

Caractérisation de l'endommagement localisé dans les géomatériaux à l'aide des ondes ultrasonores en conditions de laboratoire.

Stephen A. Hall¹, Gioacchino Viggiani¹, Elma Charalampidou²,
Pierre Bésuelle¹ & Christophe Rousseau¹

¹ CNRS/Université Joseph Fourier, Laboratoire 3S-R, 1301, rue de la piscine, 38041 Grenoble, France

² Laboratoire 3S-R et Heriot-Watt Institute of Petroleum Engineering, Edinburgh, Scotland

stephen.hall@hmg.inpg.fr

Résumé :

Nous présentons les résultats de nos premières études sur la détection et caractérisation de la déformation localisée dans des échantillons d'argile à l'aide des ondes ultrasonores. Les vitesses des ondes élastiques (ultrasoniques, sismiques...) sont sensibles aux changements des propriétés élastiques du matériau, leur mesure permet de quantifier l'endommagement induit par la déformation. Par ailleurs, les méthodes de mesure de champs par analyse d'images (stéréophotogrammétrie, corrélation d'image numérique...) sont complémentaires, elles permettent de mesurer un champ de déplacement et de déformation, donc d'identifier la déformation localisée, mais ne fournissent pas d'information sur les évolutions des propriétés mécaniques. Nous présentons les résultats de deux types d'analyse ultrasonore : une méthode appelée « circumferential velocity analysis » (CVA), qui utilise les mesures des vitesses des ondes sur différents chemins radiaux dans un échantillon cylindrique ; et une méthode de « tomographie ultrasonore » en effectuant des mesures de champ de vitesse de propagation des ondes.

Abstract:

We present initial results of the to detect and characterise localised deformation in clays using ultrasonic wave measurements. The velocities of elastic waves (e.g., ultrasonic or seismic) are sensitive to changes in elastic properties of a material and their measurement allows the quantification of damage associated with the deformation. Additionally, "field measures" based on image analysis (e.g., stereophotogrammetry or digital image correlation) allow measurement of displacement and deformation fields, and thus the identification of localised deformation, but they do not provide information on the evolution of mechanical properties. We present the results from two types of analysis: a method called "circumferential velocity analysis" (CVA), which involves velocity measurements along different diametric paths across cylindrical samples; and ultrasonic tomography to provide measurement of wave-propagation velocity fields.

Mots-clefs : Ultrasonore ; tomographie ; endommagement localisé

1 Introduction

Les vitesses des ondes « élastiques » (ultrasoniques, sismiques...) sont sensibles aux changements des propriétés élastiques du matériau, leur mesure permet de quantifier l'endommagement induit par la déformation. Nous présentons ici deux applications de ce principe. Dans un premier temps, nous avons appliqué une méthode appelée « circumferential velocity analysis » (CVA), qui implique les mesures des vitesses des ondes sur différents chemins radiaux dans un échantillon de forme cylindrique. Dans un second temps, nous avons réalisé une « tomographie ultrasonore » en effectuant des mesures de champ de vitesses de propagation des ondes sur un échantillon prismatique. Dans les deux cas, les mesures ont été effectuées sur des échantillons préalablement sollicités lors d'un essai mécanique de compression (triaxial dans le premier cas et biaxial en déformation plane dans le deuxième).

2 CVA : « Circumferential velocity analysis »

Cette analyse a été réalisée pour évaluer si nous pouvions utiliser les mesures des vitesses des ondes pour caractériser les déformations localisées dans des échantillons d'argile. La méthode CVA est basée sur les mesures des vitesses des ondes sur différents chemins radiaux

dans un échantillon cylindrique. La répétition de ces mesures autour de la circonférence d'échantillon, selon différents azimuts, permet d'étudier les variations des vitesses dues à la déformation ou les structures naturelles (comme le litage géologique, alignement préférentiel des minéraux, etc.).

Nous avons réalisé des mesures CVA sur un échantillon d'argile (marne de Beaucaire) préalablement déformé jusqu'à la rupture lors d'un essai triaxial axisymétrique avec un suivi par micro tomographie à rayons X (voir Lenoir et al., 2004). Nous avons utilisé deux capteurs piezo-céramiques équipés de guides d'onde coniques, pour avoir une surface de contact suffisamment petite et qui puisse être considérée ponctuelle. Les mesures de temps de propagation d'une onde P traversant l'échantillon étaient effectuées avec les capteurs diamétralement opposés et cela pour des azimuts régulièrement espacés de 10° tout autour d'une demi circonférence et à trois hauteurs d'échantillon (Fig. 1 et 2). Avec la mesure de diamètre correspondant, la vitesse moyenne de propagation a pu être estimée.

