



Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

LA TOMOGRAPHIE ULTRASONORE, UNE NOUVELLE MÉTHODE NON DESTRUCTIVE POUR LES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ ET MAÇONNERIE

**ULTRASONIC TOMOGRAPHY, A NEW NON-DESTRUCTIVE TESTING METHOD
TO ANALYSE REINFORCED CONCRETE AND MASONRY**

Michel GRILL^(a), Christophe MICHAUX^(b)

a. In-Situ SA, Luxembourg, L-1337 - b. In-Situ SA, Luxembourg, L-1337

* mgrill@insitu.lu

RÉSUMÉ

Les techniques d'auscultation non destructives appliquées à la construction ont fait de nombreux progrès ces dernières années. Les récents développements dans le domaine des transducteurs ultrasonores à contact sec (DPC, Dry Point Contact), les retours technologiques de l'imagerie médicale, l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs permettent aujourd'hui l'application de la tomographie ultrasonore au domaine de la construction. La tomographie se fonde sur le couplage de plusieurs transducteurs qui émettent de manière séquentielle des ondes dans l'objet testé. L'analyse par un algorithme de type SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) des ondes réfléchies vers les différents transducteurs permet de réaliser une reconstruction 3D de l'objet testé. Des coupes sous forme de lamelles peuvent alors être réalisées à partir de la reconstruction 3D. Les avantages de cette technique sont nombreux : acquisition et analyse rapide des mesures, visualisation de l'objet et de ses désordres internes, profondeur de détection accrue. Ces avantages rendent cette technique appropriée à de nombreuses applications. Le présent article détaille la technique, le système et présente un retour d'expérience. L'objectif de ce cas est de rechercher des plans de délamination dans les zones de tracé des gaines de précontraintes longitudinales des bras du pont de l'Europe situé à Coblenze. Ces délamina-

tions peuvent affecter le comportement structurel et générer des problèmes de corrosion au droit de la précontrainte. Le retour d'expérience met en exergue les perspectives prometteuses de la technique, notamment dans les domaines suivants : recherche d'objets (gaines, armatures...), recherche de délaminations, investigations sur des objets massifs, applications dans le domaine nucléaire..

ABSTRACT

Recent years have seen great improvement in non-destructive investigation methods applied to construction. Recent developments in the field of ultrasonic dry contact transducers (DPC, Dry Point Contact), technological feedback of medical imaging and increased calculation power of computers make it now possible to apply ultrasonic tomography to the construction field. Tomography is based on coupling several transducers sending out waves in a sequential mode through the tested element. Analysis of the waves reflected to the different transducers by a SAFT algorithm (Synthetic Aperture Focusing Technique) makes a 3-D image reconstruction of the tested object possible. Sections or scan lines can then be made from the reconstructed 3-D-image. This technique shows a lot of advantages: fast data acquisition and analysis, visualization of



the object and its internal disturbances, increased detection depth. Thanks to these advantages this technique can be applied to a great number of cases. Present paper gives a detailed description of both technique and system as well as returns of experience of one testing case. The purpose of this case is to search for delamination plans in areas of longitudinal poststressed ducts of the Europe bridge walls in Koblenz (D). Delaminations can affect the structural behaviour and generate corrosion problems at the level of the poststressed duct. Returns of experience underline the promising prospects of the technique, notably in fields such as: search for objects (ducts, rebars,...), search for delaminations, investigations on massive objects, applications in the nuclear domain,...

Mots-clés : tomographie ultrasonore, ondes, non destructif, ouvrages d'art, béton

* * *

1. INTRODUCTION

La propagation des ondes ultrasonores dans les matériaux de construction [1-3] tels que le béton armé ou l'acier est bien connue et de nombreuses méthodes d'auscultation non destructives sont couramment utilisées en laboratoire ou sur site. La tomographie ultrasonore fondée sur l'analyse des ondes réfléchies constitue une nouvelle technique pour les applications d'auscultation non destructive dans le domaine de la construction. Les atouts de cette méthode (test à partir d'une seule face de l'objet, reconstruction 3D, profondeur de pénétration, vitesse d'exécution et d'analyse) en font un nouvel outil particulièrement efficace dans la recherche de désordres internes des ouvrages en béton armé et maçonnerie.

