Auscultation et surveillance des pertubations hydromécaniques d'ouvrages souterrains par la mesure et l'analyse de la propagation d'ondes dans les roches

Jamil Damaj, Cyrille Balland, Thierry Verdel, David Amitrano, Françoise Homand

▶ **To cite this version:**

Jamil Damaj, Cyrille Balland, Thierry Verdel, David Amitrano, Françoise Homand. Auscultation et surveillance des pertubations hydromécaniques d'ouvrages souterrains par la mesure et l'analyse de la propagation d'ondes dans les roches. International Conference on geotechnical engineering, May 2004, Beyrouth, Lebanon. pp.791-797. ineris-00976150

HAL Id: ineris-00976150
https://ineris.hal.science/ineris-00976150

Submitted on 9 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.

Auscultation et surveillance des perturbations hydromécaniques d'ouvrages souterrains par la mesure et l'analyse de la propagation d'ondes dans les roches

Monitoring and survey of the hydromechanical perturbations in underground works using measurement and analysis of ultrasonic wave propagation in rock

*Jamil **DAMAJ** : CNRS **Libanais**, LAEGO - INERIS - **INPL**, jamil.damaj@mines.inpl nancy.fr*
*Cyrille **BALLAND** : LAEGO - **INERIS**, cyrille.balland@ineris.fr*
*Thierry VERDEL, David **AMITRANO**, Françoise HOMAND : LAEGO - INPL, thierry.verdel@mines.inpl-nancy.fr ,david.amitrano@mines.inpl-nancy.fr, francoise.homand@ensg.inpl-nancy.fr*
Laego, INERIS - Ecole des Mines, Parc Saurupt, 54042 Nancy Cedex, France
***Tél** : 00 33 (0) 3 83 58 42 89 ; Fax : 00 33 (0) 3 83 53 38 49*

Résumé : Lorsqu'une galerie est excavée, quelle que soit la méthode d'excavation, la roche encaissante subit des perturbations dans une zone dite EDZ (Excavation Disturbed or Damaged Zone). Ces perturbations peuvent se traduire par différents effets allant d'une faible variation de la pression interstitielle à un endommagement important, voire la rupture de l'ouvrage et peuvent mettre en danger la stabilité d'une partie ou de l'ensemble de l'ouvrage souterrain concerné. L'étude des caractéristiques mécaniques de cette zone « EDZ » est essentielle pour estimer la stabilité de l'ouvrage à court, moyen ou long terme.
La propagation des ondes ultrasoniques est utilisée comme moyen d'analyse en mécanique des roches depuis les années 1960. Initialement, elle a été mise au point pour déterminer les modules élastiques dynamiques des roches. Ensuite, elle a progressivement été adaptée à l'étude d'autres propriétés du matériau telles que : fissuration, porosité, saturation, etc. Avec les outils informatiques sans cesse plus puissants, un traitement des signaux plus élaboré est devenu possible, ce qui permet d'envisager la caractérisation de l' « EDZ » par cette méthode. Des essais en laboratoire à la fois acoustiques et mécaniques, nous ont permis de relier qualitativement les paramètres de propagation des ondes et les caractéristiques mécaniques du milieu étudié pendant les phases élastique et plastique. Par ailleurs, la modélisation mécanique de l'EDZ autour d'une galerie permet de comprendre les phénomènes mis en jeux à l'échelle de l'ouvrage. Enfin, les résultats d'une expérimentation in situ ont permis de caractériser la distribution de la zone endommagée autour d'un pilier de mine, ce qui a contribué à la vérification des modèles mécaniques existants et à l'estimation de la stabilité de l'ouvrage.

Abstract: The excavation of a drift creates a disturbed zone, which is called EDZ (Excavation Disturbed or Damaged Zone). The study of the mechanical characteristics of this zone is essential to estimate the stability of such a drift at short, mean or long term. The propagation of ultrasonic waves is used as a mean of analysis in rock mechanics since the 1960s. Initially, it was used to determine the dynamic elastic properties. Then, it was gradually adapted to the study of the other properties of the material such as cracking, porosity, saturation, etc. With the computer tools continuously more powerful, a more elaborated treatment of the signals became possible, which allows characterization of the "EDZ". The Tests carried out in laboratory, allowed us to correlate P-wave and mechanical parameters of the studied media in elastic and plastic phases. Besides, the mechanical modeling of the EDZ around a drift allows understanding the mechanical phenomena on the scale of the work.
Finally, the results of an in-site experiment allowed us to locate the EDZ around an underground mine pillar. It contributed to have a better understanding of the mechanical models available and to estimate the pillar stability.

