

CONSIDÉRATIONES CONCERNANT L'ÉVALUATION DU BOIS HISTORIQUE PAR MÉTHODES NON DESTRUCTIVES

LUMINIȚA ENESCU

Le Musée du Département d'Argeș, 44 Rue Armand Călinescu, 110047, Pitești, Département
d'Argeș, e-mail: enesculuminita@yahoo.com

LELIOARA IANCU

e-mail: ianculelioara.inl@gmail.com

RESUME: La possibilité d'évaluer l'état des objets de patrimoine ou des monuments en utilisant des moyens techniques non destructives présente un intérêt majeur. Les premières méthodes d'essais non destructifs ont été conçues pour des matériaux présentant une structure homogène et isotrope. Les résultats obtenus ont permis d'étendre certains procédés au bois en général et au bois historique en particulier. La littérature spécialisée de ces dernières années indique que ces méthodes sont validées par l'expérience et qu'elles peuvent donc être des instruments utiles en termes de l'appréciation de l'état de conservation des objets, mais surtout des structures en bois en œuvre. Le présent document propose d'examiner brièvement quelques méthodes d'évaluation non destructive du bois historique, en mentionnant des situations concrètes dans lesquelles ces méthodes ont été appliquées avec des résultats satisfaisants.

Mots clé: bois, évaluation non destructive (NDE), méthodes et moyens techniques.

REZUMAT. Considerații privind evaluarea lemnului istoric prin metode nedistructive. Posibilitatea de a evalua starea obiectelor de patrimoniu sau a monumentelor folosind mijloace tehnice nedistructive prezintă un interes major. Primele metode de testare nedistructivă au fost concepute pentru materiale cu o structură omogenă și izotropă. Rezultatele obținute au făcut posibilă extinderea anumitor procedee la lemn în general și la lemnul istoric în particular. Literatura de specialitate din ultimii ani indică faptul că aceste metode sunt validate de experiență și că ele pot să fie instrumente utile pentru aprecierea stării de conservare a obiectelor, dar mai ales a structurilor din lemn aflate în operă. Lucrarea își propune să prezinte pe scurt câteva metode de evaluare nedistructivă a lemnului istoric, cu referire la situații concrete în care aceste metode au fost aplicate cu rezultate satisfăcătoare.

Cuvinte cheie: lemn, evaluare nedistructivă (NDE), metode și mijloace tehnice.

1. GÉNÉRALITÉS. LES PRINCIPALES MÉTHODES D'ÉVALUATION NON DESTRUCTIVE

Bien que la plupart de la recherche sur les essais d'évaluation non destructive a été concentrée sur des matériaux manufacturés tels que les métaux, les polymères, la céramique et le béton, on a trouvé des possibilités d'utiliser des techniques d'essais non destructives aussi pour inspecter et évaluer les produits et les structures en matériaux naturels comme par exemple le bois (RH Falk, et al., 1990). Les principales méthodes de contrôle non destructif des matériaux sont résumées dans le tableau ci-dessous (Tab. 1).

Tableau 1 - Les principales méthodes de contrôle non destructif des matériaux.

LE PRINCIPE DE LA MÉTHODE	METHODE D'EVALUATION	APLICATIONS
Optique	Examen visuel	Examen des zones visibles
	Thermographie infrarouge	Determination des caractéristiques thermo-physiques à la surface du matériel
En utilisant des fluides	A l'aide des fluides pénétrants	Contrôle de l'étanchéité; contrôle des défauts traversant le matériau
Electromagnetique	Des courants électriques tourbillonnaires	Détection des défauts qui traversent le matériau
	Magnétoscopie	Détection des défauts de surface
En utilisant des rayonnements ionisants	Irradiation avec des rayonnements X ou gamma	Détection des défauts dans la masse du matériel
En utilisant des ondes mecaniques	Acoustiques; avec des ultrasons	L'évaluation des propriétés mécaniques
		Détection des défauts internes ou de surface

L'évaluation non destructive (NDE) du bois a été effectuée depuis des générations. L'inspection visuelle visant à déterminer les caractéristiques qui influencent la résistance aux sollicitations a été utilisée traditionnellement pour classer le bois en catégories d'utilisation finale. Cette évaluation de la qualité du bois est basée seulement sur la taille et la répartition des anomalies du bois qu'on peut observer à la surface du matériau. En utilisant cette technique, les anomalies induisant la réduction de la résistance et les caractéristiques des espèces sont associées empiriquement au comportement du matériau soumis aux sollicitations de traction, de flexion ou de compression.

