



HAL
open science

Caractérisation des bois sur pied par imagerie ultrasonore

Philippe Gallet, Loïc Brancheriau, Patrice Thaunay, Philippe Lasaygues

► **To cite this version:**

Philippe Gallet, Loïc Brancheriau, Patrice Thaunay, Philippe Lasaygues. Caractérisation des bois sur pied par imagerie ultrasonore. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00534627

HAL Id: hal-00534627

<https://hal.science/hal-00534627>

Submitted on 10 Nov 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Caractérisation des bois sur pied par imagerie ultrasonore

Philippe Gallet¹, Loïc Brancheriau¹, Patrice Thauunay¹, Philippe Lasaygues²

¹ Centre de recherche agronomique pour le développement CIRAD, 73, rue Jean-François Breton, 34398 Montpellier Cedex 05, France.

Philippe.gallet@cirad.fr, loic.brancheriau@cirad.fr, patrice.thaunay@cirad.fr,

² Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique LMA, CNRS, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille cedex 20, France
lasaygues@lma.cnrs-mrs.fr

Le bois est un milieu biologique en croissance. Ce milieu est orthotrope et son élaboration varie selon son âge mais également en fonction des conditions environnementales. Les variations des propriétés matérielles sont alors beaucoup plus complexes que l'anisotropie. Pour les arbres sur pied, des outils d'auscultation sont déjà disponibles sur le marché. L'objectif du projet de BioGMID est de créer un procédé efficace et optimisé pour la caractérisation et l'obtention d'image en coupe des arbres sur pied basé sur l'utilisation combinée des ultrasons et des rayons X. Une mesure ultrasonore convenablement combinée avec une mesure par rayons X devrait permettre une analyse à haute résolution qualitative et quantitative de la structure. Cet article a pour objet le développement d'un dispositif ultrasonore spécifique d'imagerie qui peut être utilisé dans les forêts tropicales de plantation. La caractérisation rapide des arbres de plantation peut être un outil utile pour le choix clonal et l'amélioration génétique.

1 Introduction

Les techniques non-destructives basées sur les rayons X et les ondes acoustiques se sont développées et adaptées au matériau bois à partir des années 60 [2]. Les principaux tomographes acoustiques tels que le « Picus Sonic » [6, 7] et Arbotom [4,5], sont basés sur la mesure de la vitesse de propagation du son dans la section transverse. Une limitation de ces outils est que seules les ondes transmises sont exploitées et le paramètre dominant mesuré est seulement la vitesse des ondes longitudinales, qui est un paramètre important, mais pas suffisamment sensible pour identifier les différentes zones et propriétés constitutives. Une amélioration de cette mesure serait d'utiliser ensemble la diffraction et la transmission des ultrasons. L'utilisation de la diffraction permet l'imagerie qualitative comme l'échographie. L'analyse de l'onde de transmission permet l'évaluation locale du module spécifique et l'atténuation interne (imagerie quantitative).

Le projet de recherche *BioGMID* (Biological Growth Medium Integrity Diagnoses using bi-modality tomographies) a pour objet le développement d'un outil méthodologique basé sur la tomographie par rayons X et par ultrasons. Premièrement, une approche qualitative peut être appliquée pour caractériser l'intégrité du matériau et deuxièmement une approche quantitative permet d'accéder aux propriétés physiques (densité, numéro atomique effectif, constante élastique). *BioGMID* se propose d'améliorer la compréhension des phénomènes d'interaction ondes/matériau. Cet article est orienté sur l'aspect ultrason du projet, particulièrement sur le développement d'un dispositif ultrasonore spécifique à l'imagerie des arbres sur pied.

2 Matériel végétal

Les premiers essais du dispositif ultrasonore ont été réalisés sur une rondelle de peuplier de 33cm de diamètre

moyen et de 10 cm de hauteur (Fig. 1). Le bois avait une humidité de 164 % et une masse volumique de 905 kg/m³ (contre 390 kg/m³ à 12%).



