ANALYSE ET INTERPRÉTATION DE L'ESSAI IN-SITU DE COMPRESSION MECANIQUE DE L'EDZ

ANALYSIS AND INTERPRETATION OF THE EDZ IN-SITU MECHANICAL COMPRESSION TEST

Hippolyte DJIZANNE[1]*, Rémi DE LA VAISSIERE[1], Gilles ARMAND[1]
[1] *Andra R&D, Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne, Bure, France*
[*] Currently at *INERIS, Parc Technologique Alata 2, Verneuil-en-Halatte, France*

RÉSUMÉ – L'effet d'un confinement mécanique sur la zone fracturée et celui d'un déconfinement soudain et progressif de la paroi d'une galerie sont analysés dans cet article. L'interprétation de l'essai *in-situ* de compression au vérin est faite à partir de la formule de Boussinesq. Les modules de déformation du massif rocheux sont estimés à partir des déplacements. Une analyse des incertitudes contribue à améliorer l'interprétation.

ABSTRACT – The effect of a mechanical confinement on the excavation damaged zone and that of sudden and progressive deconfinement of the gallery wall are analyzed in this paper. The interpretation of the *in-situ* jack compression test is based on the Boussinesq formula. The rock mass deformation moduli are estimated from the recorded displacements. Uncertainty analysis helps improves interpretation.

1. Introduction

Le creusement de galerie au niveau principal du Laboratoire de recherche Souterrain de Meuse/Haute-Marne induit une zone fracturée (Armand et al., 2014). Des essais à la plaque ont été réalisés à la paroi d'une galerie du laboratoire pour caractériser les propriétés de cette zone fracturée au cours du temps. Le profil de la surface comprimée est de forme circulaire avec une superficie de 1 m² (soit 0,56 m de rayon). Cette expérimentation appelée CDZ « Compression Mécanique de l'EDZ » installée en 2010 permet ainsi de « reproduire » d'une part, l'effet sur la paroi d'une galerie du gonflement d'un noyau de scellement en bentonite dans une galerie et d'autre part, l'effet du retrait d'un revêtement des galeries. La poussée du gonflement est susceptible d'induire une réduction de la perméabilité sous l'effet de la fermeture géométrique des fractures voire même une certaine cicatrisation hydraulique. Les premiers résultats sur les caractéristiques hydrauliques et leurs évolutions ont déjà fait l'objet de plusieurs publications (de la Vaissière et al. 2014, 2015).

Cet article a un objectif double qui est d'une part, de présenter les résultats de l'analyse mécanique des campagnes de l'essai de compression réalisé en 2017 et d'autre part, de comparer ces résultats avec ceux du même essai de compression réalisé, en 2011. Durant ces 5 années, la zone fracturée a été hydratée et un cycle de chargement intermédiaire de longue durée a été réalisé, puis le vérin a été déchargé en 2016. De la Vaissière et al. (2015) montrent que durant l'hydratation de la zone fracturée, la conductivité hydraulique de celle-ci diminue au cours du temps signe d'un processus d'auto-colmatage des fractures. La question est alors quel est l'effet de la resaturation de la zone fracturée sur ces propriétés mécaniques ? L'effet d'un confinement mécanique sur la zone fracturée et de décharge de la paroi d'une galerie sont analysés grâce à un chargement cyclique. L'interprétation de cet essai au vérin est faite à partir de la formule de Boussinesq (1885) c'est-à-dire avec l'hypothèse d'une plaque circulaire rigide appliquant un effort sur un milieu semi-infini homogène isotrope élastique. Les modules de déformation du massif rocheux sont estimés à partir des déplacements du vérin. Les modules de déformation « globaux » et « locaux »

calculés après l'essai de 2017 sont comparés à ceux obtenus en 2011. Lors du chargement du vérin, on montre que la fermeture des fissures préexistantes contribue à augmenter les modules de la zone fracturée, tandis que lors du cycle de décharge/charge, incluant la relaxation du vérin et les effets de l'hydratation, l'amplitude de ces modules diminue. Les calculs d'incertitudes montrent qu'il n'y a pas d'évolution significative des modules entre 2011 et 2017 ; les variations observées restant dans les plages d'incertitudes calculées. Toutefois, l'historique des chargements hydromécaniques de cette zone fracturée, en particulier la longue phase d'hydratation réalisée pendant environ 5 ans, cumulée à l'effet du long cycle de chargement, n'a pas contribué à augmenter de façon conséquente les modules, tant le phénomène hydrique a compté. Dans l'analyse des données des cycles de chargement de 2017, les modules obtenus augmentent généralement avec la contrainte normale d'un cycle au suivant. Ces valeurs de modules obtenus paraissent représentatives d'une zone fracturée de l'argilite du Callovo-Oxfordien.

