

Méthodes pour le diagnostic de l'intégrité des structures bois et des arbres sur pied

Michele Brunetti¹, Loïc Brancheriau², Michela Nocetti¹, Giovanni Nicolotti³

¹CNR-IVALSA, Via Madonna del Piano 10, I-50019 Sesto Fiorentino (FI), brunetti@ivalsa.cnr.it

²CIRAD, UR Bois Tropicaux, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier, loic.brancheriau@cirad.fr

³University of Torino-DIVAPRA, Via L. da Vinci 44, I-10095 Grugliasco (TO), giovanni.nicolotti@unito.it

Nos forêts sont une ressource extrêmement précieuse. En effet les forêts constituent une source renouvelable de matières premières pour un éventail toujours croissant de produits en bois et fibres. Les aspects génétiques et les facteurs environnementaux causent toutefois une grande variabilité dans le matériau bois. Par conséquent, le bois est difficile à transformer en produits de qualité constante en raison de la variabilité des propriétés de cette matière première. L'évaluation non destructive (NDE) est la science de l'identification des propriétés physiques et mécaniques d'un morceau de matière sans en altérer les possibilités d'utilisation finale et avec le but d'utiliser ensuite cette information pour prendre des décisions concernant les applications appropriées. Grâce au développement de l'utilisation des technologies de NDE, des progrès ont été accomplis dans le classement d'une variété de matériaux à base de bois et des produits utilisés dans le domaine structurels et non structurel. Cet article est écrit du point de vue de celui qui suit le développement de ces techniques, principalement sous forme de procédures pour l'évaluation non destructive. L'article est divisé en trois parties principales. La première partie présente les différents objectifs de NDE pour le bois comme arbre sur pied. La deuxième partie présente quelques applications des essais acoustiques pour les sciages en structure. La troisième partie est centrée sur le bois en place.

1 Introduction

Les propriétés du bois sont extrêmement variables en fonction de plusieurs facteurs. Conséquence de son origine biologique, le matériau bois est caractérisé par : une variabilité de ses caractères intrinsèques, son hygroscopicité, son anisotropie et son altération puis sa dégradation biologique. La variabilité des propriétés du bois se rencontre entre les différentes essences, dans une même essence, en fonction des conditions environnementales (sol, température, précipitations...) et en fonction des conditions de "culture". Les différences peuvent alors être importantes (bois juvénile, bois de réaction, aubier, duramen). C'est en raison de cette forte variabilité que la connaissance des propriétés du bois devient indispensable en fonction des utilisations finales du matériau et pour en optimiser l'emploi. D'autre part, l'utilisation importante du bois au cours des âges (bâtiments, bateaux, peintures, statues et autres ouvrages de notre patrimoine culturel) pose la question de vérifier constamment et d'une façon non destructive l'état de conservation des éléments bois.

En Italie, il existe de nombreux exemples d'utilisation du bois dans le patrimoine historique et culturel. De plus, l'industrie italienne de transformation du bois est aujourd'hui encore importante et il existe une forte demande de qualification des produits à base de bois : par exemple, les Normes Techniques Italiennes imposent, depuis juillet 2009, les classements selon la résistance du bois pour une utilisation en structure.

Dans le but de caractériser le matériau bois, de l'arbre sur pied jusqu'aux produits finis ou semi-finis, l'utilisation des techniques non-destructives est devenue une nécessité et son importance augmente avec l'évolution de la normalisation.

Cet article présente, dans le cadre des expériences des auteurs, quelques cas d'application des techniques non-destructives aux différents niveaux de la filière de transformation du bois :

1. Evaluation des arbres sur pied (pour les deux aspects stabilité de l'arbre et qualité du bois).
2. Caractérisation du bois en vue de son utilisation en structure (classement en résistance des poutres de charpente).
3. Evaluation des éléments bois en service (poteaux en contact avec l'eau de mer, structures anciennes) et de bois dit «fossile».