Dans les dernières années, pour évaluer les propriétés du bois sans le détruire, on a créé des méthodes et on a développé des techniques et des équipements de contrôle non destructif (NDT / NDE) beaucoup plus précises. Tout cela vise l'étude et la détection des changements critiques des paramètres

CONSIDÉRATIONS CONCERNANT L'ÉVALUATION DU BOIS HISTORIQUE PAR MÉTHODES NON DESTRUCTIVES

structurels, pour faciliter le calcul de la résistance structurelle afin de prévenir les éventuels dommages sérieux lors de l'exploitation (Sohi et al., 2011).

2. LE BOIS HISTORIQUE. LA DÉGRADATION DU BOIS À L'AIR LIBRE

Le bois longtemps exposé aux sollicitations mécaniques, aux rayonnements solaires et aux intempéries est soumis à une série de processus de dégradation complexes. Parmi ceux-ci, les plus courants sont les dégradations de nature:

- a) photochimique, causée par les rayonnements ultraviolets;
- b) thermique, déterminée par la chaleur;
- c) physico-chimique, favorisée par l'hygroscopicité et l'hygroscopicité du bois;
- d) biochimique et biologique, sous l'action des agents biologiques: bactéries; champignons; insectes.

3. METHODES D'EVALUATION NON DESTRUCTIVE DU BOIS HISTORIQUE

La restauration d'un bien culturel connaît un certain déroulement de phases:

- la phase d'étude d'objet;
- la phase d'élaboration de la documentation de restauration;
- la phase de préparation et de mise en place des conditions nécessaires à l'intervention proprement dite;
- la phase d'intervention proprement dite.

Tout d'abord, l'objet est examiné et étudié avec soin, pour déterminer son état et ses problèmes; la procédure est essentielle et assez difficile à réaliser. L'analyse implique la recherche au-delà de l'aspect de la surface, l'évaluation du degré de fragilité de l'objet, la détermination du degré d'affectation des propriétés physico-mécaniques. En règle générale, les spécialistes de laboratoire d'investigations prélèvent des échantillons pour l'analyse de la structure et de la composition, pour déterminer la nature des produits d'alteration et l'état réel de l'objet.

Afin de préserver l'intégrité de l'objet ou de la structure analysée, il est indiqué d'effectuer ces analyses sans prélever des échantillons (analyses non destructives). Dans le cas du bois, l'évaluation non destructive se déroule généralement en deux étapes:

1. l'examen visuel;
2. l'inspection en utilisant des outils / équipements.

Parmi les méthodes d'évaluation non destructive du bois, les plus couramment utilisées sont: la méthode d'impact dynamique, la méthode résistographique, les méthodes basées sur des mesurages acoustiques.

3.1. La méthode des mesurages locales de la dureté (la méthode d'impact dynamique)

La méthode d'impact dynamique consiste dans l'introduction d'un poinçon métallique dans la pièce de bois avec une certaine énergie (Fig. 1), la profondeur de pénétration étant inversement proportionnelle à la dureté du bois dans la section transversale. La profondeur de pénétration peut être utilisée comme mesure de la densité du bois, ainsi que de l'intensité et de la profondeur de la dégradation fongique (Cruz et al., 1999 ; Teles et Valle, 2001). La méthode est appliquée plus fréquemment pour l'évaluation des structures en bois telles que les pylônes de réseau, les installations portuaires, etc. et moins fréquemment pour les constructions.

Les résultats de l'évaluation dépendent: du lieu de test dans l'élément; de l'anisotropie et de la densité du bois; du pourcentage de bois tardif; de défauts ou de dégradation du matériau; de l'expérience des opérateurs (Bonamini, 1995).



Figure 1 - La méthode d'impact dynamique - équipement et principe
(https://inspectapedia.com/structure/Pilodyn_Wood_Test.php; 29 sept. 2018).

3.2. La méthode résistographique

La méthode résistographique consiste dans la détermination de la résistance du matériau à l'avancement d'une petite perceuse dont le diamètre varie entre 1,5 mm et 3 mm (Fig. 2a). Le principe de ce processus est la corrélation d'entre la résistance du matériau testé à l'avancement de la perceuse et la densité du matériau. Le résultat de l'essai est le profil de la densité de l'échantillon (Fig. 2b), qui peut être utilisé pour évaluer la présence ou l'absence de zones de dégradation.