2. TOMOGRAPHIE - PRINCIPE

La tomographie consiste à générer des ondes multiples à travers l'objet à tester. Les multiples ondes réfléchies sont

alors mesurées à la surface de l'objet. Les réflexions enregistrées à la surface de l'objet sont analysées via un algorithme de type SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) qui permet de reconstruire une image 3D de l'objet. Cette image peut alors être découpée en fines lamelles selon 3 directions. Les éléments clés d'un tomographe sont l'antenne munie des transducteurs DPC (Dry Point Contact) et le logiciel de reconstruction. Dans le cas d'éléments en béton armé, l'utilisation d'ondes de cisaillement limite la diffusion des ondes de retour et l'atténuation du signal dans la direction de propagation des ondes.

2.1. Transducteurs

Un programme de recherche mené à l'institut de recherche MSI de Moscou a permis la mise au point de transducteurs ultrasonores basse fréquence à contact sec (DPC, Dry Point Contact) [4]. La sensibilité des transducteurs a notamment été améliorée en augmentant la directivité des ondes générées. L'association de plusieurs transducteurs (fréquence centrale de 50kHz) constitue l'antenne du tomographe. Chaque transducteur a une double fonction, à savoir émission et réception des ondes de cisaillement. La figure (1) présente des exemples de transducteurs ainsi que leurs configurations possibles dans différentes antennes.

2.2. SAFT

Les applications courantes de détection de défauts internes (vitesse d'impulsion ultrasonique, écho d'impact, [1]) utilisent généralement un ou deux transducteurs générant des ondes de compression. Dans ces cas, la mesure est ponctuelle. Les avancées permanentes en matière de puissance de calcul et de vitesse d'acquisition ont permis de développer de nouveaux logiciels capables de produire des reconstructions 3D, illustrées en figures (2a) et (2b), des objets à l'image des techniques médicales telles que l'IRM (Image par Résonance Magnétique). Le caractère hétérogène du béton rend nécessaire la combinaison de nombreux points de mesure afin de reconstruire de façon satisfaisante les conditions internes d'un objet. La combinaison des ondes émises et reçues par chacun des transducteurs est réalisée via un algorithme de type SAFT



Figure 1 : Différents transducteurs à contact sec et différentes configurations.