Nous montrons que les mesures CVA donnent une bonne indication de l'anisotropie préexistante dans l'échantillon, évidente dans la première tranche (la plus haute) qui n'est pas concernée par la déformation localisée (Fig. 2i). Cette anisotropie est probablement liée au litage sédimentaire

Pour la tranche en milieu d'échantillon (Fig. 2ii), on voit un fort effet de la déformation localisée sur les vitesses d'onde – les vitesses sont réduites pour les chemins qui traversent la zone de localisation et les vitesses sont normales pour les autres chemins. Pour la troisième tranche, celle en bas (Fig. 2iii), on voit aussi un effet de l'endommagement, mais plus difficile à interpréter. Les vitesses réduites existent pour les trajets traversant les zones de déformation localisée ouvertes (partie externe de la bande), mais on voit aussi les vitesses augmentées sur d'autres chemins (traversant la partie centrale de la bande). Il semble que dans cette dernière tranche il y a un effet de l'endommagement (fissures ouvertes) éventuellement associé à un effet de compaction (bande fermée et compactante) et d'hétérogénéité naturelle (voir la tâche blanche, donc de densité élevée, ainsi que la variabilité générale du niveau de gris dans l'image tomographique RX).

On peut quantifier l'endommagement à partir de ces mesures par les différences entre les vitesses mesurées et la vitesse dans la roche « intacte » (voir Fig. 2b); pour la vitesse « intacte » on utilise la vitesse moyenne de la première tranche qui n'exhibe pas d'endommagement localisé. De plus, on peut calculer l'endommagement à partir des images tomographiques à rayons-X avec une hypothèse simple de l'origine des changements de vitesse ; on suppose que la roche comprend une partie de roche intacte et la porosité remplie seulement avec l'air. Une comparaison des deux quantifications d'endommagement (l'une par vitesses des ondes et l'autre à partir des images tomographiques RX) montre que l'effet de l'endommagement sur les ondes est plus grand de ce qui aurait pu être prédit à partir des images tomographiques. Cela n'est pas trop surprenant mais montre que l'hypothèse du mélange roche + air n'explique pas l'observation, il convient de chercher un meilleur modèle pour les effets d'endommagement sur les ondes et sa quantification à partir des images de rayons-X. Il est important de noter aussi que les variations observées dans les résultats CVA ne correspondent pas à la dilatation de l'échantillon lors du déchargement en fin d'essai, observée à partir des images tomographiques. Donc les variations observées doivent être liées à la déformation localisée (plus les effets d'hétérogénéité et d'anisotropie naturelle).

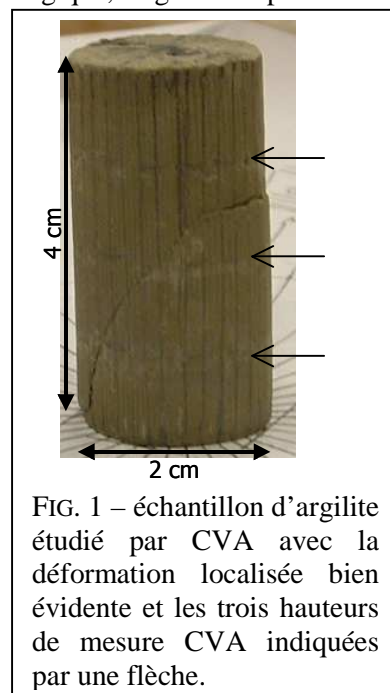


FIG. 1 – échantillon d'argilite étudié par CVA avec la déformation localisée bien évidente et les trois hauteurs de mesure CVA indiquées par une flèche.

Cette étude a eu l'objectif principal de vérifier la pertinence des mesures de vitesse des ondes ultrasonores pour caractériser l'endommagement localisé dans les argiles. Les résultats montrent que les mesures des vitesses ultrasonores sont sensibles à la déformation localisée (observée, elle, par micro-tomographie RX), et nous permet de voir les effets des fissures ouvertes et des zones compactées. En plus ces mesures nous ont permis de calculer un endommagement pour chaque chemin radial. Mais, l'hétérogénéité (naturelle et induite) dans l'échantillon et révélée par les mesures de vitesse montre la nécessité de faire les mesures des champs de vitesse (et non pas seulement des mesures « 1D »), plus les analyses avant les essais pour comparaison.

