

PROPOSITION D'UNE NOUVELLE METHODE D'INTERPRETATION DES ESSAIS AU VERIN PLAT POUR SUIVRE L'EVOLUTION DE CONTRAINTE DANS DES REVETEMENTS DES GALERIES DU LABORATOIRE SOUTERRAIN EN MEUSE/HAUTE-MARNE

PROPOSAL OF A NEW INTERPRETATION METHOD OF THE FLAT JACK TEST TO FOLLOW THE EVOLUTION OF STRESSES IN THE UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY AT MEUSE/HAUTE-MARNE LININGS

Minh-Ngoc VU¹, Jad ZGHONDI², Gilles ARMAND², Chi-Cong VU¹

¹ Andra, Direction R&D, Chatenay-Malabry, France

² Andra, Direction R&D, Laboratoire Souterrain en Meuse/Haute-Marne, Bure, France

RÉSUMÉ – Les soutènements\revêtements au Laboratoire Souterrain en Meuse/Haute-Marne (LSMHM) sont instrumentés de manière à pouvoir suivre l'évolution des contraintes et des déformations et mieux appréhender l'interaction entre la structure en béton et la roche avoisinante. La technique dite du vérin plat permet d'avoir une mesure directe pour mesurer une contrainte locale à un instant donné. Cette mesure est effectuée normalement une fois, ce qui n'est pas le cas au LSMHM où les vérins plats sont sollicités régulièrement d'une manière à pouvoir suivre l'évolution des contraintes dans le temps. Cet article propose une nouvelle méthode d'interprétation correspondant aux mesures réalisées au LSMHM. Il consiste une relation analytique entre la pression du vérin plat et la contrainte orthoradiale de la structure.

ABSTRACT – The linings in Underground Research Laboratory at Meuse/Haute-Marne (URL) are instrumented to follow the stress/strain evolution, as well as better understand the interaction between concrete structures and the surrounding rock. The flat jack test provides a relatively simple and non-destructive technique to assess the in situ stress state and mechanical properties of structures at a considered moment. The flat jack is taken off from the structure after the test and the saw is filled by material to restore the original structure. This is not the case in URL where the flat jack is let in place to follow the stress evolution by coming regularly to make the measure. This article proposes an interpretation method corresponding to measurement performed at URL. This is a closed-form relation between orthoradial stress and flat jack pressure.

1. Introduction

La méthode de mesure de contrainte par vérin plat, issue de la mécanique des roches, consiste à effectuer une saignée à un endroit donné de la structure à l'aide d'une scie pour libérer les contraintes, puis venir avec un vérin solliciter cette saignée pour revenir à l'état de contrainte avant la création de la saignée. Cela consiste à insérer un vérin plat qui épouse parfaitement la forme de la saignée, et à augmenter la pression de façon à rétablir le champ de déplacements qui existait initialement à la surface de la structure avant la réalisation des entailles. Cette mesure ne nécessite pas la détermination des paramètres mécaniques de déformabilité module d'Young et coefficient de Poisson.

La popularité de la méthode au vérin plat provient de son mode d'application relativement simple, et adaptable pour différents types d'ouvrages existants, tels que ouvrages en maçonnerie, massif rocheux, revêtements de tunnel, barrages, etc. Vu son

utilisation, le protocole du test au vérin plat (Abdunur 1985) adapté aux ouvrages en maçonnerie a été normalisé que ça soit pour un dispositif à un seul vérin plat (ASTM C1196-04) ou à double vérins plats (ASTM C1197-04).