1. Introduction

Les méthodes d'imagerie et de détection au sein de milieux rocheux, basées sur la propagation d'ondes élastiques, ont beaucoup progressé ces dernières années, grâce à de nouveaux concepts et grâce aussi au perfectionnement des techniques de traitement du signal (Ngugen and Tuong Truong, 2002), lequel est généralement masqué par un bruit de fond parasite qu'il faut réduire (Pettitt, 2001), éliminer ou parfois, ce qui est plus étonnant, utiliser pour la construction de l'image. Leurs applications couvrent des domaines très variés. Les plus connues sont celles de la médecine et du contrôle industriel. Une autre application concerne l'exploration des couches profondes de la terre, par la détection et le traitement très élaboré des signaux engendrés au cours des phénomènes sismiques. En ce qui nous concerne, nous avons utilisé cette technique pour connaître la distribution des vitesses de propagation d'ondes P dans un pilier de mine et dans le plan radial d'un échantillon de roche argileuse (argilite).

Cet article s'articule autour de deux parties. Dans la première, la méthode de mesure des vitesses dans un massif rocheux ainsi que les principes généraux de la tomographie sont présentés. La deuxième partie présente une application de la tomographie à un pilier de mine et à une éprouvette d'argilite. Celle-ci a permis d'une part d'évaluer les structures du pilier et de l'éprouvette et d'autre part de poursuivre le développement du logiciel de tomographie sismique.

2. Tomographie sismique

2.1. Généralités

La tomographie est basée sur l'analyse des caractéristiques de propagation des ondes dans le milieu se trouvant entre les sources d'où elles sont émises et les capteurs où elles sont enregistrées. Il existe plusieurs types de tomographie sismique (Côte, 1988) qui sont :

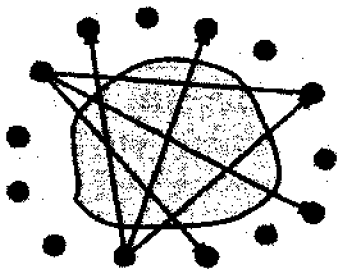


*Figure 1: Schéma de principe des tomographies sismiques en **transmission** (● récepteurs et ●sources)*

- **les tomographies en émission** : principalement utilisées dans le domaine médical;
- **les tomographies en réflexion** : principalement utilisées dans le domaine pétrolier;
- **les tomographies en transmission** : les plus diversement utilisées (de la microscopie à la physique du globe). Les sources et les récepteurs sont disposés autour de l'objet. Les ondes physiques interagissent avec les matériaux avant d'être enregistrées sur les capteurs (Figure 1). L'analyse de l'ensemble des modifications apportées aux ondes permet d'étudier la distribution spatiale de certaines propriétés du matériau. C'est dans cette catégorie de méthodes tomographiques que se situe le travail présenté dans cet article.

2.2. *Inversion des vitesses des ondes*

L'objectif de la tomographie sismique de vitesse est de calculer le champ de vitesse qui explique le mieux les temps de trajet mesurés. Pour atteindre cet objectif, il faut tout d'abord discrétiser les rais et l'espace traversé par ces rais (Figure 2). La surface d'auscultation est donc divisée en cellules (Ivansson, 1992) auxquelles est affectée une lenteur u (inverse de la vitesse). Les rais sont découpés en éléments de petite longueur (Kharrat et al. 1995). Le

temps de trajet total F (pour un rai entre la source sismique et le récepteur) est donc la somme des temps nécessaires pour traverser chaque cellule (Bishop & Styles, 1990). La relation entre le vecteur de temps de trajet et la matrice des lenteurs s'écrit (Maxwell, 1993):

$$Y = Au \tag{1}$$

Avec Y : vecteur des temps de trajets de dimension M (nombre de rais = nombre d'émetteurs x I nombre de récepteurs

u : vecteur des lenteurs de dimension N (nombre de cellules) et A : matrice de dimension $M \times N$.

A la matrice ci-dessous correspond par exemple à la discrétisation de la longueur des rais dans chaque cellule du plan de tomographie pour l'exemple de la figure 2.