Figure 1 : Photographie de la rondelle de peuplier.

3 Méthodologie expérimentale

L'objectif est de développer un dispositif ultrasonore spécifique d'imagerie qui peut être utilisé dans les plantations de forêts tropicales. La caractérisation d'arbres de plantation, en termes de comportement mécanique et aussi de détection précoce des détériorations internes, pourrait être un outil utile pour la sélection clonale et l'amélioration génétique.

3.1 Dispositif de tomographie

Les principaux points du cahier des charges du dispositif sont :

- Poids compris entre 10 et 20 kg.
- Montage de l'équipement en quelques minutes.

- Alimentation par batterie.
- Diamètre des troncs de 15 à 50 cm.
- Deux transducteurs ultrasonores peuvent se déplacer autour du tronc séparément.
- Durée de scan entre 10 et 20 minutes (fonction de la résolution souhaitée).

Le CIRAD a conçu et réalisé cet équipement. La partie mécanique a été développée avec un logiciel de CAO, qui a permis de vérifier virtuellement toutes les fonctionnalités par rapport au cahier des charges. La partie électronique a été également conçue au CIRAD, incluant le générateur d'impulsions haute tension, la conversion analogique - numérique du signal, le contrôle - commande, avec ses pilotes spécifiques, de l'automatisation et de l'acquisition des données.

Le dispositif est constitué d'un anneau en aluminium supporté par trois pieds (Fig. 2). La hauteur de l'anneau peut être ajustée de 1 m à 1,6 m mais la hauteur typique est de 1,3m. Dans un premier temps, deux des trois parties de l'anneau sont assemblées ainsi que les trois pieds. Cet ensemble est alors placé contre le tronc en utilisant deux éléments de serrage. Chaque capteur est monté sur un chariot et les chariots sont insérés dans l'anneau. Enfin, la dernière partie de l'anneau est montée et le troisième élément de serrage est appliqué pour rendre l'anneau solidaire de l'arbre.

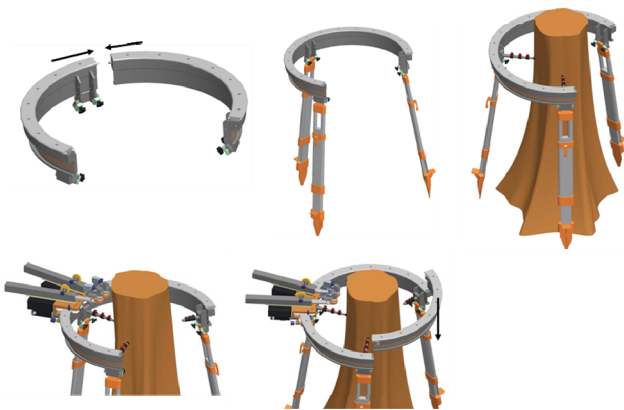


Figure 2 : Assemblage du dispositif.

L'image tomographique peut être obtenue par une analyse quantitative (deux transducteurs). L'analyse qualitative de type échographique a été discutée précédemment [1]. Concernant l'analyse quantitative, le processus d'un scan est montré à la Fig. 3. A cause des dimensions de chaque chariot, le secteur angulaire de 120° ne peut être scanné dans une projection (secteur rouge, Fig. 3). Un angle typique de 5° conduit à environ 48 points par projection. Pour un scan complet, le nombre total d'acquisition est ainsi de 3456. Pour une projection, l'émetteur reste en position pendant que le récepteur se déplace autour de l'anneau. La projection suivante est initiée par un pas angulaire et est suivie par un autre mouvement du récepteur autour de l'anneau (Une acquisition est effectuée à chaque pas angulaire).

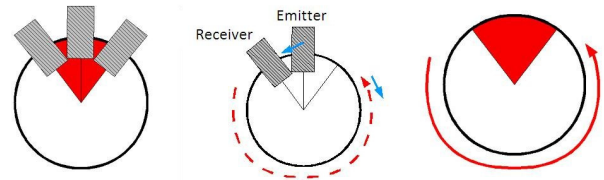


Figure 3 : Principe d'essai pour l'imagerie quantitative.