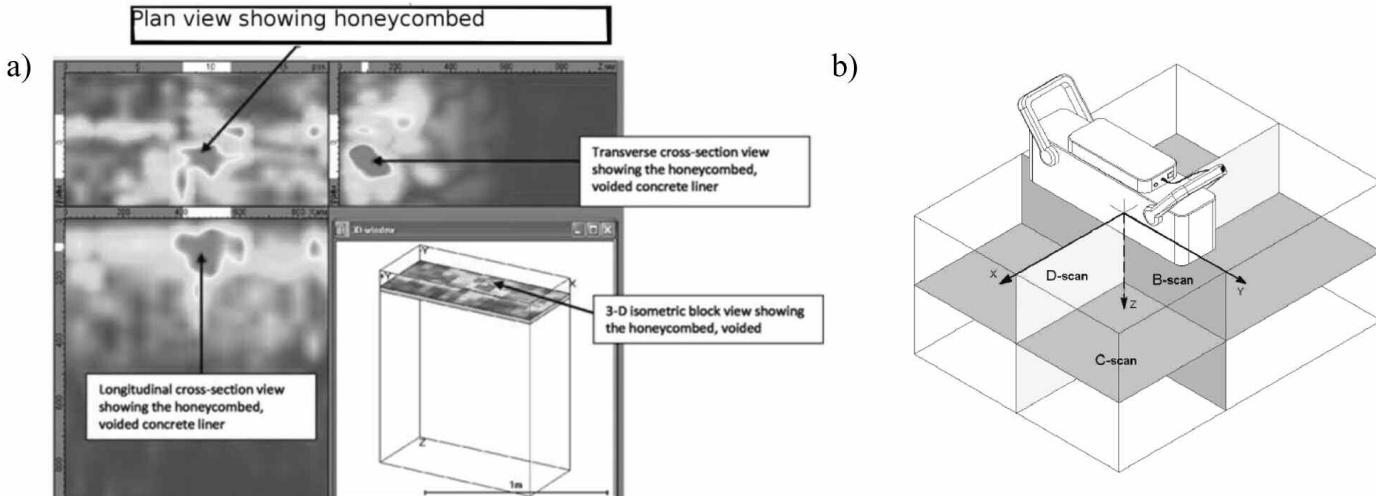


Figure 2 : a) Différentes coupes possibles via le logiciel de reconstruction 3D.
b) Vue en plan (C-scan), Coupe longitudinale (D-scan), Coupe transversale (B-scan) et vue isométrique.

(Synthetic Aperture Focusing Technique) [5]. Ce logiciel de traitement du signal améliore la résolution d'une image ultrasonore avec distorsion de la focalisation.

Les coupes peuvent être réalisées à différentes profondeurs afin de cibler un désordre. Les coupes longitudinale et transversale permettent également de visualiser plusieurs désordres superposés ou non.

3. MÉTHODE DE TEST

3.1. Système

Le premier tomographe commercialisé sur le marché est appelé MIRA (figure (3)). L'antenne comprend 10 rangées de 4 transducteurs à ondes de cisaillement dont la fréquence est de 50kHz. Les transducteurs sont à contact sec et sont montés sur des ressorts afin d'épouser la surface de test même en cas d'irrégularités. L'extrémité des transducteurs est recouverte d'une pointe en céramique afin de protéger les éléments piézoélectriques. Les signaux d'émission et de réception des ondes de cisaillement sont transmis par Wi-Fi à un ordinateur portable équipé du logiciel de reconstruction 3D. Une mesure prend environ 3s. Les images de reconstruction sont alors présentées à l'écran sous forme de coupes (appelées B-scan, C-scan et D-scan) ou d'une vue isométrique. Ces différentes coupes montrent la géométrie de l'objet et ses désordres internes (les vides, les défauts de compactage tels que les nids de graviers, les délaminations [6]).

3.2. Principe de mesure

Chaque mesure comprend une séquence d'émission/réception des ondes de cisaillement. La première rangée de transducteurs émet une onde dans l'objet, toutes les autres rangées de transducteurs sont en mode réception. Dans un deuxième temps, la seconde rangée de transducteurs

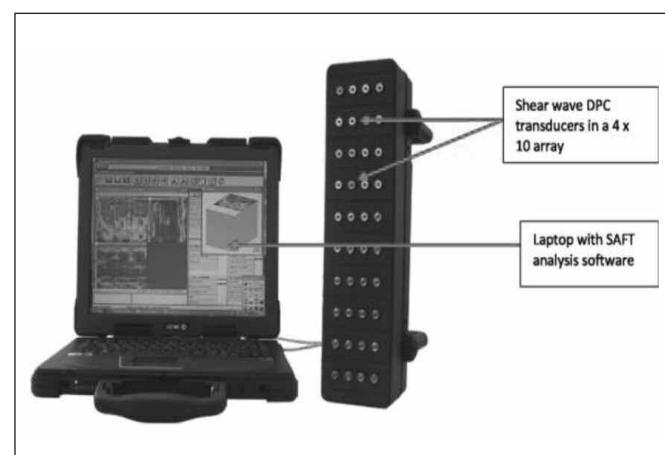


Figure 3 : Tomographe ultrasonore type MIRA.

devient émettrice et les autres rangées sont réceptrices. Cette opération se répète jusqu'au moment où la dernière rangée devient émettrice et les autres réceptrices. La figure (4a) présente la superposition de tous les tracés d'ondes dans l'objet testé. Tout désordre situé sous l'antenne est donc détectable (figure 4b).

