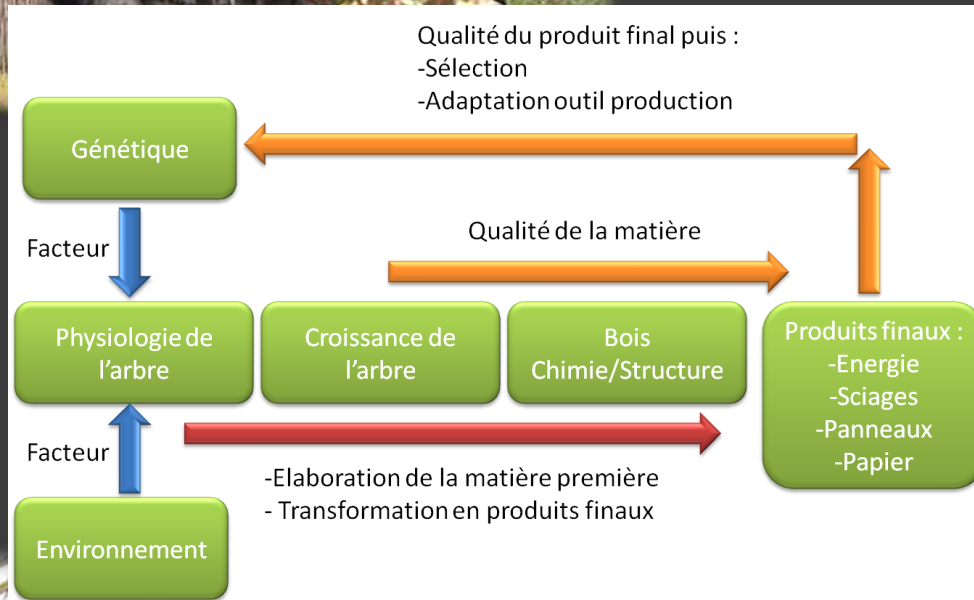
Problématique scientifique

- Optimiser les modalités de transformation et d'utilisation des bois tropicaux (ressources plantées)
- Maîtriser l'hétérogénéité des propriétés (sélection) et de mieux gérer la qualité produite au cours du processus de transformation
 - Sélectionner très tôt les ressources plantées en fonction de la qualité attendue des produits finaux (papier, charbon, construction)
 - Evaluer les performances tout au long du processus de transformation de ces produits

➤ Méthodes CND

Mes recherches :

- Ondes acoustiques – ultrasonores
- Spectrométrie proche infrarouge
- Statistiques permettant l'étalonnage et à l'analyse des performances



P.calori. ↗
Tx. lignine ↗
Densité ↗

Rigidité ↗
Durabilité ↗
Densité ↗
Retrait ↘

Rdt. pâte ↗
Tx. Cellulose ↗
Tx. lignine ↘



Questions de recherche

- Mesurer et modéliser la réponse dynamique linéaire d'une structure macroscopique (problème direct, 1D et 2D)
- Comprendre et modéliser l'effet des hétérogénéités sur la réponse vibratoire dans le domaine linéaire (problème direct, 1D et 2D)
- Déterminer les paramètres intrinsèques à partir de la réponse dynamique (problème inverse, 1D et 2D)
- Détecter la présence et positionner les hétérogénéités à partir de la réponse dynamique (problème inverse, 1D et 2D)

Partie 2.

Synthèse des travaux de recherche

2. Synthèse des travaux de recherche

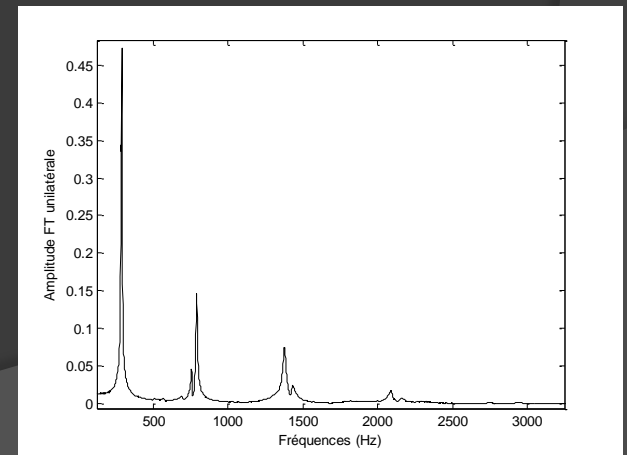
- ⦿ CND : Vérification de la qualité d'une fourniture sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à son utilisation ultérieure
- ⦿ Deux domaines d'application principaux :
 - Mesurer de façon directe ou indirecte des caractéristiques intrinsèques
 - Détecter, positionner, identifier et dimensionner les défauts dans les pièces, les structures ou les assemblages
- Caractérisation quantitative et qualitative

2. Synthèse des travaux de recherche

- Caractérisation quantitative
 - Propriétés mécaniques (MOR, MOE)
 - Axes anisotropie
- Caractérisation qualitative
 - Perception des sons musicaux
 - Délaminations
 - Criques de compression
- Quantitatif / qualitatif
 - Tomographie

2. Synthèse des travaux de recherche

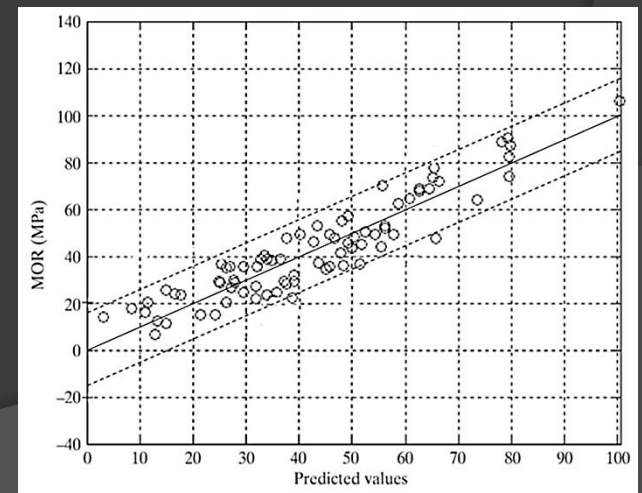
- Détermination de la contrainte à rupture
 - Classement mécanique avivés : MOR indirect
 - Classiquement MOE => MOR
 - Vibrations libres : calcul direct MOE
 - Possibilité utiliser directement le spectre en fréquence



2. Synthèse des travaux de recherche

- Poutres de mélèze en dimensions d'emploi (3x0.15x0.05m³)
- Modèle PLS, nombre de variable 500, 82 poutres
- $R^2 = 0.83$ contre $R^2 = 0.43$ avec MOE statique
- Stabilité du modèle, faible nombre d'observations

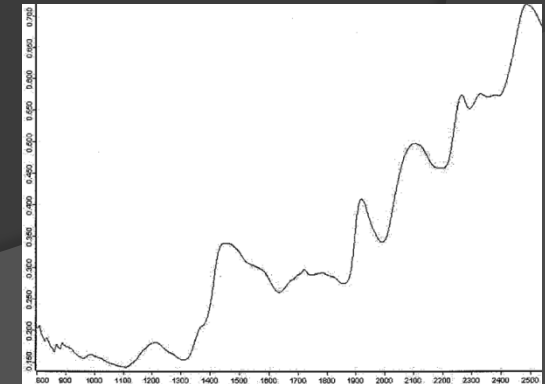
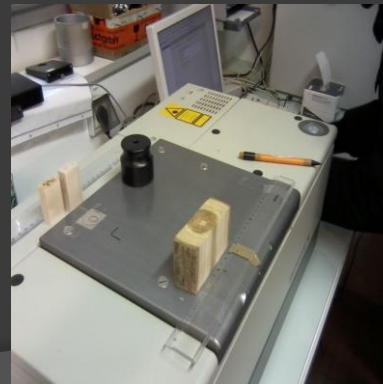
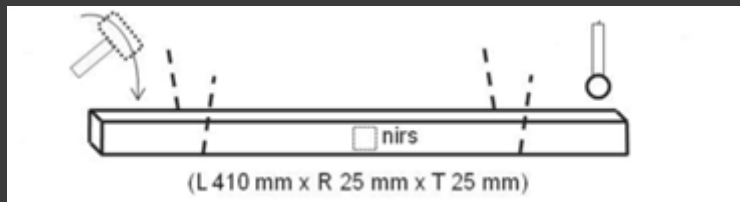
N	LV	R ²	SEC (MPa)	IC95 (MPa)	$\frac{SEP}{SEC}$
82	10	0.83	8.6	18	3.4



2. Synthèse des travaux de recherche

○ Détermination indirecte du MOE

- Spectroscopie PIR (4000 à 14000 cm^{-1})
- Très rapide, x props locales (diam 8 mm)
- Mais mesure surface, étalonnage délicat, sensible H%
- Utilisé pour phénotypage en génétique (héritabilité)

