



## **Comparaison de méthodes de détection de temps de vol adaptées à la tomographie ultrasonore des arbres sur pied**

P. Lasaygues<sup>a</sup>, A. Arciniegas<sup>a</sup> et L. Brancheriau<sup>b</sup>

<sup>a</sup>LMA - CNRS, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France

<sup>b</sup>CIRAD, UR BioWooEB, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier Cedex 5, France

lasaygues@lma.cnrs-mrs.fr

Parmi les modalités de contrôle non destructif des arbres sur pied, les méthodes par impact, basées sur la détermination de la vitesse de propagation d'une onde dans le plan transverse du tronc, sont considérées comme des modalités classiques de référence. Les outils commerciaux sont généralement basés sur l'utilisation d'un marteau à impulsions (chocs) pour l'émission, et sur des capteurs basse fréquence pour la réception. Les signaux enregistrés sont traités pour déterminer les temps de propagation (TOF). Il existe plusieurs algorithmes mais, à notre connaissance, aucune étude comparative n'a été menée sur différentes méthodes de mesure. Dans cet étude, nous comparons quatre procédures de détection de TOF à partir de mesures expérimentales sur des échantillons de résine et de bois.

## 1 Introduction

Les modalités d'imagerie des arbres sur pied permettent de rechercher des défauts internes comme des zones d'altérations liées à la présence de champignons ou d'insectes. Elles peuvent être classées en fonction de la longueur d'onde caractéristique du rayonnement ; rayons gamma/x, infrarouge, micro-ondes, ondes élastiques. En tomographie acoustique, les méthodes par impact, basées sur la détermination de la vitesse de propagation d'une onde dans le plan transverse du tronc, sont considérées comme des modalités classiques de référence. Les outils commerciaux sont généralement basés sur l'utilisation d'un marteau à impulsions (chocs) pour l'émission, et sur des capteurs basse fréquence pour la réception. Les signaux enregistrés sont traités puis mis en forme pour l'interprétation, en principe sous forme d'image 2D. La résolution des images dépend de la longueur d'onde, du nombre de capteurs (résolution spatiale), de l'algorithme d'inversion, et très sensiblement de la précision sur la mesure du temps de propagation de l'onde (time-of-flight, TOF) entre les émetteurs et les récepteurs. Sur les dispositifs commerciaux, les algorithmes sont basés sur la mesure de la puissance instantanée en prenant le premier point au-dessus d'un niveau de seuil de bruit. Une autre approche consiste à déterminer un seuil proportionnel à l'amplitude maximale du signal temporel. D'autres utilisent le critère d'information d'Akaike. Il n'existe pas d'étude comparative, et dans le cadre du développement de notre tomographe ARB'UST, nous avons mené une étude comparative de quatre procédures de détection de TOF, sachant que les procédures doivent être optimisées pour l'examen in situ des arbres (compromis entre la résolution des images et le temps de traitement). L'étude est menée à partir de mesures expérimentales sur des échantillons de résine et de bois.

## 2 Protocole expérimental

L'intérêt principal de ce travail est d'étudier la sensibilité de méthodes de détection de temps de vol d'une onde ultrasonore à travers un échantillon parallélépipédique (lame à faces parallèles,  $L \times l = 100 \times 100$  mm). Les méthodes ont été comparées expérimentalement, en cuve remplie d'eau, sur un premier échantillon isotrope de résine, et sur deux échantillons de bois. La fréquence nominale retenue pour l'onde est de 500 kHz. La longueur d'onde est plus petite que l'épaisseur des échantillons (environ 10 - 20 mm), et nous négligeons les échos multiples à l'intérieur de l'échantillon. Seule les phénomènes de propagation seront pris en compte, et nous ferons abstraction des autres phénomènes physiques. L'incidence du faisceau acoustique sera supposée normale à l'interface eau/échantillon, et sous cette condition, seules les ondes de compression sont prises en compte. Les phénomènes d'atténuation ne sont pas

analysés. Seul le temps de vol de l'onde, et du premier signal est étudié.

