



**HAL**  
open science

## Techniques d'instrumentation ultrasonique appliquées à la caractérisation de l'endommagement d'ouvrages souterrains

Cyrille Balland, François Forney, Will Pettitt

► **To cite this version:**

Cyrille Balland, François Forney, Will Pettitt. Techniques d'instrumentation ultrasonique appliquées à la caractérisation de l'endommagement d'ouvrages souterrains. Journée AGAP "Géophysique appliquée aux besoins du génie civil et de l'environnement", Nov 2002, Nantes, France. ineris-00972393

**HAL Id: ineris-00972393**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00972393>**

Submitted on 3 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# TECHNIQUE D'INSTRUMENTATION ULTRASONIQUE APPLIQUEE A LA CARACTERISATION DE L'ENDOMMAGEMENT D'OUVRAGES SOUTERRAINS

*BALLAND Cyrille, INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques);  
FORNEY François, INERIS (Solen) ; PETTITT Will, ASC (Applied Seismology Consultants).*

## RESUME

Dans le cadre des expérimentations du site pilote de Tressange (bassin ferrifère lorrain), une sonde ultrasonique a été développée pour mesurer la vitesse des ondes P et S dans les sondages. Deux diagraphies horizontales dans un pilier mettent en évidence des variations de fracturation ou de contrainte. Dans le premier sondage, il y a une augmentation linéaire de la vitesse approximativement jusqu'à 2,5 m du parement, suivie d'une vitesse constante. Ceci est interprété comme l'extension de la zone endommagée dans le pilier à cet endroit. Dans le second sondage, situé de l'autre côté du pilier, la vitesse observée est constante sur les 3 premiers mètres. La vitesse coïncide avec celle observée à proximité du parement dans l'autre sondage. Après 3 m, la vitesse tend linéairement vers la même valeur que dans la zone non endommagée du sondage BGP92. Cela suggère que les 3 premiers mètres représentent une section du pilier qui est découplée du reste de la masse, peut-être à cause d'une fracture (naturelle ou induite par l'excavation). Le découplage semble décharger ce bloc de la roche en place. D'un point de vue général, ces mesures confirment que les piliers de ce type de zone minière ne sont pas porteurs dans l'intégralité de leur dimension géométrique apparente.