2. Analyse et interprétation de l'essai au vérin en galerie GET

Pour déterminer les modules de déformation, il est nécessaire de connaitre précisément l'état des contraintes et des déformations aux points considérés (en surface ou en profondeur). Les points particulièrement sensibles sont les conditions d'appui sous la plaque, la stabilité du dispositif de réaction et la fiabilité du dispositif de mesure. Pour cela, on suppose que le chargement est uniformément réparti ; que l'axe de chargement est strictement perpendiculaire à la surface d'appui circulaire de 1 m² et que les mesures de déplacements enregistrées au niveau du corps du vérin correspondent uniquement aux déplacements du massif (enfoncement de la plaque).

Les modules de déformation globaux et locaux de la campagne de 2017 sont calculés et comparés à ceux obtenus lors de la campagne de 2011. La phase préparatoire de l'expérimentation, les moyens de mesure et les premiers résultats de cette expérimentation sont présentés par de la Vaissière et al. (2014). La convention de signe de la mécanique des milieux continus est respectée dans l'article (compression négative et traction positive ou contraction négative et dilatation positive ou raccourcissement négatif et allongement positif). La Figure 1 présente une photo *(a)* et un plan d'implantation *(b)* de l'expérimentation dans la galerie GET du Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne.

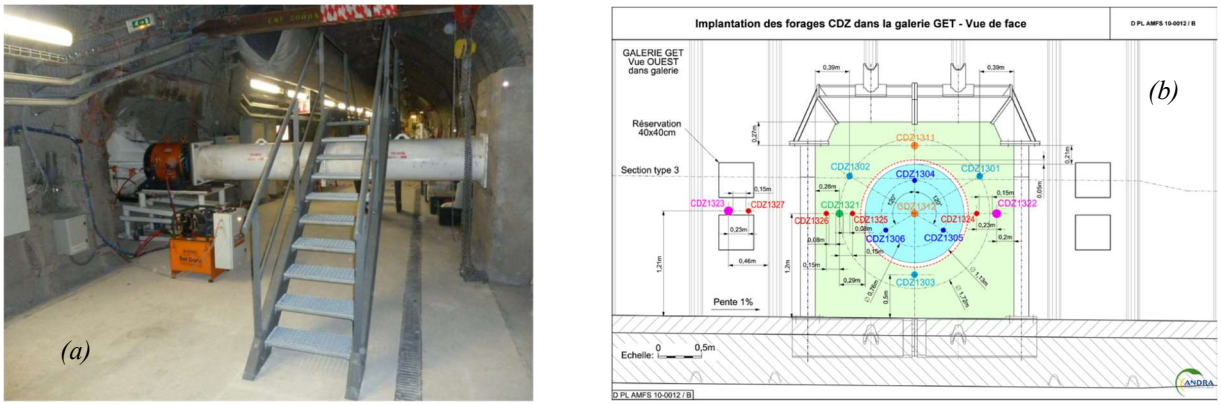

Figure 1 a) Photo de l'expérimentation en galerie GET b) vue de face de l'implantation des forages instrumentés de l'expérimentation CDZ.

2.1 Chargements appliqués en 2011 et en 2017

Un essai de chargement rapide, quasiment identique à celui de 2011 a été réalisé en 2017. L'objectif visé par ces chargements rapides est de caractériser le comportement mécanique instantané de la zone fracturée par le creusement, soumise à un cycle de charge/décharge. En effet, l'essai rapide a été répété pour vérifier l'évolution des modules de déformation globaux et locaux, compte tenu de l'historique de chargement de la zone fracturée.

Sur la Figure 2, on observe que la réponse en déplacement est différente alors que le chargement appliqué lors des deux cycles rapides est sensiblement le même. Les déplacements mesurés lors du premier cycle rapide (2011) sont supérieurs à ceux mesurés lors du cycle rapide le plus récent (2017). Entre les deux cycles, il y a eu deux longues phases d'hydratation (2011/2012 et 2013/2014) de la roche ainsi qu'un cycle de chargement de longue durée (2015 à 2016). Le premier cycle de chargement rapide (2011) avait permis d'obtenir les modules de déformation avant hydratation de la zone fracturée. La concavité observée sur la courbe chargement vs déplacement, est imputée à la nature fissurée du milieu comprimé. La différence observée sur les amplitudes des déplacements entre 2011 et 2017 peut signifier que certaines fissures se sont refermées complètement. La fermeture probable de ces fissures pourrait entraîner une modification des caractéristiques mécaniques et notamment des modules de déformation.

