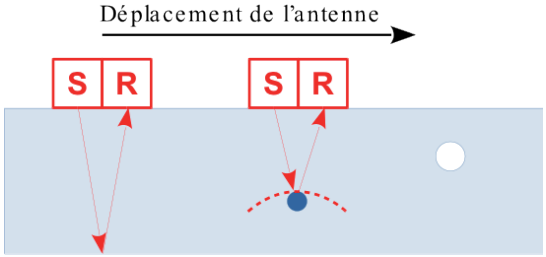
B1-11

PULSE ÉCHO ET TOMOGRAPHIE ULTRASONORE

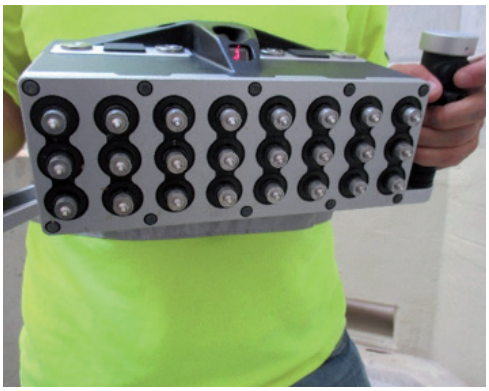
PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

OBJECTIF	La tomographie US est un développement de la technique pulse-écho. Les objectifs de ces deux méthodes sont distingués selon la recherche de la géométrie en supposant des caractéristiques du béton homogène (cas 1) alors que dans le cas 2 on cherche à évaluer un module en connaissant l'épaisseur de la pièce. **Cas 1 :** – recherche de la géométrie d'éléments de structures en béton, – recherche de vides, de délaminages quasi-parallèles au parement, – recherche de gaines de précontrainte et de vides d'injection significatifs, – imagerie d'éléments de structures en béton, – évaluation de l'épaisseur d'éléments plans de structure (poutres, murs, piles, etc.). **Cas 2** : – évaluation du module d'Young dynamique du béton.
PRINCIPE	Ces deux méthodes sont basées sur la propagation d'ondes ultrasonores de volume de compression (onde P) ou de cisaillement (onde S) et leurs réflexions sur des interfaces de fort contraste comme l'interface entre le béton et l'air ou celui entre le béton et l'acier. Le temps d'arrivée de l'onde réfléchie (départ du signal ou 1er pic) est détecté. Si on connait l'épaisseur de béton traversé, on peut en déduire la vitesse des ondes et inversement. Pour le pulse-écho ultrasonore (UPE), l'émetteur et le récepteur peuvent être constitués chacun d'un seul capteur ou d'un tableau de traducteurs (ou transducteurs) pour pouvoir augmenter l'énergie du signal donc la sensibilité du dispositif. Ils sont solidaires et la distance entre l'émetteur et le récepteur est fixe. Pour la tomographie ultrasonore, il est nécessaire de disposer de plusieurs sources et de plusieurs récepteurs, pouvant être composés chacun d'un seul capteur ou d'un tableau de traducteurs. Chaque source à son tour émet un signal qui est reçu par l'ensemble des récepteurs. Une inversion de l'ensemble des signaux est nécessaire pour reconstituer le modèle de la structure auscultée, ses propriétés et sa géométrie en 2 voire 3 dimensions. **Cas 1 :** La mesure physique directe de l'épaisseur en quelques points permet d'étalonner la vitesse puis de l'utiliser pour reconstruire des images en supposant que la vitesse est la même en tout point. L'appareil de mesure est déplacé selon un axe X et un pas fixé pour réaliser un profil. Toute discontinuité géométrique de la structure ou mécanique à l'intérieur de celle-ci perturbe les signaux reçus ; à titre d'exemple la présence d'une cavité cylindrique se traduit par un signal réfléchi suivant une forme d'hyperbole dans le cas de l'UPE. Une image en 2D (dans le plan XZ, Z étant l'axe perpendiculaire à la surface) peut être obtenue. En réalisant une cartographie de mesures selon un quadrillage en X, Y, une image en 3D peut être reconstituée par le logiciel de traitement des mesures.  Schéma de principe correspondant au cas 1 **Cas 2 :** On peut utiliser des capteurs de compression P ou de cisaillement S ou les 2. Si l'épaisseur est connue, la vitesse des ondes P (resp. S) peut être calculée. Si on connait en outre la densité du béton, on peut déduire des vitesses P et S le module d'Young dynamique.
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non