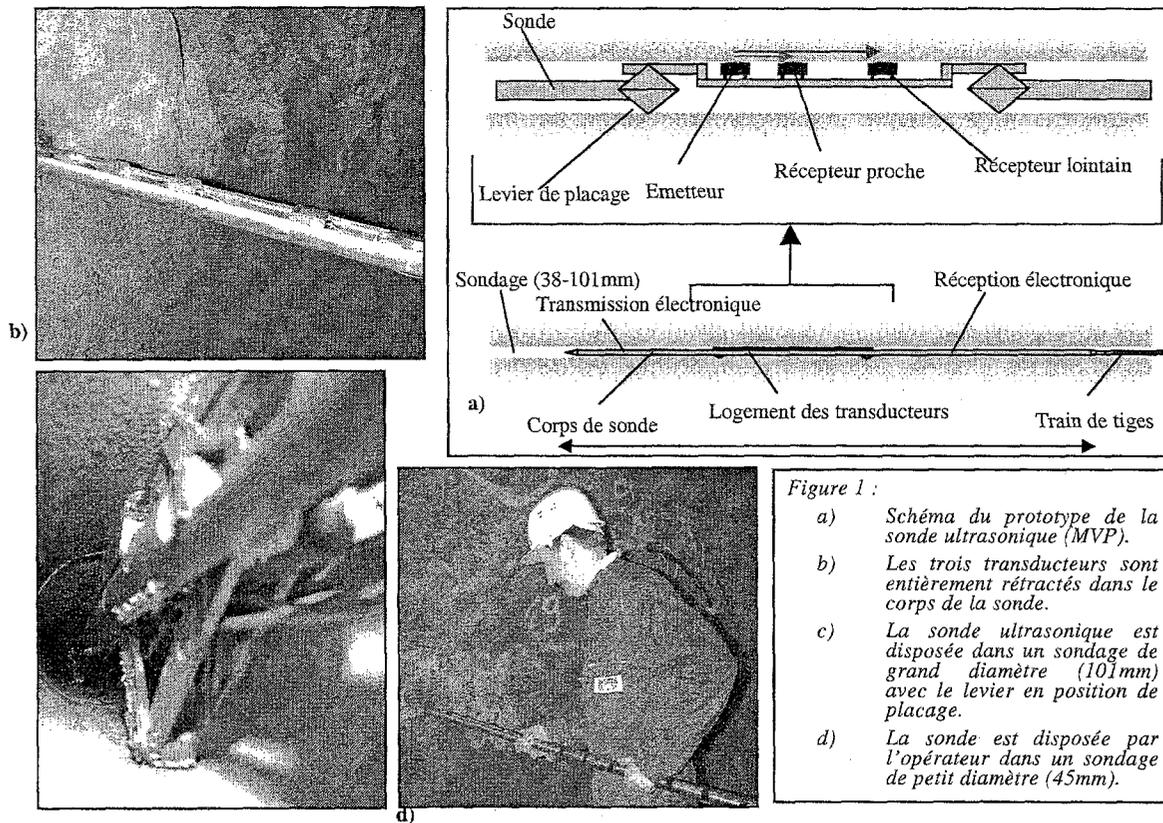
## INTRODUCTION

L'abandon progressif des mines du bassin ferrifère de Lorraine soulève des questions majeures sur les affaissements potentiels différés, notamment sur l'impact de la remontée progressive de la nappe aquifère dans les ouvrages souterrains depuis mars 2002. Une expérimentation d'ennoyage contrôlé est conduite dans le stot de Tressange. Le site choisi est constitué d'une zone d'ennoyage dans la couche de minerai dite « brune ». L'étanchéité est assurée par des barrières maçonnées reliant plusieurs piliers, par le mur et le toit de la couche brune. Le but principal de l'expérimentation est d'étudier le comportement hydromécanique des ouvrages durant leur immersion. Durant la phase initiale (avant ennoyage de la zone test) une série d'expériences a été menée dans le cadre de cette étude. Elle a pour objectif de concevoir une sonde de diagraphie ultrasonique capable de caractériser l'endommagement des matériaux notamment dans un pilier de mine, d'évaluer les paramètres dynamiques des matériaux qui constituent les ouvrages et de détecter les failles ou autres fractures qui les affectent. Ce document expose les caractéristiques de la sonde ultrasonique et de la chaîne d'acquisition. Il présente les mesures tests préliminaires qui ont été réalisées sur le site et leur contribution à la connaissance de l'état mécanique des roches excavées longtemps après l'exploitation de la mine.

## CONCEPTION DE LA SONDE ULTRASONIQUE

La sonde ultrasonique (Micro Velocity Probe) a été développée par ASC en partenariat avec l'INERIS (référence 1) pour donner une diagraphie de vitesse en sondage. Elle utilise trois transducteurs ultrasoniques (un émetteur et deux récepteurs), qui sont mécaniquement plaqués contre la paroi du sondage (figure 1). Les transducteurs opèrent à des fréquences de 50 à 700 kHz avec un pic de réponse à 100 kHz. Le système de chargement mécanique permet d'utiliser la sonde dans des sondages de 38 à 101mm (1,5'' à 4''). La sonde contient toute la chaîne de transmission et d'acquisition du signal reliée par un boîtier de communication à la surface vers un ordinateur. La conversion analogique digitale est réalisée à 5 MHz par un échantillonnage de 12 bits. La longueur du signal (jusqu'à 4096 points), l'amplification et le stacking automatique sont configurés dans le logiciel d'acquisition. Les deux récepteurs peuvent être fixés dans leur logement, dans une plage comprise entre 2,5 à 30 cm, ils sont désignés comme le proche et le lointain (figure 1). Dans cette

étude de validation, le récepteur proche est fixé à 8,5 cm de l'émetteur et le récepteur lointain à 23,5 cm (pour des rais directs). La sonde a été déplacée avec un pas de mesure de 10 cm.