Dans le LSMHM, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) étudie le comportement hydromécanique de différentes galeries construites avec différentes méthodes d'excavation et de soutènement/revêtement. La comparaison du comportement hydromécanique de galeries parallèles avec différents soutènement/revêtement permet de mieux comprendre l'effet de la méthode de construction sur la zone endommagée par le creusement, le chargement de la structure et l'interaction roche/structure. Ces études permettront d'apporter des éléments scientifiques et technologiques pour la conception et le dimensionnement des ouvrages souterrains du projet Cigéo (Centre industriel de stockage géologique). Ces différentes galeries sont instrumentées avant lors et après creusement, que ça soit par des capteurs intégrés dans la roche ou dans les structures cimentaires. Le suivi de ces structures cimentaires (soutènement/revêtement) est assuré par des capteurs de déformations (cordes vibrantes) et de pressions (vérin plat et cellules de pression totales) intégrés dans la masse de la structure (Zghondi et al. 2017). La mesure au vérin plat donne la contrainte par relâchement à un instant donné. Pour suivre l'évolution temporelle de la contrainte dans la structure il faudrait réaliser des saignées successivement à différent temps ce qui est difficile à faire si on réalise le suivi à une fréquence temporelle élevée. Pour cette raison, la mesure de vérin plat est utilisée aussi pour suivre l'évolution de contrainte au cours du temps en laissant le vérin plat dans la saignée et en venant solliciter de nouveau pour suivre l'évolution de l'état de contrainte. Cette technique a été utilisée dans des tunnels ferroviaires (Le Mouel et al. 1994). Le retour d'expérience actuelle au LS montre que jusqu'à présent la mesure au vérin plat sont les seules mesures directes de la contrainte, mais présentent une incertitude qui augmentent avec le temps.

Le principe de l'essai pour la mesure de la contrainte est rappelé dans la Figure 1. Dans un premier temps les plots de mesures de distances sont mis en place de part et d'autre de la zone du vérin, définissant une distance de référence entre ces plots appelée d_{0i} (Figure 1a). La saignée est ensuite créée et la distance entre les plots est de nouveau mesurée $d < d_{0i}$ (Figure 1b). Le vérin plat est après inséré dans la saignée et directement chargé par une pompe à huile jusqu'à obtenir que la distance d des soit égale à celle initialement mesurée ; $d = d_{0i}$ (Figure 1c). La pression mesurée du vérin plat traduit l'état de la contrainte σ_0 dans la structure. Deux solutions sont possibles pour réaliser un suivi dans le temps de la mesure au vérin plat :

- soit un nouveau vérin est installé dans la structure, la nouvelle mesure correspondra à l'état de contrainte σ_1 , les étapes a,b,c dans la Figure 1 seront répétées. Cependant la distance de référence $d_{1i} \neq d_{0i}$ (Figure 1e) et la pression d'huile p_1 traduit directement l'état de la contrainte σ_1 (Figure 1f).
- soit le vérin plat est laissé dans la saignée en venant de temps en temps pour réaliser l'essai (Figure 1d). Dans ce cas, seule la distance d_{0i} est connue et la pression p'_1 correspond à $d = d_{0i}$ n'est pas l'état de contrainte σ_1 au moment de réalisation de mesure. La simulation numérique peut aider à déterminer σ_1 à partir de d_{0i} et p'_1 .

La méthode d'interprétation classique de la contrainte σ dans la structure tient compte d'une correction de la pression du vérin p en prenant en compte les facteurs K_a en relation avec le ratio de la surface du vérin plat et celle verticale de la saignée (slot) ainsi que de K_m concernant la rigidité intrinsèque du vérin plat.

$$\sigma = K_a K_m p \quad (1)$$

En effet, le vérin plat a une rigidité intrinsèque qui empêche sa dilatation lors de la pressurisation. La pression d'huile dans le vérin est alors supérieure à celle appliquée par le vérin à la structure. Le coefficient K_m dépend de la pression d'huile et la géométrie du

vérin. La calibration de ce coefficient pour différents vérins plats ont été étudiée par Rossi (1987). La méthode d'interprétation par l'équation (1) est baptisée dans cet article « méthode traditionnelle (MT) ».