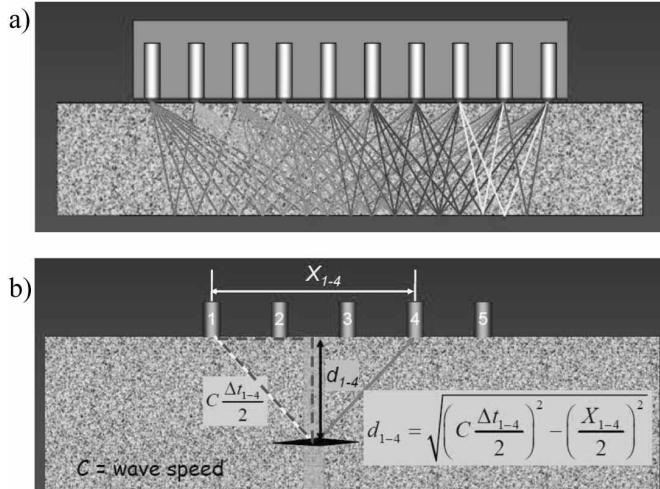
En présence d'un désordre, sa position est repérée en fonction de la position des transducteurs et sa profondeur est déterminée par l'équation (1) illustrée par la figure (4b).

$$d_{1-4} = \sqrt{\left(C \frac{\Delta t_{1-4}}{2}\right)^2 - \left(\frac{X_{1-4}}{2}\right)^2} \quad (1)$$

Où d_{1-4} (en m) est la profondeur du désordre
 C (en m/s) est la vitesse de propagation des ondes de cisaillement

Δt_{1-4} (en s) est le temps de vol de l'onde entre les rangées 1 et 2 des transducteurs

X_{1-4} (en m) est la distance entre les rangées 1 et 4 des transducteurs



**Figure 4 : a) Illustration du tracé des ondes émises et reçues par les transducteurs.
b) Illustration de la localisation d'un désordre interne**

4. RETOUR D'EXPÉRIENCE – RECHERCHE DE DÉLAMINATION

4.1. Problématique

Le pont Europabrücke (figure (5a)) situé à Coblenze (D) enjambe la Moselle à sa jonction avec le Rhin. Le pont construit en 1950 et agrandi en 1970 est composé de 3 arches en béton armé. La partie la plus ancienne du pont principal est formée par un double caisson précontraint. Les parois latérales ou « bracons » (épaisseur de 400 mm) de ces deux caissons contiennent des armatures passives, des gaines de précontrainte (verticales et longitudinales) et

des tuyaux de refroidissement (utilisés lors de la construction pour refroidir le béton lors de son durcissement). La figure (5b) montre la configuration des éléments d'un bracon. L'expansion de l'eau dans les tuyaux de refroidissement lors des cycles de gel/dégel a généré des contraintes dans le béton des bracons qui a fissuré sous forme de délamination. La délamination se présente sous la forme d'un plan de fissuration parallèle à la surface du parement dont l'ouverture est d'environ 1 mm. Dans le cadre de la réhabilitation du tablier du pont, le Maître d'Ouvrage a demandé une expertise afin de quantifier et de localiser ces délaminations. Au vu des quantités à inspecter, la tomographie ultrasonore a été retenue comme la méthode de test la mieux appropriée.

4.2. Déroulement des tests

Une grille de mesure a été définie comprenant, pour chaque section de bétonnage de 3 m, deux lignes de mesure verticales et une ligne de mesure horizontale. Le pas entre deux points de mesure est de 30 cm. Les mesures ont été réalisées au tomographe. En l'absence de désordre, l'image obtenue montre une interface à 400 mm de profondeur qui correspond à l'épaisseur totale du bracon. Cette situation est illustrée en figure (6a). En présence d'une délamination, l'image obtenue présente une interface située à la profondeur de la délamination. Ces deux résultats sont illustrés par la figure (6b).

Un D-scan est une accumulation de B-scan. Cette coupe 2D comprend un axe horizontal (x) qui est l'axe de déplacement de l'antenne à la surface du bracon et un axe vertical (z) correspondant à la profondeur. La figure (6) illustre les 2 cas typiques rencontrés lors des tests. Sur la figure (6a), une première interface à 400mm de profondeur correspond à l'épaisseur totale. Sur la figure (6b) deux interfaces sont observées : une délamination située à environ 160mm de profondeur de la position x=0 à la position