## APPLICATION DE LA SONDE

Une fois la conception achevée, la sonde a été testée dans le but, d'une part de valider le matériel et la méthode, et d'autre part d'ausculter les ouvrages sur le site pilote de Tressange. L'étude s'est portée sur une structure déterminante de la stabilité de la mine : le pilier. Deux sondages (BGP92 et BGP94) ont donc été forés horizontalement de chaque côté d'un pilier dans le minerai de fer de 17 m de large et 28 m de long. Afin de mesurer les plus petites variations de vitesse possible, une méthode de comparaison des signaux, « la cross corrélation », a été utilisée. Elle consiste à mesurer le décalage de temps entre deux signaux de même nature par corrélation de l'allure du signal dans une fenêtre temporelle choisie.

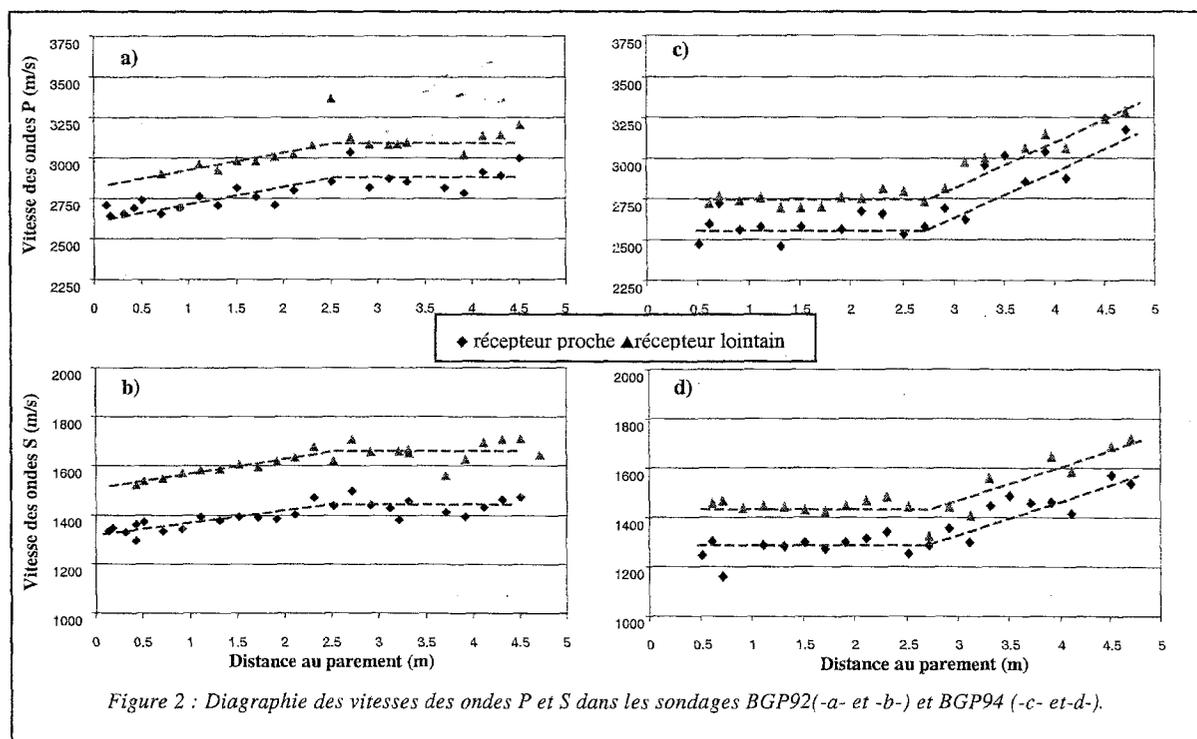
## INCERTITUDE DE MESURE

Deux types d'incertitude peuvent se produire lorsque l'on mesure la vitesse des ondes. Le premier est lié aux incertitudes lors du pointé manuel : la vitesse mesurée dépend de l'habileté de l'utilisateur à repérer avec exactitude la première arrivée. C'est un problème avec les arrivées émergeant particulièrement lorsque l'utilisateur doit pointer la première arrivée avec une ou plusieurs longueurs d'ondes noyées dans le bruit. Avec ces très courtes distances (8,5 et 23,5 cm), ces arrivées cachées peuvent produire de fortes incertitudes de vitesse. Ces incertitudes sont estimées approximativement à  $\pm 150$  m/s pour les ondes P et  $\pm 75$  m/s pour les ondes S pour le récepteur proche ; et respectivement  $\pm 50$  m/s et  $\pm 25$  m/s pour le récepteur éloigné. Le second type d'incertitude est généré par le bruit dans les résultats de la cross corrélation : la principale raison de l'utilisation de la cross corrélation est d'éliminer la source d'incertitude générée par le pointé manuel. Cependant, la précision de la « cross corrélation » dépend de la bonne qualité du signal qui doit avoir une forme comparable d'un point de mesure à l'autre. Les premières arrivées doivent toujours être définies au-dessus du bruit. L'effet de ce bruit sur la mesure de la vitesse est difficile à apprécier ; cependant il est improbable que cela dépasse un ou deux points d'échantillonnage. Pour les vitesses mesurées dans cette étude,