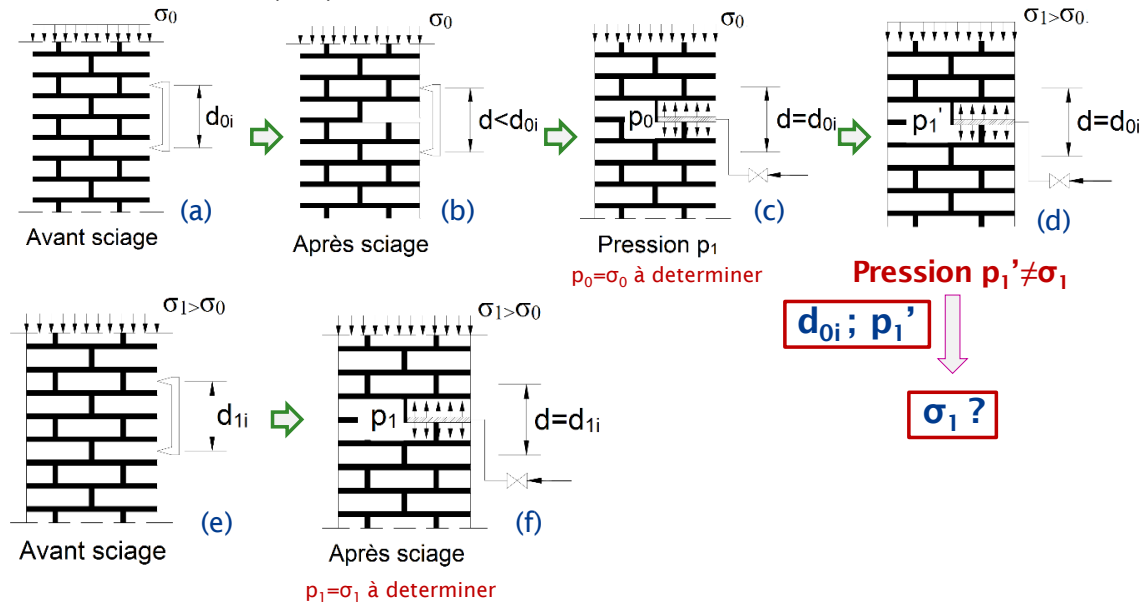


Figure 1. Phasage typique d'un essai au vérin plat

Ce traitement empirique a été appliqué au LSMHM et conduit à des valeurs minimale et maximale, correspondant aux pressions nécessaires pour ouvrir la saignée relative aux distances inter plot entre les deux niveaux de plots (plots proches et éloignés) (Figure 3). Cette estimation fournit un intervalle de mesure avec une incertitude qui peut être conséquente suivant les conditions d'essai. Les analyses de la Figure 1 montrent que la **MT**, basée sur le déplacement de référence initial avant sciage, ne peut plus être appliquée lors des mesures successives au LSMHM. Ajoutons qu'une autre incertitude n'est pas prise en compte dans la MT ; la pression d'huile dans le vérin plat est homogène alors que la contrainte orthoradiale n'est pas uniforme dans l'épaisseur du revêtement et donc n'est pas constante sur la surface du vérin.

L'objectif de ce travail est de proposer une autre méthode d'interprétation de l'essai au vérin plat adaptée aux mesures réalisées au LSMHM afin de réduire l'incertitude sur la détermination de la contrainte dans la structure. La méthode a été construite en tenant compte du fait que le déplacement de référence est connu lors de la première mesure et que les déplacements de référence successifs ont pu être déterminés à partir d'une modélisation par codes aux éléments finis (Code_Aster). A la suite, une solution semi-analytique, décrivant la relation entre la pression d'huile dans le vérin plat et la contrainte orthoradiale dans le revêtement, est proposée. Elle est utilisée après pour corriger les différentes mesures réalisées au LSMHM. La comparaison avec l'évolution des contraintes dans des revêtements, déduite via d'autres types de capteurs, permet de montrer que la nouvelle méthode d'interprétation permet d'estimer de façon correcte l'évolution de la contrainte dans le revêtement.