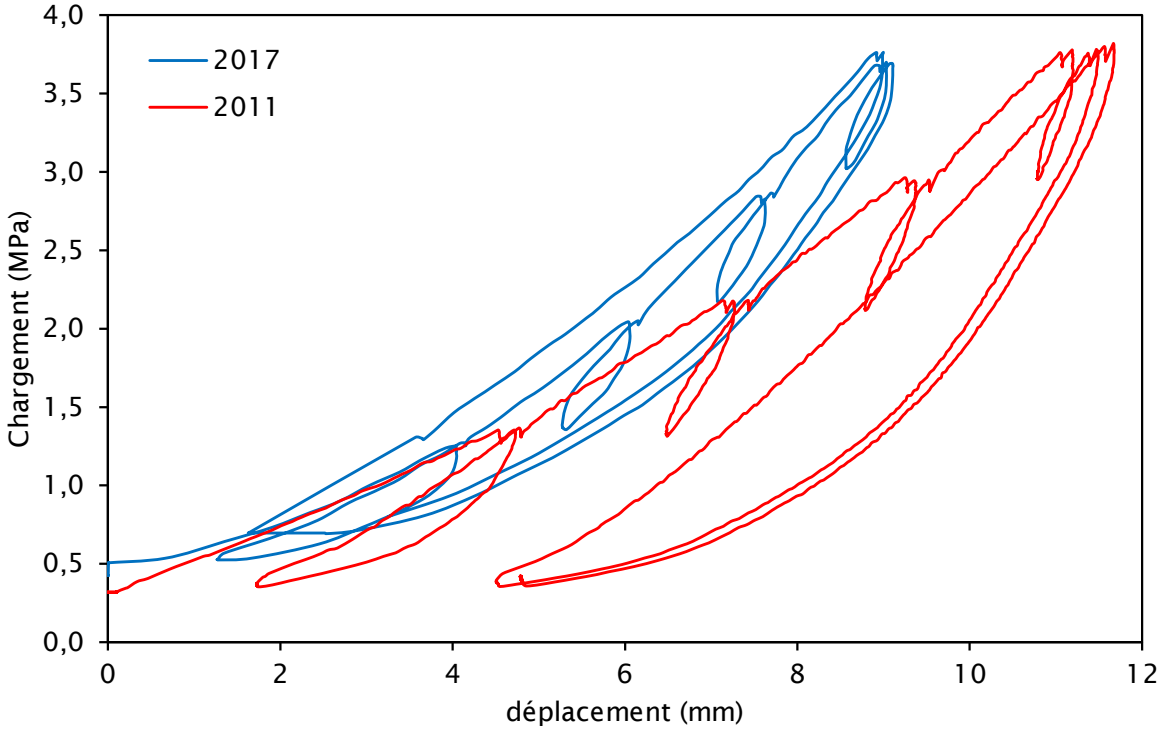

Figure 2. Comparaison des cycles de chargement rapides réalisés en 2011 et en 2017.

2.2 Hypothèses et méthode d'analyse

Pour interpréter le chargement mécanique du vérin sur la paroi de la galerie, l'intégration de la formule de Boussinesq (1885) sur la surface d'appui du vérin permet de déterminer la contrainte verticale. On considère une plaque circulaire rigide de rayon a, appliquant une contrainte p à un milieu semi-infini homogène isotrope élastique de module d'élasticité E et de coefficient de Poisson v. En considérant un point situé sur l'axe des z, l'écriture des formules de la contrainte verticale $\sigma_z(z)$ engendrée par un chargement distribué p sur un disque de rayon a et de la déformation associée $\varepsilon_z(z)$ permet d'estimer le module de déformation « local » à différentes profondeurs.

$$E = \frac{(1+\upsilon)p}{\varepsilon_z(z)}\left(1 - 2\upsilon + 2\upsilon\left(\frac{z}{\sqrt{a^2+z^2}}\right) - \left(\frac{z}{\sqrt{a^2+z^2}}\right)^3\right) \quad (1)$$

Avec : E = Module local ; υ = coefficient de Poisson ; p : chargement appliqué par le vérin et mesuré par deux cellules de pression positionnées à l'arrière du vérin : a = rayon du disque ; z = distance à la paroi des points de mesures dans le massif ; $\varepsilon_z(z)$ = déformations calculées à partir des déplacements mesurés par l'extensomètre multipoint.

Il est possible d'obtenir une estimation du module de déformation « global » du massif en connaissant la contrainte appliquée par le vérin et l'enfoncement de la couronne de répartition.

$$E = \left(1 + \frac{2}{\pi}\right)(1 - \upsilon^2)\frac{pa}{u_z^{moy}} \quad \text{.....(2)}$$

Avec : E = Module global ; υ = coefficient de Poisson ; p = chargement appliqué par le vérin et mesuré par deux cellules de pression positionnées à l'arrière du vérin; a = rayon du disque ; u_z^{moy}= déplacement moyen calculé à partir des mesures des deux capteurs potentiométriques fixés de chaque côté du corps du vérin pour mesure la course du vérin.