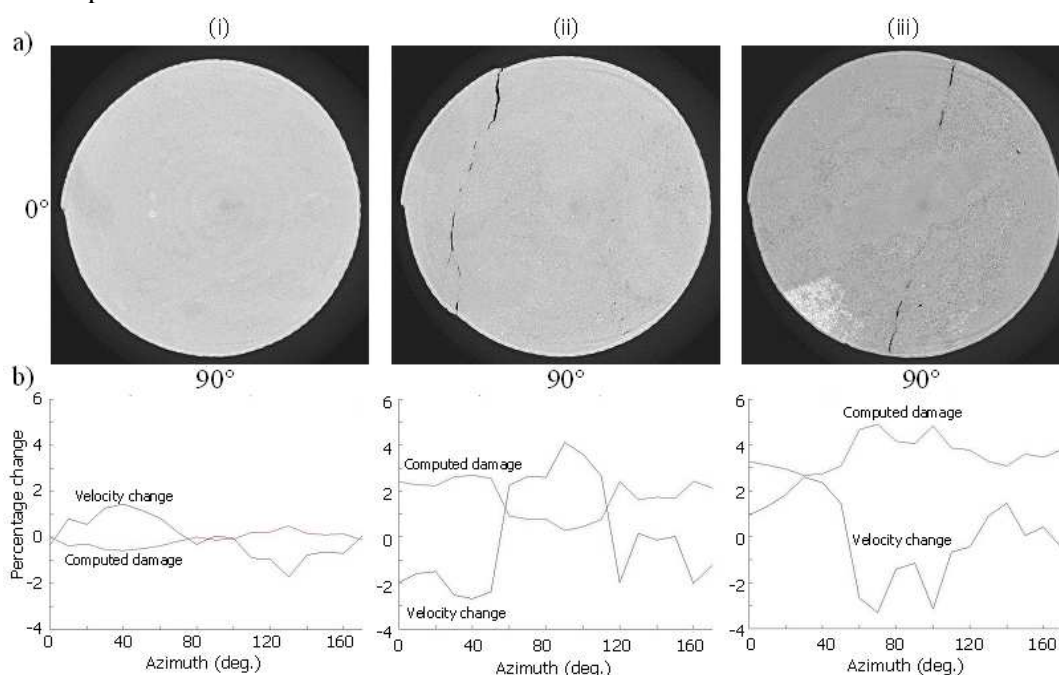


FIG. 2 - (a) Coupes horizontales de la reconstruction tomographique à rayons-X de l'échantillon pour les trois niveaux (i-iii) : coupes de la plus haute à la plus basse d'analyse CVA. (b) Résultats d'analyse CVA : variations de vitesse de propagation d'onde par rapport aux valeurs moyennes des coupes et l'endommagement calculé par rapport à la vitesse moyenne de la coupe (i) et avec l'hypothèse d'une combinaison matrice plus vides.

3 Tomographie ultrasonore

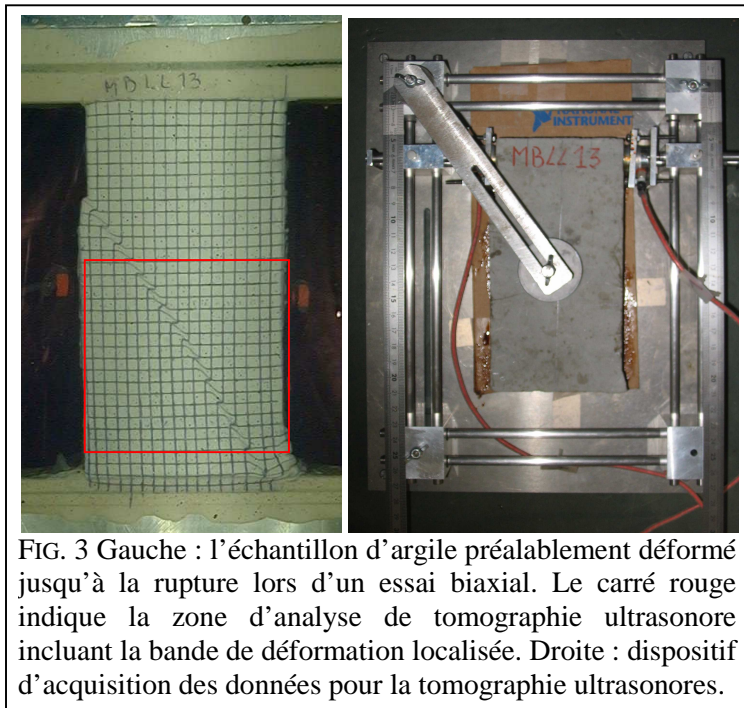
Les analyses telles que la méthode CVA permettent d'évaluer l'anisotropie et l'endommagement dans des échantillons mieux que les mesures classiques (une seule ou quelques mesures par échantillon). Par contre la CVA ne peut pas donner une quantification spatiale de l'endommagement - on n'obtient qu'une valeur moyennée sur des diamètres - qui serait nécessaire dans le cas de la déformation localisée. Nous avons alors entrepris une activité de « tomographie ultrasonore » en effectuant des mesures de champ de vitesses de propagation des ondes. Nous avons commencé par réaliser cette tomographie ultrasonore sur un échantillon « 2D », dont les caractéristiques varient essentiellement dans deux directions car le chargement appliqué pendant l'essai mécanique était en condition de déformation plane, mais le principe est le même pour les échantillons cylindriques (travail en cours actuellement).