L'acquisition est effectuée par un convertisseur analogique numérique de 16 bits avec une fréquence d'échantillonnage réglable jusqu'à 5MHz et une mémoire de 128000 échantillons. L'émission est assurée par un générateur dont la tension, le nombre d'oscillations et leur durée sont paramétrables. Le transducteur est composé d'une roue dans laquelle est placé l'émetteur. Le couplant est fait d'un élastomère entourant la roue (Fig. 3).

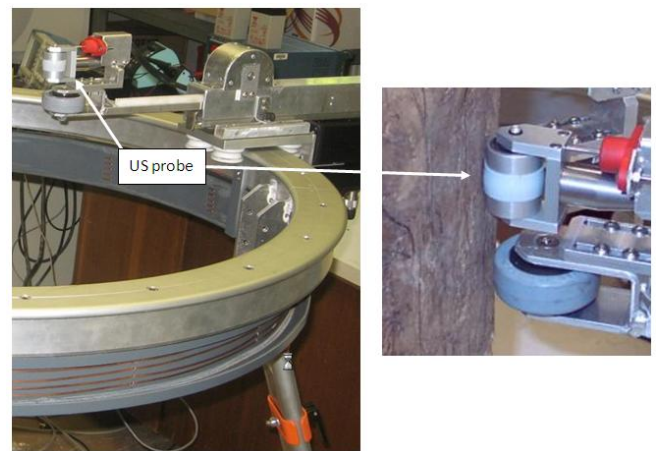


Figure 3 : Développement de l'équipement ultrasonore dans le laboratoire du CIRAD.

Les premiers essais ont été réalisés avec des transducteurs ultrasonores ayant une fréquence de fonctionnement centrée sur 300kHz. L'émission était une impulsion de 420V et de durée $1,6 \mu s$. Un gain de 101dB ne suffisait pas pour obtenir un signal exploitable sur un tronc de diamètre 30 cm à l'état vert. Plusieurs types de transducteurs avec des fréquences de fonctionnement différentes (300kHz, 150kHz et 80kHz) ont été testés. Seuls, les transducteurs de 80kHz ont permis d'avoir des signaux exploitables.

3.2 Conditions expérimentales

L'émission est composée de 10 oscillations de 420V d'amplitude avec des périodes de $12,5 \mu s$ (signal carré). L'amplification en sortie est réglée sur 66dB. L'acquisition est réglée sur 500kHz, 1024 points (16 bits). La fenêtre d'observation est de 2048 μs .

Les transducteurs utilisés pour la tomographie ont une fréquence de fonctionnement centrée sur 80kHz et un diamètre de 3,2cm. A cette fréquence et pour le bois, la résolution longitudinale et latérale est respectivement de 17,7 mm et 36,4 mm soit un quadrillage de $644mm^2$ (Fig.4).

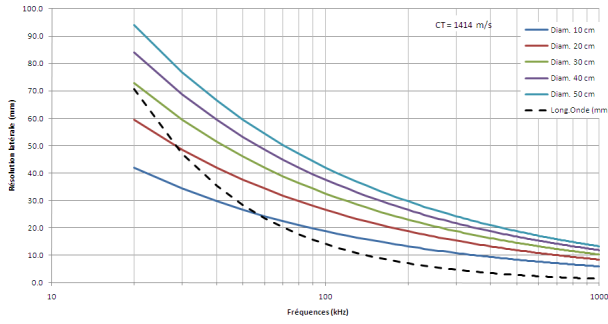


Figure 4 : Courbes théoriques de résolution longitudinale et latérale dans le plan transverse du bois.

Avec cette résolution, le pas angulaire est réglé sur 20° , soit 17 points par projection. Dans cette configuration, la surface sondée est divisible en 153 pixels soit, pour le diamètre du disque, un quadrillage de 576mm^2 .