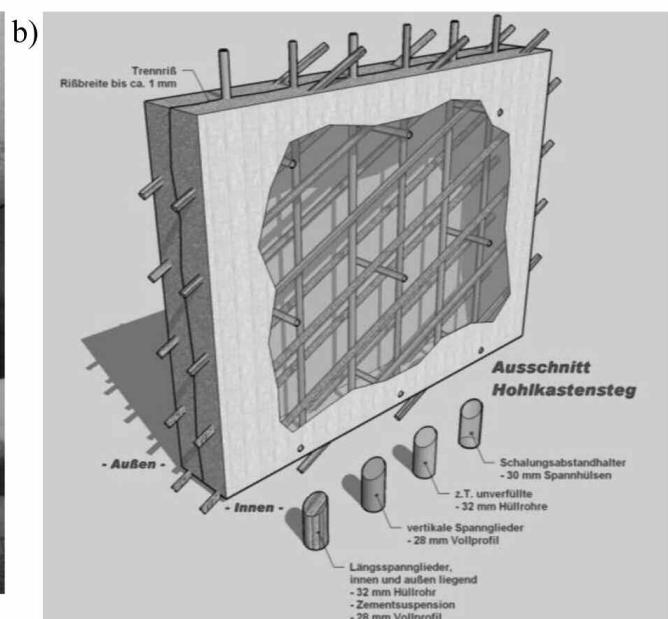
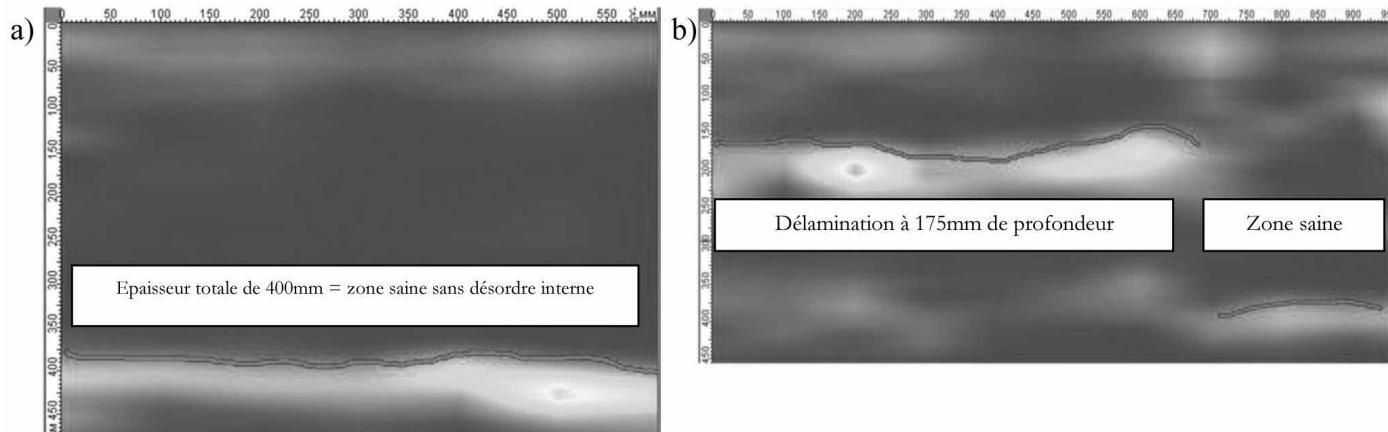


Figure 5 : a) Europabrücke b) Illustration des éléments contenus dans un bracon.



**Figure 6 : a) Extrait d'une coupe D-scan indiquant une zone saine.
b) Extrait d'une coupe D-scan indiquant une délamination et une zone saine.**

$x=700\text{mm}$. La seconde interface située à environ 400 mm de profondeur (i.e. égale à l'épaisseur du bracon) de la position $x=700\text{mm}$ à $x=950\text{ mm}$ est une zone saine. Les résultats de la tomographie ultrasonore ont été confirmés par la méthode écho d'impact ainsi que par des validations destructives. Après validation de la méthode, les tests ont été réalisés sur les sections désignées par le Maître d'Ouvrage.

