

Zeitschrift: Bulletin du ciment
Herausgeber: Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)
Band: 68 (2000)
Heft: 3

Artikel: Méthodes d'essai non destructives pour ouvrages en béton, 2e partie
Autor: Hermann, Kurt
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-146519>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Méthodes d'essai non destructives pour ouvrages en béton, 2^e partie

Les mesures par écho d'impulsions ultrasonores et par radar à impulsions sont d'autres exemples de méthodes d'essai non destructives dans la construction.

Il y a une grande similitude entre la méthode Impact-Echo traitée dans le dernier numéro du «Bulletin du ciment» [13] et les méthodes par écho d'impulsions ultrasonores et par radar à impulsions ou géoradar décrites ci-après. Elles diffèrent principalement par les gammes de longueurs d'ondes – et donc également par les gammes de fréquences d'ondes – utilisées.

Le présent article est basé essentiellement sur des exposés [3, 4] présentés lors du séminaire du TFB «Praxistaugliche Prüfmethode für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» (voir encadré «A propos de cet article»).

Echo d'impulsions ultrasonores

On appelle ultrasons les vibrations mécaniques de la matière dont la fréquence est supérieure au seuil d'audibilité de l'homme (fréquence > 20 kHz). Les mesures par écho d'impulsions ultrasonores font partie depuis plusieurs décennies des procédés standard pour l'essai non destructif de matériaux homogènes tels que métaux, ainsi que pour le diagnostic en médecine.

Les premières mesures par ultrasons sur des éléments d'ouvrage en béton

ont été effectuées par transmission lorsque la face inférieure et la face supérieure étaient accessibles. La méthode par écho d'impulsions ultrasonores fournit depuis environ dix ans des résultats utilisables.

Les ultrasons dans le béton

Pendant leur propagation dans le béton, les ondes ultrasonores sont réfléchies ou dispersées et amorties aux interfaces entre granulats et pâte de ciment durcie, ainsi qu'aux bulles d'air. La représentation ondulatoire en devient diffuse déjà après un court parcours de l'onde incidente. De nombreux échos provenant de la réflexion sur les granulats se superposent aux signaux des ondes réfléchies aux interfaces concernées (face arrière de l'élément d'ouvrage, gaine, etc.). D'autres ondes peuvent s'y ajouter, qui se superposent également aux véritables signaux. Les ondes de surface (ondes de Raleigh), se produisant également avec la méthode Impact-Echo [13], en sont un exemple.

De plus longs parcours des ondes sonores dans le béton ne sont possibles que si la longueur d'onde ultrasonore λ est plus grande que le diamètre maximum des granulats. Les vitesses d'onde longitudinale v typiques des bétons sont d'environ 4000 m/s. C'est

pourquoi pour les mesures par écho d'impulsions ultrasonores, on utilise des ondes d'une gamme de fréquences de 50 à 300 kHz, dont les longueurs d'onde λ sont d'environ 80 à 13 mm ($\lambda = v/f$; f = fréquence) [3].

Appareillage

Décrit de façon simplifiée, un appareil pour l'écho d'impulsions ultrasonores se compose d'un émetteur générant des impulsions électriques et d'un palpeur avec transducteur piézoélectrique, lequel génère des impulsions mécaniques à partir des impulsions électriques, et reconvertit en impulsions électriques les frac-

A propos de cet article

Le présent article – comme sa première partie [13] – est basé en grande partie sur des exposés présentés lors du séminaire du TFB n° 994 360 «Praxistaugliche Prüfmethode für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» du 8 décembre 1999 à Wildegg. Les orateurs étaient:

- [1] Dr. Daniele Inaudi, Smartec SA, Grancia
- [2] Prof. Dr. Eugen Brühwiler, EPFL, Lausanne
- [3] Dr. Herbert Wiggenhauser, BAM, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
- [4] Johannes Hugenschmidt, Empa, Dübendorf

Des compléments provenant de la littérature spécialisée figurent dans la liste en page 6.

tions d'onde sonore réfléchies. Celles-ci sont amplifiées dans le récepteur de l'appareil à ultrasons; la variation des impulsions en fonction du temps peut être suivie sur un écran (voir figure 6).