2 Evaluation des arbres sur pied

2.1 Stabilité mécanique des arbres

La stabilité mécanique des arbres sur pied est déterminée notamment par le degré de détérioration de la structure transversale du tronc. Le but de l'analyse est de détecter les altérations (champignons, insectes), de les localiser et de mesurer approximativement leur forme et leur étendue. L'analyse doit être totalement non destructive et doit permettre d'assurer la sûreté des personnes.

Une technique utilisée est la tomographie par ultrasons (Fig. 1) : à partir de la mesure du temps de propagation des impulsions ultrasonores (générées avec un appareil portable, AU 80 *Sattec*, équipé de deux transducteurs de fréquence 1 MHz), il a été possible de détecter l'état de dégradation de la section transversale d'un arbre (hêtre) en reconstituant une cartographie interne 2D et 3D. Pour surmonter le problème de l'atténuation du signal, un émetteur à haute énergie et une amplification du signal reçu a été utilisé. Dans le cas d'un signal trop atténué, une

analyse en fréquence a permis de choisir un filtre pour augmenter le rapport signal sur bruit.

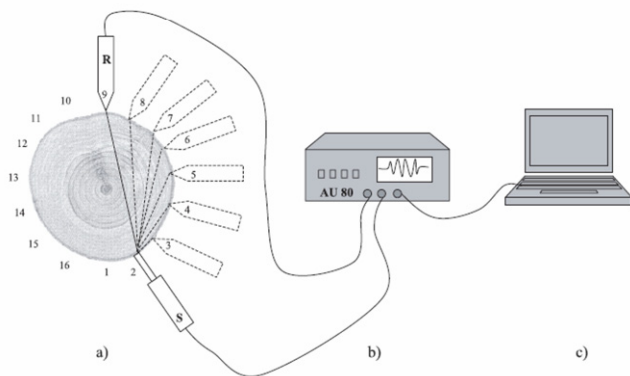


Figure 1 : Schéma d'acquisition des signaux ultrasonores [1]; (a) mesures sur la section d'un arbre; (b) lecture des temps; (c) reconstruction tomographique. S : transducteur source; R: transducteur récepteur.

Pour réaliser les images tomographiques (Fig. 2), le logiciel *Migratom*®, issu du domaine de la géophysique, a été utilisé. Avant de procéder à l'inversion tomographique, un traitement des données a été effectué : la section du tronc a été virtuellement divisée en plusieurs pixels puis une valeur de vitesse calculée par le logiciel a été attribuée à chaque pixel. Pour déterminer la distribution des vitesses dans la section, le logiciel utilisait un algorithme itératif, c'est-à-dire qui modifie la solution initiale (qui correspond à une hypothèse initiale sur la distribution des vitesses dans les pixels) jusqu'à convergence vers la solution "optimale" souhaitée. Pour chaque itération, le vecteur des temps de propagation calculé – obtenu en modélisant la propagation de l'impulsion ultrasonore à l'intérieur de la section 2D hétérogène – est comparé avec les temps mesurés puis les

valeurs des vitesses pour chaque pixel sont optimisées avant une nouvelle itération. Les itérations sont arrêtées lorsque l'on aboutit à une valeur préfixée de l'écart type entre les temps expérimentaux et les temps calculés ou quand une valeur limite est atteinte. Le résultat final est l'image tomographique de la section de l'arbre, où les zones correspondantes du bois non dégradé sont caractérisées par des valeurs de vitesse de propagation des ultrasons plus élevées, tandis que les zones dégradées sont représentées par de plus faibles valeurs de vitesse. Une relation similaire a été établie sur des éprouvettes attaquées en laboratoire par différents agents pathogènes.

La reconstruction de l'image tridimensionnelle à partir de trois tomogrammes en 2D de la distribution des vitesses (Fig. 2) a été faite par le logiciel *Fortner*®. Cette image est très parlante, et elle montre l'évolution de la pourriture dans le tronc, de la base de l'arbre vers le haut.

Les améliorations possibles de cette technique porte sur:

- la durée de l'acquisition des données (qui est relativement longue, 45 minutes par arbre),
- le traitement des signaux,
- la résolution spatiale expérimentale qui ne permet pas de détecter la présence de petites cavités de 1 à 2 cm de diamètre,
- la nécessité de faire un grand nombre de mesures pour l'analyse statistique et au moins trois sections pour obtenir une image en 3D.