## 3 Les échantillons

L'échantillon isotrope est fabriqué à base de résine et la vitesse des ondes de compression de référence est de 2300 m/s. L'épaisseur est de 18 mm. Deux échantillons de bois ont également été testés : *Tatajuba* (*Bagassa guianensis*), la vitesse des ondes de compression de référence est 2001 m/s ; pour une épaisseur de 9,99 mm ; *Iroko* (*Milicia excelsia*), la vitesse des ondes de compression de référence est 1670 m/s ; pour une épaisseur de 9,35 mm. Les vitesses de référence sont mesurées par intercorrélation entre le signal transmis sans objet et avec l'objet suivant une méthode classique [1].

### 3.1 Méthodes de calcul

Le retard  $\Delta t$  est calculé par différence entre deux temps de vol mesurés sur les signaux ( $\Delta t = t_1 - t_0$ ) avec  $t_0$ : le temps de référence du signal sans échantillon, et  $t_1$ : le temps mesuré avec l'échantillon. Le temps de référence est une moyenne obtenue à partir de 100 signaux avec un rapport signal sur bruit (SNR) de +30dB. Les temps  $t_1$  sont déterminés sur 100 signaux enregistrés pour un rapport SNR donné, en utilisant les algorithmes suivants :

1. La méthode dite du "*critère de seuil*" (Threshold) est la plus utilisée en CND des arbres. Le temps est mesuré au point où l'enveloppe du signal analytique associé est supérieure au bruit [2, 3]. Le seuil dépend de l'estimation des propriétés statistiques du bruit ou est proportionnel à la valeur maximale de l'amplitude du signal temporel [4, 5]. Dans cette étude, nous avons choisi un seuil 5 fois l'écart-type du bruit.

2. Le "*critère de Akaike*" (AIC) repose sur l'hypothèse qu'une série temporelle discrète peut être divisée en segments localement stationnaires (chaque segment étant modélisé par un processus autorégressif). La méthode a été utilisée initialement en géophysique pour déterminer les temps de propagation des ondes longitudinales et transversales [6]. Pour un ordre fixé du modèle autorégressif, le point où le critère est minimum, donne la valeur de l'écart optimal entre deux séries temporelles du bruit et du signal. Le critère est défini par l'équation suivante [7, 8] :

$$AIC[k] = k \cdot \log(\text{var}(x[1, \dots, k])) + (N - k) \cdot \log(\text{var}(x[k + 1, \dots, N])) \quad (1)$$

avec  $x[k]$  le signal à l'indice  $k$ ,  $N$  la longueur du signal et  $\text{var}$  la variance.

3. Le "critère de Hinkley" (Hinkley) est une méthode utilisée en contrôle du béton [9, 10, 11]. Elle est basée sur la minimisation de l'énergie partielle du signal, avec un paramètre  $\alpha$  de normalisation (Kurz et al. 2005) :

$$S[k] = \sum_{p=1}^k (x_p^2) - \frac{k}{\alpha \cdot N} \sum_{p=1}^N (x_p^2) \quad (2)$$

Pour  $\alpha = 1$ , le critère repose sur l'analyse de la puissance instantanée du signal et le temps est déterminé à l'indice  $k$  lorsque la puissance instantanée est supérieure à la puissance moyenne du signal.

4. Le "critère de la variance de Fisher" (Fisher) a été établi exceptionnellement pour cette étude. Il est basé sur la comparaison de la variance entre deux segments identiques du signal :

$$F[k] = \frac{\text{var}(x[k, \dots, k+n-1])}{\text{var}(x[k+n, \dots, k+2n-1])} \quad (3)$$

Dans notre cas, la variable  $n$  est choisie égale à 30.

### 3.4 Résultats

La vitesse  $C$  dans le matériau a été déterminée par l'équation (4) avec  $C_0$  la vitesse des ultrasons dans l'eau,  $\Delta t$  le retard entre les deux signaux et  $L$  l'épaisseur du matériau.

$$C = \frac{C_0}{1 + \frac{C_0 \Delta t}{L}} \quad (4)$$

Les figures 1, 2 et 3 représentent la vitesse moyenne des ondes de compression en fonction du rapport signal à bruit, pour respectivement, les parallélépipèdes rectangles de résine, et de bois, *Tatajuba* et *Iroko*.