On distingue entre mesures bistatiques et mesures monostatiques, selon que l'émetteur et le récepteur d'ultrasons sont séparés ou non. Dans le tableau d'écho d'impulsions, plusieurs têtes – par exemple dix – fonctionnent tour à tour comme émetteur et comme récepteur. De gros efforts ont été consentis pour perfectionner cette méthode. On a par exemple mis au point des

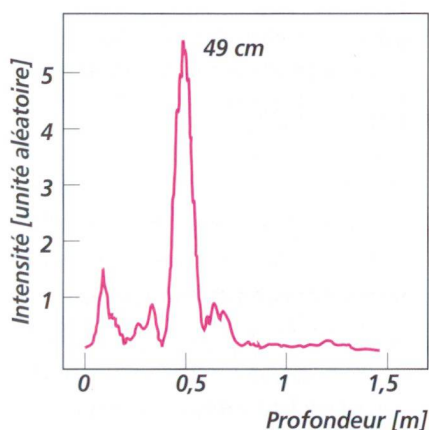


Fig. 7 Détermination de l'épaisseur d'une dalle en béton contenant un élément réfléchissant (joint de reprise) à une profondeur de 50 cm: répartition en profondeur de l'énergie ultrasonore rétrodiffusée (selon [3, 10]). Dessin: TFB

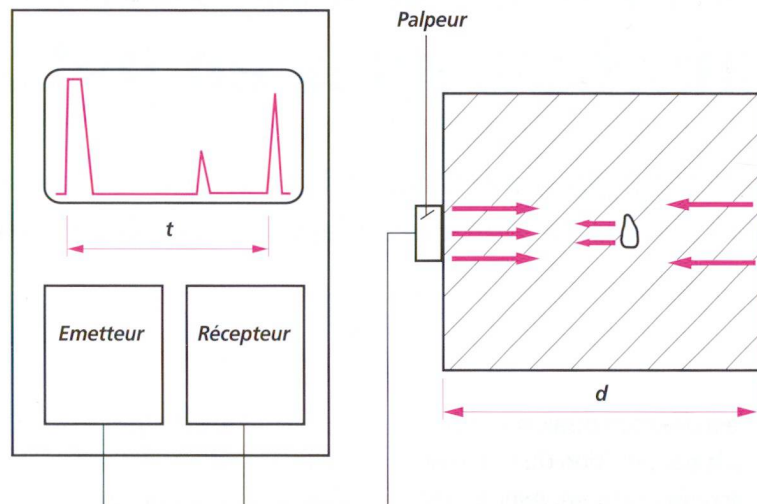


Fig. 6 Représentation schématique d'une mesure par écho d'impulsions ultrasonores (selon [9]). Dessin: TFB

systèmes informatiques et des techniques de filtrage pour améliorer les résultats des mesures et leur interprétation.

Un exemple simple tiré de la pratique [3, 10]

Une nouvelle construction devait éventuellement être réalisée sur la semelle d'un ouvrage à démolir se trouvant 2 m au-dessous de la nappe phréatique. Pour le contrôle des plans de construction, une mesure de l'épaisseur de cette semelle a été effectuée, qui, pour des raisons faciles à comprendre, devait être non destructive.

Sur une carotte d'environ 10 cm de longueur, on a déterminé en m/s (4000 ± 300) la vitesse v des ondes longitudinales dans le béton à proximité immédiate de la zone de mesure. Comme il est important que les têtes de mesure soient bien accouplées à la surface de l'élément d'ouvrage, la zone de mesure (60 x 120 cm) a été poncée. La position optimale des têtes de mesure, accouplées avec de la vaseline, a été déter-

minée sur la base d'un examen de la zone au moyen d'un détecteur d'armature (les têtes devaient être placées autant que possible entre les barres d'armature).

On a enregistré au total 156 images d'impulsions en fonction du temps. Leur superposition et leur intégration ont donné la répartition en profondeur de l'énergie ultrasonore rétrodiffusée représentée à la figure 7. Les autres signaux sont des signaux rétrodiffusés, qui peuvent provenir par exemple de l'armature. Ce résultat était surprenant. Mais lors de l'étude des plans de construction, il est apparu que la semelle avait été réalisée en deux parties, un joint de reprise ayant été prévu à 50 cm de profondeur. La réflexion a donc été mesurée à ce joint.