2.3 Modules de déformation globaux

La déformation mesurée comprend une partie réversible et une partie permanente. Le serrage et la mise en place du vérin sont supposés permanents pendant l'essai de compression, voir Figure 3 (CFMR, 2000).

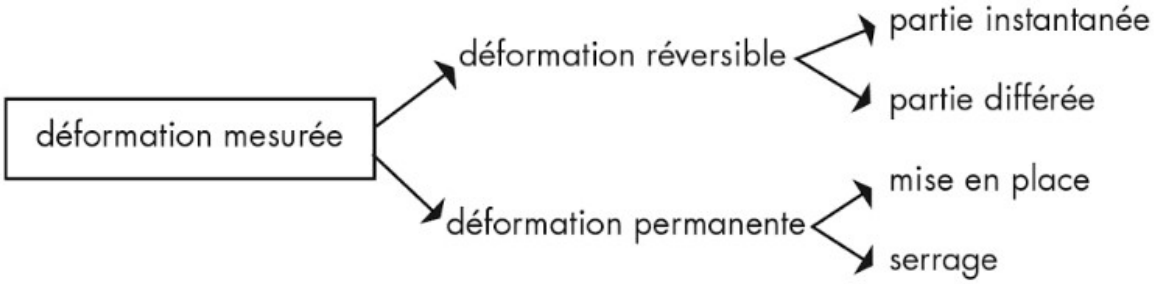

Figure 3 Décomposition de la déformation mesurée d'après Mazenot, 1964 (CFMR, 2000).

Dans l'analyse, les cycles de charge/décharge sont différenciés des phases de chargement. Les modules de déformation calculés à partir des cycles de charge/décharge sont dit « cycliques » tandis que les modules calculés à partir des phases de chargement sont dit « tangents ». Les modules de déformation globaux sont calculés directement à partir de l'enfoncement de la couronne de répartition et de la contrainte appliquée par le vérin.

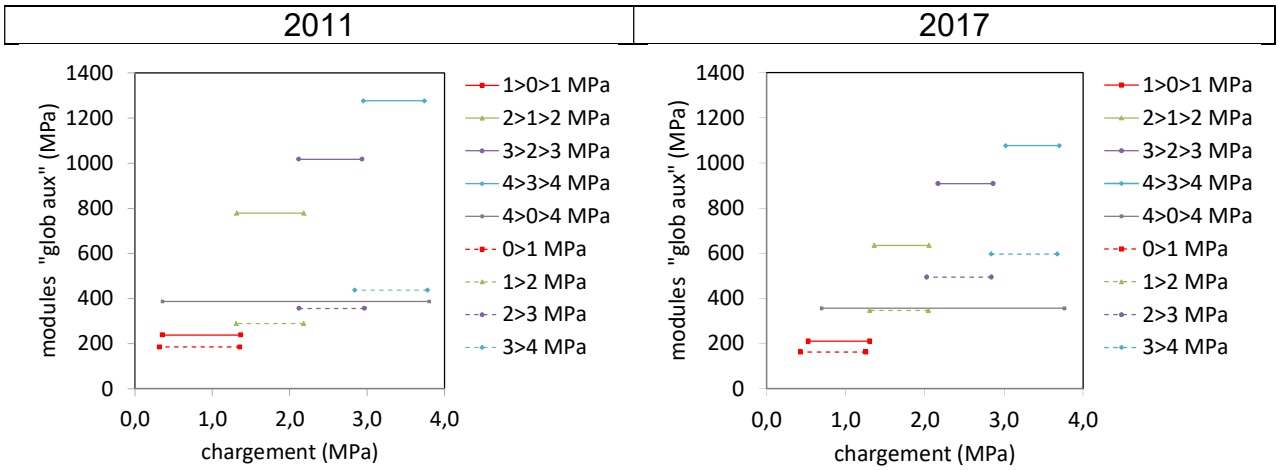

Figure 4. Comparaison entre les modules globaux des 2 cycles de chargement rapide.

Sur la Figure 4, une comparaison est effectuée entre les modules globaux des 2 cycles de chargement rapide de 2011 et de 2017. Sur cette figure, la phase de charge est représentée en trait discontinu tandis que, le cycle de décharge/charge est représenté en trait continu. Les modules globaux obtenus analytiquement sans prise en compte des incertitudes, augmentent avec l'amplitude du chargement. Cette augmentation est plus nette sur les

modules cycliques que sur les modules tangents. Ces valeurs paraissent représentatives d'une zone fracturée de l'argilite du Callovo-Oxfordien.