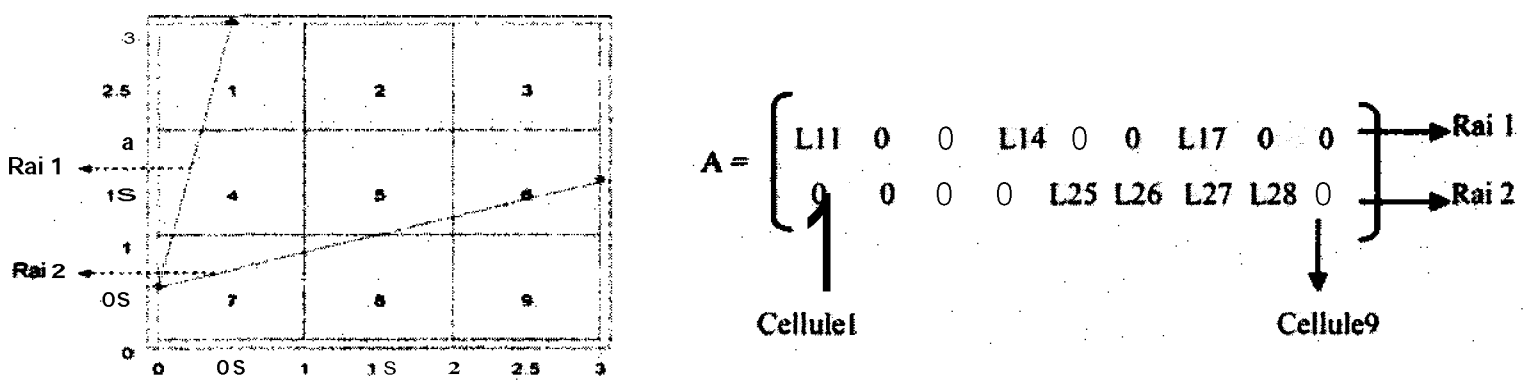


Figure 2 : représentation d'une grille de 9 cellules et 2 rais (une source et deux récepteurs) à gauche et de la matrice A correspondante à droite

En généralisant, la matrice A a donc autant de lignes que de rais et autant de colonnes que de cellules. Le problème inverse (Lagabrielle, 1988) est d'estimer u en résolvant l'équation (1). Cette opération est effectuée en utilisant une des méthodes d'inversion existantes.

2.3. *Méthode d'inversion*

Plusieurs méthodes d'inversion ont été développées pour résoudre le problème inverse. Elles sont soit purement mathématiques (inversions matricielles) comme la méthode des moindres carrés, soit géométriques (inversions géométriques) comme la méthode en transformée de Fourier, la méthode de reconstruction algébrique (Gordon et al, 1970), ou la méthode de reconstruction itérative simultanée (Gilbert, 1972) etc....
Dans le logiciel de tomographie « TOMI », développé par l'INERIS dans l'environnement Mathematica (Verdel, 2001), nous avons utilisé la méthode d'inversion des moindres carrés amortis qui consiste à trouver le vecteur u qui minimise à la fois le carré des écarts aux données et le carré des écarts à un modèle défini a priori u_0 (Kharrat et al., 1995), on cherche ainsi u tel que l'équation (2) soit minimum. Cette minimisation (moindres carrés amortis) conduit à la solution qui se présente par l'équation (3).

$$\left\|Y - Au\right\|^2 + \lambda^2 \left\|u - u_0\right\|^2 \tag{2}$$

$$u = u_0 \left(A^T A + \lambda^2 I\right)^{-1} A^T (y - Au_0) \tag{3}$$

Avec λ^2, facteur d'amortissement servant à quantifier l'importance relative accordée à l'une ou l'autre de deux minimisations qui se trouvent dans l'équation 2. La valeur de ce facteur est déterminée par le « point genou » de la courbe de la variance de la vitesse de en fonction de la variance des temps d'arrivée de l'onde (McGaughey and Young, 1990) (Figure 3).