Un problème majeur réside dans l'atténuation du signal ultrasonore qui dépend beaucoup du couplage transducteurs - écorce d'une part et d'autre part, de la présence éventuelle de zones de pourriture. Une autre technique comparable est la tomographie basée sur la mesure de la résistivité électrique. Cette technique donne une résolution acceptable pour la mesure géométrique des dégradations [2].

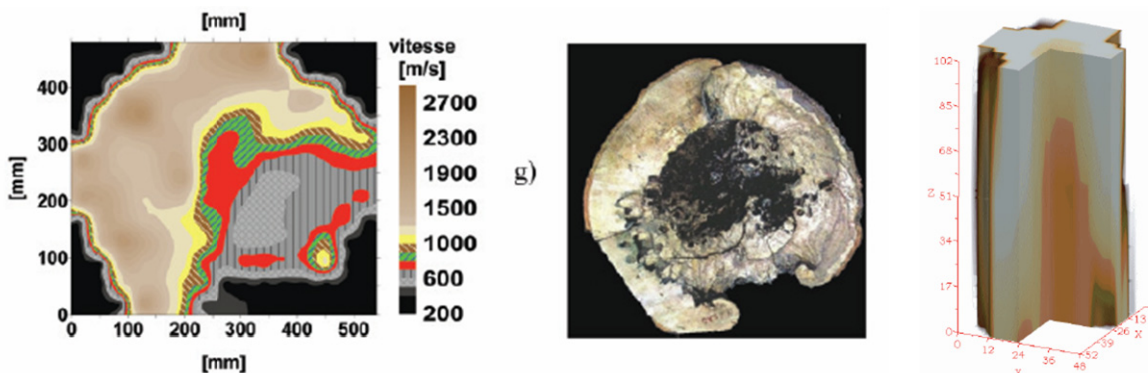


Figure 2 : Image 2D - 3D de la distribution des valeurs des vitesses dans le tronc (images tomographiques, photographique au centre) [1].

2.2 Qualité du bois des arbres sur pied

Le contrôle non destructif trouve également une importante place dans le domaine de la qualité du bois pour une utilisation vers l'industrie : l'objectif des plantations en arboriculture est en effet, pour certaines essences, la production de bois de qualité élevée.

A ce propos, l'activité d'amélioration génétique conduite jusqu'à présent se fonde généralement sur la sélection des caractères de croissance, de résistance aux pathogènes et d'aspect. Les clones ne sont pas sélectionnés en considérant la qualité intrinsèque du bois. Il est

important de souligner que pour des essences comme le merisier et le noyer, l'introduction des propriétés du bois dans les programmes d'amélioration est actuellement un thème de recherche important [3], [4] [5].

Entre toutes les propriétés du bois, la densité est le caractère le plus représentatif. La densité explique en effet un grand nombre de propriétés physico-mécaniques. Une technique non destructive d'évaluation de ce caractère est la microdensitometrie par rayons X, développée par Polge [7] et perfectionnée par Mothe et al. [8].

L'analyse peut être effectuée à partir de « carottes » prélevées sur les arbres sans les abattre : des bandes minces (épaisseur 1,2 à 2 mm) sont ensuite extraites dans la

direction radiale. Les échantillons doivent être conditionnés à une température de 20°C et à une humidité de 65% (humidité théorique du bois de 12%).

L'exposition aux rayons X est normalement conduite à une distance de 1,6 m pour un temps d'exposition de 12 à 15

minutes (puissance 9 Kv, 10 mA) : les images obtenues (Fig. 3) permettent d'avoir une résolution de 25 μm . Ces images correspondent à une variation du niveau de gris rapportée à un matériau de densité connue.