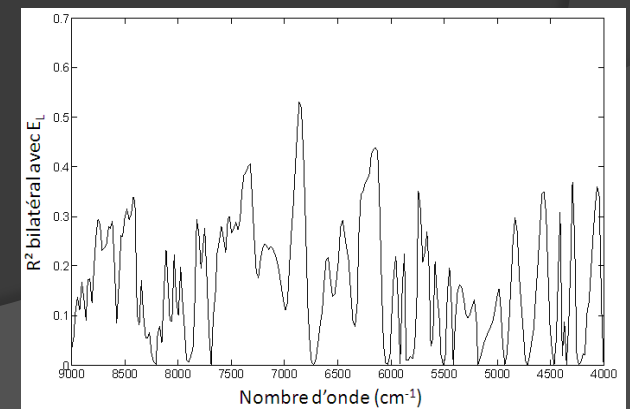
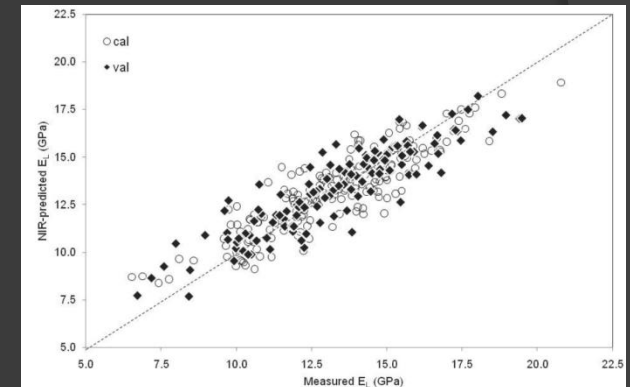


2. Synthèse des travaux de recherche

- Eucalyptus de plantation
- Modèle PLS, 2343 variables, 327 observations

N	LV	R ²	SEC (Mpa)	IC95 (Mpa)	$\frac{SEP}{SEC}$
327	5	0.78	1130	2200	1.0

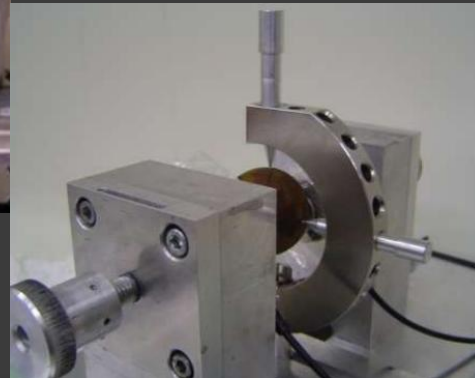
- Importance bande $\sim 6900 \text{ cm}^{-1}$
Lignines (liaison OH intra)
...Délicat, prétraitement



2. Synthèse des travaux de recherche

○ Détermination des axes d'anisotropie

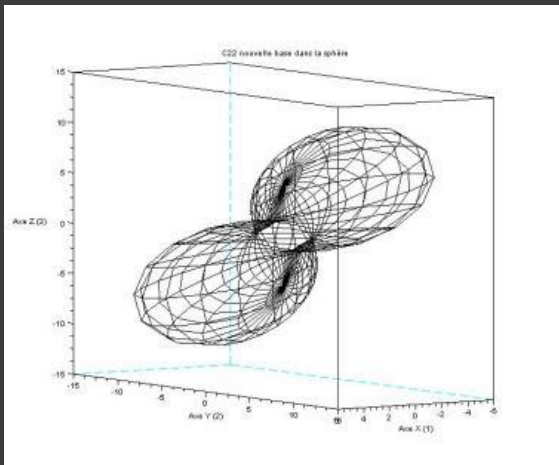
- Cas loupe Thuya, optimisation usinage
- Dispositif ultrasonore 1 MHz, sphère 36 mm
- 133 points de mesure, pas de 15°
- Détermination du Temps, constante rigidité C^*



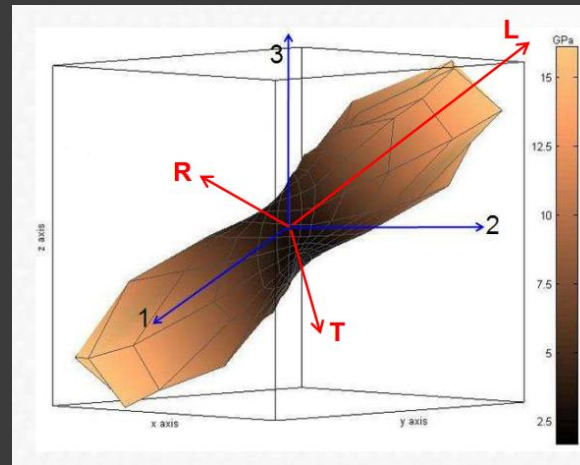
2. Synthèse des travaux de recherche

- Problème direct

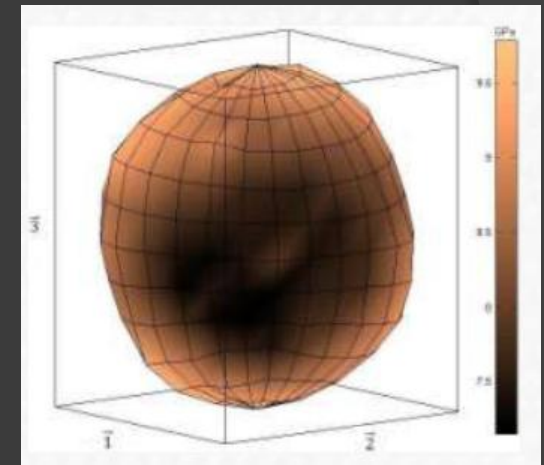
modèle bois



Hêtre



Thuya

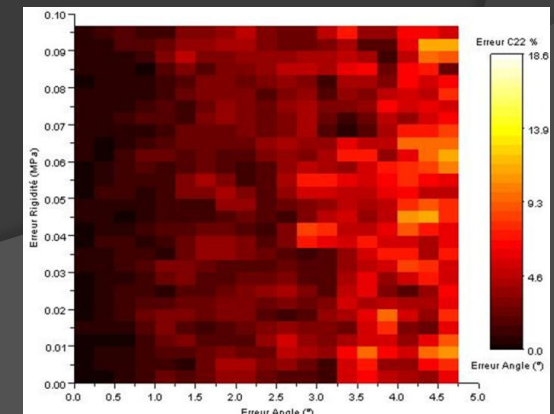


- Problème inverse (axes identifiés)

$$\overline{C^*} = [C_{11}, C_{22}, C_{33}, (C_{12} + 2.G_{12}), (C_{13} + 2.G_{13}), (C_{23} + 2.G_{23})]^T$$

Test sensibilité bruit de l'inversion ($C^* \pm 1\text{MPa} + \text{Angle} \pm 5^\circ$)

- Effet erreur angulaire > erreur C^*
- Erreur angulaire < $2^\circ \Rightarrow$ Erreur $C < 5\%$



2. Synthèse des travaux de recherche

◉ Caractérisation qualitative

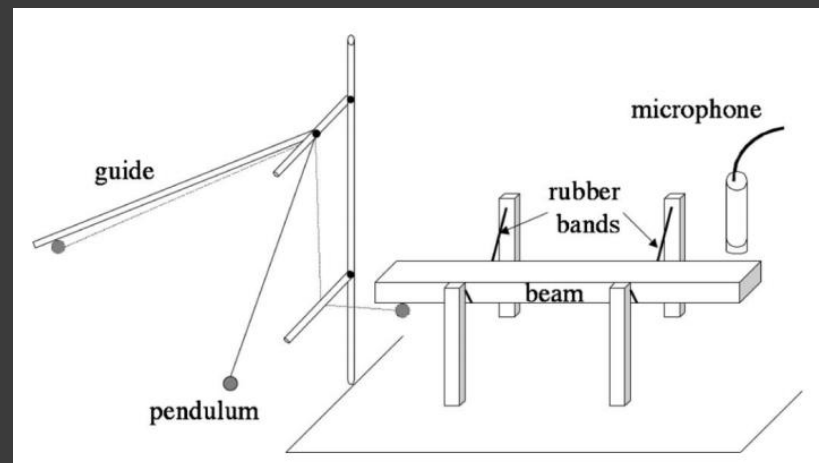
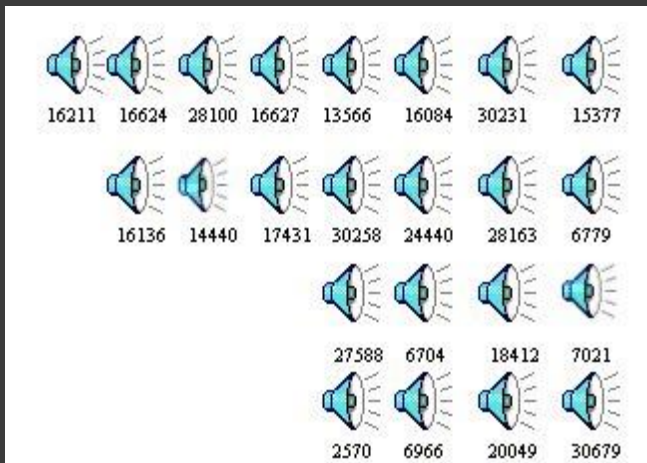
Perception des sons musicaux