Pour cet exemple de tomographie ultrasonore nous présentons l'analyse effectuée sur un échantillon d'argile (marne de Beaucaire) préalablement déformé (et qui montre une déformation localisée sous forme d'une bande de cisaillement, Fig. 3a) en déformation plane dans la cellule « biaxiale » du Laboratoire 3S-R à Grenoble. Nous présentons dans la suite

l'approche de la tomographie ultrasonore, l'acquisition, le traitement des données et quelques résultats préliminaires.

3.1 Dispositif d'acquisition des données

Le dispositif d'acquisition des données pour la tomographie ultrasonore est illustré dans la Figure 3b. Il comprend un plan de travail ajustable à la taille d'échantillon avec une fixation par pression pour maintenir le positionnement de l'échantillon pendant les mesures. Il y a plusieurs « chariots » qui portent les capteurs piezo-céramiques pour la réception et transmission des ondes ultrasonores. Chaque chariot peut glisser sur les rails du cadre pour un positionnement précis. Une autre dimension de glissement, perpendiculaire à la direction de guidage des chariots, permet d'approcher les capteurs de l'échantillon, avec un contrôle de la force de contact par l'intermédiaire d'un ressort. Les capteurs sont connectés soit à une voie du générateur des ondes soit à une voie de réception (*USBox*, *Lecoer électronique*). Avec un système de contrôle piloté sous *LABVIEW*, on contrôle les paramètres d'acquisition



(forme d'onde envoyée, fréquence d'échantillonnage de réception, etc.) et on enregistre les données sous forme de séries temporelles. Cette acquisition a été faite avec deux capteurs placés sur les deux bords longs opposés de l'échantillon avec plusieurs positionnements (directement opposés ou plus ou moins décalés). Cette acquisition fournit plusieurs chemins de mesure se croisant et traversant l'échantillon, ce qui permet de faire une analyse inverse tomographique, décrite ci-après.

3.2 L'analyse inverse : tomographie ultrasonore

Avec les données acquises comme expliqué ci-dessus, il est possible de faire une analyse inverse de tomographie ultrasonore pour fournir une carte de vitesses pour la propagation des ondes ultrasonores traversant un échantillon. On utilise ici la méthode présentée par Chapman et Pratt (1992) et Pratt et Chapman (1992) originalement utilisée pour la tomographie sismique « cross-well » (2D). Cette méthode permet de faire une tomographie anisotrope, c'est à dire une analyse de champ des vitesses et une quantification de son anisotropie dans le plan. Dans cet exemple nous travaillons en 2D, ce qui est raisonnable du fait du chargement en déformation plane effectué (nous nous attendons à peu près à la même déformation sur toute l'épaisseur de l'échantillon).