2. Expérimentation au vérin plat au LSMHM

Les vérins plats sont installés au soutènement/revêtement des différentes galeries au LSMHM, à savoir GCR/GCS/GRD/GER comme les montrés dans la Figure 2. La forme du vérin plat et la disposition des plots de mesure sont présentées dans la Figure 3. Il y a deux distances des plots : 250 mm et 100 mm. Les mesures correspondant à ces deux distances sont appelées mesure 1 et mesure 2. Comme le mentionné en introduction, la particularité au LSMHM est qu'après installation la mesure est suivie

dans le temps via des mesures ponctuelles. Jusqu'à présent, des campagnes de mesures ont été réalisées sur ces vérins avec des fréquences variables suivant les galeries dépendant de l'évolution du chargement. Le résultat et l'analyse des mesures brutes sont discutés dans la section 4.

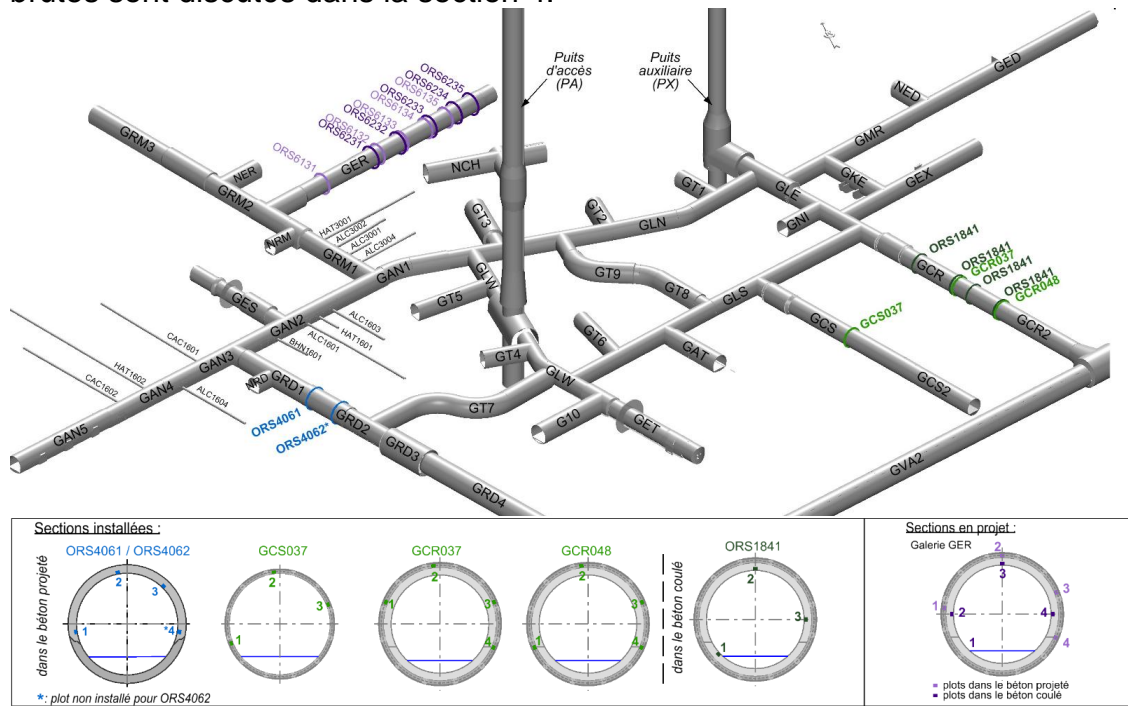


Figure 2. Position et disposition par section de mesures de vérin plat dans le LSMHM