1. Beauté d'un son? Cas lames xylophone
2. Comment reconnaît-on un son? Catégorisation sons d'impact

2. Synthèse des travaux de recherche

○ Qualité des lames de xylophone

- 58 essences tropicales (200 à 1300 kg/m³)
- Luthier : classification indirecte (écoute)
- Mesures acoustiques : paramètres du signal



2. Synthèse des travaux de recherche

⦿ Paramètres du signal

- Matériau : masse volumique, élasticité
- Temporel : amplitudes, amortissements
- Fréquentiel : harmonicité, centre de gravité, étendue spectrale

⦿ Classification non ciblée par les descripteurs

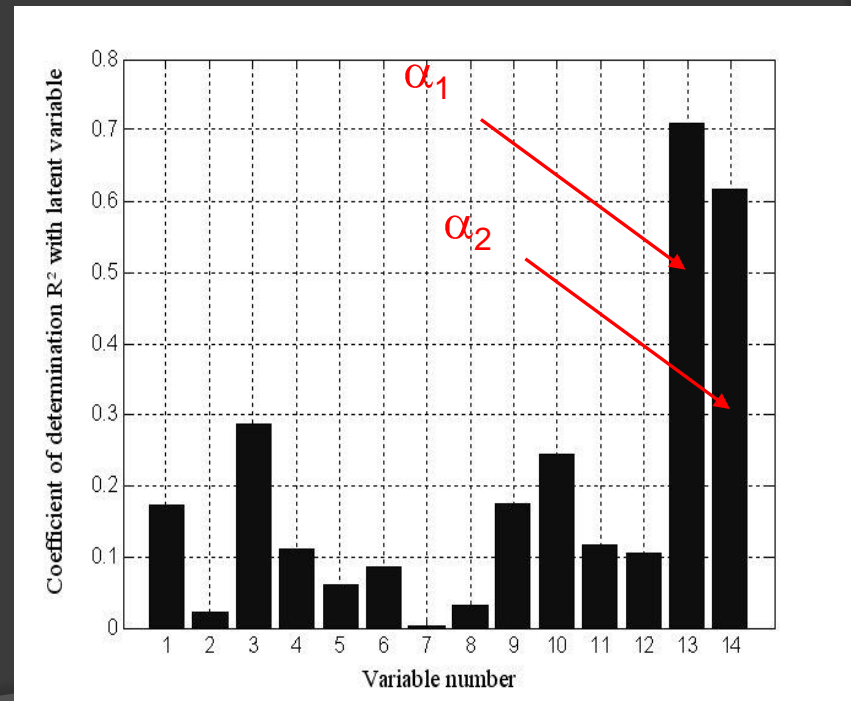
- Classification hiérarchique (3 groupes)

Nbre.	G1	G2	G3
Bon	3	4	0
Moyen	7	16	3
Mauvais	4	7	6

2. Synthèse des travaux de recherche

● Classification ciblée par les descripteurs

- Cible : c. auditive du moins bon au meilleur (poids 1)
- Modèle PLS ($R^2 = 0,70$)
- Représentativité sur LV1 =>

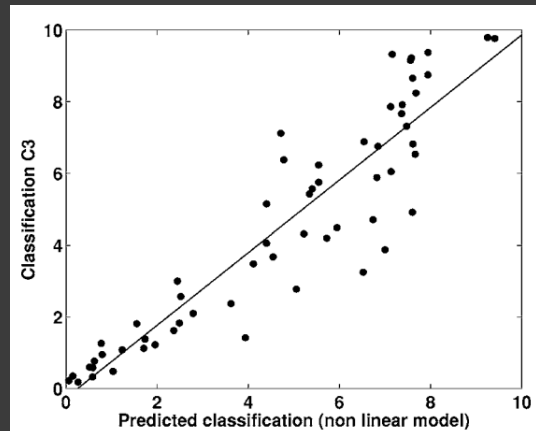
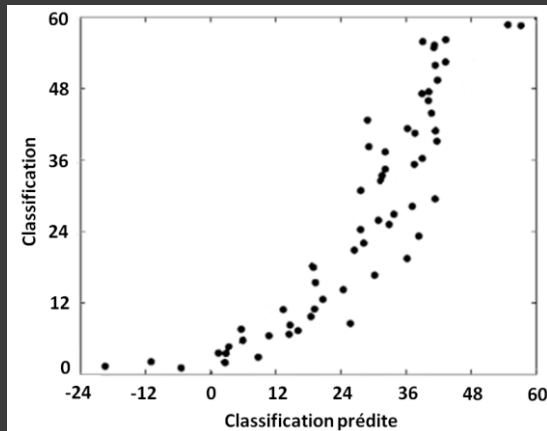


Degré de représentation

2. Synthèse des travaux de recherche

Classification ciblée par les descripteurs

$$\hat{C}3_{\text{Linear}} = -3.82 \times 10^{-1} \alpha_1 - 1.32 \times 10^{-3} SB + 17.52$$



$$\hat{C}3_{\text{sigmoid}} = \frac{10}{1 + e^{-\frac{\hat{C}3_{\text{Linear}} - 5}{1.64}}}$$

Qualité acoustique des lames de xylophone

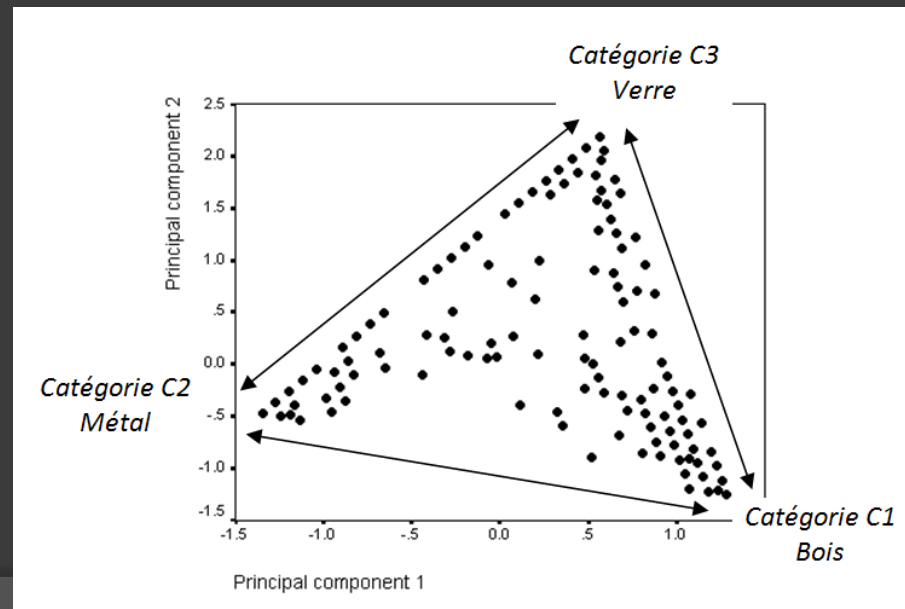
- Amortissement des vibrations (durée du signal)
- Forte masse volumique

2. Synthèse des travaux de recherche

- Catégorisation des sons de matériaux frappés
 - Bois, métal et verre (5 sons naturels par matériau)
 - Pour les 3 transitions : 100 sons hybrides (morphing sonore) => 300 sons au total
 - Test de catégorisation effectué par 22 sujets
 - Chaque son caractérisé par :
 - % réponse (bois, métal, verre)
 - Descripteurs sonores

2. Synthèse des travaux de recherche

- Espace perceptif de catégorisation
 - Limites entre catégories inconnues
 - Difficulté de jugement
 - Transition métal-verre mieux perçue
 - Bois-métal moins bien perçue



2. Synthèse des travaux de recherche

- ① Identification des limites de catégorie
 - Classification hiérarchique
 - Verre : catégorie la plus facilement identifiable
 - Métal puis Bois plus diffuse
- ② Estimation de l'appartenance via les descripteurs
 - Descripteurs corrélés entre eux
 - Régression logistique binaire
 - avec une sélection pas à pas

