

# Méthodes d'évaluation et contrôle non destructif et de géophysique

Xavier DEROBERT  
Iftstar, route de Bouaye, CS4, F-44344 Bouguenais, France

## Résumé.

Les techniques de reconnaissance non destructives (ND) sont couramment employées pour le génie civil des transports, de l'énergie ou du domaine urbain, que l'on parle de méthodes d'évaluation et contrôle non destructif ou de géophysique. Si dans les dernières décennies, on s'intéressait à des informations géométriques internes du milieu ausculté, les recherches récentes se sont orientées vers des informations liées à la nature et l'état de ce milieu pour tendre vers une notion d'évaluation non destructive. Actuellement, les études en cours cherchent à intégrer les valeurs déduites des mesures ND dans des approches statistiques associées à des modèles de durée de vie.



Projet cofinancé par le Fonds européen de développement régional dans  
du programme INTERREG IVA Grande Région  
*L'Union européenne investit dans votre avenir.*

Gefördert durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung im  
des Programms INTERREG IVA Großregion  
*Die Europäische Union investiert in Ihre Zukunft.*



## 1. Introduction

Les techniques de reconnaissance non destructives (ND) sont couramment employées pour le génie civil des transports, de l'énergie ou du domaine urbain. Suivant les communautés et le milieu ausculté, on parle de méthodes d'évaluation et contrôle non destructif pour l'auscultation de structures ou infrastructures ou de géophysique pour l'auscultation du sous-sol (du proche sous-sol pour des applications de génie civil).

Ces techniques utilisent de méthodes physiques indirectes, par propagation d'ondes ou de diffusion de champs, pour obtenir des informations internes au milieu ausculté [1-2]. Pendant les dernières décennies, avec les technologies et informatiques de l'époque, les techniques développées étaient principalement orientées vers la recherche d'informations géométriques. On peut citer, à travers la construction de coupes internes (ou images qualitatives), le profil radar, la tomographie sismique ou sonique, le panneau électrique, ou à travers des cartographies des cartes de résistivité électrique, de gravimétrie, ou d'images infra-rouges.

Les recherches récentes, bien qu'ayant vu également évoluer ces techniques vers des outils plus précis, rapides, ou légers, se sont orientées vers des informations sur l'état du milieu ausculté et donc vers des notions d'évaluation. On évoque alors des notions d'images (tomographies, panneaux, sections...) quantitatives.

Actuellement, les travaux en cours s'orientent vers les relations pouvant exister entre les valeurs déduites des mesures ND et les indicateurs d'état ou de composition du milieu pour que ces premières puissent être utiles, et donc prises en compte comme entrées, à des modèles de durée de vie d'ouvrages. Cela implique des approches de complémentarité, fusion de données ND, approches statistiques qui sont des orientations de recherche actuelles.

Les images, servant d'illustrations dans le texte qui suit, proviennent sauf exceptions d'études réalisées par le Laboratoire Auscultation et Imagerie (Assessment and Imaging Laboratory) sur ces dernières années.

## 2. Imagerie qualitative

L'une des techniques les plus couramment employées pour donner de manière indirecte des informations géométriques est la technique radar (Ground-penetrating radar, GPR). Lors de son déplacement, le système enregistre le temps de propagation d'impulsions électromagnétiques brèves réfléchies aux différentes interfaces qu'elles rencontrent. Cela se traduit par l'acquisition de coupes-temps correspondant à une image déformée de la section verticale du milieu ausculté (Fig. 1). En effet, comme sur l'exemple présenté en Fig.1a, l'unité de l'axe vertical est une unité de temps (des nanosecondes pour la technique radar. Une calibration est alors nécessaire pour connaître les vitesses de propagation des ondes radar dans les milieux auscultés pour transformer ces profils temporels en sections.