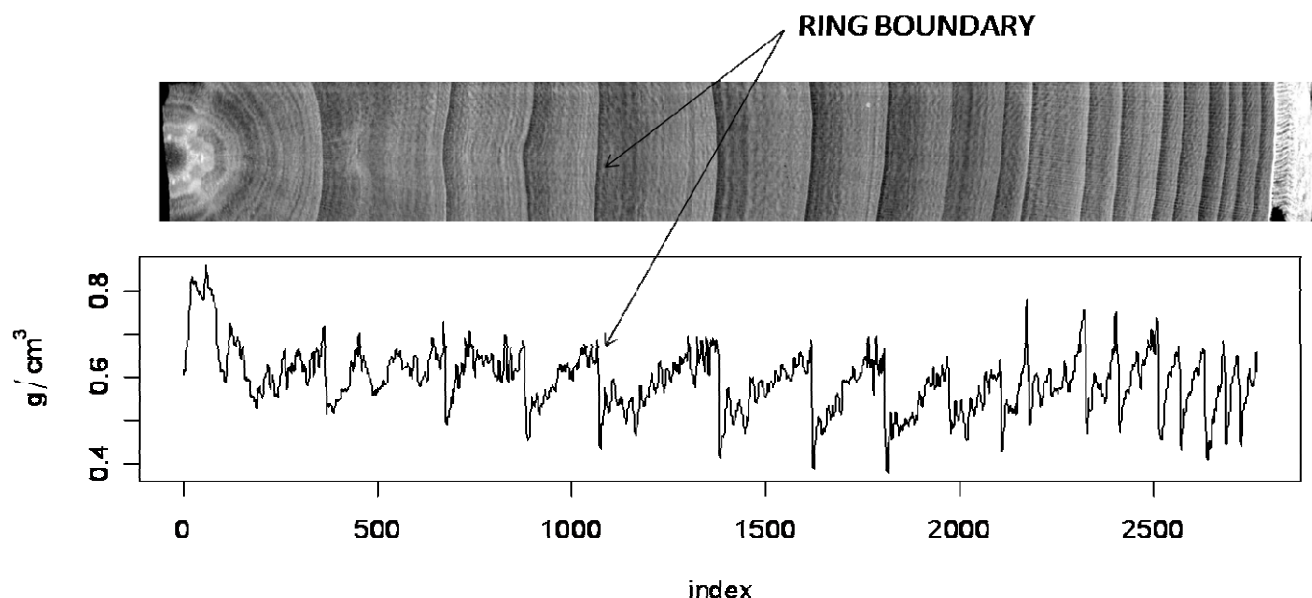


Figure 3 : Exemple de radiographie X et correspondance avec un profil densitométrique.

La possibilité d'analyser plusieurs échantillons dans un même temps, rend cette technique très rapide. Cette technique est donc très adaptée à des études génétiques pour lesquelles la caractérisation d'un nombre élevé d'arbres est nécessaire.

Au CNR-IVALSA, en collaboration avec l'INRA d'Orléans, la microdensitometrie a été utilisée pour la sélection de différents clones de merisier plantés en Italie. Les mesures de densité ont été utilisées pour évaluer les relations sites – clones et pour vérifier la possibilité d'une sélection précoce des meilleurs arbres [9], [10].

Les figures 4 (a et b) mettent en évidence les différences de densité pour les sites et les clones étudiés.