2. Synthèse des travaux de recherche

- Estimation de l'appartenance via les descripteurs
 - Informations utilisées différentes selon le matériau
 - Bois : amortissement, fréquence « moyenne »
 - Métal : amortissement
 - Verre < modèle complexe > : composition spectrale et sa fluctuation dans le temps

Catégorie	Performance (%)
Bois	95,5%
Métal	85,0%
Verre	90,5%

2. Synthèse des travaux de recherche

- ⦿ Caractérisation qualitative

Dé laminations

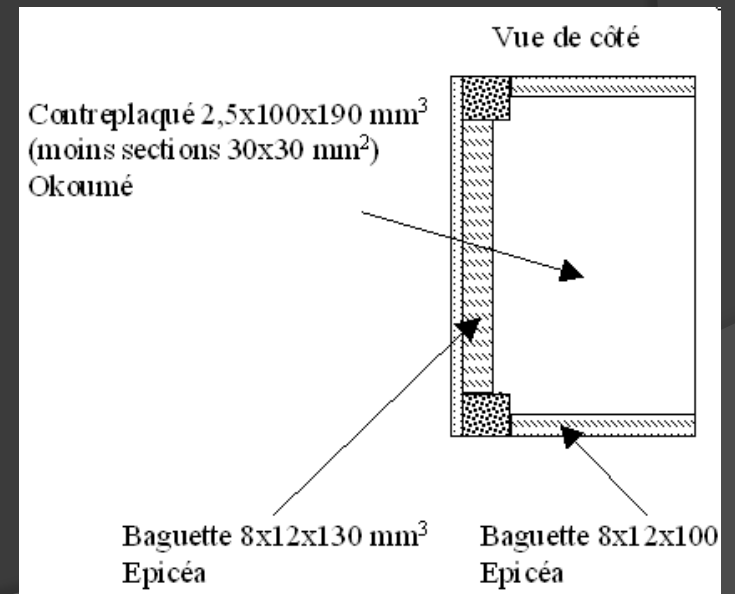
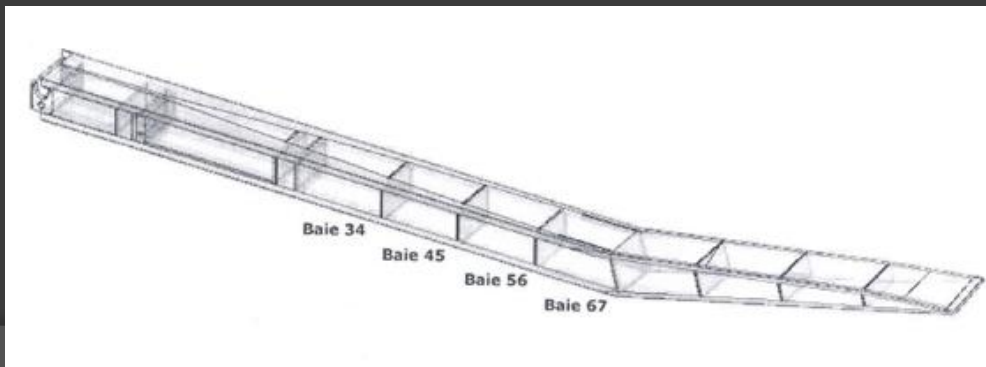
=> Détecter, positionner et dimensionner

1. Aviation civile
2. Centrale électrique

2. Synthèse des travaux de recherche

● Délaminations dans les assemblages collés

- Problème en production : encollage
- Longeron de voilure de DR 400



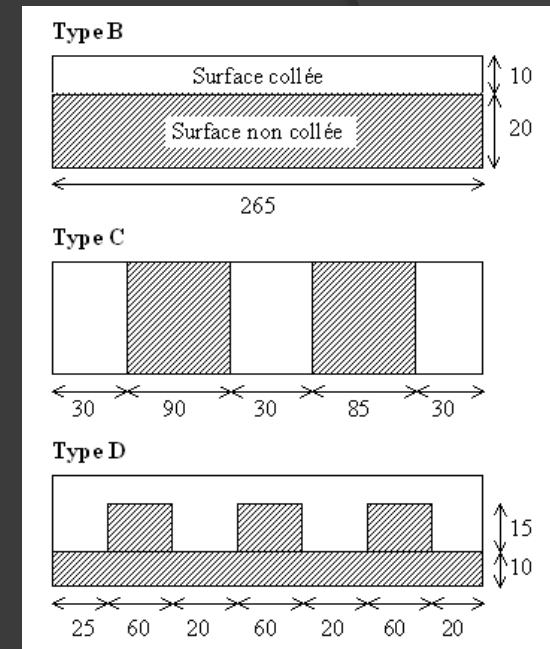
2. Synthèse des travaux de recherche

● Matériel

- 16 éprouvettes : tasseau de pin avec un contreplaqué bouleau
- 4 modalités de collage

● Protocole expérimental

- Balayage en fréquence < 2 kHz

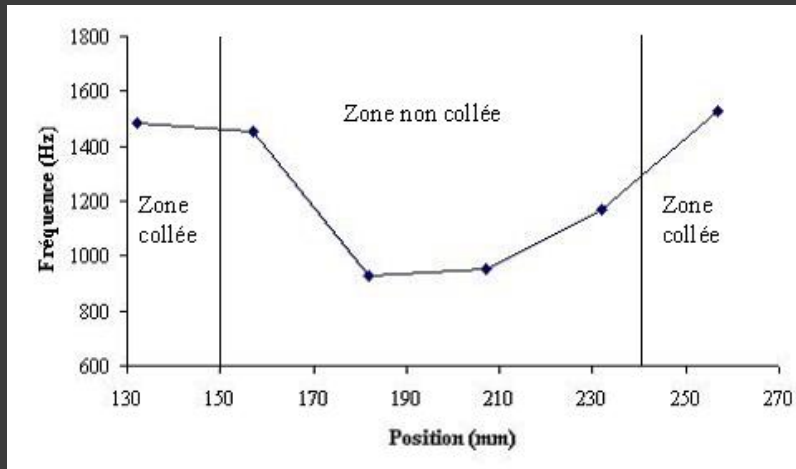


Contrôle ponctuel

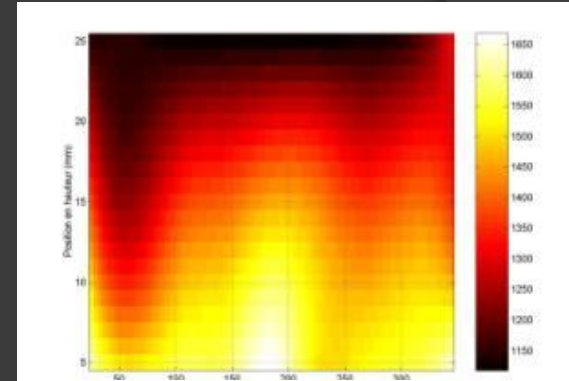
2. Synthèse des travaux de recherche

● Résultats

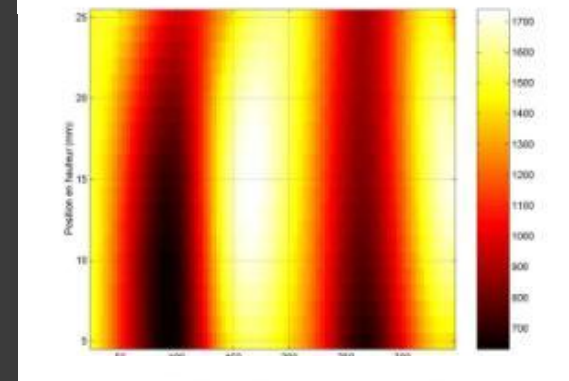
- Résonance zone collée > zone non collée



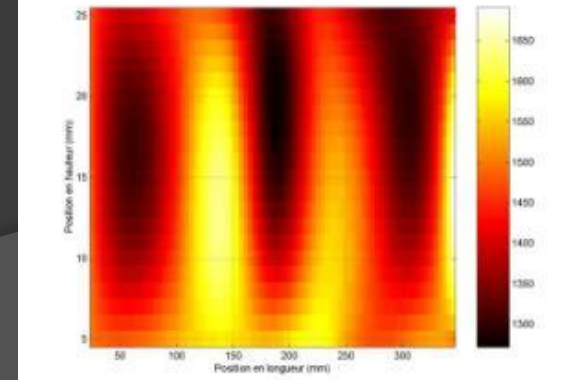
B



C



D



2. Synthèse des travaux de recherche

◎ Délaminations d'une peau composite

- Composite epoxy-fibre sur béton
- 4 panneaux (60x100 cm²) en béton revêtus avec des délaminations de taille différente