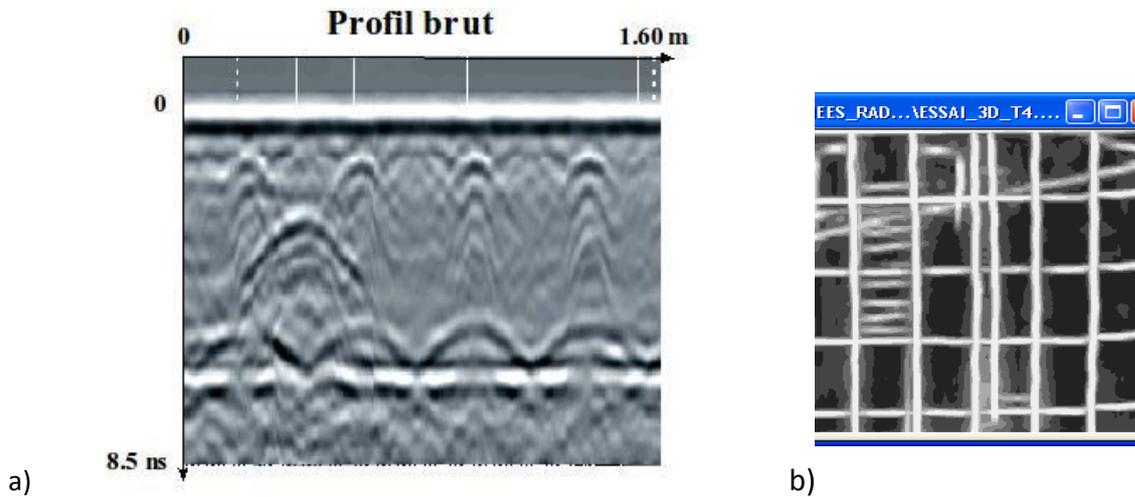


Figure 1: a) profil radar (réalisé à 1.5 GHz) sur l'âme d'une poutre de béton précontraint. b) Cartographie radar sur un élément de quai précontraint (source : Cerema – DLRSB).

On peut, à partir de plusieurs linéaires d'acquisition parallèles, reconstruire des cartographies issues d'un bloc de données 3D, comme pour le cas de la technique radar (voir la figure 1b présentant une image du ferrailage – armatures passives et actives – d'un élément de structure de quai), ou issue d'une mesure intégrante par position spatiale.

Pour ce dernier cas, on peut prendre comme exemple des techniques de mesures électromagnétiques (EM) basses fréquences (BF – quelques dizaines de Hertz), pour des applications géophysiques. Le principe général repose sur l'émission d'un signal EM entreteu, à l'aide d'une bobine et la mesure d'un champ EM induit par la nature du milieu environnant. Cette mesure intégrant un volume pluri-métrique de sol autour du point de mesure donne une information en terme de résistivité électrique apparente. Cette approche reste qualitative car le paramètre mesuré n'est pas directement relié à la nature diélectrique intrinsèque du proche sous-sol. L'exemple présenté en figure 2 montre une cartographie EM BF pour la recherche de vides en Normandie.

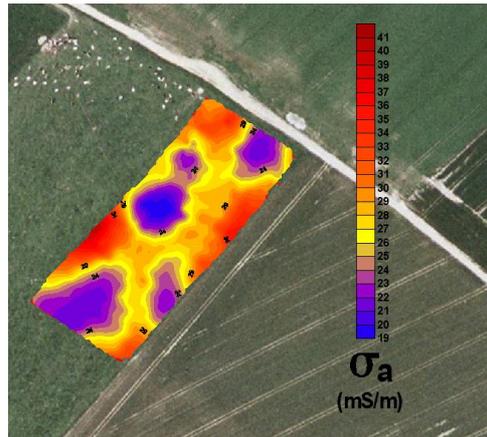


Figure 2 : Cartographie EM BF pour la recherche de vides en Normandie (FR). (source : Cerema - DLRR)