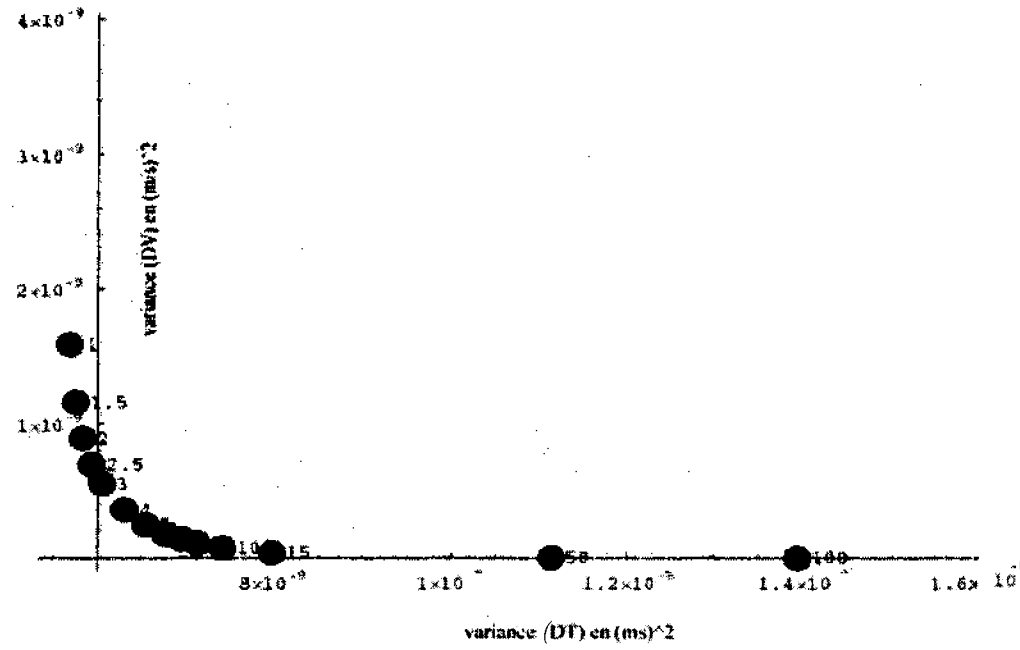


Figure 3 : Variance des vitesses et variance des temps de trajet pour différentes valeurs de λ^2 (dans ce cas la valeur optimale de λ^2 est $\lambda^2 = 4$)

3. Applications

3.1. Pilier G de la mine de Tressange

Le site pilote de Tressange appartenant aux anciennes mines de fer de Lorraine (France) a été choisi pour étudier la structure et le comportement des ouvrages miniers sous l'influence de l'eau. Ce site est constitué de 10 piliers (Figure 4) sur lesquels ont été construits des murs étanches de manière à permettre un ennoyage contrôlé du site (Al Heib, 2001). L'un des objectifs de cette expérimentation est de réaliser une étude tomographique sur un des piliers d'environ 18 m de large et 30 m de long (pilier G), pour estimer la distribution des vitesses de propagation des ondes P et en déduire certains caractères mécaniques. La réalisation de cette expérience a été conduite avec une distribution de 70 forages autour du pilier (Figure 5). Les sources sismiques (explosives) ont été reliées à un dispositif de déclenchement qui permet de mesurer le temps de départ (TO). Les récepteurs ont été distribués dans plusieurs forages autour du pilier et enregistrent les signaux produits par la source sismique. Ces récepteurs sont reliés à un ordinateur équipé du logiciel d'acquisition SYTMIS (SYstème de Traitement et d'acquisition des données MIcroSismiques) développé par l'INERIS. L'introduction des données dans le logiciel de tomographie TOMI permet d'inverser ces dernières pour obtenir la carte des vitesses de propagation des ondes P dans le plan étudié du pilier G. Plusieurs inversions ont été réalisées avec des maillages de tailles différentes afin d'étudier la sensibilité des résultats à ces paramètres. L'étude paramétrique a mis en évidence une divergence à partir de 225 cellules. La cause de cette divergence tient à l'existence de trop nombreuses cellules qui ne sont pas (ou qui sont peu) traversées par des rais, introduisant de nombreux zéros dans la matrice à inverser.

La carte des vitesses du pilier G présentée sous la figure 6, correspond aux résultats obtenus avec une grille (maillage) de 200 cellules. L'image tomographique ainsi obtenue montre que le pilier est constitué d'un cœur sain où les vitesses sont assez élevées, et d'une couronne endommagée où les vitesses sont nettement plus faibles. Les hautes vitesses (le cœur de pilier), indiquent une zone saine avec des propriétés élastiques d'origine. Tandis que les faibles vitesses (la couronne sur le pourtour du pilier), indique l'extension de l'endommagement dans le parement du pilier où les propriétés élastiques sont dégradées. La perspective de ce travail est de traiter les données de la tomographie du pilier G après l'ennoyage de ce dernier. Ce traitement nous permettra de connaître l'influence de l'ennoyage sur certaines propriétés mécaniques du pilier G pour estimer l'influence de l'ennoyage sur les piliers des mines.