4 Résultats

Pour chaque émission – réception, le signal est filtré par une ondelette de Morlet de fréquence 80kHz et de largeur 10kHz (bande passante à -3dB). Le temps de vol (τ) est estimé (Eq. 1) ainsi que le temps caractéristique (τ_{AT}) de la décroissance temporelle (Eq. 2).

$$\tau = 3,5(t_{Max} - t_0) \text{ en (s)} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec t_{Max} : temps associé au maximum de l'enveloppe, t_0 : temps associé au front montant de la première impulsion du train d'onde. Le coefficient (3.5) est issu de la calibration du dispositif ultrasonore sur un cube étalon d'aluminium.

$$|s_X(t)| \approx \beta_{Max} \text{Exp}\left(-\frac{t-t_{Max}}{\tau_{AT}}\right) \text{ et } \tau_{AT} \text{ en (s)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Pour $t \in [t_{Max}, \infty[$, avec $|s_X(t)|$: enveloppe temporelle, β_{Max} : amplitude maximum de l'enveloppe. A partir des ces paramètres du signal, la lenteur de propagation (L) et l'atténuation (A_{dB}) sont calculées (Eq. 3 et Eq. 4). Le coefficient d'atténuation est calculé en imposant une vitesse de propagation transverse de 1400 m/s.

$$L = \frac{\tau}{d_{AB}} \text{ en (s/m)} \quad (\text{Eq.3})$$

Avec d_{AB} : distance entre les transducteurs.

$$A_{dB} = -\frac{6,2 \cdot 10^{-3}}{\tau_{AT}} \text{ en (dB/m)} \quad (\text{Eq. 4})$$

Les grandeurs physiques (L , A_{dB}) respectent l'hypothèse de Radon et sont par conséquent sommables sur le rayon droit de propagation. Dans ce cas, une hypothèse forte d'isotropie transverse du matériau bois est faite. La cartographie quantitative des grandeurs physiques calculées est réalisée par inversion du modèle de Radon. Un algorithme de rétro - projection filtrée (filtre de Shepp - Logan) est utilisé sur une géométrie en éventail (Fig. 5). Les valeurs manquantes de chaque rétro - projection sont interpolées en cubic - spline.

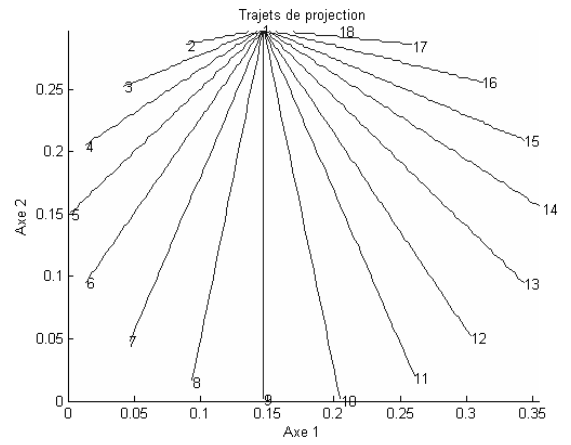


Figure 5 : Tomographie avec une géométrie en éventail, exemple des points de projection pour l'émetteur placé en première position.

	$L (\times 10^{-6})$	$A \text{ (dB)}$
Moyenne	1010	-15.9
Écart-type	554	5.2
Minimum	435	-51.3
Maximum	3179	-4.7

Tableau 1 : Statistiques descriptives des paramètres calculés (N=306).