La vitesse moyenne pour chaque valeur SNR est calculée à partir de l'équation (4), en utilisant la valeur moyenne du  $t_1$  associée.

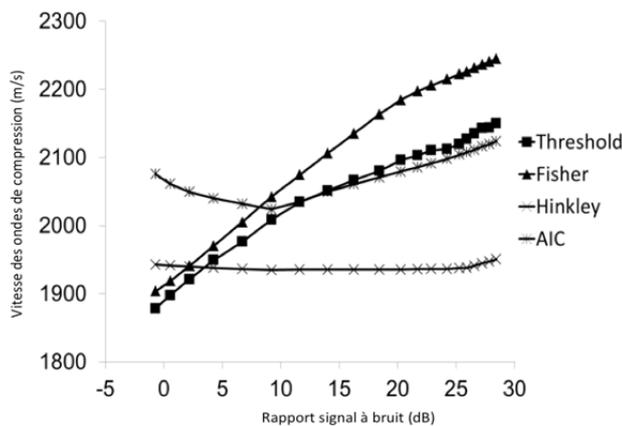


Figure 1: Vitesses moyennes (100 signaux par SNR) des ondes de compression dans un parallélépipède rectangle de résine de 18 mm d'épaisseur.

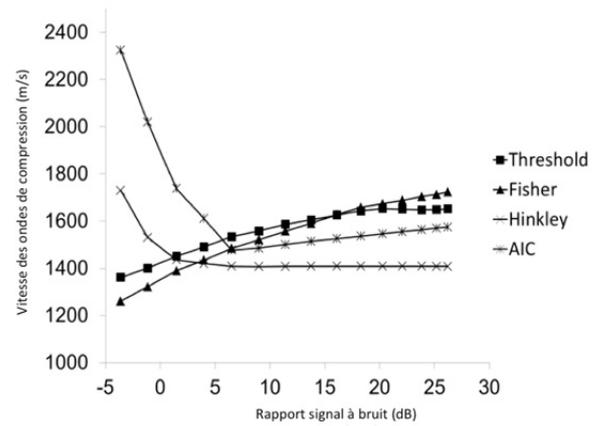


Figure 2: Vitesses moyennes (100 signaux par SNR) des ondes de compression dans un parallélépipède rectangle de bois (*Tatajuba*) de 9,35 mm d'épaisseur.

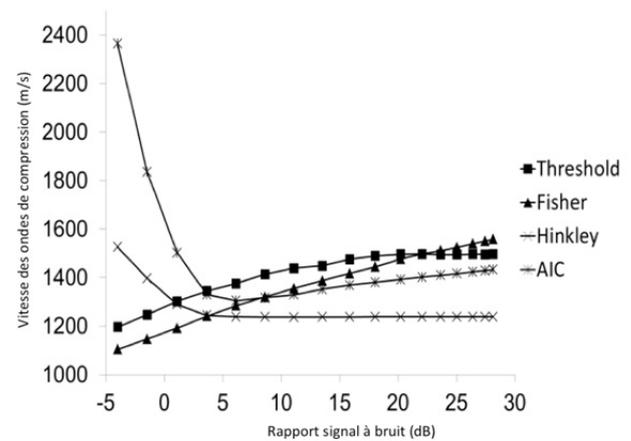


Figure 3: Vitesses moyennes (100 signaux par SNR) des ondes de compression dans un parallélépipède rectangle de bois (*Iroko*) de 9,35 mm d'épaisseur.

On peut remarquer immédiatement que les méthodes de détection des temps de vol  $t_1$ , et donc de la vitesse des ondes de compression dans l'échantillon, convergent lorsque le niveau de bruit diminue, vers une valeur limite, proche de la vitesse de référence déterminée par intercorrélacion entre la mesure avec et sans échantillon (2300 m/s pour la résine, 2001 m/s pour la *Tatajuba* et 1670 m/s pour l'*Iroko*).