Domaines d'utilisation

Les mesures par écho d'impulsions ultrasonores conviennent pour mesurer l'épaisseur de fondations et semelles, lorsque certaines conditions sont remplies. En dehors de l'accessibilité, qui peut être un problème

pour de nombreux essais non destructifs, la composition du béton est également importante. Avec un diamètre maximum des granulats jusqu'à 16 mm, et si les fers d'armature ne sont pas trop serrés (> 10 cm), il suffit souvent d'un appareillage simple. Dans de telles conditions, il est possible d'effectuer des mesures d'épaisseur jusqu'à 1 m de profondeur.

La localisation de l'armature et la détection de tuyaux vides en matière plastique, de canaux de coffrage glissants, ainsi que de corps déplaceurs dans les ponts, sont également possibles. La localisation de délaminations (p. ex. enduits) et de défauts d'injection dans les gaines n'est pas encore applicable en pratique. Aussi bien l'exécution des mesures que l'interprétation des résultats posent de hautes exigences [3].

Radar à impulsions

Le radar à impulsions permet de détecter des objets et des interfaces entre divers matériaux, pour autant que ceux-ci témoignent de propriétés électromagnétiques différant suffisamment. Pour des essais non destructifs, une résolution élevée est souvent plus importante qu'une grande profondeur de pénétration. Etant donné que parallèlement à l'augmentation de la fréquence, la

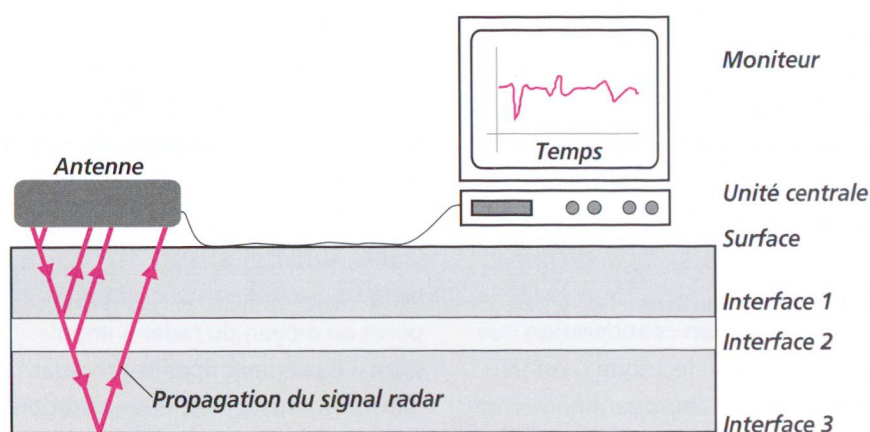


Fig. 8 Représentation schématique du principe de fonctionnement des mesures par radar à impulsions (selon [12]).

Dessin: TFB

profondeur de pénétration diminue alors que la résolution augmente, des impulsions électromagnétiques d'une durée généralement de moins de 1,0 ns sont générées dans la gamme des hautes fréquences (à partir de 1 GHz). Ces impulsions sont diffusées par une antenne, réfléchies aux interfaces de matériaux à propriétés diélectriques différentes, transmises et absorbées. Les impulsions réfléchies sont reçues par l'antenne et, après traitement, évaluées dans le PC en ce qui concerne leur durée, leur intensité ainsi que d'autres paramètres (figure 8).

Sont visualisés:

- Images d'une trace: représentation d'une mesure en un point auquel l'intensité du signal en fonction du temps est reportée.

- Documents radar; ces documents résultent de la réunion le long d'une ligne des nombreuses courbes isolées provenant des mesures.
- Mesures avec distance variable entre antenne émettrice et antenne réceptrice.

La vitesse de propagation v de l'onde électromagnétique dans le béton est approximativement connue; elle peut également être déterminée par des mesures par transmission (carottes, ou directement sur l'élément d'ouvrage lorsque celui-ci est accessible depuis sa face arrière). L'échelle de temps peut ainsi être convertie en une échelle de profondeur, car le rapport est

$$v = 2d/t = c_0 \cdot (\epsilon_r)^{1/2} \quad (7)$$

d: épaisseur du matériau à pénétrer
t: durée de l'onde électromagnétique dans le matériau
c₀: vitesse de la lumière dans le vide
ε_r: coefficient diélectrique du matériau

Le facteur 2 résulte du fait que le signal traverse deux fois la structure examinée.