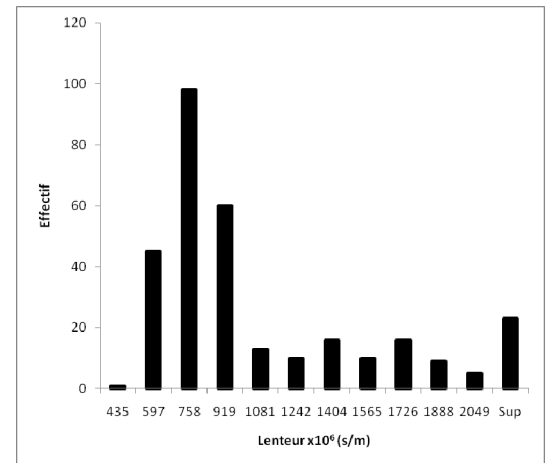


Figure 6 : Distribution des lenteurs ($\times 10^{-6}$).

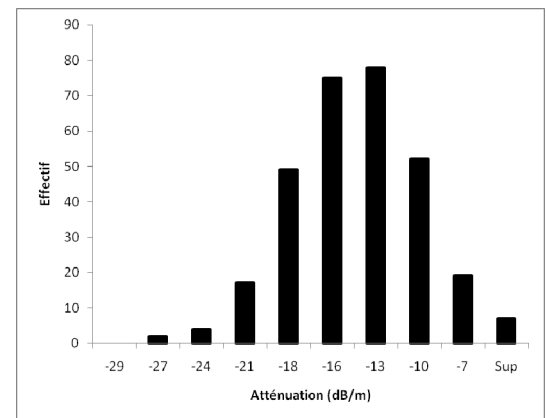


Figure 7 : Distribution des atténuations.

Le Tab. 1, la Fig. 6 et la Fig. 7 présente les statistiques descriptives des paramètres calculés. La valeur moyenne de la lenteur correspond à une vitesse de propagation

transverse de 990 m/s. L'atténuation moyenne mesurée est d'environ -16 dB/m. La distribution des atténuations montre une forme très proche de la loi normale (Fig. 7) alors que la distribution des lenteurs montre une dissymétrie prononcée vers la droite du graphique (plus forte lenteur).

Il est important de souligner que la fréquence dominante des signaux se situe en moyenne à 17667 Hz (écart type de 2240 Hz) alors que le train d'onde ultrasonore est centré sur 80kHz (de même que le filtre passe-bande). Cette différence de fréquence a pu engendrer des erreurs sur les déterminations des temps de vol lorsque la vitesse de propagation est plus faible (de l'ordre de 600 m/s), i.e. forte valeur de lenteur.

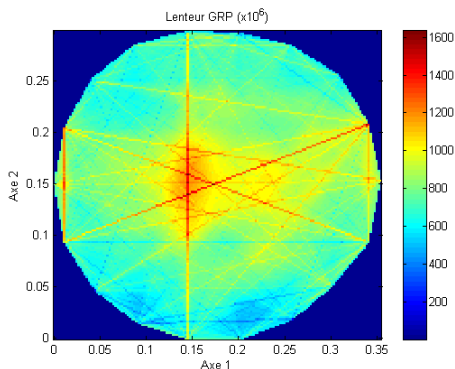


Figure 8 : Cartographie des lenteurs ($\times 10^{-6}$) dans la section de peuplier.

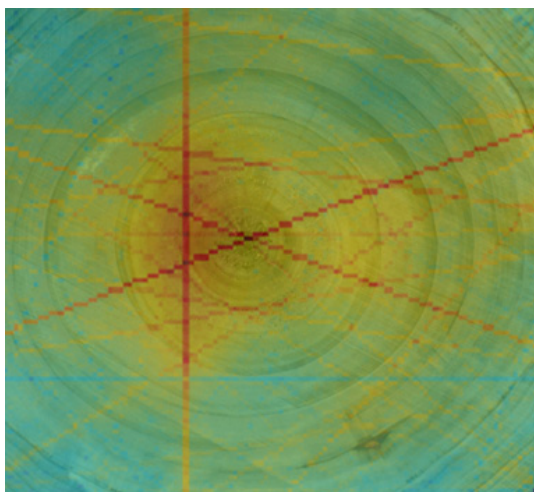


Figure 9 : Superposition par transparence de la zone de plus faible lenteur et du disque de peuplier.