Toutes les méthodes dépendent de l'estimation des propriétés statistiques du bruit. Plus le bruit est important (SNR petit), moins bonne est la mesure, et l'écart par rapport à la valeur de référence est grande. Malgré tout, les méthodes "Threshold" et "Fisher" résistent mieux que les deux autres, "AIC" et "Hinkley", même si la méthode "Hinkley" reste en moyenne stable sur la plage des rapports signaux à bruit (le paramètre  $\alpha$  de normalisation permettant de réduire le biais, ici  $\alpha$  est égal à 1). Le comportement des méthodes diffèrent entre l'échantillon de résine et les échantillons de bois. Les échantillons de bois sont anisotropes et plus hétérogènes que l'échantillon de résine qui est isotrope. Dans cette expérience, le bruit que nous faisons varier, est un bruit électronique ajouté au produit de convolution entre la réponse impulsionnelle de l'objet et le signal envoyé. Dans le cas de la résine, l'objet se comporte comme un filtre linéaire, et les hypothèses de propagation sont satisfaites alors que pour les échantillons de bois, un

bruit intrinsèque à la réponse de l'objet, lié aux propriétés matérielles, perturbe le comportement des méthodes statistiques. En effet, le calcul du temps de vol dépend des propriétés statistiques locales des signaux qui varient alors suivant le point d'analyse. Les signaux enregistrés à travers les échantillons de bois, sont plus bruités que ceux ayant traversés l'échantillon de résine. Les valeurs des rapports signaux à bruit déterminés en abscisse correspondent à des moyennes calculées sur les 100 signaux enregistrés. Dans le cas de l'échantillon de résine, l'écart-type sur les mesures SNR était faible, alors qu'il est plus important pour les échantillons de bois. Les signaux bruts étaient bien plus bruités.

Les méthodes "Hinkley" et "AIC" ont donc tendance à moins bien résister à de faibles rapports signaux à bruit ( $SNR < 10$  dB) et le biais systématiques (écart par rapport à la mesure de référence) est plus important. Ceci a déjà été observé par Zhang (2003). Lorsque le SNR est trop faible, la puissance du signal est alors égale à la puissance du bruit et il est impossible de déterminer le point d'arrivée avec un critère de "Hinkley".

La même remarque peut être faite pour la méthode "AIC". Avec cette méthode, il s'agit de comparer successivement la variance de la partie gauche avec la variance de la partie droite du signal. Dans le cas où la durée utile du signal est petite comparée à la durée totale de l'acquisition et en présence d'un fort niveau de bruit, les variances sont égales et la détermination du point d'arrivée est impossible.

La méthode "Threshold" est gouvernée par le paramètre multiplicateur de l'écart-type du bruit. Si ce paramètre est petit, le biais systématique sera petit également mais l'écart-type de la mesure par rapport à la vitesse de référence (à SNR donné) sera très grand car la probabilité pour se trouver dans le bruit sera grande. Les mesures expérimentales qui ont pu être réalisées en laboratoire sur petits échantillons (en cuve ou en contact) mais aussi en tomographie ont permis de trouver un compromis acceptable avec un paramètre égal à 5 (valeur fixée dans cette étude).

La méthode "Fisher" est bien adaptée lorsque le SNR est faible. Elle donne des résultats acceptables même lorsque le signal est quasiment noyé dans le bruit. Cette méthode est gouvernée par la taille des segments d'analyse. La taille est fixée à 30 points dans cette étude pour permettre une estimation acceptable des variances. La taille du segment doit être inférieure à la durée utile du signal (partie déterministe du signal). L'inconvénient est que la taille d'un segment délocalise le point d'arrivée dans le temps. Cette méthode détermine si 2 segments consécutifs sont différents mais le point d'arrivée dans le deuxième segment peut être n'importe où. Il est ici fixé au milieu du 2<sup>ème</sup> segment.