Les résultats de 2017 présentent comparativement à ceux de 2011, à la fois une diminution et une augmentation du module en fonction du type de chargement. En effet, les modules globaux calculés pour le cycle de décharge/charge de 2017 paraissent moins importants que ceux calculés en 2011, tandis que les modules globaux de la phase de charge de 2017 paraissent plus importants que ceux calculés en 2011. Cette différence d'amplitude est une nouvelle fois très faible de l'ordre de quelques dizaines de MPa. L'évolution des propriétés mécaniques n'est pas nette au vu des incertitudes sur le chargement appliqué et sur la connaissance de la zone fracturée.

2.3 Modules de déformation locaux

Les modules de déformation locaux sont calculés à différentes profondeurs à partir des mesures de déplacements obtenus par extensométrie en forage. L'extensomètre est positionné au centre de la zone d'appui du vérin. La précision théorique de l'extensomètre est de 0,004 mm. La déformation calculée est inversement proportionnelle à la profondeur des ancrages. Les valeurs de déformation maximales sont localisées entre 0 et 0,5 m (max à -1,7%) et représentent principalement la contraction de la roche. Dans les graphes suivants, les modules représentés sont calculés entre 0 et 2 m (à 0,25, 0,55, 0,65, 0,75, 0,85, 1, 1,2, 1,4, 1,65, 1,95) compte tenu de la faible contrainte (~10%) perçue au-delà de 2 m.

La Figure 5 présente les modules de déformation locaux calculés en fonction de la distance à la paroi dans les deux premiers mètres. 90 valeurs de modules de déformation locaux sont représentées en deux groupes : cycle de charge et cycle de décharge/charge. A 0,25 m de la paroi, les modules calculés sont très faibles, signe d'un endommagement important imputable à l'excavation. La différence entre les modules locaux calculés dans la phase de charge et ceux calculés pour un cycle de décharge/charge n'est pas évidente. Pour finir, l'évolution des modules de déformation en fonction de la profondeur n'est pas linéaire.

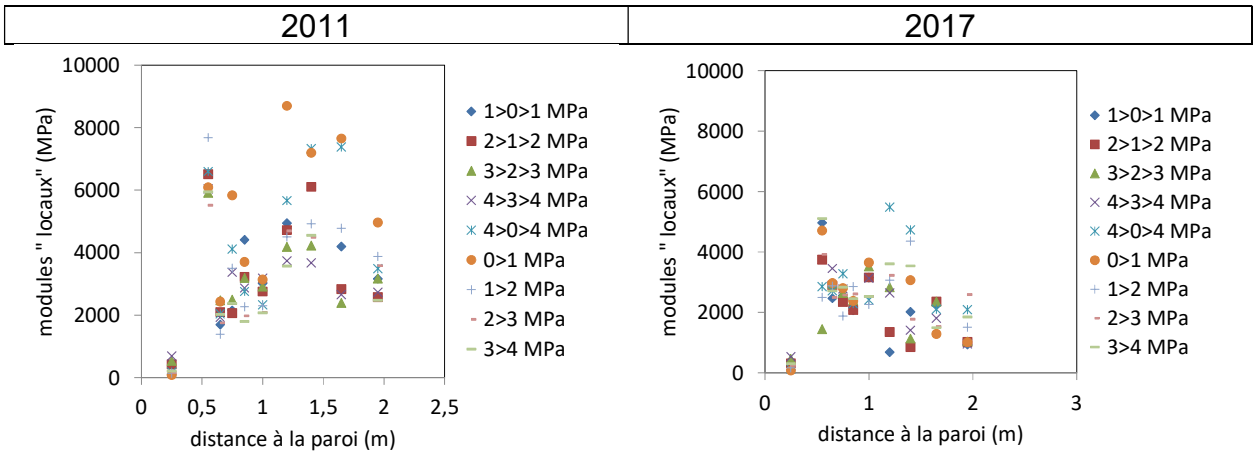

Figure 5. Comparaison entre les modules locaux des 2 cycles de chargement rapide.

En 2017, le module local maximal (5487 MPa) est atteint à 1,2m de la paroi, pendant le cycle de décharge/charge 4-0-4 MPa et le plus petit module local (72 MPa) est obtenu à 0,25m de la paroi pendant le cycle de charge rapide 0-1 MPa. Une réduction des valeurs de module locaux au-delà d'un mètre de profondeur semble significative entre 2011 et 2017. Sous réserve de la prise en compte des incertitudes, les modules locaux calculés pour le cycle rapide de 2017 sont relativement moins importants que ceux qui avaient été obtenus pour le cycle rapide de 2011.