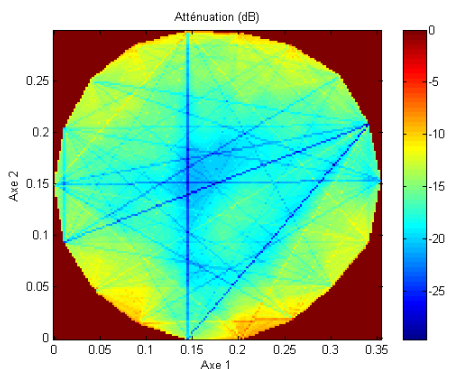


Figure 10 : Cartographie des atténuations dans la section de peuplier.

Les Fig. 8, 9 et 10 montrent les cartographies obtenues par inversion des projections expérimentales. Le nombre optimal de pixels dans la zone étudiée est de 153 (au regard des résolutions physiques longitudinales et latérales), ce qui implique un nombre optimal de pixels de l'image de 16x16. Dans le cas des figures présentées, les images ont pour taille 160x160 afin d'augmenter leur lisibilité.

Sur la Fig. 8 comme sur la Fig. 10, une zone de plus faible lenteur et de plus forte atténuation est nettement visible. Les paramètres de lenteur et d'atténuation sont calculés de manière indépendante (Eq. 3 et 4) et leur niveau de liaison statistique est relativement faible ($R^2=0.18$). Cette zone dite de "faiblesse" est située très près du centre du disque (Fig. 9). La photographie ne permet cependant pas de voir que le centre du disque est en effet dégradé ; il est de plus traversé par des fissures ténues (constatation visuelle avant l'essai). Les cartographies obtenues confirmeraient donc cette observation visuelle, cependant, compte tenu de la résolution spatiale (17,7mm x 36,4mm), il est impossible de déterminer précisément la taille de la dégradation.

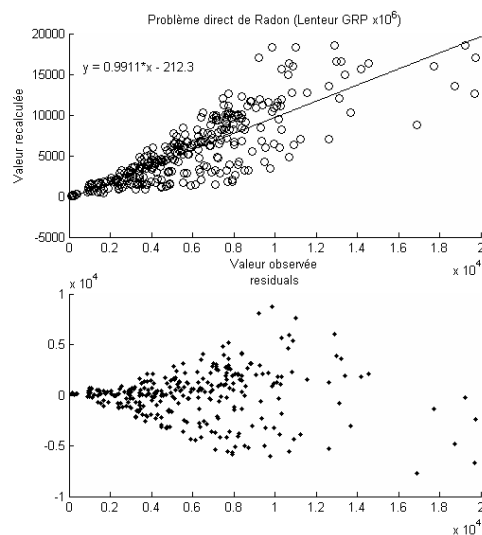


Figure 11 : Qualité de la reconstruction des lenteurs ($\times 10^{-6}$), relation entre points de projection mesurés et points de projection calculés (Radon direct), $R^2 = 0.68$.

Les Fig. 11 et 12 permettent d'évaluer la qualité de la reconstruction tomographique selon le modèle de Radon. Sur ces figures, il s'agit de mettre en relation les valeurs des points de projection obtenues directement par l'expérience et les valeurs calculées (par sommation des valeurs associées à chaque pixel selon le problème direct de Radon). Ces figures montrent que le degré de liaison entre valeur observée et valeur calculée est très fort ($R^2=0.68$, Fig. 11 et $R^2=0.78$, Fig. 12). Cependant l'analyse des résidus montre un phénomène d'hétéroscédasticité marqué pour les lenteurs : la variance de l'erreur augmente avec la valeur de la lenteur. Cette remarque tend à prouver que les fortes valeurs de lenteur sont mal estimées (au contraire de l'atténuation où les erreurs sont normalement distribuées).