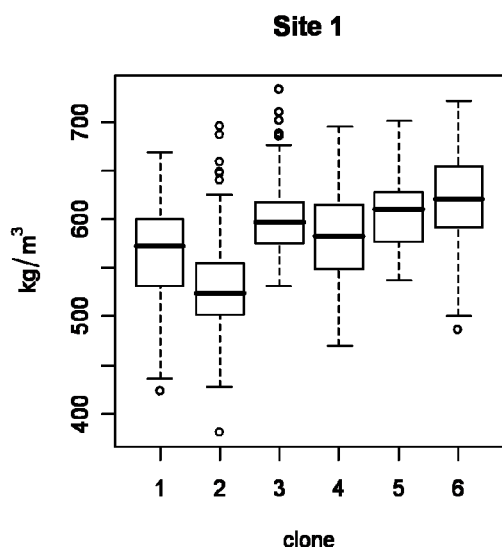


Figure 4 (a) : Variation de la densité pour les 6 clones du site 1

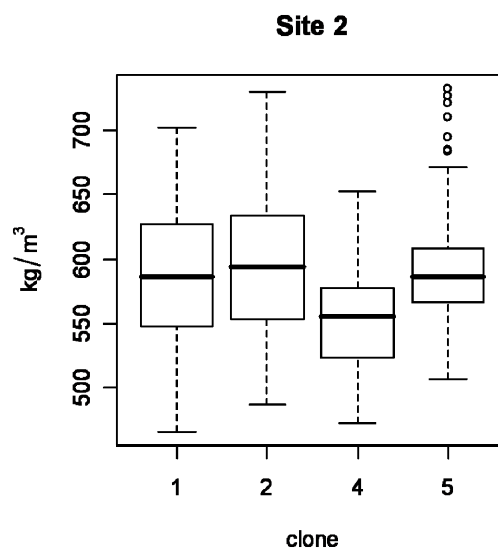


Figure 4 (b) : Variation de la densité pour les 4 clones du site 2

3 Caractérisation du bois pour la structure

Un exemple représentatif de l'application du contrôle non destructif est celui de la caractérisation du bois pour une utilisation en structure. En application de la directive européenne sur les produits pour la construction (Council Directive 89/106/EEC), le bois de structure doit être classé selon la résistance (marquage CE). L'objectif est d'assigner une classe de résistance à chaque élément structurel (norme EN 338 [11]) de façon à garantir ses performances mécaniques. Il va sans dire que l'évaluation des propriétés

mécaniques doit être fiable et non destructive. Pour être classée, une pièce de bois doit être caractérisée par 3 propriétés : résistance à la flexion (valeur normalisée obtenue après rupture et qui doit être estimée par méthode non destructive), module d'élasticité et densité.

La propriété du bois la mieux corrélée avec la résistance est le module d'élasticité [12] [13] [14]. Le module peut être mesuré d'une façon dynamique par ultrason ou par méthode vibratoire.

Dans le cadre d'un projet de recherche entre le CNR-IVALSA et le CIRAD, environ 2000 poutres de 4 essences différentes (sapin, douglas, pin laricio de Corse, châtaigner) et de 4 sections différentes ont été classées selon la résistance. Le classement "non destructif" a été effectué visuellement puis en utilisant la méthode *BING®* (<http://www.xylo-metry.org/>) en déterminant le module d'élasticité dynamique en vibration de flexion et de compression (enregistrement via un accéléromètre dans ce cas). Les mesures ont été effectuées sur des bois stabilisés à l'humidité théorique moyenne de 12%. La Fig. 5 montre, pour les 4 essences, la liaison entre le module dynamique en compression (MOE_{dyn}) et le module statique (MOE) calculé selon la norme EN 408. Les niveaux de liaisons statistiques montrés à la Fig. 5 sont tout à fait acceptable et conformes à ceux de la littérature [12] [13] [14].

Concernant la liaison entre le module dynamique et la résistance à la flexion (MOR), la Fig. 6 met en évidence que les meilleurs résultats sont obtenus avec le bois de Douglas. Au contraire, avec le bois de châtaigner, la relation MOE_{dyn}/MOR est très faible (le classement en résistance est plus difficile pour les bois feuillus).

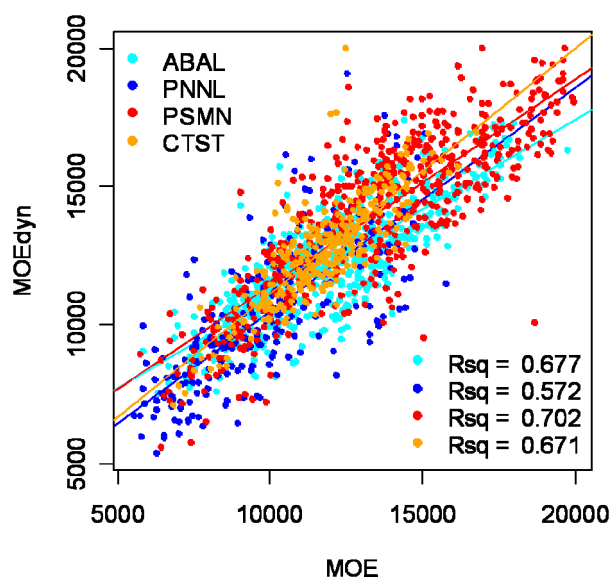


Figure 5 : Régression MOE dynamique vs. MOE statique pour sapin (ABAL), pin laricio de Corse (PNNL) douglas (PSMN) et châtaigner (CTST).