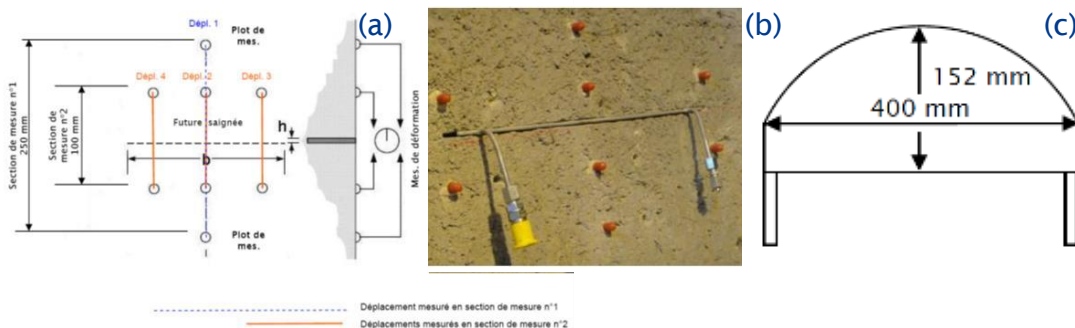


Figure 3. Disposition du vérin plat et des plots de mesure

3. Nouvelle méthode d'interprétation (NM)

Cette section est consacrée à proposer une relation analytique entre la pression d'huile du vérin plat et l'état de contrainte dans le revêtement du tunnel soumis à un chargement radial isotrope à son extrados. L'essai au vérin plat a été réalisée dans la galerie GCR (Galerie de Conception Rigide) au LSMHM et est modélisé par codes aux éléments finis (Code_Aster). Il s'agit d'une modélisation 3D dont la géométrie, le maillage, les conditions aux limites et le chargement sont montrés dans la Figure 4. Le revêtement de la galerie GCR est constitué d'un béton coulé sur place de 31 cm d'épaisseur moyenne et 2,15 m de rayon intérieur. Le comportement du béton est supposé être élastique avec un module d'Young $E = 30 \text{ GPa}$ et un coefficient de Poisson $\nu = 0,25$. Les lèvres de la saignée sont bloquées dans la modélisation avant l'installation du vérin plat, leurs déplacement est libéré lors de la libération de la contrainte et soumise à une pression uniforme au moment où l'essai est effectué. Il faut noter que la taille du vérin plat est petite par rapport à la taille de la galerie, sa présence par la symétrie n'affecte pas alors celui considéré.

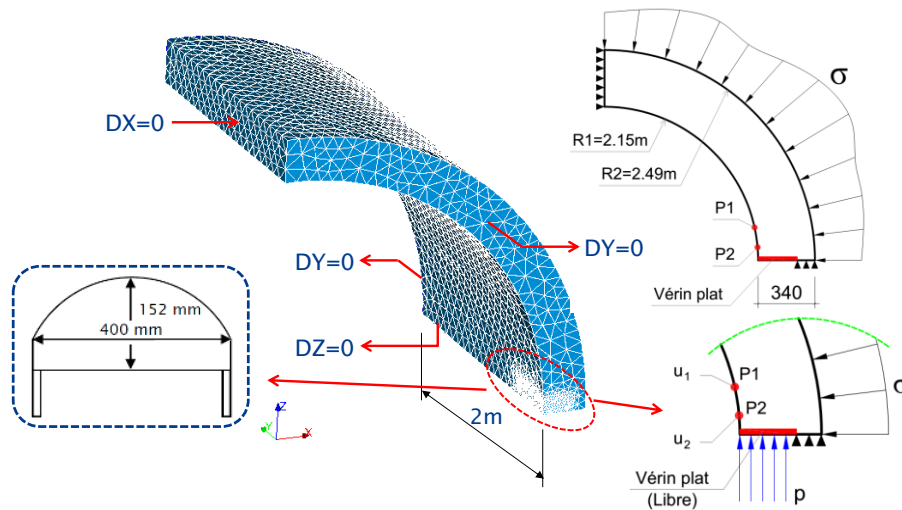


Figure 4. Modèle en modélisation de l'essai au vérin plat dans la galerie GCR

Notons que

- u_{01}^0 et u_{02}^0 sont des déplacements de référence avant de scier correspondant au chargement initial σ_0 ;
- p_{1m} , p_{2m} sont les pressions d'huile au vérin plat nécessaires pour restaurer les déplacements de référence aux points de jauge P_1 , P_2 : $u_1 = u_{01}^0$ et $u_2 = u_{02}^0$ à une mesure donnée et à un chargement $\sigma \geq \sigma_0$;
- u_{01} et u_{02} sont des déplacements des points de jauge P_1 , P_2 correspondant au chargement σ et à une structure intacte (sans saignée) ;
- p_1 , p_2 sont les pressions d'huile au vérin plat nécessaires pour restaurer les déplacements $u_1 = u_{01}$ et $u_2 = u_{02}$ correspondant au chargement σ ;