cela équivaut à une estimation de l'incertitude sur les ondes P de  $\pm 50$  m/s pour le récepteur proche et  $\pm 15$  m/s pour le récepteur éloigné. L'incertitude pour les ondes S est respectivement de  $\pm 25$  m/s et  $\pm 8$  m/s. Il faut noter que pour toutes les diagraphies de la sonde ultrasonique, où de bons résultats de cross corrélation ont été obtenus, la vitesse absolue est calculée uniquement pour les arrivées de référence. Toutes les autres vitesses sur les diagraphies sont obtenues en relatif. La vitesse absolue a été obtenue à une profondeur particulière incluant la première incertitude. La variation relative de la vitesse le long de la diagraphie tient compte uniquement de la seconde incertitude. Cela signifie que de faibles changements de vitesse le long du profil peuvent être ainsi mis en évidence. Seules les variations supérieures à cette incertitude seront exploitées dans ce document.

## RESULTATS ET INTERPRETATIONS

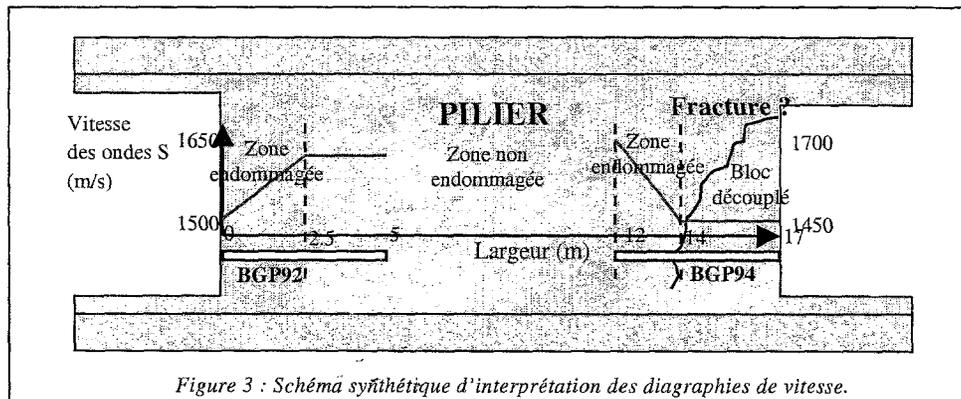
La bonne qualité des signaux a permis d'obtenir une bonne cross corrélation pour les ondes P et les ondes S qui ont une beaucoup plus grande amplitude (environ 10 fois). Les diagraphies du sondage BGP92 (figure 2-a et 2-b), pour les ondes P et S, montrent une augmentation linéaire de la vitesse avec la profondeur jusqu'à 2,5 m environ de la paroi du pilier. Les changements de vitesse pour les ondes S sont de +82 et +111 m/s respectivement pour les récepteurs proche et lointain. Après 2,5 m de profondeur, la vitesse des ondes S (figure 2-b) devient constante avec 1450 m/s pour le récepteur proche et 1650 m/s pour le récepteur lointain. Les ondes S montrent seulement de petites variations en dehors de cette tendance de  $\pm 50$  m/s au maximum. Le plat sur la diagraphie après 2,5 m n'est pas si apparent pour les vitesses des ondes P (figure 2-b) en particulier autour de 4 m de profondeur où d'autres augmentations se produisent. Les vitesses des ondes P sont de 2850 et 3100 m/s environ pour les récepteurs proche et lointain dans cette zone et il y a une variation de 200 m/s pour les deux récepteurs en descendant dans le sondage. Une mesure sort de la tendance entre 2,5 et 2,7 m où la vitesse des ondes P est relativement élevée sur les deux récepteurs, de même pour les vitesses des ondes S mais le phénomène est moins prononcé. Ceci est attribué au passage de la sonde MVP (micro velocity probe) sur une inclusion avec des vitesses élevées. L'augmentation de la vitesse jusqu'à 2,5 m révèle une zone endommagée et localement déconfinée. L'endommagement diminue et la vitesse augmente lorsque l'on pénètre dans le pilier.