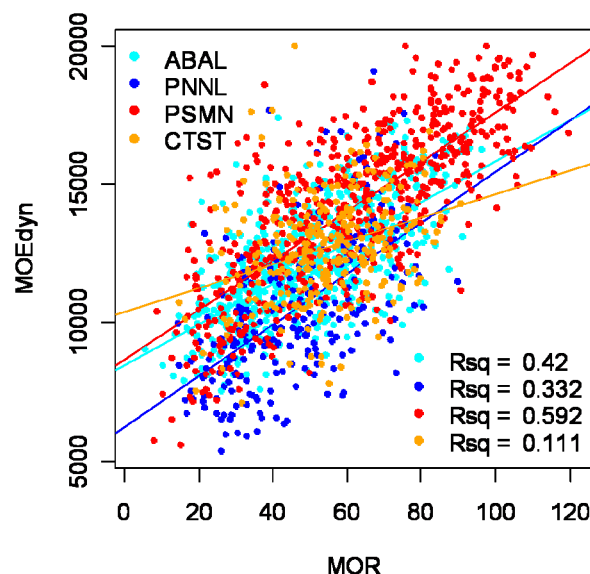


Figure 6 : Régression MOE dynamique vs. MOR pour sapin (ABAL), pin laricio de Corse (PNNL) douglas (PSMN), châtaigner (CTST).

4 Evaluation des éléments bois en service

4.1 Structures anciennes

Les structures en bois représentent une importante partie du patrimoine culturel : leur conservation nécessite d'avoir des données fiables et mises à jour sur leur résistance résiduelle. Pour cela, une norme spécifique a été développée en Italie (UNI 11119 [15]). Cette norme définit les objectifs, les procédures et les exigences pour le diagnostic des structures bois (Fig. 7). Cette norme détaille notamment la manière d'évaluer la résistance résiduelle des éléments en service.

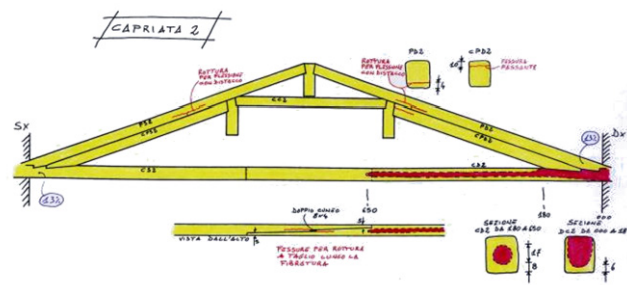


Figure 7 : Exemple de présentation des résultats d'un diagnostic.

Dans la pratique, un classement des éléments est réalisé «in situ» avec une recherche et quantification des possibles dégradations dues aux insectes ou aux champignons. L'utilisation des techniques de contrôle non destructif est liée soit à l'évaluation des caractéristiques mécaniques des poutres (en parallèle avec un "classement" visuel), soit à la quantification locale des dégradations.

L'utilisation des ultrasons ou d'autres techniques est possible sur la totalité des éléments de structure à l'exclusion des extrémités, qui bien souvent sont inaccessibles. Dans ce cas précis, l'utilisation d'un perçage dynamométrique est fondamentale pour vérifier la densité du bois en profondeur (Fig. 8). Cette propriété est fortement liée à la présence de dégradations et à leur intensité.

Pour mieux développer ces techniques, le CNR-IVALSA est en train de conduire des essais en laboratoire sur des poutres d'épicéa démontées d'une structure du XVII^e siècle. Les résultats préliminaires sont encourageants ; des corrélations exploitables entre MOE_{dyn} / MOE ($R^2 = 0.74$) et MOE_{dyn} / MOR ($R^2 = 0.56$) ont en effet été trouvées.