4.3. Résultats

Seule une partie d'un caisson, environ 630 m^2 de bracon, a été testée à partir des surfaces intérieures. La partie testée comprenait 42 sections de bétonnage dont 21 sections présentaient des délaminations qui ont été observées à des profondeurs variant de 80 à 250 mm. Au total 1100 points de mesure ont été effectués en 3 jours de tests incluant la phase de validation par carottage.

4.4. Discussion des résultats

Dans le cas de la tomographie ultrasonore, l'analyse des résultats, sous forme d'images d'intensité, peut apparaître en première approche plus directe que l'analyse de résultats d'écho d'impact qui nécessite une analyse de spectre. Toutefois, les résultats de tomographie peuvent être complexes. Des réflexions parasites peuvent apparaître dans les images. La figure (6b) met notamment en évidence des réflexions parasites en surface et en profondeur. Ces réflexions parasites ont pour origine des réflexions secondaires artificiellement créées par l'algorithme. La qualité du contact transducteurs/béton influe également sur la présence de ces réflexions. Mais les parasites proches de la surface peuvent être considérablement réduits en réalisant un calibrage de l'antenne avant les mesures. Au besoin, le calibrage peut être répété. La bonne interprétation des résultats nécessite, comme pour tout test non destructif, d'avoir un maximum d'informations constructives et un opérateur expérimenté.

Dans le cas de l'Europabrücke, la majorité des tests a révélé des signaux clairs. Les tests dont l'analyse était plus difficile ont été complétés par l'écho d'impact. La qualité du bétonnage et de l'état de surface ainsi que la densité de

ferraillage peuvent affecter localement la qualité des signaux. La qualité des images reste intimement liée à la résolution du système. Enfin, le volume des vides détectés n'est pas identifiable.

5. CONCLUSION

Le cas de l'Europabrücke a montré la pertinence de la tomographie ultrasonore. La profondeur de pénétration des ondes de cisaillement et la reconstruction 3D confèrent à la tomographie ultrasonore de nombreuses applications dans le domaine de la construction : recherche de désordres internes, mesures d'épaisseur, détection de gaines de pré-contrainte... Cette méthode est rapide et ne nécessite l'accès qu'à une seule face de l'objet. De plus, elle permet de scanner en profondeur des objets massifs et dans certains cas collecter des informations simultanées à différentes profondeurs (armatures, désordres internes, épaisseur totale du massif). La profondeur de détection atteint, en pratique, 1 m pour le béton armé et 1,5 m pour la pierre naturelle [7]. Ces limites ne sont pas absolues, elles dépendent des caractéristiques de l'objet testé (ferraillage, qualité du béton...). Depuis la commercialisation du premier tomographe dédié au béton en 2008, les retours d'expériences sont nombreux et concluants. Les développements sont toujours en cours. Des progrès en matière de résolution et d'analyse sont attendus. En particulier, l'analyse de la phase des ondes de retour permettrait de distinguer les réflexions dues à l'air des réflexions dues au métal.

RÉFÉRENCES

- [1] V.M. Malhotra and N.J. Carino, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press Second Edition
- [2] Leslie, J.R. and Cheesman, W.J., An Ultrasonic Method of Studying Deterioration and Cracking in Concrete Structures, ACI J. Proc., 46 (1), 17, 1949
- [3] Jones, R., The Application of Ultrasonic to the Testing of Concrete, Research, London, 383, 1948
- [4] V.N.Kozlov, A.A. Samokrutov, V.G. Shevaldykin, Ultrasonic Equipment for evaluation of concrete structures based on trans-



ducers with dry point contact, In : Al-Quadi, Washer, G (eds.) Proceedings of NDE Conference on Civil Engineering, 2006, St Louis, MO, USA, pp.496-498. NDT Tch., Columbus 2006
[5] M. Schickert, M. Krause, W. Muller : Ultrasonic imaging of concrete elements using reconstruction by synthetic aperture focusing technique. J. Mater Civ. Eng 15(3), 235-246 (2003)

- [6] M. Krause, B. Milmann, M. Schickert, K. Mayer, Investigation of Tendon Ducts by Means of Ultrasonic Echo Methods: A Comparative Study, ECDNT 2006 – Tu 3.2.1
- [7] M. Grill, C. Michaux, Ninth ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete Seville, October 13-17, 2009