Il faut prendre en considération que le coefficient diélectrique ε_r est influencé par plusieurs paramètres, entre autres par l'humidité et la teneur en sel du matériau, ainsi que par la porosité et la fréquence des ondes électromagnétiques. C'est pourquoi

sans carottages ou sondages isolés, en particulier pour les évaluations quantitatives, on ne peut fréquemment pas obtenir d'indications plus précises.

Géoradar [4]

L'examen non destructif de routes et ponts au moyen du radar à impulsions – également appelé géoradar dans ce contexte – est une utilisation intéressante. Des informations sur les expériences faites avec une installation de géoradar mobile (voir *photo de la page de titre*) ont été données

lors du séminaire du TFB sur les méthodes d'essai non destructives. Deux antennes paraboliques d'une fréquence nominale de 2,5 GHz sont fixées à l'avant du véhicule à 25 cm du sol. A l'arrière du véhicule se trouve une antenne de 900 MHz ainsi qu'un transmetteur de position. Le reste de l'appareillage est à l'intérieur du véhicule.

Cette configuration de l'installation de géoradar permet par exemple, pour les mesures d'épaisseur de revêtements en béton, des vitesses jusqu'à 80 km/h, sans gêner la circulation. Il faut en l'occurrence prendre en considération que l'espacement des différentes mesures (résolution horizontale) augmente avec la vitesse; à 50 km/h, il est de 13 cm. Lorsqu'une résolution horizontale élevée ou une grande précision de positionnement sont exigées, par exemple pour l'examen de la couche d'armature dans un pont, la vitesse doit être limitée à 10 km/h environ.

L'enrobage de l'armature et l'épaisseur du revêtement d'un pont de 209 m de longueur sont représentés à la *figure 9*. Aussi bien les réflexions de la face inférieure du revêtement que celles dues à la couche d'armature supérieure sont nettement perceptibles. L'interprétation a donné les résultats reproduits dans le graphique.

BIBLIOGRAPHIE

- [3] **Wiggenhauser, H.**, «Zerstörungsfreie Lokalisierung von Spanngliedern und Fehlstellen in Stahlbeton», exposé présenté lors du séminaire du TFB n° 994 360 «Praxistaugliche Prüfmethode für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» du 8 décembre 1999 à Wildeggen.
- [4] **Hugenschmidt, J.**, «Georadar zur zerstörungsfreien Untersuchung von Strassen und Brücken», exposé présenté lors du séminaire du TFB n° 994 360 «Praxistaugliche Prüfmethode für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» du 8 décembre 1999 à Wildeggen.
- [9] **Krieger, J., Krause, M., et Wiggenhauser, H.**, «Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken», Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft **B 18** (1998).
- [10] **Mielentz, F., Milman, B., Krause, H., et Wiggenhauser, H.**, «Praxiseinsatz eines Ultraschallecho-Verfahrens zur Strukturuntersuchung von Betonbauteilen», in «Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen», DGZfP-Berichtsband 66-CD, Plakat 3, pages 163–170 (1999).
- [11] **Krieger, J.**, «Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode bei Betonbrücken», Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft **B 9** (1995).
- [12] **Hugenschmidt, J.**, «Georadar in Strassenbau und Unterhalt. Anwendungsbeispiele – Berichtsperiode 1995–1997», Empa, Dübendorf (1997).
- [13] **Hermann, K.**, «Méthodes d'essai non destructives pour ouvrages en béton», 1^{er} partie, Bulletin du ciment **68** [2], 3–7 (2000).