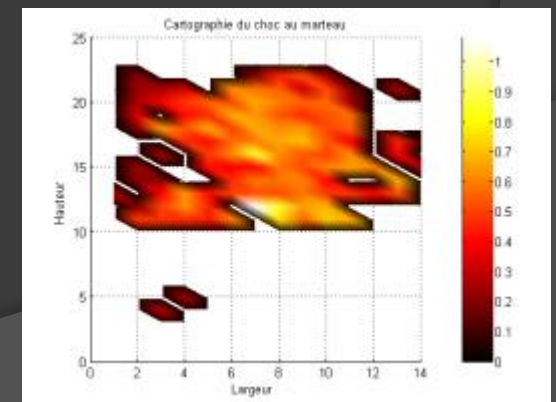
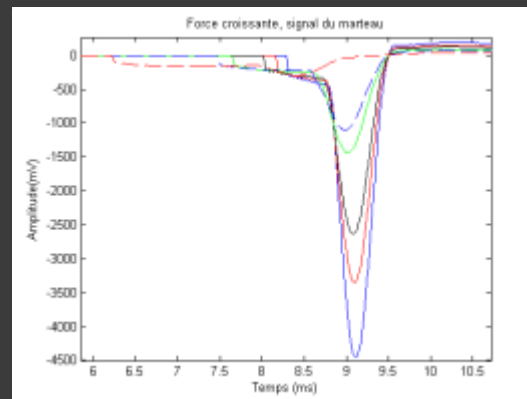


- 2 méthodes expérimentales :
 - Marteau instrumenté
 - Contact frottant - microphone

2. Synthèse des travaux de recherche

◎ Sollicitation par impact

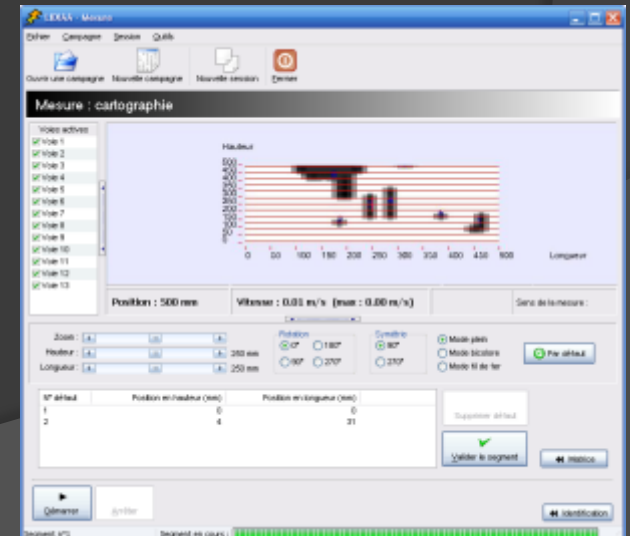
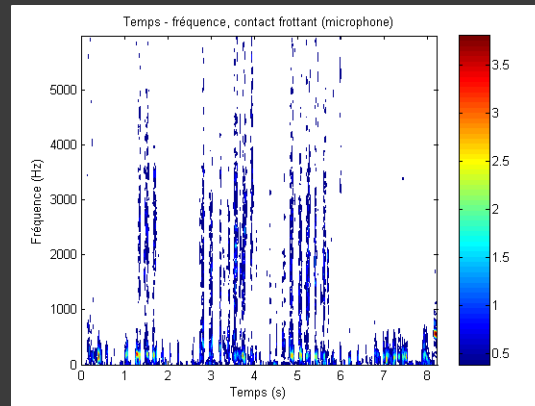
- Courbe force – temps : présence épaulement
- 2 chocs modélisés par 2 gaussiennes
- Différence des temps caractéristiques comme paramètre indicateur
- Valable si intensité modérée choc et constante



2. Synthèse des travaux de recherche

● Sollicitation par contact frottant

- Signature des délaminations sur le spectrogramme
- Présence de vibrations de plus hautes fréquences



2. Synthèse des travaux de recherche

- Caractérisation qualitative

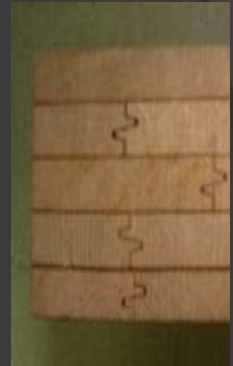
Criques de compression
=> Détecter, positionner

1. Aviation civile

2. Synthèse des travaux de recherche

○ Détection des criques de compression

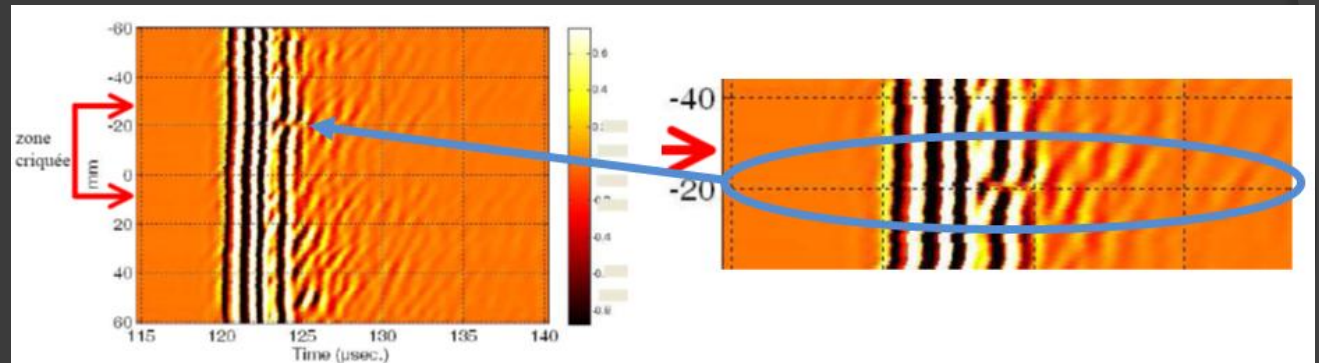
- Avion voltige Cap 10
- Pb fissuration longeron \leq limite de vol
- 1 élément longeron testé en incidence normal et oblique $\pm 20^\circ$
- Essai ultrasonore en réflexion (1 MHz) dans l'eau



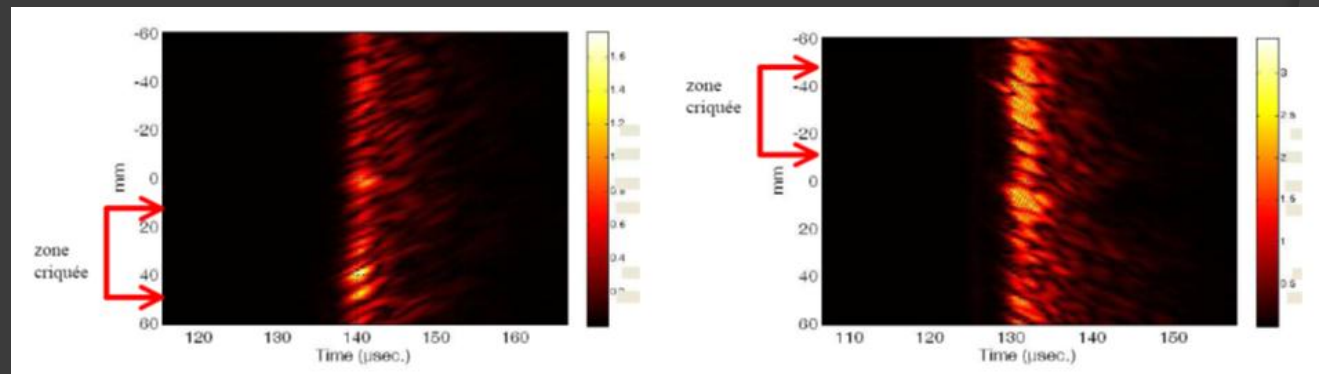
2. Synthèse des travaux de recherche

- Paquets ondes ($4\mu\text{s}$, 3mm) : cernes d'accroissement
- Rupture impédance acoustique dans la zone de crique
- Sondage optimal avec plusieurs angles d'incidence