La diagraphie du sondage BGP94 (figures 2-c et 2-d) donne un scénario complètement différent de la diagraphie BGP92. Les vitesses sont faibles et constantes jusqu'à environ 3 m de profondeur. Au-

delà, une augmentation linéaire est observée jusqu'à la fin du sondage. Les variations sont de +500 m/s environ pour les ondes P et de +300 m/s pour les ondes S. La vitesse dans les trois premiers mètres du sondage est comparable aux vitesses des ondes P et S mesurées dans le sondage BGP92 près du parement (respectivement 2600-2800 et 1300-1500 m/s). Cette zone pourrait correspondre aux roches les plus endommagées. L'explication de ces résultats est que les 3 premiers mètres sont disjoints du reste du pilier par une fracture naturelle ou induite par l'excavation. Cette séparation produit sur la section un déchargement de la contrainte appliquée sur le pilier. Après 3 m, s'installe typiquement, une contrainte verticale faisant augmenter la vitesse des ondes.

Les vitesses des deux sondages sont équivalentes dans les parties profondes. Cependant, il manque 7m d'auscultation entre les deux sondages. Les vitesses mesurées dans les sondages BGP92 et BGP94 sur le récepteur proche sont plus faibles que pour le récepteur lointain. C'est l'effet du « plongement du rai », il est expliqué par un endommagement et/ou une zone de perturbation des contraintes autour du sondage. Le rai plongeant traverse cette zone depuis le sondage dans le milieu des vitesses plus élevées. Plus la distance entre l'émetteur et le récepteur sur la sonde est grande, plus les rais échantillonnent les zones de la roche avec des vitesses élevées. Pour expliquer ces effets, il faudrait des mesures plus détaillées et modéliser les rais. Néanmoins, il est clair que les vitesses mesurées par le récepteur lointain sont plus représentatives des vitesses du milieu. La désunion décharge ce bloc de roche. La figure 3 synthétise ces premières interprétations, elles pourront être corrélées avec d'autres techniques comme la tomographie sismique.



## CONCLUSION

La sonde de diagraphie ultrasonique développée a permis de déterminer avec succès l'état de fracturation et d'endommagement d'un pilier de mine. La haute fréquence des ondes acoustiques générées par l'émetteur (entre 50 et 700 kHz) rend possible la détection d'hétérogénéités centimétriques. Par ailleurs, comme la vitesse des ondes S est calculée en plus de celle des ondes P, les mesures pourront être directement interprétées en termes mécaniques, et corrélées sans effet d'échelle avec des essais en laboratoire où sont associées mesures de contrainte/déformation et mesures acoustiques. La qualité des résultats, la légèreté du matériel et la facilité de mise en place font de cette méthode un outil adapté à l'auscultation in-situ de tous les types d'ouvrages rocheux, maçonnés ou en béton dont il faut reconnaître leurs caractéristiques mécaniques et en particulier leur endommagement.

## RÉFÉRENCES

- [1] W. Pettitt, 2001. *Ultrasonic velocity measurements in boreholes at the Tressange Pillar Experiment*, Applied Seismology Consultants Ltd report, UK.
- [2] F. Forney, 2001. Développement du logiciel de traitement de signaux sismiques pour la mesure de vitesse, rapport d'étape INERIS DRS-01-25303/RN08.