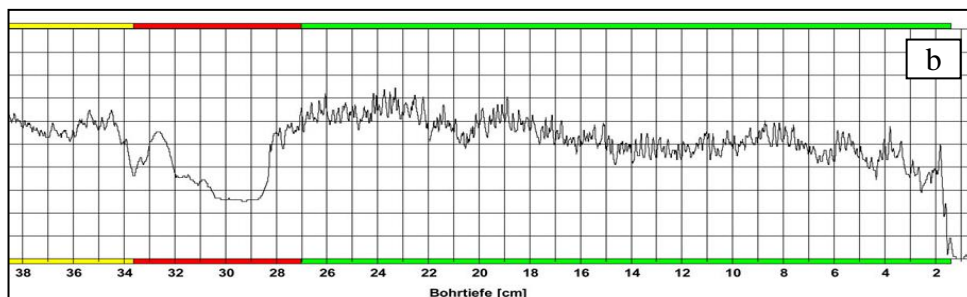
3.3. Méthodes basées sur des mesurages acoustiques

Ces méthodes sont utilisées pour étudier les propriétés élastiques des pièces en bois massif, mais également pour inspecter qualitativement le contreplaqué et d'autres matériaux composites à base de bois. Les propriétés élastiques des matériaux solides sont d'une importance considérable tant dans le domaine de la science que de la technologie. Pour le bois, leur mesurage fournit des informations essentielles pour une meilleure compréhension des caractéristiques structurales du matériau, qui détermine ses propriétés physico-mécaniques et, implicitement, son comportement en service.

CONSIDÉRATIONS CONCERNANT L'ÉVALUATION DU BOIS HISTORIQUE PAR MÉTHODES NON DESTRUCTIVES



Figure 2 - Essais du bois par la méthode résistographique:
a. l'équipement; b. le profil résulté après le test.
(http://www.imlusa.com/html/drilling_resistance_measurement.html/ 29 sept. 2008).



3.3.1. La technique basée sur le principe de détermination de la fréquence de résonance utilise une onde acoustique pour évaluer la qualité du matériau. L'onde incidente est générée par un coup de marteau, dont le poids doit être d'environ 1% du poids de l'élément testé, appliqué à une extrémité; un microphone sensible enregistre l'onde à l'autre extrémité.

3.3.2. La technique à base d'ultrasons est, apparemment, la méthode acoustique la plus utilisée dans la pratique. Le procédé implique l'utilisation d'une paire de transducteurs piézoélectriques, d'un générateur de signal pour produire le signal d'impulsion ultrasonique et d'un dispositif pour mesurer le temps de transmission de l'impulsion ultrasonique par l'échantillon (temps de vol). À partir des résultats des mesurages, le module d'élasticité dynamique peut être calculé, c'est-à-dire sa valeur en direction longitudinale. C'est la propriété mécanique la plus importante, définissant la qualité du matériau.

4. OBSERVATIONS ET CONCLUSIONS FORMULEES PAR DES PRATICIENS

4.1. Conclusions fondées sur l'évaluation non destructive des plaques de contreplaqué par ultrasons (Iancu, 2002):

- entre la résistance au cisaillement et le temps de vol des ultrasons, une très forte corrélation est constatée pour tous les types de stratifications;
- la corrélation entre la résistance à la flexion statique (σ_i) et le temps de vol des ultrasons est très élevée pour les structures 3, 5, 7 et élevée pour la structure à 9 couches; ceci est justifié par le fait qu'au phénomène de flexion participe principalement les couches de feuilles de placage qui composent le panneau, puis la résistance de l'adhésif. Par conséquent, plus le nombre de couches est élevé, plus la résistance à la flexion diminue légèrement;
- on a constaté une très forte corrélation entre le module d'élasticité longitudinal (EII) et le temps de vol des ultrasons (tUS) par la plaque pour le contreplaqué à 3 et 5 couches, et une forte corrélation pour le contreplaqué à 7 couches; pareil qu'à la résistance à la flexion, avec le nombre croissant de couches, la corrélation commence à diminuer;
- le film phénolique forme des pellicules homogènes presque parfaits - car il est appliqué sous forme de feuille -, suivi de l'adhésif urée-formaldéhydrique et celui-ci suivi de l'adhésif polyuréthanique qui forme de films beaucoup plus spongieux que l'adhésif urée-formaldéhydrique. La porosité de l'adhésif après la polymérisation entre les couches contribue à la déviation de l'impulsion ultrasonique transmise;
- il n'y avait pas une corrélation très rigoureuse entre le module transversale d'élasticité (GT) et la masse volumétrique des échantillons étudiés, à cause de certaines inhomogénéités présentes dans le matériau, qui dévient le trajet des ultrasons;
- en cas d'adhésion insuffisante (couche pauvre d'adhésif entre les feuilles de placage), les temps de vol obtenus ont des valeurs beaucoup plus élevées, en raison de la déviation du trajet des ultrasons due à la présence de l'air (Fig. 3);
- les déterminations expérimentales indiquent que la vitesse des ultrasons augmente avec l'épaisseur de la plaque; la couche adhésive joue un rôle très important dans la méthode d'évaluation par ultrasons;
- pour les défauts naturels de type noeud, du fait que le bois dans ces zones est plus dense que dans la zone voisine, les temps de vol ont des valeurs inférieures aux temps normaux pour cette épaisseur (une différence d'environ 1,1 à 1,7 μ s);
- pour le défaut de type manque de matière dans les couches centrales, les temps de vol ont des valeurs plus basses que dans la région voisine.