Incidence normale



Incidence oblique
 $+20^\circ$ et -20°



2. Synthèse des travaux de recherche

- Caractérisation quantitative / qualitative

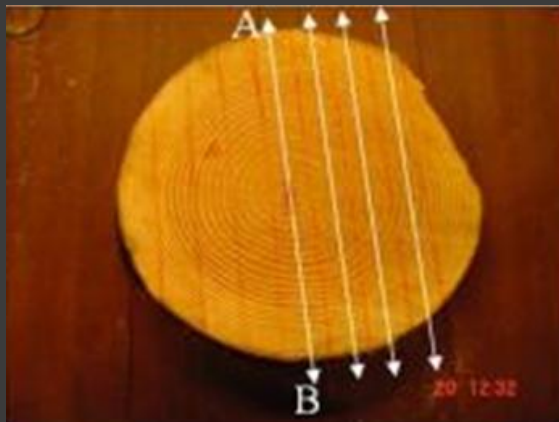
Tomographie des bois sur pied

1. Acoustique en transmission
2. Ultrasonore en réflexion

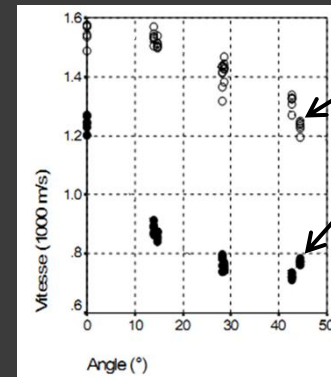
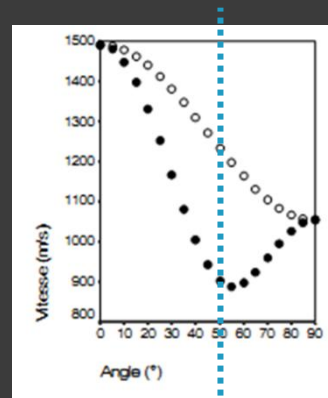
2. Synthèse des travaux de recherche

○ Imagerie acoustique en transmission

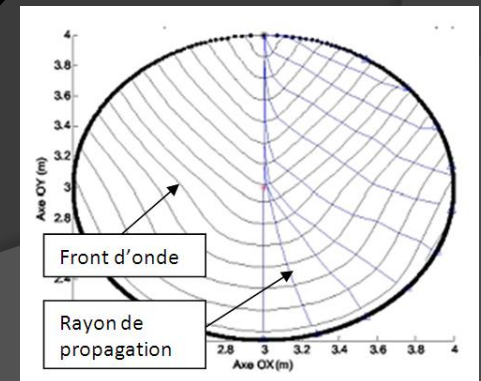
- Effet de l'anisotropie transverse sur les rayons de propagation



- Bois de Douglas ($E_R/E_T \sim 1,4$)
- Détermination du TOF



Avant découpe
Après



2. Synthèse des travaux de recherche

● Effet de la taille d'une inclusion centrale

- Bois de Cèdre ($E_R/E_T \sim 1,2$)
- Rétroprojection filtrée, reconstruction de la lenteur
- 16 points de sonde \Rightarrow résolution num. 3,8 cm

D 48 cm



($\varnothing=3$ cm)



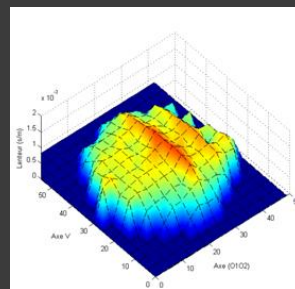
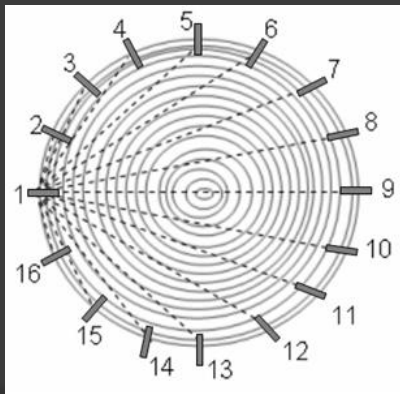
($\varnothing=7.5$ cm)



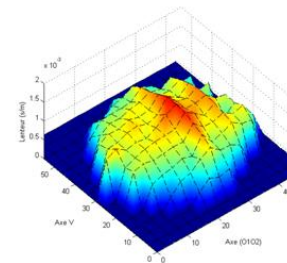
($\varnothing=15$ cm)



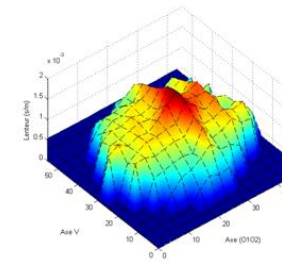
($\varnothing=20$ cm)



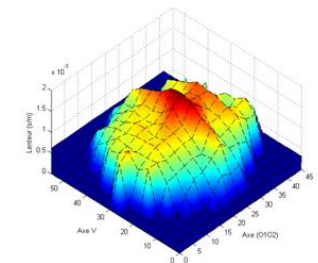
($\varnothing=3$ cm)



($\varnothing=7.5$ cm)



($\varnothing=15$ cm)

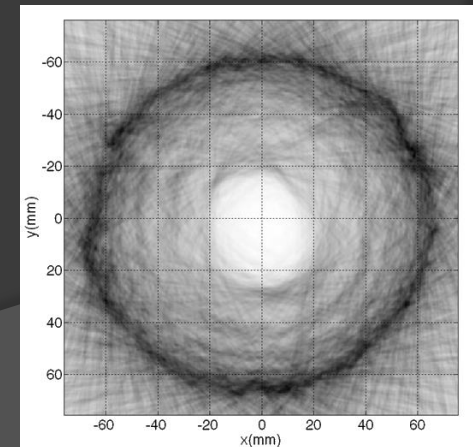
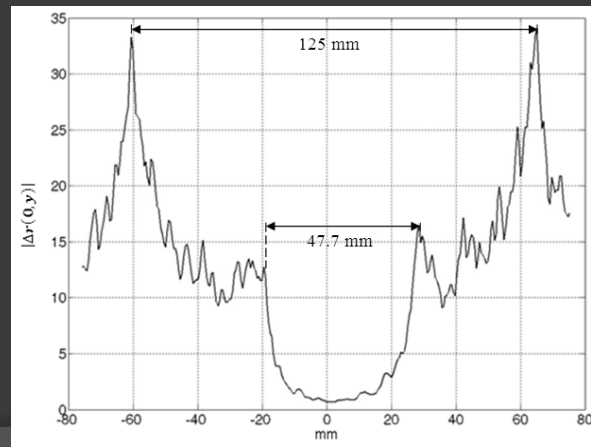
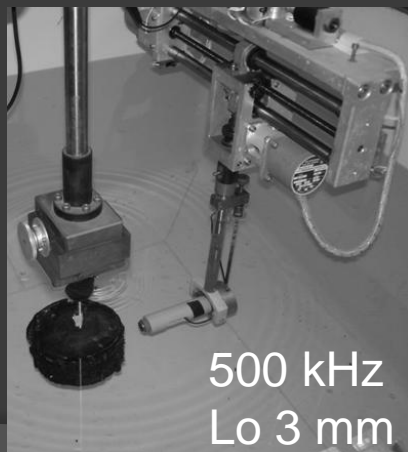
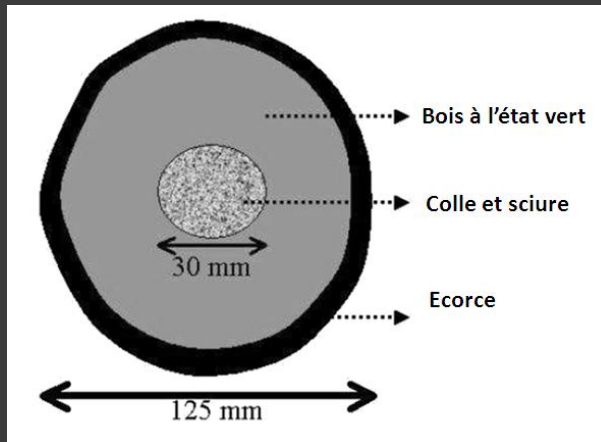


($\varnothing=20$ cm)

2. Synthèse des travaux de recherche

Imagerie ultrasonore en réflexion (bois d'Épicéa)

- Réflectivité des interfaces
- 1 rotation émetteur – récepteur
- Très fort contraste de l'écorce
- Inclusion observable
- D 48 mm (σ 4 mm) au lieu de 30 mm



Partie 3.