Les données comprennent les « temps de vol » pour chaque trajet correspondant aux positionnements des deux capteurs et les positions des capteurs. Comme avec toute analyse tomographique nous commençons avec la discrétisation d'espace du modèle (le modèle est le champ de vitesse dans l'échantillon) et nous divisons le plan d'échantillon avec un maillage carré (Fig. 4a). Donc chaque temps de vol, t_i , pour chaque trajectoire i peut-être décrit comme

$t_i = \sum_j l_j p_j$; pour une longueur de trajet de l_j , et les « slownesses » (inverses des vitesses) p_j

dans chaque cellule j présente sur la trajectoire. Cette discrétisation nous permet d'écrire le système des équations de la forme $\underline{d} = \mathbf{A} \underline{m}$ avec le vecteur des données, $\underline{d} = (t_1, t_2, \dots, t_N)$, le vecteur du modèle, $\underline{m} = (p_1, p_2, \dots, p_M)^T$, et la matrice $\mathbf{A} = \{l_{ij}\}_{i=1:N, j=1:M}$. Si on considère que le milieu est anisotrope, on peut modifier le matrice \mathbf{A} pour prendre en compte cette anisotropie. La méthode adoptée considère l'anisotropie comme une perturbation du modèle isotrope pour écrire le système d'équations comme,

$$\delta T_i = -\frac{1}{2} \int_j \frac{1}{\alpha^3} \delta q_0 dl_j - \frac{1}{2} \int_j \sum_{k=1}^5 \frac{1}{\alpha^3} \hat{p}_{1j}^{5-k} \hat{p}_{2j}^{k-1} \delta q_k dl_j,$$

dans laquelle $q_0 = \alpha^2$, $q_1 = a_{1111} - \alpha^2$, $q_2 = a_{1121}$, $q_3 = 2a_{1122} + 4a_{2121} - 2\alpha^2$, $q_4 = a_{2221}$, $q_5 = a_{2222} - \alpha^2$ (α est la vitesse isotrope et a_{ijkl} le tenseur de rigidité normalisé par le densité). Ce système d'équations est résolu ici avec une méthode itérative, utilisant la méthode LSQR (Paige et Saunders, 1982), avec rélinéarisations (actualisation des trajets dans le maillage en respectant le nouveau champ de vitesse déterminé). Les résultats de cette approche sont les champs des paramètres de modèle \underline{m} (comprennent q_0 , la vitesse isotrope au carré, et q_{1-5} qui décrit l'anisotropie, pour chaque cellule). Dans l'analyse inverse on utilise quelques paramètres de pondération qui permettent de contrôler la rugosité de la solution et le degré d'anisotropie dans le modèle ; on ajuste ces paramètres pour trouver le meilleur rapport entre l'erreur, la « rugosité » et la « réalité » d'image résultant.

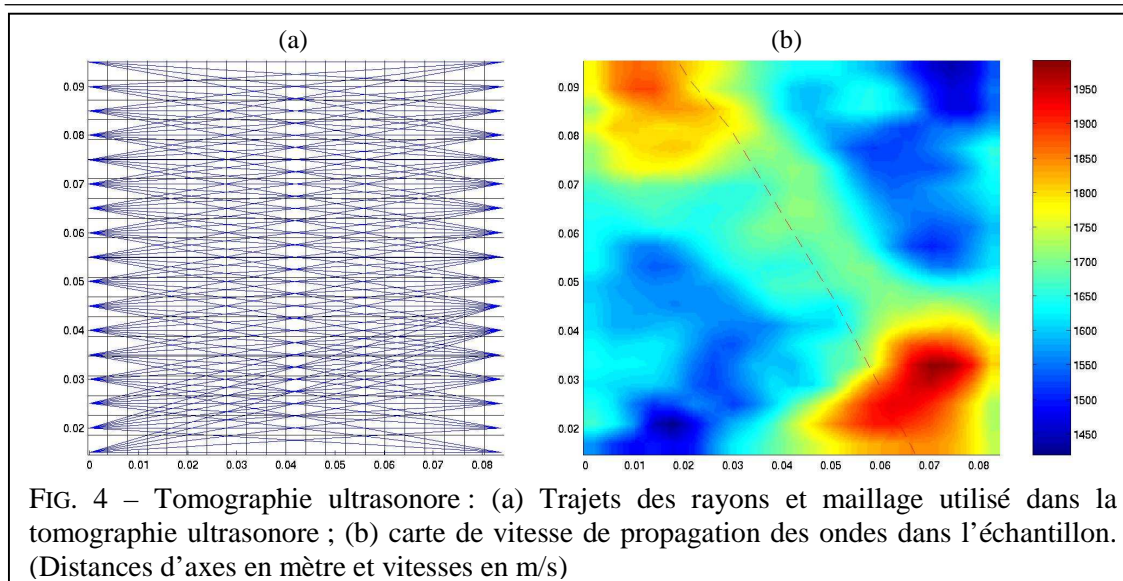
3.3 Résultats

Avant de faire l'analyse tomographique il est intéressant de voir les variations de vitesse dans les données brutes, en particulier les trajets avec les capteurs directement opposés, pour avoir une première impression de la variabilité et sensibilité des mesures. Dans ce cas, nous avons vu une variabilité de vitesse des ondes qui correspond à une variabilité visible dans la forme de la bande de cisaillement qui traverse l'échantillon. Cette première observation nous a encouragé pour continuer avec l'analyse complète de tomographie ultrasonore.