3. Discussion sur la prise en compte des incertitudes dans l'interprétation des modules

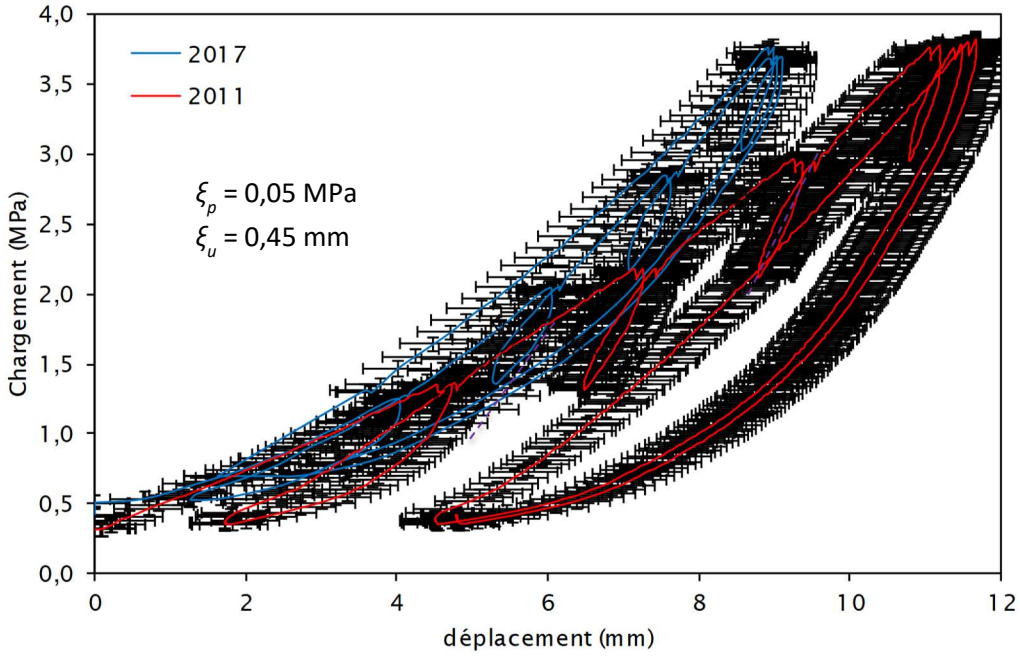

Figure 6. Comparaison entre les courbes de chargement-déplacement des cycles rapides de 2011 et de 2017.

Dans cette section, un calcul semi-analytique est réalisé pour prendre en compte les incertitudes dans le calcul des modules de déformation globaux et locaux. L'objectif de ce calcul est d'évaluer la pertinence d'une potentielle évolution des modules entre 2011 et 2017. La méthode des moindres carrés et la méthode des moindres carrés pondérés sont utilisées pour le calcul des incertitudes, respectivement sous Excel et sous Python. Une fonction affine de type $y = f(x) = ax + b$ est considérée.

- La méthode des moindres carrées est utilisée sous Excel pour trouver les valeurs optimales de *a* et *b* en utilisant une fonction d'écart. L'incertitude calculée sous Excel en utilisant la fonction « DROITEREG » ne prend pas en compte les incertitudes respectives des mesures expérimentales de chargement et de déplacement. Pour cette raison, les résultats de cette méthode ne sont pas présentés dans cet article.
- Pour prendre en compte les incertitudes respectives des mesures expérimentales de chargement et de déplacement, la méthode des moindres carrées pondérés est utilisée sous Python en adaptant un algorithme de type WLS (weigth least squared). Dans cette méthode, les points de mesures sont assortis d'une incertitude, pouvant éventuellement dépendre de n : ($x_n \pm \Delta x_n$, $y_n \pm \Delta y_n$). Dans ce cas, la droite de régression passe près des points dont l'incertitude est la plus faible par rapport à ceux dont l'incertitude est la plus grande.

Les incertitudes prises en compte sur les données d'entrées étaient : ξ_p = ±0,05 MPa sur les mesures de chargement appliqué par le vérin ; ξ_u = ±0,45 mm sur les mesures de déplacement par les capteurs potentiométriques et ξ_m = ±0.002 mm sur les mesures de déplacement par l'extensomètre multipoint. La Figure 6 présente une comparaison des plages de valeurs admissibles sur les courbes de chargement-déplacement des cycles de 2011 et de 2017.

3.1 Plage d'incertitude sur la valeur des modules de déformation globaux

Les modules de déformation globaux sont calculés à partir des mesures de surface (c'est-à-dire en paroi et non dans la roche) et du chargement appliqué par le vérin (voir Figure 7). La pente de la droite formée entre le chargement et le déplacement permet d'évaluer ce module.