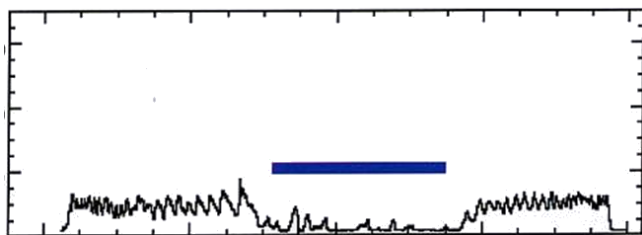


Figure 8 : Détection de pourriture par perçage dynamométrique.

4.2 Poteaux en contact avec l'eau de mer

Une autre application des méthodes vibratoires pour l'évaluation du bois en service est celle utilisée près de Venise pour vérifier la dégradation (*Teredo Navalis*) qui touche les poteaux en contact avec l'eau de mer (Fig. 9). Pour le moment le CNR-IVALSA a testé les poteaux avant leur mise en œuvre (Fig. 10) ; ces mesures seront ensuite répétées de manière périodique. Il est également envisageable de "surveiller" les poteaux directement dans l'eau.



Figure 9 : Dégradations provoquées par des mollusques marins (*Teredo navalis*).



Figure 10 : Mesure du MOE dynamique sur poteaux.

4.3 Bois dit «fossile»

Le cas de la forêt de Dunarobba (Italie) est presque unique dans le monde. Il s'agit d'une forêt d'arbres ressemblants au Séquoia, conservée dans l'argile, où le bois (daté de 2 millions d'années) conserve encore la structure et les caractéristiques d'un bois «standard» : il est par exemple encore capable d'adsorber l'humidité et d'avoir du retrait. Ce patrimoine exceptionnel est fragilisé depuis la mise à jour des troncs (dégradation en surface due aux agents de l'atmosphère et à la pollution). Différentes interventions de conservation sont envisagées ; il est alors nécessaire de vérifier l'efficacité, à travers une surveillance constante, des méthodes de conservation. Les conditions d'intervention sont réellement singulières :

- Les troncs ont une hauteur pouvant atteindre 10 mètres et un diamètre de 1 mètre.
- Ils se trouvent exactement dans leur position d'origine (lorsque les arbres étaient vivants).
- Le bois n'est pas à proprement parlé fossilisé, mais il a souffert de transformations par la pression de l'argile et il a presque perdu ses «directions anatomiques».

Il a été décidé d'évaluer 4 différentes stratégies de conservation (couverture avec une toiture, construction d'une grande chambre climatisée, création d'une «chemise» avec des résines naturelles, sciage des troncs au niveau du terrain et création d'une barrière transversale pour l'eau). Ces 4 stratégies de conservation s'accompagnent d'un contrôle des déformations et de la fissuration au cours du temps (principalement causées par les variations saisonnières de température et d'humidité). La technique choisie est le balayage laser 3D (*Konica Minolta Vivid 910*) avec une reconstruction géométrique des images digitalisées afin d'observer les variations dimensionnelles. Cette technologie a l'avantage d'être portable et possède une précision de 50 μ m, la mesure est de plus très répétable sur ce type de bois. Cependant, il est nécessaire de protéger le scanner de la lumière ambiante même en présence de nuages. Chaque surface de contrôle a été mesurée au moyen de 15 scans (de dimensions 30 x 15 cm). La construction des images a été possible grâce à la méthode développée par le ISTI-CNR de Pise (Italie) dans le cadre du projet EU IST "ViHAP3D". La méthode utilisée s'est montrée capable d'évaluer soit les variations attribuées à l'humidité du bois (variation en volume, déformation plastique, Fig.

11^a), soit le détachement de petits morceaux superficiels (Fig. 11^b).

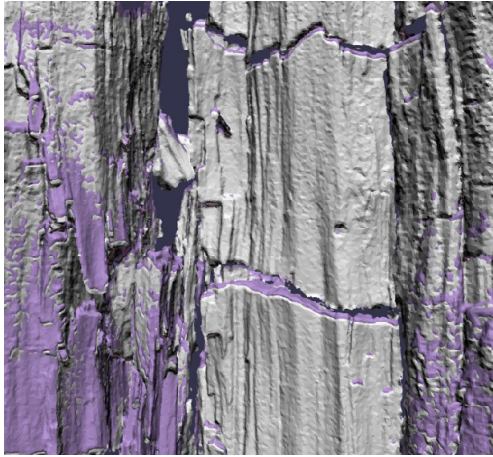


Figure 11 (a) : Déformation plastique causée par des variations de l'humidité (échelle de 1 mm) [16].