Conclusions et projet scientifique

3. Conclusions et projet scientifique

- Utilisation directe du spectre de vibration comme variable prédictive des propriétés mécaniques
- Importance de certaines bandes d'absorption (lignines) proche infrarouge dans la relation entre propriétés mécaniques et absorbance
- Importance des descripteurs acoustiques dans le jugement qualitatif et la discrimination, possibilité d'utilisation en classement mécanique
- Possibilité d'une caractérisation qualitative (détection d'hétérogénéité) montré pour la recherche de délaminations et de criques de compression dans les assemblages collés
- Effet de l'anisotropie du bois sur les vitesses de propagation : détermination des axes d'anisotropie et hypothèse de reconstruction en tomographie
- Tomographie acoustique et ultrasonore des arbres sur pied : effets de la présence de cavités et d'hétérogénéités
Nécessité d'améliorer la qualité des images obtenues (diminuer la résolution spatiale) et de diminuer l'incertitude de reconstruction des paramètres

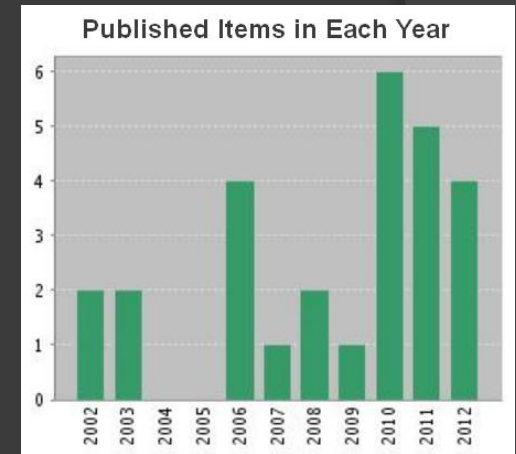
3. Conclusions et projet scientifique

● Evolution des activités de recherche (2001-2012)

- Obligation de résultats
R&D pour l'industrie

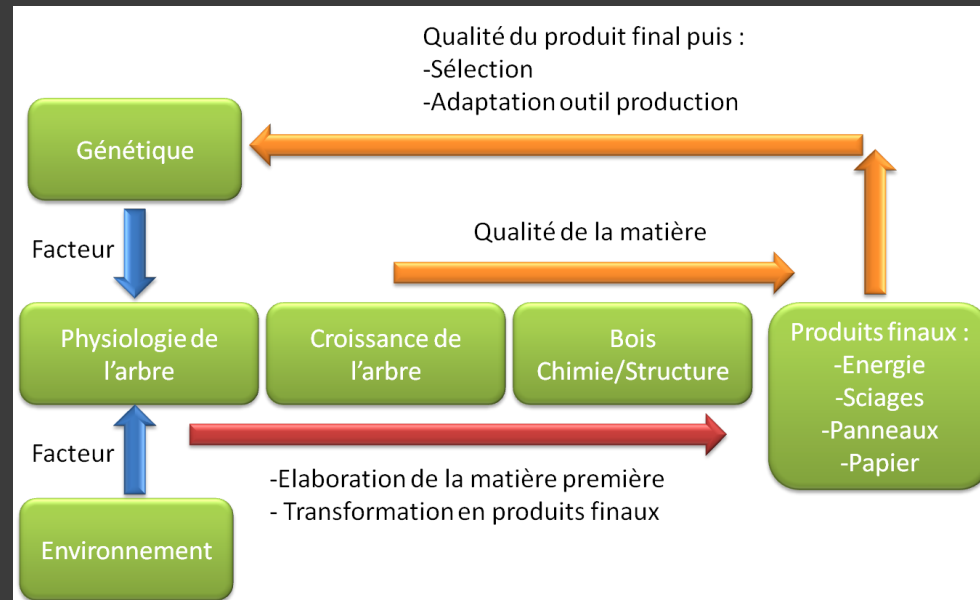
- Recherches plus fondamentales
Recentrer sur les pays du Sud

Orientées sur la croissance des plantations forestières



3. Conclusions et projet scientifique

- Considérer la caractérisation de la matière au travers du processus dynamique de croissance
- Connaissance nécessaire pour la compréhension des mécanismes couplés de croissance mais aussi pour la déconstruction de la matière ligneuse



3. Conclusions et projet scientifique

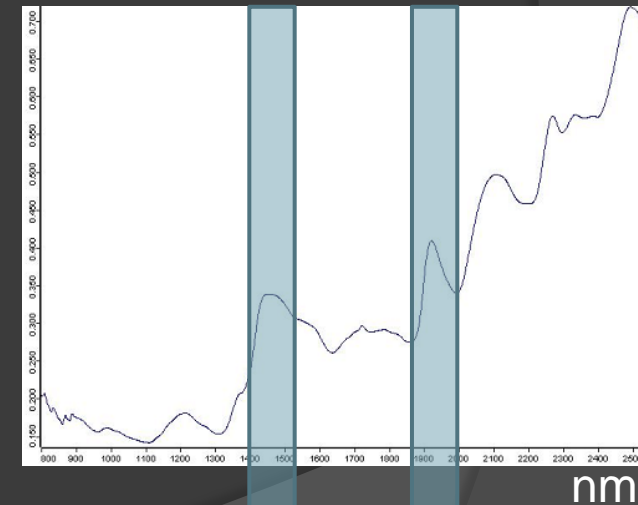
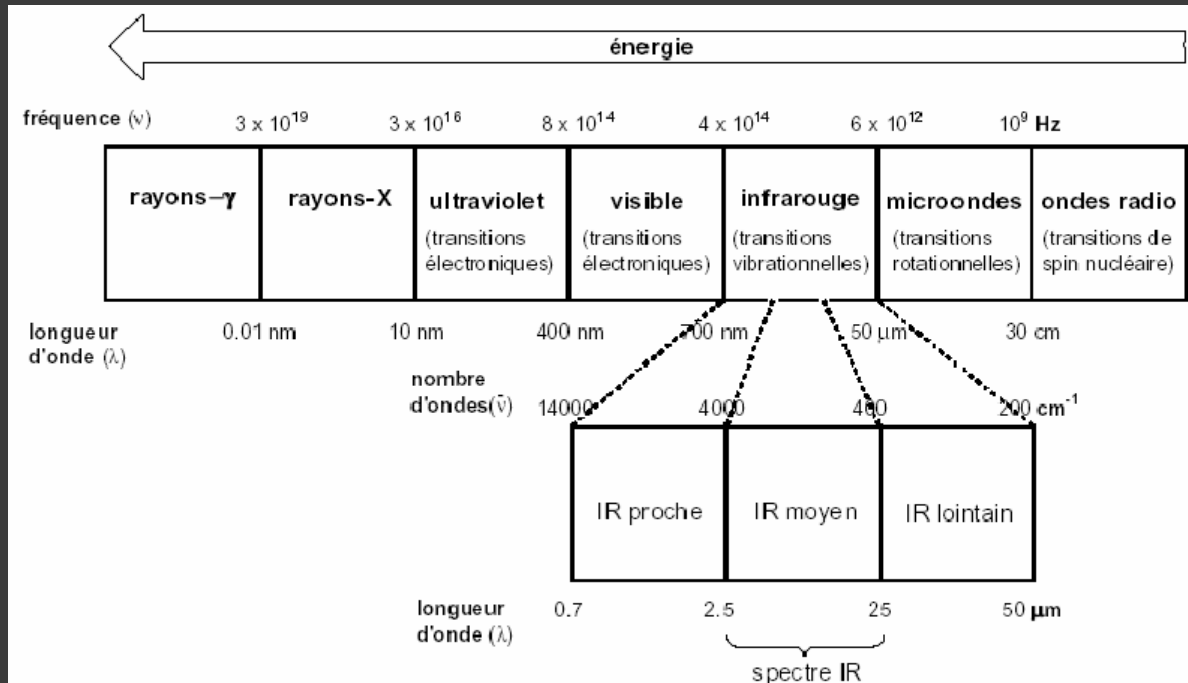
- ⦿ Questions de recherche relatives à l'étude de la variabilité dans le fonctionnement et l'organisation structurelle des plantes :
 - Quelle est la relation entre la variabilité des propriétés du bois et le développement de l'arbre ?
 - Comment l'arbre régule sa forme en fonction des contraintes mécaniques internes ou externes ?



Merci de votre attention

Annexe

◉ Spectroscopie Proche Infra Rouge

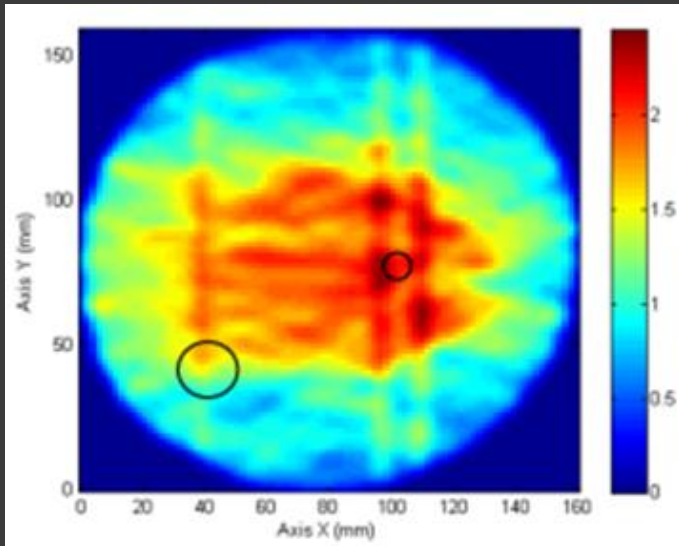


Absorption IR par les molécules
Liaisons chimiques, fréquences de vibration
Bandes harmoniques et Bandes de combinaison