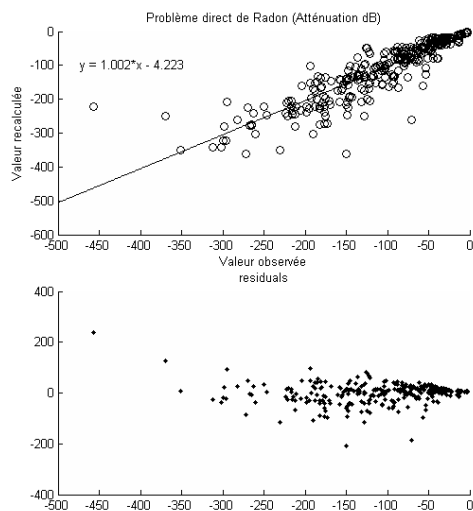


Figure 12 : Qualité de la reconstruction des atténuations, relation entre points de projection mesurés et points de projection calculés (Radon direct), $R^2 = 0.78$.

5 Conclusion

Cet article a présenté les premiers résultats obtenus avec un dispositif spécifique pour la tomographie ultrasonore des arbres sur pied. Ce dispositif est développé dans le cadre du projet BioGMID qui vise à obtenir un procédé efficace et optimisé pour la caractérisation et l'obtention d'image en coupe transversale par utilisation des ultrasons mais aussi des rayons X.

Dans le cas de cette expérience, l'émission ultrasonore est un train d'onde carré de 80kHz (420V), l'amplification en sortie est de 66dB. A cette fréquence et dans le bois, la résolution est de 17,7mm x 36,4mm, soit un quadrillage de 644mm². L'objet d'étude est un disque de peuplier de 33 cm de diamètre et de 10 cm d'épaisseur à l'état saturé en eau.

Les cartographies réalisées ont été calculées selon le modèle de Radon en rétro - projection filtrée avec une géométrie en éventail. Les paramètres physiques concernés sont la lenteur de propagation (s/m) et l'atténuation (dB/m). Les cartographies de ces paramètres sont a priori en accord avec les constatations visuelles (présence d'une dégradation centrale et démarrage de fissuration également au centre). L'analyse des reconstructions quantitatives a également mis en évidence que l'erreur de calcul augmente avec l'augmentation de la lenteur. Ce phénomène ne se produit pas pour les atténuations.

Partenaires

Les partenaires travaillant sur l'aspect bois du projet BioGMID ont une expérience significative de l'imagerie et de la tomographie dans le milieu biologique : LMA (Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique), CNDRI (INSA Lyon, Laboratoire ode Contrôle Non Destructif par Rayonnements Ionisants) et CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, unité production et valorisation des bois tropicaux unité).

Remerciements

Cette recherche est soutenue par une subvention de l'Agence Nationale Française de Recherche (BLAN07-1_183692, "BioGMID").

Références

- [1] Brancheriau L., Lasaygues P., Debieu E., Lefebvre JP. (2008) *Ultrasonic tomography of green wood using a non-parametric imaging algorithm with reflected waves*, Annals of Forest Science, Vol. 65, N°7, pp. 712-718.
- [2] Bucur, V. (2003) *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*, Springer-Verlag, Berlin, 324 p.
- [3] Divos, F. (2000) *Stress wave based tomography for tree evaluation*. Proc. Of 12th Int. Symposium on NDT of Wood, Sopron 13-15 Sept. 2000: 469.
- [4] Rinn, F. (2003) *Technische Grundlagen der Impuls-Tomographie*. Baumzeitung 8:29-31.
- [5] Rinn, F. (2004) *Holzanatomische Grundlagen der Schall-Tomographie an Ba ́umen*. Neue Landschaft 7:44-47.
- [6] Rust, S. (2000) *A new tomographic device for the non - destructive testing of trees*, 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, University of Western Hungary, Sopron, 233-237.
- [7] Rust, S., G6cke L. (2000) *PICUS Sonic Tomograph - a new device for nondestructive timber testing*. International Symposium on Plant Health in Urban Horticulture, Braunschweig, Germany, 300.