***Figure 4** : Zone d'expérimentation*

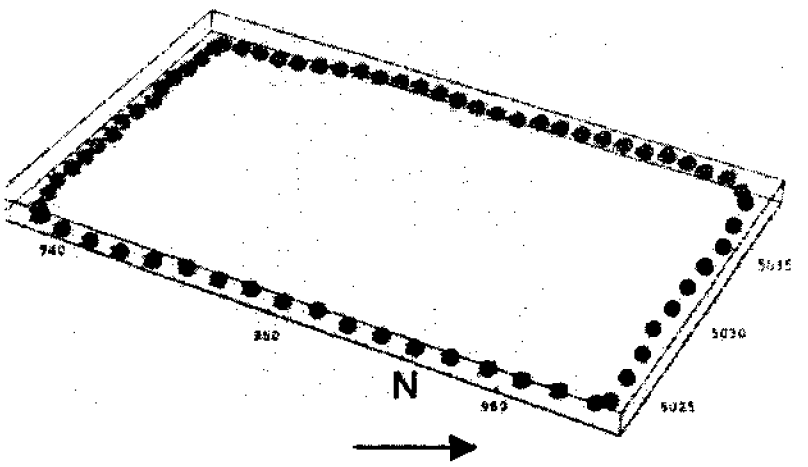


Figure 5 : Distribution des sources et récepteurs autour du pilier G

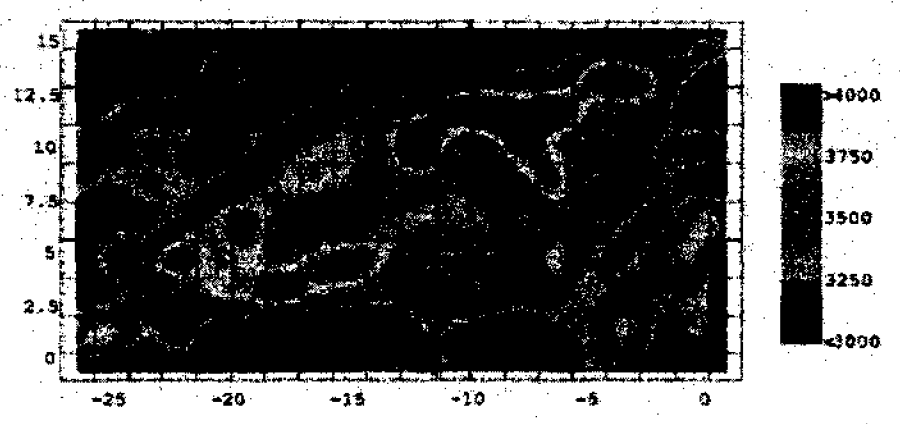


*Figure 6 : Image tomographique du **pilier** G, à droite les valeurs des vitesses de l'onde P sont en m/s*

3.2. Tomographie en laboratoire

La deuxième expérience concerne un essai de laboratoire sur un matériau différent du cas précédent. Elle a porté sur une **éprouvette** d'argilite cylindrique de 70 mm de diamètre et de 140 mm de hauteur. Cet échantillon a été extrait à une profondeur d'environ 460 m sur le site du laboratoire souterrain de **l'ANDRA** à Bure qui se trouve à la frontière de la Meuse et de la Haute-Marne en France. Un plan d'auscultation tomographique horizontal a été installé à **50 mm** de la tête de l'échantillon. Ce plan a été équipé de 12 capteurs (Figure 7) comprenant 4 sources et 8 récepteurs **(Balland,** 2003). Les mesures ultrasoniques et mécaniques ont été réalisées lors d'un essai de compression uniaxial en laboratoire (Wassermann, 2002).