On pourrait citer d'autres approches plus complexes telles que les techniques tomographiques dont l'objet est de reconstruire numériquement par inversion des données une section du milieu ausculté. Pour cela, il est nécessaire de disposer de multi-capteurs, implantés selon différents espacements de façon que les différentes sections – ou volumes – élémentaires auscultées influencent plusieurs mesures. La figure 3 présente un exemple de cartographie, issu d'une reconstruction tomographique sismique, réalisée sur un pilier de carrière soumis à une contrainte latérale (flèche noire). Les mesures ont été réalisées depuis trois forages, les lignes de ronds et triangles représentant les positions d'émission et de réception. Cette cartographie indique les zones où ont eu lieu les plus grandes variations de temps de propagation des ondes sismiques, les mesures ayant été réalisées sans puis avec mise en compression du vérin simulant la contrainte latérale. Un début d'interprétation est de relier les variations les plus importantes en termes d'augmentation de vitesse en variation de contrainte. Cette cartographie positionne ainsi l'étendue des variations de contraintes maximales que subit le pilier.

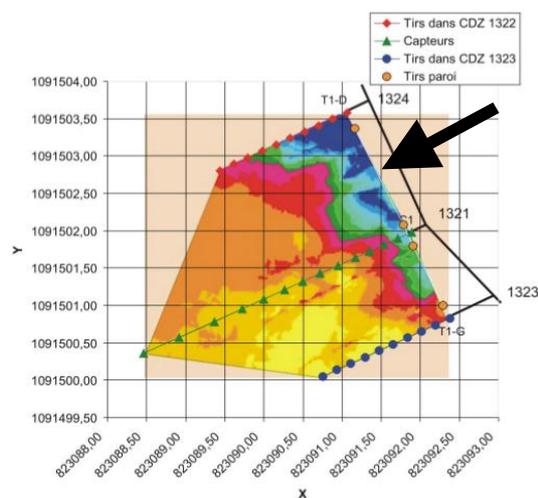


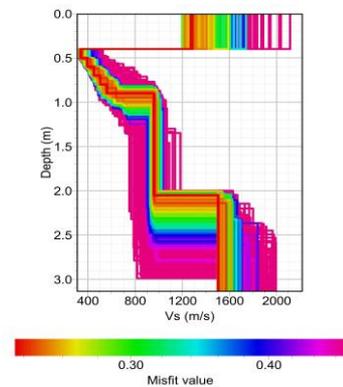
Figure 3 : tomographie sismique (section horizontale) sur un pilier de carrière donnant une carte de variation vitesse sous l'effet d'une contrainte latérale (flèche noire).

### 3. Imagerie quantitative

Les techniques d'imagerie quantitatives, quant à elles, ont pour objet de donner les caractéristiques physiques du milieu telles que : la permittivité ou la résistivité électrique pour des mesures électromagnétiques, le module d'Young ou vitesses de propagation pour des ondes mécaniques (sismiques, soniques ou ultrasoniques). Ces informations, issues de calculs d'inversion de mesures, sont considérées comme caractérisant le milieu de manière indépendante de la technique de mesure. Cette hypothèse forte doit être nuancée car la précision de ces informations dépend bien entendu de la densité spatiale des mesures, de la précision de leur localisation ou de la précision des mesures elles-mêmes. Ces reconstructions peuvent avoir également un caractère mono-dimensionnel, généralement fonction de la profondeur comme sur l'exemple de la figure 4, où l'on recherche les épaisseurs et des caractéristiques mécaniques (vitesses sismiques) du radier, et de son proche environnement, d'un tunnel.



a)



b)

Figure 4 : a) dispositif expérimental d'une ligne de capteurs sismiques en tunnel. b) reconstruction de profils verticaux de vitesses sismiques fonction de la profondeur.

Pour cet exemple, à travers la réalisation de plusieurs profils (Fig.4b), on constate l'existence de deux couches de matériaux au-dessus du substratum dont on connaît les épaisseurs et les vitesses sismiques moyennes. Sachant que plus la vitesse sismique est vélocité, plus le matériau présente une résistance mécanique importante, on peut commencer un début d'interprétation sur ces mesures.