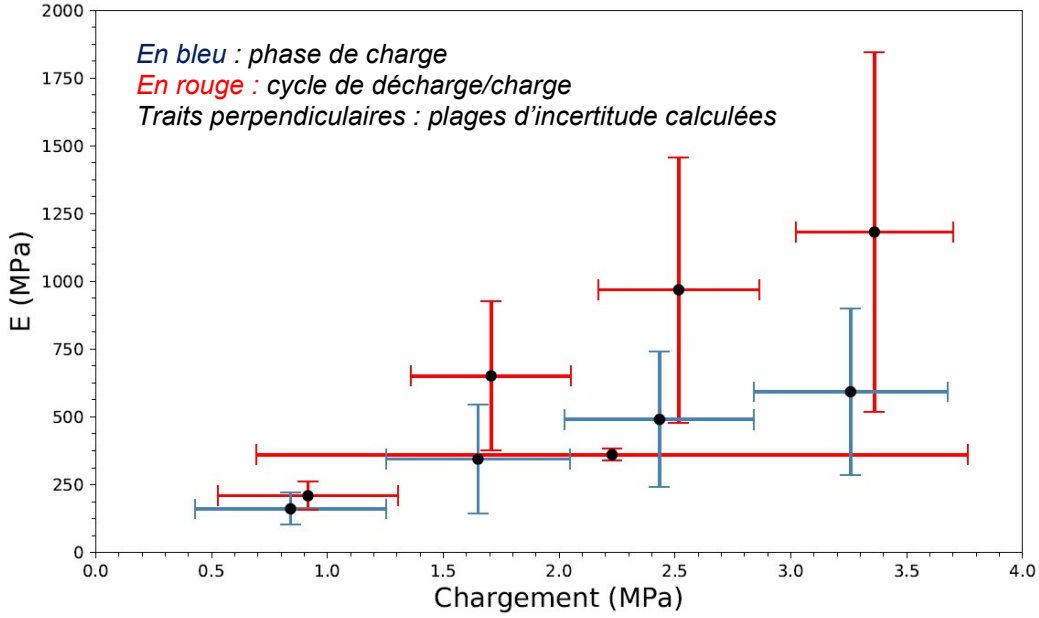

Figure 7. Plages d'incertitudes sur modules globaux des cycles de décharge/charge de 2017.

La prise en compte des incertitudes dans le calcul des modules globaux montre que, les modules globaux calculés à partir des cycles de chargement de 2011 sont dans la plage de valeur admissible des modules calculés en 2017. Les évolutions des modules ne sont donc pas significatives.

3.2 Plage d'incertitude sur la valeur des modules de déformation locaux

Les modules de déformation locaux sont calculés en champ proche et à différentes profondeurs à partir des mesures de l'extensomètre multipoint et de l'estimation de la contrainte appliquée (voir Figure 8).