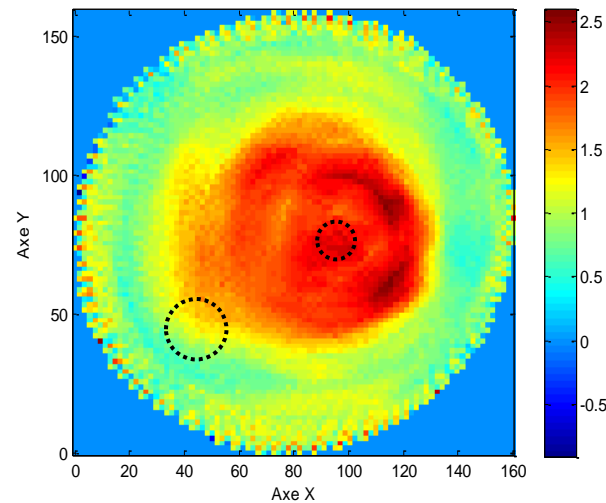
Bandes de l'eau
Liaisons O-H

Annexe

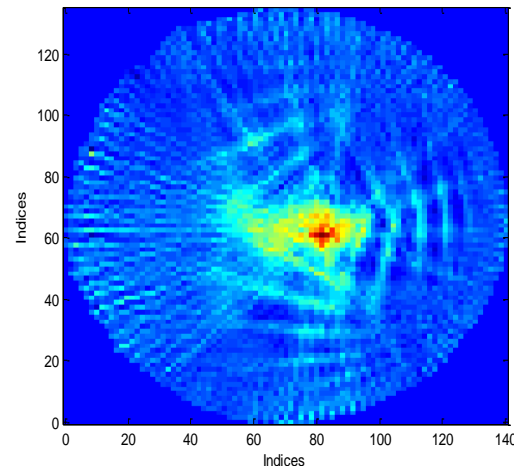
Imagerie : correction de l'artefact numérique



Avant correction



Après correction



Après correction
Calcul TOF modifié

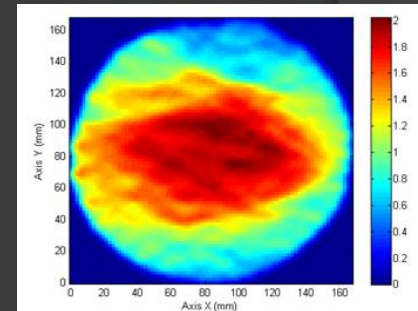
Annexe

○ Imagerie ultrasonore en transmission

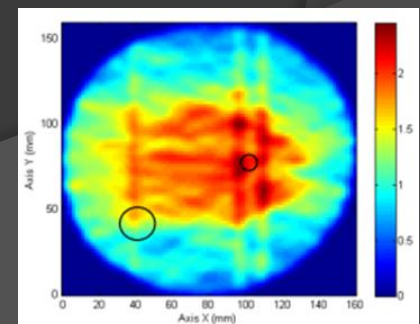
- Effet de l'écorce et de la présence de cavité
 - Epicéa (D ~15 cm)
 - Tomographié (55 kHz) : avec, sans écorce puis percé 1 cm et 2 cm



Lenteur (10^{-3} s/m), écorce



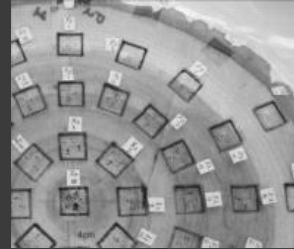
Lenteur (10^{-3} s/m), perçages



Modalités	Wilcoxon p (bilateral)
Ecorce – Sans écorce	
Vitesse	0.496
Atténuation	< 0.001
Perçage – Sans écorce	
Vitesse	0.126
Atténuation	0.998

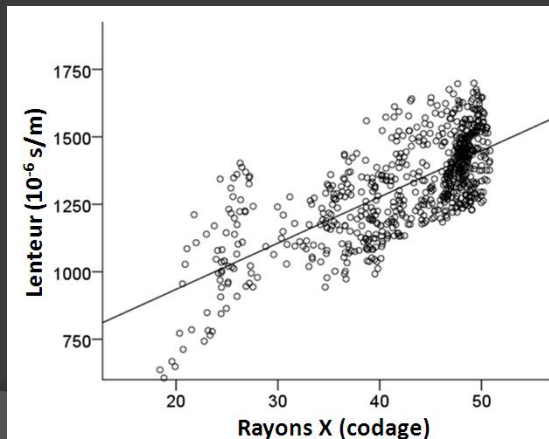
Annexe

- Présence de bois de réaction
 - Peuplier et épicéa (D ~30 cm)
 - Disques tomographié à 80 kHz (sans écorce), radiographiés X, échantillonnés (2x2x10cm³)

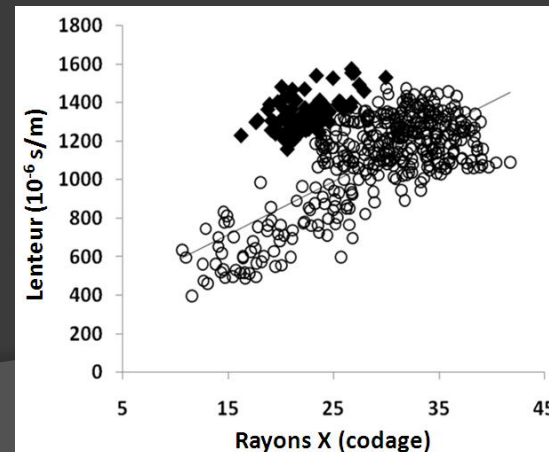


Paramètres ultrasonores	Bois normal Moyenne	Bois de réaction Moyenne	U test p-value
Peuplier			
Lenteur (10 ⁻⁶ s/m)	1328	1496	<0.001
Atténuation (dB)	-17.2	-18.3	0.016
Epicéa			
Lenteur (10 ⁻⁶ s/m)	1210	721	<0.001
Atténuation (dB)	-12.1	-6.8	<0.001

Peuplier



Epicéa



Annexe

⦿ Ratios d'anisotropie

Feuillus	ER/ET	Résineux	ER/ET
Bouleau	1.6	Séquoia	1.0
Frêne	1.6	Mélèze	1.2
Mahogany	1.7	Douglas	1.4
Peuplier Amérique	1.8	Pin	1.4
Chêne rouge	1.9	Cèdre rouge	1.5
Noyer	1.9	Pin	1.5
Erable	2.0	Pin	1.7
Erable	2.1	Epicéa	1.8
Peuplier	2.1	Pin	1.9
Mahogany	2.2	Pruche de l'Ouest	1.9
Chêne blanc	2.3	Pin	2.1
Cerisier	2.3	Cyprès	2.2
Liquidambar	2.3	Epicéa	2.2
Tilleul	2.4	Cèdre	2.3
Balsa	3.1	Sapin	2.6
Average	2.1	Average	1.7

Annexe

● Indicateurs synthétiques (2012)

	Nombre
Articles dans des revues à comité de lecture	27
Communications internationales avec actes	11
Ouvrages et chapitres d'ouvrage	2
Brevet, dépôt de marque et logiciel	5
Logiciels	3
Co-encadrements	12
étudiants	
thèses	3
thèses en cours	4

Annexe

◉ Actions de recherche actuelles

- Tomographie des bois sur pied (LMA-CIRAD; thèse de Andrés Arciniegas + dépôt d'un projet PRAD avec le Maroc)
- Modélisation de la croissance du Teck (AMAP-UR40, l'université de Lomé au Togo ; thèse de Sylvestre Kodjo Tondjo)
- Caractérisation mécaniques des charbons sous différentes conditions de pyrolyse (Alfredo Napoli UR 40 et UFLA Brésil ; thèse de Maïra Reis)
- Performance mécanique de Bio-composite Kenaf / epoxy-phenolic matrix (Institute Of Tropical Forestry and Forest Product, University Putra of Malaysia, Malaysie ; thèse de Fariborz Hashemi)

Annexe

- AMAP Botanique et bioinformatique de l'architecture des plantes

Caractérisation et analyse de la diversité, de la structure et de l'organisation des plantes et des peuplements végétaux

1 : « Diversité des Plantes et des Communautés Végétales »
Biogéographie et écologie

2 : « Architecture, Fonctionnement et Évolution des Plantes »

3 : « Organisation et Dynamique des Peuplements et des Paysages Végétaux »

Annexe

- Le comportement en grande déformation des petits axes (relation contrainte – conduction hydraulique) et des feuilles (rupture programmée des feuilles)
- La compréhension de la relation structure – comportement mécanique pour l'élaboration de nouveaux matériaux « bio-inspirés »
- L'analyse de la croissance se fera par l'intermédiaire de modèle 'structure-fonction' (modèle GreenLab). Prise en compte des variations de propriétés physiques et mécaniques