La figure 8 montre la variation de la vitesse moyenne des ondes P enregistrées en fonction de la contrainte axiale appliquée à l'échantillon. La vitesse moyenne diminue avec l'augmentation de la contrainte appliquée. Les cartes tomographiques confirment cette diminution de la vitesse de l'onde P dans la direction horizontale (Figure 9). Ces cartes montrent que les vitesses au cœur de **l'éprouvette** ne sont pas influencées restent voisine de 2950 m/s. Par contre, en périphérie de **l'éprouvette,** la vitesse des ondes P a diminué en passant d'une valeur supérieure à 3200 (zones sombres sur l'image de gauche) jusqu'à moins de 2700 m/s (zones sombre sur **l'image** de droite). Le résultat de la tomographie réalisée sur l'échantillon d'argilite indique donc une diminution de la vitesse de propagation des ondes P localisée dans des zones de la périphérie de l'éprouvette en fonction de l'augmentation de la contrainte appliquée. Cette diminution de vitesse est reliée à la réduction des caractères élastiques de l'échantillon liée à l'initialisation et à la propagation et l'apparition de fissures suivant la direction axiale de l'échantillon.

*Figure 7 : Echantillon d'argilite équipé de 12 **capteurs** et soumis à un chargement*

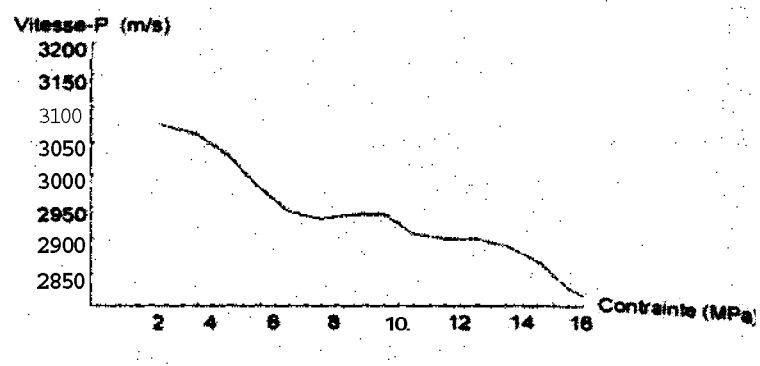
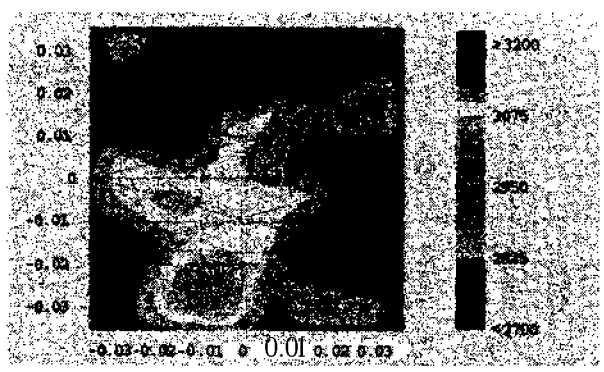


Figure 8 : Variation de la moyenne de la vitesse de l'onde P en fonction de la contrainte axiale

a)



b)

*Figure 9 : Cartes **tomographiques** avec des rais courbes (**Um** et **Thurber**, 1987) a) contrainte axiale = 0 **MPa**, b) contrainte axiale = 17 **Mpa***

5. Conclusions

Le logiciel de tomographie TOMI développé à l'INERIS permet aujourd'hui de réaliser un traitement complet de données de tomographie acquises sur le terrain ou en laboratoire.