#### 4. Caractérisation des matériaux

Les recherches récentes, bien qu'ayant vu également évoluer ces techniques vers des outils plus précis, rapides, ou légers, se sont orientées vers des informations sur l'état du milieu ausculté et donc vers des notions d'évaluation.

Certains travaux de recherche en cours s'intéressent aux relations pouvant exister entre les valeurs déduites des mesures ND et les indicateurs d'état ou de composition du milieu pour que ces premières puissent être utiles, et donc prises en compte comme entrées, à des modèles de durée de vie d'ouvrages [3].

Dans cette démarche, à partir de mesures en laboratoire sur des mélanges homogénéisés contrôlés à l'aide de cellules EM, soniques ou électriques, en modifiant un des paramètres du mélange (tel que la teneur en eau, la porosité, la teneur en ciment pour des bétons hydrauliques, ou la nature des granulats), on peut obtenir des courbes de régression (master curves) par technique ND. En prenant comme exemple l'étude de la sensibilité d'une technique ND avec la teneur en eau et la porosité, on obtient une équation du type (pour le cas de relations linéaires) :

$$\text{Mes(NDT)} = a.W + b.\text{Porosité} + c \quad (1)$$

Dans cet espace (W, Porosité) les autres paramètres d'état ou de composition se retrouvent dans le terme c. Ainsi chaque technique ND est décrite par un triplet propre (a, b, c) suivant sa sensibilité à l'état hydrique ou poreux du mélange. Lors d'une auscultation ND par plusieurs techniques (EM, électrique ou US) de ce mélange dans un état hydrique et poreux non connus, on peut remonter à une estimation de cet état en recoupant les courbes issues de l'équation (1) et des mesures ND. La figure 6 donne un exemple expérimental sur un mélange de béton homogène, où le point vert correspond à son état réel, et où les droites convergent vers un couple de valeurs (W, Sr – taux de saturation) très proche. Cet exemple d'étude montre le potentiel des techniques ND, sachant qu'il reste de nombreux verrous scientifiques que les études actuelles cherchent à lever, à travers l'étude de gradients, de fusion de données ND, ou d'approches statistiques fonction de la variabilité spatiale du matériau ausculté. Ainsi, on souhaite à terme à relier les valeurs déduites des mesures ND aux indicateurs d'état ou de composition du milieu pour que ces premières puissent être prises en compte comme entrées dans des modèles de durée de vie d'ouvrages.

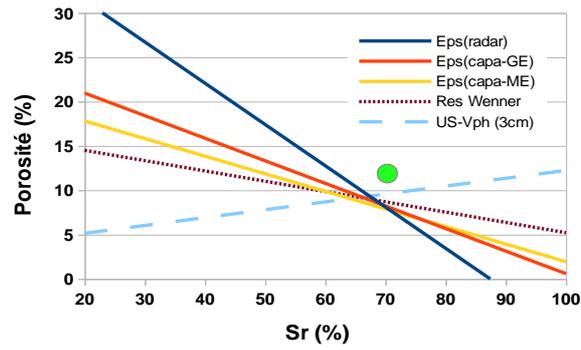


Figure 5 : Caractérisation d'un mélange de béton par le couplage de plusieurs techniques ND (radar, électrique, capacitive, ultrasonique).

## References

- [1] Reynolds J.M. (1997), "An introduction to applied and environmental geophysics", éd. Wiley & Sons, pp 681-749.
- [2] McCann DM, Forde MC. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. NDT&E Int 2001;34(2):71–84.
- [3] Balayssac J.P., Laurens S., Arliguie G., Breyse D., Garnier V., Dérobert X., Piwakowski B. (2012), "Description of the general outlines of SENSO project: Quality assessment and limits of different NDT methods", Journ. Const. & Build. Mat., Vol. 35, pp. 131-138.