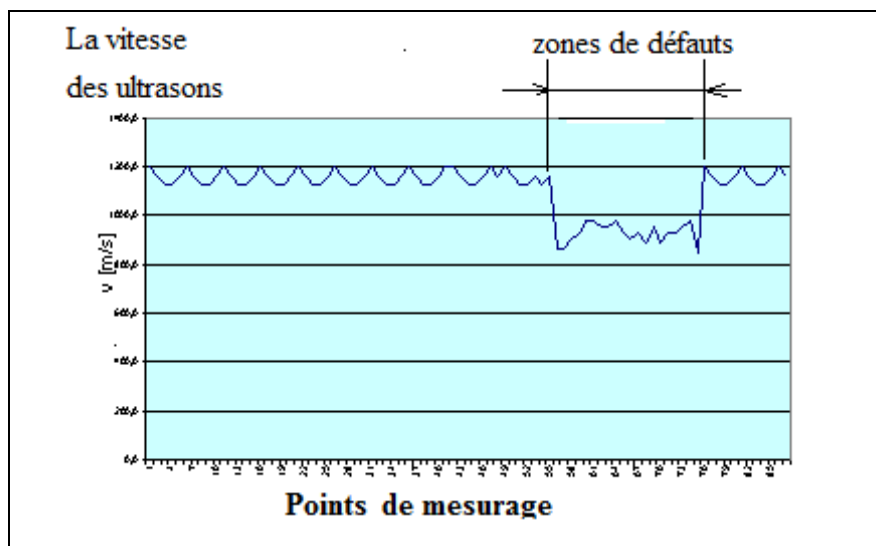


Figure 3 - Représentation de la vitesse des ultrasons sur l'épaisseur d'un plaque de contreplaqué de 3,72 mm, constitué de 3 couches de placage, en cas de défaut (absence de film adhésif).

4.2. Conclusions de l'analyse comparative de l'évaluation non destructive des éléments en bois de la structure du toit du vestibule de la Gare Masaryk de Prague (Hasnicova et Kuklik, 2014):

Équipement utilisé: Sylvatest, Dynamic, Pilodyn (Fig. 4a). Les tests effectués ont abouti aux principales conclusions suivantes:

- les méthodes d'essais non destructifs sont très utiles pour les investigations préliminaires. À partir des déterminations, les paramètres mécaniques de la pièce peuvent être approximés avec une précision suffisante, mais une évaluation correcte de ceux-ci nécessite une grande expérience;

- une surveillance à long terme, en utilisant le même équipement, par une équipe expérimentée, est recommandée et les résultats des déterminations sont fiables;

- les recherches ont mis en évidence un aspect particulier qui a été présenté en détail: une fissure superficielle influe considérablement sur les tests ultrasoniques lorsqu'elle est placée sur la même surface sur laquelle les capteurs sont appliqués, mais elle n'est pas détectable à la surface opposée de la poutre (Fig. 4b).

Les mesurages in situ ont montré que certains éléments en bois de la structure de la Gare Masaryk de Prague n'étaient plus conformes aux normes contemporaines. Ces éléments ne pouvaient pas être retenus dans la structure de la gare, malgré le désir des experts impliquées dans les travaux de conservation. Par conséquent, on a sélectionné seulement les pièces de la plus haute qualité, qui ont été réutilisées, le reste étant remplacé par des composants en bois lamellé collé.