## Conclusion

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la conception et du développement d'un prototype d'imagerie ultrasonore pour le contrôle non destructif des modifications géométriques et structurelles internes des arbres sur pied. À terme, ce prototype et le protocole associé seront proposés aux exploitants et aux gestionnaires forestiers (agriculture, exploitation industrielle, sécurité urbaine) et devra permettre de diagnostiquer la présence de défauts et/ou d'altérations importantes agissant sur la santé et la vitalité

des arbres. Ces contraintes d'exploitation du système et particulièrement le compromis temps de traitement / qualité des images obtenues, ou encore le choix d'une électronique au plus bas coût possible nécessitent de réfléchir aux procédures de traitement et de reconstruction. L'algorithme de tomographie acoustique retenu pour cet appareil est de type fan-beam, c'est à dire un émetteur en contact transmet une onde dans la section de l'arbre qui est ensuite réceptionné en plusieurs points sur un secteur angulaire opposé. Sur le sinogramme des signaux numérisés, on détermine la projection des temps de vol de chaque onde entre l'émetteur et chacun des récepteurs. La matrice des projection sera inversée pour obtenir l'image suivant un algorithme d'inversion ad hoc. Pour la détection des temps de vol, il existe plusieurs algorithmes, dont certains sont aujourd'hui implémentés sur des dispositifs commerciaux dédiés à l'imagerie des arbres. Dans ce travail, nous proposons une étude de 4 algorithmes basés sur l'analyse statistique du bruit et/ou de la puissance instantanée des signaux. Dans le cas particulier d'un rapport signal sur bruit variable, la méthode appropriée est alors celle qui permet de déterminer un temps de vol moyen (donc une vitesse moyenne) le plus constant possible, et une erreur de détermination la plus faible possible. La méthode "Hinkley" apparaît être la meilleure méthode lorsque le SNR est supérieur à 10 dB, et la méthode "Fisher" semble être mieux adaptée pour des signaux plus bruités. Il serait alors intéressant d'approfondir l'étude par une analyse statistique des biais et des écart-types (biais aléatoires) sur les résultats pour chacune des méthodes proposés, sur une plage plus importante de SNR, et pour différentes conditions expérimentales, et de tester des algorithmes combinant plusieurs méthodes. Par exemple, vérifier si la méthode de "Fisher" ne permettrait pas d'identifier une partie du signal dans laquelle se trouve le temps recherché, et utiliser une autre méthode ("Hinkley" par exemple) sur cette partie pour déterminer le temps-de-vol.

## Références

- [1] Henry M., Ayrault C., Castagnède B., Fellah Z., Depollier C., Fellah M., Lauriks W., Sahraoui S., Metrology of Physical Parameters of Absorbing Materials. In Materials and Acoustics Handbook, Bruneau M and Potel C, eds., ISTE, London, UK. (2010)
- [2] Beall F., Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology* 36:197-212. (2002)
- [3] Bucur V., *Acoustics of Wood*. Springer Series in Wood Science, 2nd edition. (2006)
- [4] Kanda S., Shioya K., Yanagiya Y., Tamura Y., Adachi K., Ultrasonic TOF-CT system for wooden pillars. *Ultrasonics Symposium, IEEE* 1:743-746. (1998)
- [5] Yanagida H., Tamura Y., Kim K.M., Lee J.J. Development of ultrasonic time-of-flight computed tomography for hard wood with anisotropic acoustic property. *Japanese Journal of Applied Physics* 46:5321-5325 (2007)
- [6] Sleeman R., Van Eck T., Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 113(1-4):265-275, (1999)
- [7] Maeda N., A method for reading and checking phase times in autoprocessing system of seismic wave data.

---

*Journal of the Seismological Society of Japan* 38:365-379, (1985)

[8] Zhang H., Thurber C., Rowe C., Automatic p-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America* 93:1904-1912 (2003).

[9] Hinkley D., Inference about the change-point from cumulative sum tests. *Biometrika* 58:509-523. (1971)

[10] Grosse C., Reinhardt H.W., Schallemissionsquellen automatisch lokalisieren: *Entwicklung eines algorithmus. Materialprüfung* 41(9):342-347. (1999) (en allemand)

[11] Kurz J. H., Grosse C. U., and Reinhardt H.-W., "Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete.", *Ultrasonics* 43, 538–546 (2005).