MATURITÉ	**Cas 1 :** Méthode relativement récente, la difficulté résidant dans l'interprétation et l'inversion des mesures. Sous réserve d'un calibrage correct, les mesures d'épaisseurs sont bien maîtrisées. **Cas 2 :** Méthode en cours de développement pour l'évaluation des module d'Young et coefficient de Poisson dynamiques.
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	Le matériel est diffusé dans le commerce. Il est constitué d'une antenne de capteurs émetteurs et récepteurs reliée à un système d'acquisition portatif constitué d'une carte d'acquisition et d'un logiciel de traitement de données, spécifique au problème posé. Les paramètres d'acquisition (distance, pas, vitesse estimée, durée d'enregistrement du signal, fréquence centrale, etc.) sont réglés avant le début des mesures. Un écran permet de visualiser les signaux et une première image en temps réel sur un petit écran. Les photos suivantes illustrent, à titre d'exemple, deux matériels employés.



Appareil de type PROCEQ en cours d'utilisation (Photo IFSTTAR)


Vue des transducteurs de l'appareil PROCEQ (Photo IFSTTAR)


Appareil de type MIRA en cours d'utilisation (Photo ADISS)

MODALITÉS D'APPLICATIONS

DOMAINE D'APPLICATION	Toute structure en béton, béton armé ou béton précontraint se présentant sous forme d'assemblage de parallélépipèdes plans. Plus la géométrie sera complexe, plus l'analyse sera difficile. Plus le parement d'une structure est courbe, plus les mesures sont difficiles à effectuer. Pour le cas n°2, il vaut mieux se limiter aux éléments plans (poutres, parois, etc.).
SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	Le matériel est portatif et autonome en énergie. L'accès à la face à ausculter doit être dégagé pour plaquer l'antenne. Le parement de béton ne doit pas comporter de défauts de surface trop importants (granulats lessivés, bulles, dépôts de laitance, etc.). En présence d'une couche de poussière, il est préférable de nettoyer le parement par brossage.
LIMITES D'UTILISATION	L'état de saturation en eau ou de dégradation du béton peut limiter la profondeur d'investigation. Des mesures d'épaisseur ont été réalisées jusqu'à 1 m de béton ; au-delà, nous n'avons pas de connaissance sur la limite d'épaisseur auscultable. Cela dépend des systèmes de mesure. Des objets situés à faible distance de la face auscultée sont difficilement détectables voire impossibles à détecter (exemple du premier lit d'armatures). Un ferraillage trop dense perturbe les mesures. La surface d'un vide directement atteinte par les ondes vide est détectable mais pas sa surface opposée. Un vide peut masquer les objets et les défauts situés derrière. Difficulté d'interprétation entre un vide lié à un défaut d'injection d'une gaine de précontrainte et un vide concomitant liés à un défaut de bétonnage autour de la gaine (ségrégation, défaut de vibration,etc.).

PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ	**Cas 1 :** Pour les mesures d'épaisseur : de l'ordre de 2% de l'épaisseur totale si les conditions de calibrage sont bonnes (matériau globalement homogène et possibilité de vérifier localement une épaisseur). On peut positionner en profondeur une gaine de précontrainte à environ 2 % près mais il est quasi impossible de déterminer son diamètre. **Cas 2 :** La vitesse des ultrasons dans le béton dépend de sa porosité et de son degré de saturation, donc de sa formulation et de son état. C'est pourquoi une calibration sur carottes est nécessaire pour obtenir une bonne précision dans l'évaluation des épaisseurs, des vitesses ou des modules dynamiques pour un élément d'ouvrage donné. La précision sur le module d'Young dynamique.est alors inférieure à une valeur estimée à 1 GPa.
PERSONNEL ET COMPÉTENCES	Un ou deux chargés d'investigations selon le système de mesure utilisé ou la configuration de la structure (verticale ou horizontale).
CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES	
ACCÈS À 1 OU 2 FACES	1 face
COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES	Non
RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE	La durée des mesures est de plusieurs secondes, il est donc fastidieux de réaliser un profil (image 2D) ou une cartographie (3D) sur une large surface, sachant que plus le pas entre 2 mesures est serré, meilleure est la précision. Dans de bonnes conditions d'accès, plusieurs centaines de mesures sont réalisables dans une journée. Pour faire autant de mesures, il vaut mieux être 2 opérateurs et se relayer. **Cas 1 :** Pour les évaluations d'épaisseur et la recherche de discontinuités planes, travail par point ou suivant un profil ou une cartographie de dimensions quelconques, de préférence choisi en corrélation avec les mailles d'armatures et de la taille des objets recherchés. Pour la recherche des gaines de précontrainte, la coupe doit être perpendiculaire à l'axe des gaines. **Cas 2 :** Les mesures sont réalisées au centre des mailles d'armatures passives.
DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS	**Cas 1 :** Lecture directe ou non (selon le dispositif utilisé) en temps réel pour les mesures d'épaisseur à condition d'avoir calibré en vitesse. Nécessité d'une exploitation et d'une présentation des résultats en différé pour la recherche des vides ou des gaines ou pour analyser des géométries plus complexes. **Cas 2 :** Exploitation en différé préférable.
PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES	Non
PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES	Non
RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC	Non
ENCOMBREMENT – POIDS	Faible encombrement – La force à appliquer est relativement importante et donc il est difficile à appliquer à bout de bras ou à maintenir le système d emesures pendant plusieurs secondes en chaque point de mesure. La difficulté augmente avec le nombre de traducteurs.
AVANTAGES – INCONVÉNIENTS	
AVANTAGES	Méthode non destructive, non contraignante pour l'environnement. Bonne sensibilité en profondeur. **Cas 1 :** Évaluation facile d'épaisseur de plaques en béton. La possibilité de visualiser une image en temps réel rend cette méthode intéressante comme préalable à d'autres méthodes. **Cas 1 :** Évaluation possible du module d'Young dynamique *in-situ* sous réserve de la connaissance de l'épaisseur et de la densité du béton, obtenue par des mesures de calibration.

INCONVÉNIENTS	Rendement relativement faible Faible sensibilité en surface **Cas 1 :** Méthode encore en cours de développement et qui nécessite un retour d'expérience sur ouvrages réels avant d'être généralisée. **Cas 2 :** Très peu de structures (poutre, murs et balcons) ont été auscultées à ce jour.
DISPONIBILITÉ – COÛT	
DISPONIBILITÉ	Faible
COÛT	Moyen
RÉFÉRENCES	
NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES	NF EN 12504-4 (2005) «Éssais pour béton dans les structures - Partie 4 : determination de la vitesse de propagation du son » « Testing concrete - Part 4 : determination of ultrasonic pulse velocity » Dérobert X. and Abraham O., "GPR and seismic imaging in a gypsum quarry", Journal off Applied Geophysics, 2000, Vol. 45, pp 157-169 Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B., Müller, W.,Schmitz V. Wiggenhauser H. "Ultrasonic imaging of concrete members using an array system", NDT&E Int., Vol. 34(6), 2001, pp.403-408 Taffe A., Wiggenhauser H., "Validation for Thickness Measurement in Civil Engineering with Ultrasonic Echo", Proceedings of Int. Symp. on NDT-CE, Saint-Louis, USA, 2006, pp506-512 De La Haza, A., Samokrutov A., Samokrotov P., "Assessment of concrete structures using the Mira and Eyecon ultrasonic shear wave devices and the SAFT-C image reconstruction technique", Constr. Build. Mat. Vol.38, 2013, pp.1276-1291 APOS : Opération de Recherche de l'IFSTTAR : Auscultation pour des ouvrages sûrs : https://www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/AII1/APOS.html