La Figure 4 présente les premiers résultats de la tomographie ultrasonore. Dans ce premier temps nous ne considérons pas l'anisotropie (il faut quelques améliorations de la méthodologie pour augmenter la précision avant d'être confiant dans cette caractérisation). On peut voir dans la carte de vitesse pour l'échantillon (Fig. 4b) qu'on retrouve un rapport entre les variations de vitesse et la déformation localisée – on voit une bande de vitesse augmentée proche de la position de la bande de déformation localisée observée sur la face d'échantillon (Fig. 3a). Nous travaillons encore sur l'amélioration de ce résultat, par exemple pour définir si les deux zones de vitesse augmentée aux deux extrémités de la bande sont réelles ou sont des artefacts. Une comparaison de cette carte avec une carte de la déformation obtenue par stéréophotogrammétrie montre une correspondance entre les variations des vitesses et la localisation de la déformation, mais nous travaillons encore sur cette comparaison et l'amélioration des analyses tomographiques.

4 Conclusions

Avec les mesures de type CVA nous avons montré que les mesures des vitesses des ondes ultrasonores sont sensibles à la déformation localisée (observée, elle, par micro tomographie RX). Pour les mesures effectuées sur un échantillon d'argile, préalablement déformé jusqu'à la rupture lors d'un essai triaxial axisymétrique sous contrôle micro tomographique RX, on voit les réductions et augmentations de vitesse liée à la déformation localisée dilatante et compactante, respectivement. De plus, les mesures CVA nous ont permis de calculer une mesure d'endommagement pour chaque chemin radial. Mais, cette méthode ne peut pas, par



contre, donner une quantification spatiale de l'endommagement, on n'obtient qu'une valeur moyennée sur des diamètres.

La tomographie ultrasonore permet de cartographier les variations de vitesse. Avec cette méthode nous avons fait une première analyse sur un échantillon préalablement déformé (et qui montre une bande de localisation). La carte de vitesses des ondes fournie par cette analyse montre une « bande » où la vitesse est en générale augmentée relativement au reste de l'échantillon, ce qui suggère une compaction du matériau dans la bande. Par ailleurs, nous travaillons sur la concordance de cette tomographie ultrasonore avec les cartes de déformation déterminées par corrélation d'image numérique. La combinaison de ces deux techniques représente une avancée tout à fait originale qui pourra donner plusieurs informations supplémentaires sur le comportement et l'endommagement des géomatériaux.

Remerciements

Nous remercions nos collègues à Heriot-Watt University et le financement du projet européen EIERO qui a nous aidé pour effectuer les premières analyses avant de lancer notre propre projet. Nous remercions également Nicolas Lenoir pour sa collaboration.

Références

- Chapman, C.H. & Pratt, R.G., 1992 Travelttime tomography in anisotropic media – I. Theory. *Geophys. J. Int.*, **109**, 1-19
- Desrues, J., 1984 La localisation de la déformation dans les milieux granulaires, PhD Thesis, Université de Grenoble, Grenoble, France.
- Desrues, J. & Viggiani, G., 2004 Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.* **28**, 279–321.
- Lenoir, N., Marello, S., Viggiani, G., Bésuelle, P., Desrues, J. & Di Michiel, M., 2004 X-ray micro tomography characterization of strain localization upon deviatoric loading of saturated fine-grained stiff soils, in: J. Otani, Y. Obara (Eds.), *X-ray CT for Geomaterials (GeoX2003)*, Balkema, pp. 147–155.
- Pratt, R.G. & Chapman, C.H., 1992 Travelttime tomography in anisotropic media – II. Application. *Geophys. J. Int.*, **109**, 20-37
- Paige, C.C. & Saunders, M.A., 1982 LSQR: an algorithm for sparse linear equations and spare least squares. *ACM Trans. Math. Software* **8**, 195-209