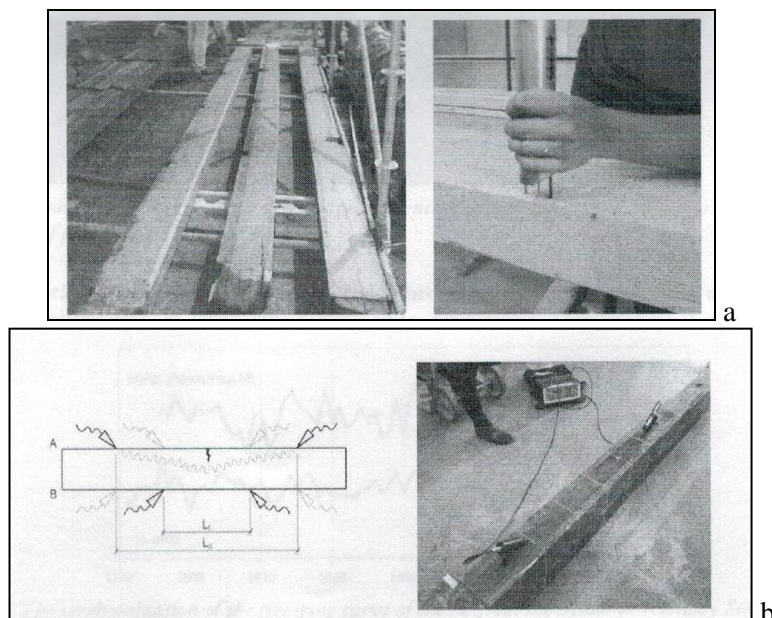


Figure 4 - L'évaluation non destructive des éléments de structure de la toiture de la Gare Masaryk de Prague: la méthode de détermination de la dureté locale (a); la méthode aux ultrasons (b).

RÉFÉRENCES

- ALEXIU V., 1997 - *Recuperarea monumentului de lemn „Biserica Drăganu”. Transferarea acestuia la Mănăstirea Curtea de Argeș (La récupération du monument en bois "Eglise Draganu". Le transfert du celui-ci au monastère de Curtea de Arges)* - Sesiunea anuală de comunicări științifice „220 de ani de la nașterea cărturarului Dinicu Golescu” (Session scientifique annuelle "220 ans depuis la naissance de l'érudit Dinicu Golescu"), Complexul Muzeal Golești/Le Complexe Muséal Golești.
- FALK R. H., PATTON-MALLORY M., MCDONALD K. A., 1990 - *Nondestructive testing of wood products and structures: state-of-the-art and research needs*, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI 53705, *Nondestructive testing and evaluation for manufacturing and construction: Proceedings of conference, 1988 August 9-12, Champaign, IL*, New York: Hemisphere Publishing Corp.
- DULCE F. H., NUNES L., MACHADO S. J., DE BRITO J., 2011 - *Timber in Buildings: Estimation of Some Properties using Pilodyn and Resistograph*. International Conference on Durability of Building Material and Components. DBMC. Porto. Portugal. **XII**: 1-8.
- HASNICOVA H., KUKLIK P., 2014 - *Various non-destructive methods for investigation of timber members from a historical structure*. *Wood Research*. **59 (3)**: 411-420.
- IANCU L., 2002 - *Contribuții la încercarea nedistructivă a placajelor din lemn*. Thèse de doctorat. Université Transilvania Brașov.

CONSIDÉRATIONS CONCERNANT L'ÉVALUATION DU BOIS HISTORIQUE PAR MÉTHODES NON DESTRUCTIVES

KHARRAT W., 2016 - *Conception et validation d'un dispositif pour la mesure du module d'élasticité dynamique dans le bois*. Thèse de doctorat, Université du Québec, École de Génie. On line à: <http://depositum.uqat.ca/680/1/Kharrat%2C%20Wassim.pdf>. (accès à: 29 septembre 2018).

LAVISCI P., 2001 - *Pathologie des structures en bois. Analyse des caractéristiques physiques et mécaniques des collages structuraux pour la restauration des charpentes*. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy. Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois. On line à: http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_2001_0196_LAVISCI.pdf. (accès à: septembre 2018).

***<http://www.woodscienceconsulting.com/resistograph/> (accès à: 29 septembre 2018).

***http://www.imlusa.com/html/drilling_resistance_measurement.html/ (accès à: 29 septembre 2018).