La modélisation de l'expérimentation au vérin plat consiste à : (1) calculer les déplacements de références u_{01}^0 et u_{02}^0 à l'état initial correspondant au chargement σ_0 avant le premier test ; (2) déterminer les déplacements initiaux u_{01} , u_{02} aux points P_1 , P_2 avant de scier correspondant au chargement actuel σ (ces déplacements sont inconnus en expérimentation) ; (3) calculer les déplacements u_1 , u_2 après la création de la saignée avec le chargement actuel σ ; (4) calculer les pressions d'huile théoriques p_1 , p_2 pour annuler les déplacements induits par la présence de la saignée, i.e. $u_1 = u_{01}$ et $u_2 = u_{02}$; (5) calculer les pressions mesurées p_{1m} , p_{2m} pour remonter aux déplacements de référence $u_1 = u_{01}^0$ et $u_2 = u_{02}^0$. Ils s'agissent donc de trois calculs directs en éléments finis et deux analyses inverses. En réalité, l'essai donne p_{1m} , p_{2m} tandis que p_1 , p_2 sont reliés au chargement actuel σ et donc à l'état de contrainte dans le revêtement.

La relation entre la contrainte dans le revêtement et les pressions p_{1m} , p_{2m} (après la correction par les coefficients K_m , K_a) est élaborée par l'intermédiaire des pressions p_1 , p_2 . Dans ce qui suit, la relation entre $\sigma_{\theta\theta}$ et p_1 , p_2 est étudiée dans un premier temps et celle entre p_1 , p_2 et p_{1m} , p_{2m} dans un deuxième temps.

La solution élastique d'un tube soumis à une pression uniforme à l'extérieur σ_c s'écrit

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_c \frac{R_{ext}^2(r^2 + R_{int}^2)}{r^2(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} ; \quad \sigma_{rr} = \sigma_c \frac{R_{ext}^2(r^2 - R_{int}^2)}{r^2(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} \quad (2)$$

$$u_r = \sigma_c \left(\frac{R_{ext}^2 r}{2(\lambda + G)(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} + \frac{R_{ext}^2 R_{int}^2}{2G(R_{ext}^2 - R_{int}^2)r} \right) \quad (3)$$

Les déplacements u_{01} et u_{02} à l'état intact (avant sciage), sous un chargement isotrope considéré, sont calculés à partir du déplacement radial dans l'équation (3).

$$u_{01} = u_r(R_{int}).\sin q_1 ; u_{02} = u_r(R_{int}).\sin q_2 \quad (4)$$

où $\sin\theta = Z/R_{int}$ avec $Z_1 = 12.5\text{cm}$ et $Z_2 = 5.0\text{cm}$.

Les déplacements u_1 , u_2 après la création de la saignée sont déterminés par la simulation numérique. Les pressions p_1 , p_2 sont obtenues par l'analyse inverse en vérifiant les conditions $u_1=u_{01}$ et $u_2=u_{02}$. Les variations de p_1 , p_2 versus $\sigma_{\theta\theta}$, pour différents chargement variant de 0,5 à 2,5 MPa, sont présentées dans la Figure 5. Les résultats montrent que les pressions p_1 , p_2 varient linéairement en fonction de la contrainte orthoradiale à l'intrados du revêtement $\sigma_{\theta\theta}$. Des relations suivantes sont déduites.

$$p_1 = C_1\sigma_{\theta\theta} = 1.4295\sigma_{\theta\theta} ; p_2 = C_2\sigma_{\theta\theta} = 1.1013\sigma_{\theta\theta} ; p_1 / p_2 \sim 1.3 \quad (5)$$