Figure 11 (b) : L'image en fausses couleurs montre, pour 2 balayages, les surfaces se détachant (en jaune) [16].

5 Conclusion

Les exemples d'application, illustrés dans cet article, montrent que dans tous les domaines d'utilisation du bois (à partir de l'arbre sur pied jusqu'à toutes les utilisations finales possibles : passées et récentes), le contrôle non destructif joue un rôle important pour la caractérisation de ce matériau. La grande variabilité de ces caractères, l'hygroscopicité et l'anisotropie obligent à concevoir des méthodes de contrôle propres au matériau bois. Des techniques de plus en plus sophistiquées sont actuellement expérimentées sur le terrain pour garantir des diagnostics que l'on espère plus fiables.

Références

- [1] Martinis R., Socco L.V., Sambuelli L., Nicolotti G., Schmitt O., Bucur V., "Tomographie ultrasonore pour les arbres sur pied", *Annals of Forest Science*, 61, 157-162 (2004).
- [2] Nicolotti G., Socco L.V., Martinis R., Godio A., Sambuelli L., "Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees", *Journal of Arboriculture*, 29, 66-78 (2003).
- [3] Zobel B.J., Jett J.B., "Genetics of wood production". Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, 352 pp (1995).
- [4] Rozenberg P., Franc A., Cahalan C., "Incorporating wood density in breeding programs for softwoods in Europe: a strategy and associated methods", *Silvae Genetica*, 50(1), 1-7 (2001).
- [5] Nocetti M., "Miglioramento genetico delle piante per la produzione legnosa con particolare riferimento ai caratteri del legno", *Forest@*, 5, 112-120 [online: 2008-03-27] URL: <http://www.sisef.it/forest@/> (2008).
- [6] Zobel B.J., van Buijtenen J.P., "Wood variation. Its causes and control". Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, 363 pp (1989).
- [7] Polge H., "Fifteen years of wood radiation densitometry", *Wood Science and Technology*, 12(3), 187-196 (1978).
- [8] Mothe F., Duchanois G., Zannier B., Leban J.M., "Microdensitometric analysis of wood samples: data computation method used at INRA-ERQB (CERD programme)", *Annales des Sciences Forestières* 55(3), 301-313 (1998).
- [9] Nocetti M., Brunetti M., Ducci F., Romagnoli M., Santi F., "Variability of wood properties in two wild cherry clonal trial", *Wood Science and Technology*, DOI 10.1007/s00226-009-0294-x (2009).
- [10] Nocetti M., Brunetti M., Ducci F., Romagnoli M., Rozenberg P., Santi F., "Trait-trait and age-age phenotypic correlations for growth and wood properties in wild cherry", *Wood Science and Technology*, Submitted.
- [11] EN 338 "Structural timber – Strength classes", CEN European Committee for Standardization (2003).
- [12] Hanhijärvi A., Ranta-Maunus A., "Development of strength grading of timber using combined measurement techniques. Report of the Combigrade-project – phase 2". VTT Publication 686 (2008).
- [13] Piter J.C., Zerbino R.L., Blaß H.J., "Machine strength grading of Argentinean Eucalyptus grandis. Main grading parameters and analysis of strength profiles according to European standards", *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62(1), 9-15 (2004).
- [14] Glos P., "New grading methods". Cost E29 Symposium, Florence, 27-29 October 2004, 1-8 (2004).
- [15] UNI 11119 "Cultural heritage - Wooden artefacts - Load-bearing structures - On site inspections for the diagnosis of timber members", UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2004).
- [16] Brunetti M., Callieri M., Pizzo B., Montani C., Pingi P., "Scopigno R., Using 3D scanning to monitor wood deformations and to evaluate preservation strategies". Proc. of SPIE Vol. 6618, 66180E, (2007).