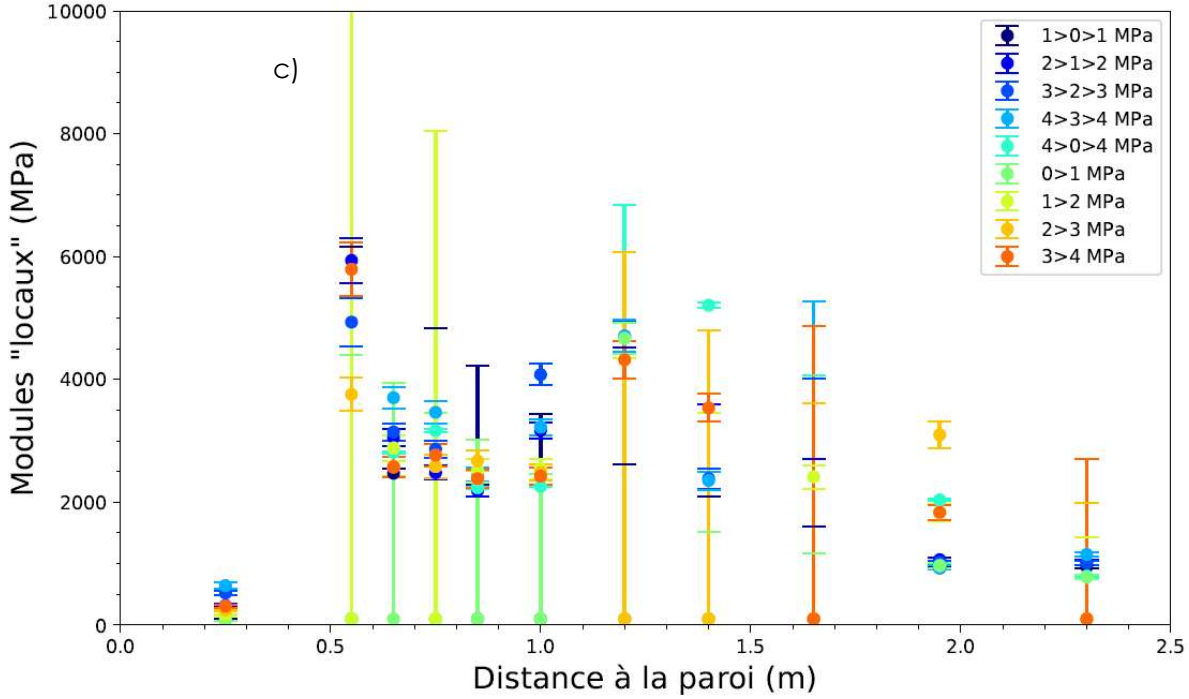

Figure 8. Plages d'incertitudes sur modules locaux des cycles de décharge/charge de 2017.

La prise en compte des incertitudes dans le calcul des différents modules locaux montre, que les modules locaux calculés à partir des cycles de chargement de 2011 sont dans la plage de valeur admissible des modules calculés en 2017. Les évolutions des modules ne sont finalement pas significatives.

4. Conclusion et perspectives

Les modules de déformation globaux et locaux du massif ont été déterminés à partir des données d'entrée de l'essai à la plaque, à savoir : les déplacements en paroi et à différentes profondeurs obtenus grâce à des mesures extensométriques et la contrainte appliquée par le vérin et déterminée par l'approche de Boussinesq en profondeur. Pour ce type d'essai, il est admis que la zone d'influence de la contrainte appliquée en paroi ne dépasse pas 3 diamètres. Aussi, en utilisant une plaque rigide, on a supposé que l'enfoncement sous la plaque reste uniforme sur toute la surface de la zone chargée. Lors du chargement du vérin, la fermeture des fissures préexistantes est susceptible de contribuer à l'augmentation des modules de la zone fracturée avec la contrainte normale appliquée, tandis que lors du cycle de décharge, l'amplitude de ces modules diminue mais moins en valeur absolue que celle observée lors du chargement ; signe d'une ré-ouverture des fractures restant cependant inférieure à l'ouverture initiale de celle-ci.

Cependant, les calculs d'incertitudes montrent qu'il n'y a pas eu d'évolution significative des modules de déformation entre 2011 et 2017 car, les variations observées restent dans les plages d'incertitudes calculées malgré les variations de conductivité hydraulique montrées par de la Vaissière et al. 2015. Une explication phénoménologique se trouve peut-être dans l'historique de chargements hydromécaniques de cette zone fracturée connectée. En effet, la longue phase d'hydratation réalisée pendant environ 5 ans dans la zone, conduit à un gonflement des particules argileuse dans les fractures et à proximité des fractures affectant ainsi la transmissive des fractures sans pour autant modifier la rigidité globale du massif fracturé. Les valeurs de modules paraissent représentatives d'une zone fracturée de l'argilite du Callovo-Oxfordien. Cette étude montre entre autres que, la zone fracturée a une rigidité inférieure à celle du Callovo-Oxfodiren sain et est capable d'absorber une partie des déformations induite par le fluage provenant de l'argilite saine. De ce fait, le chargement mécanique des revêtements peut être retardé.

En perspective, il est possible d'améliorer l'interprétation des données du cycle de chargement en utilisant à la place de l'approximation de Boussinesq un modèle numérique permettant de mieux prendre en compte le comportement hydromécanique de la zone fracturée (non élastique isotrope) et de mieux estimer l'état de contrainte en dessous de la plaque.

5. Bibliographie

Armand, G., Leveau, F., Nussbaum, C., de La Vaissiere, R., Noiret, A., Jaeggi, D., Landrein, P., and Righini, C. (2014). "Geometry and Properties of the Excavation-Induced Fractures at the Meuse/Haute-Marne URL Drifts." Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(1), 21–41.

Boussinesq (1885). — Application des potentiels à l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques. — Gauthier-Villars. Paris

CFMR (Comité Français de Mécanique des Roches) (2000). Manuel de mécanique des roches, tome 1: Fondements, 265 pages, Les Presses de l'École des Mines, Paris.

De la vaissière R., Morel J., Noiret A., Cote P., Helminger B., Sohrabi R., Lavanchy J.-M., Leveau F. and Nussbaum C. (2014). Excavation-induced fractures network surrounding tunnel: Properties and evolution under loading. September 2014, Geological Society London, Special Publications 400(1):279-29; DOI: 10.1144/SP400.30

De la Vaissière R., Armand G. and Talandier J. (2015). Gas and water flow in an excavation-induced fracture network around an underground drift: A case study for a radioactive waste repository in clay rock; February 2015, Journal of Hydrology 521:141-156, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.067