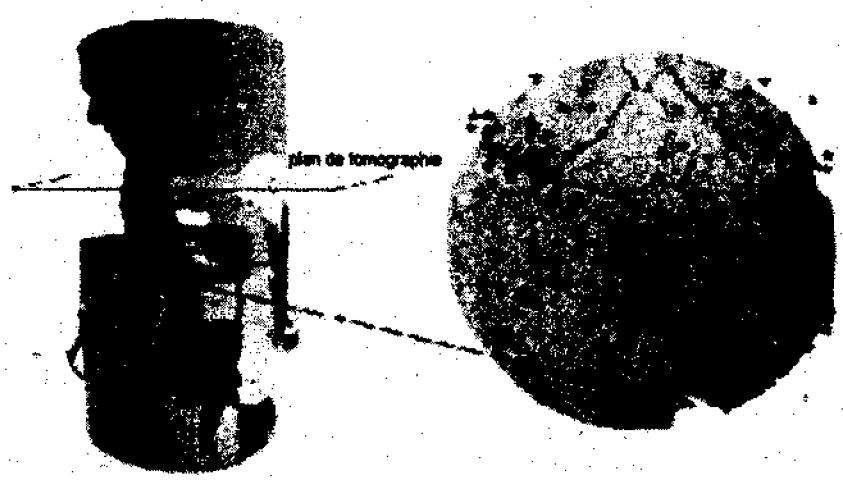


Figure 10 : Localisation des émissions acoustiques

D'une part l'application du logiciel TOMI sur des ouvrages in situ de grandes dimensions comme le pilier étudié a montré que le cœur de ce pilier est sain et sa couronne endommagée. L'étude a permis d'estimer la zone sur laquelle le pilier est porteur et ainsi mieux connaître sa stabilité. D'autre part, son application à l'étude du comportement d'éprouvette d'argilite a permis de mettre en évidence l'effet de la contrainte axiale sur le champ de vitesse et de localiser les zones d'initialisation de l'endommagement. Ce résultat est corrélé à l'étude des émissions acoustiques dont a été montré qu'elles étaient localisées dans la périphérie de l'éprouvette et traduisaient d'un endommagement et de la coalescence des fractures sous l'effet de la contrainte appliquée (Figure 10).

6. Remerciements

Nous tenons à remercier l'Andra qui nous a fourni les échantillons de roche et la société ARBED chez qui nous avons effectué l'expérimentation in situ.

7. Références Bibliographiques

AL HEIB M. (2000)., Présentation du site pilote de Tressange, Rapport INERIS DRS-02-25300/RN05.

BALLAND C. (2003). Ultrasonic survey measurements of argillaceous material in controlled laboratory experiments. Rapport INERIS DRS-03-27799/RN01.

BALLAND C. (2002). Technique de tomographie sismique appliquée aux ouvrages miniers abandonnés. Rapport INERIS DRS-02-25303/RN11.

BISHOP I. and STYLES P. (1990). Seismic tomographie imaging of a buried concrete target. Geophysical Prospecting, vol 38, pp. 169-188.

COTE Ph. (1988)., Tomographies sismiques en génie civil. Thèse à Université Joseph Fourier, Grenoble.

GILBERT P. (1972). Iterative methods for the three dimensional reconstruction of an object from projections. Joun. Theor. Biol. V. 36, P. 105-117.

GORDON R., BENDER R. and HERMAN G.T., (1970). Algebric Reconstruction Technics (ART) for three dimensional electron, microscopy and X-Ray photography, J. Theor. Biol. V. 29, P. 471-481.

IVANSSON S. (1985). A studey of methods for tomographie velocity estimation in the presence of low-velocity zones, Geophysics, Vol. 50, No. 6, P. 969-988.

KHARRAT Y. RHAZI J. BALLIVY G. COTE Ph. (1995). Auscultation des structures hydrauliques en béton par tomographie sonique, Revue canadienne de génie civil, Vol. 22, No. 6, P. 1072-7083.

Lagabrielle R., (1988). Bilan du thème Auscultation et imagerie des Journées Physique des Arcs, Déc. 1987, Bulletin de liaison.

MAXWELL S. (1993)., Seismic P-wave velocity imaging in underground mines : observations on the relationship between velocity structurband mining-induced seismicity. Thesis, Queen's University

McGAUGHEY W.J., YOUNG R.P. (1990). Expand abstracts of the technical program with authors' biographies, Society of exploration geophysicists sixtieth annual international meeting & exposition, Vo. 1, Sep. 23-27, San Francisco, California.

NGUYEN Mai K., TUONG TRUONG T. (2003). On a generalized X-Ray transform and a new method for defect detection using the medium electronic density, C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. 1336, P. 195-200.

PETTITT W. (2001). The cross-correlation algorithm: description and implementation, Report INERIS 03.

UM J. and THURBER C. (1987)., A fast algorithm for two-point seismic ray tracing., Bulletin of the Seismological of America, Vol. 77, No. 3, pp. 972-986, June 1987.

VERDEL T. (2001). Logiciel TOMI, version1.2.0. Documentation électronique Laego-Ineris, Ecole des Mines de Nancy.

WASSERMANN J. (2002). Protocole expérimental des essais mécaniques - acoustiques - ultrasoniques (essais « MAU ») en compression uniaxiale. Notes techniques INERIS.