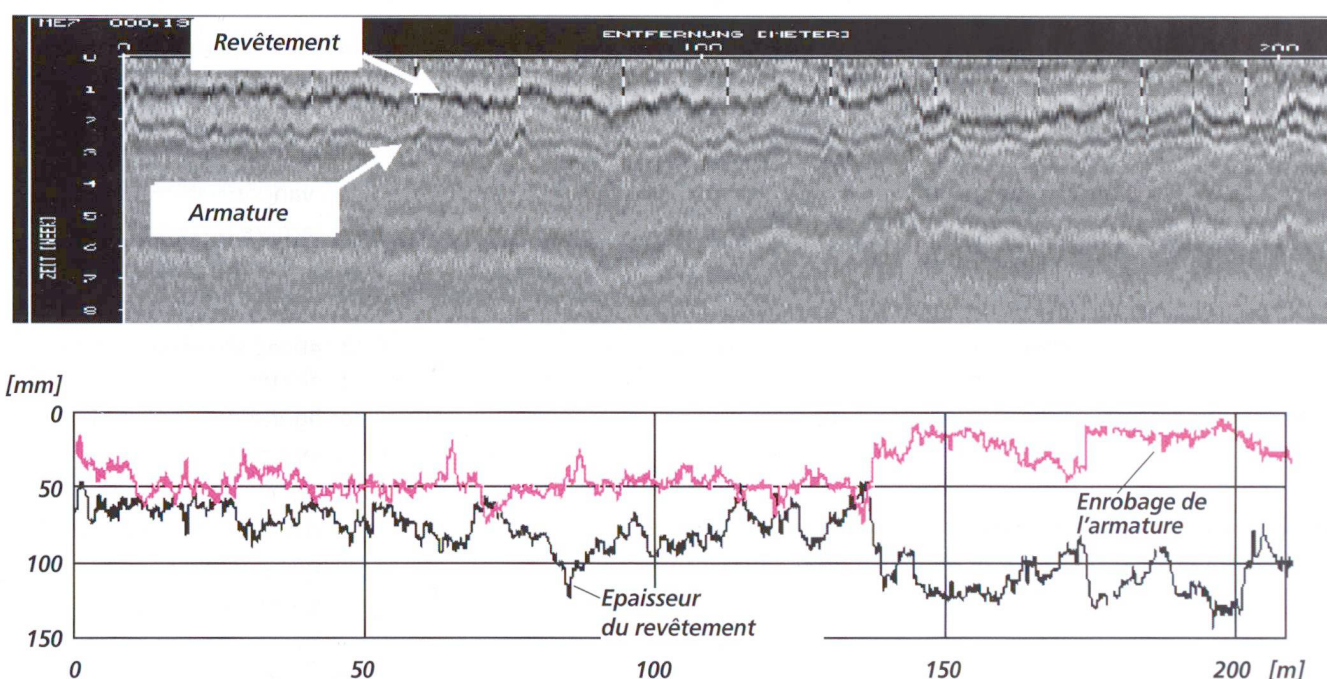


Fig. 9 Examen d'un pont: enregistrement (en haut) ainsi qu'épaisseur du revêtement et enrobage de l'armature (en bas).

Figure: Empa, Dübendorf

Des sondages et carottages à 23 endroits de ce pont et d'autres situés aux alentours ont fourni des indications sur la précision des mesures: elle était de ± 6 mm pour l'enrobage et de ± 12 mm pour l'épaisseur du revêtement.

Les mesures par géoradar ont fait leurs preuves pour les examens de routes et de ponts. Nous mentionnerons ici la détermination de l'épaisseur totale des revêtements routiers et de l'épaisseur des différentes couches du revêtement, de l'épaisseur des couches d'armature, ainsi que la détection de défauts

dans le béton sous la surface du revêtement dans les ponts [4]. Des informations supplémentaires fournies par exemple par des carottes sont toujours utiles, et souvent indispensables.

La profondeur de pénétration limitée des ondes électromagnétiques et la résolution elle aussi limitée peuvent présenter des inconvénients. De plus, les signaux radar ne traversent pas les métaux.

Conclusion

Lors du séminaire du TFB, seule une petite sélection de méthodes d'essai

non destructives pour ouvrages en béton a pu être présentée. Aussi bien la méthode Impact-Echo que celles par écho d'impulsions et par radar à impulsions exigent un coûteux appareillage. On mesure beaucoup, mais pour de nombreuses mesures et interprétations, des spécialistes sont encore nécessaires. Dans quelques domaines cependant – pensons au géoradar –, ces méthodes sont déjà applicables dans la pratique, alors que dans d'autres domaines, il reste encore pas mal à faire pour qu'elles s'imposent.

Kurt Hermann, TFB