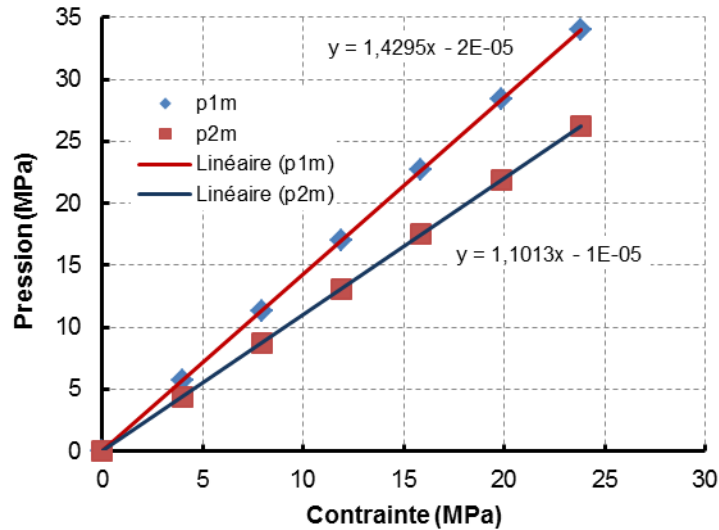


Figure 5. Variations de p_1 , p_2 en fonction de $\sigma_{\theta\theta}$

La simulation en éléments finis permet d'exprimer ensuite les pressions p_i en fonction de celles p_{im} ($i = 1,2$). Pour cela, plusieurs chargements initiaux σ_0 sont considérés et les déplacements correspondants u_{01}^0 et u_{02}^0 sont calculés. Pour chaque σ_0 , les pressions p_i et p_{im} sont déterminés pour différents chargements σ . La Figure 6 présente respectivement les variations de p_{1m} en fonction de p_1 et p_{2m} en fonction de p_2 , pour différents chargements initiaux σ_0 . Nous observons que les courbes p_{im} vs p_i ($i=1,2$) sont des lignes parallèles, c'est-à-dire ces lignes ont une même tangence C_{im} :

$$p_{im} = C_{im} \cdot p_i + b_i \quad (i = 1,2) \quad (6)$$

Les résultats graphiques donnent $C_{1m} = 1,3104$ et $C_{2m} = 1,1055$. Le coefficient b_i dépend du chargement initial σ_0 . Lors que $\sigma = \sigma_0$, $p_{im} = p_i$ où p_i est relié à σ_0 par les équations (5) et (2). Ces analyses donnent

$$b_i = (1 - C_{im})C_i \frac{2R_{ext}^2}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} \sigma_0 \quad (i = 1,2) \quad (7)$$

En substituant les équations (5) et (7) dans l'équation (6), cette dernière peut s'écrire :

$$p_{im} = C_{im}C_i\sigma_{\theta\theta} + (1 - C_{im})C_i \frac{2R_{ext}^2}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} \sigma_0 \quad (i = 1,2) \quad (8)$$

ou

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{C_{im}C_i} p_{im} + \frac{(C_{im} - 1)}{C_{im}} \frac{2R_{ext}^2}{(R_{ext}^2 - R_{int}^2)} \sigma_0 \quad (i = 1,2) \quad (9)$$

$\sigma_{\theta\theta}$ qui exprime la contrainte orthoradiale à l'intérieur du revêtement à partir de la pression d'huile au vérin plat. Au LSMHM, le vérin plat est installé juste après la mise en place du soutènement ou avant le début du chargement des revêtements, c'est-à-dire et pour les deux cas que $\sigma_0 \approx 0$. Cela entraîne :

$$p_{im} = C_{im} C_i \sigma_{\theta\theta} ; p_{1m} = 1.8732 \sigma_{\theta\theta} ; p_{2m} = 1.2175 \sigma_{\theta\theta} \text{ et } \frac{p_{1m}}{p_{2m}} = 1.54 \quad (10)$$

Ces analyses théoriques ci-dessus montrent deux pressions d'huile du vérin plat p_{1m} et p_{2m} permettant d'annuler les déplacements aux points P_1 , P_2 et conduisant à une seule valeur de contrainte $\sigma_{\theta\theta}$. En pratique de mesure, les valeurs $\sigma_{\theta\theta}$ déduites de p_{1m} et p_{2m} sont généralement différentes et la moyenne peut être considérée comme étant la contrainte mesurée.

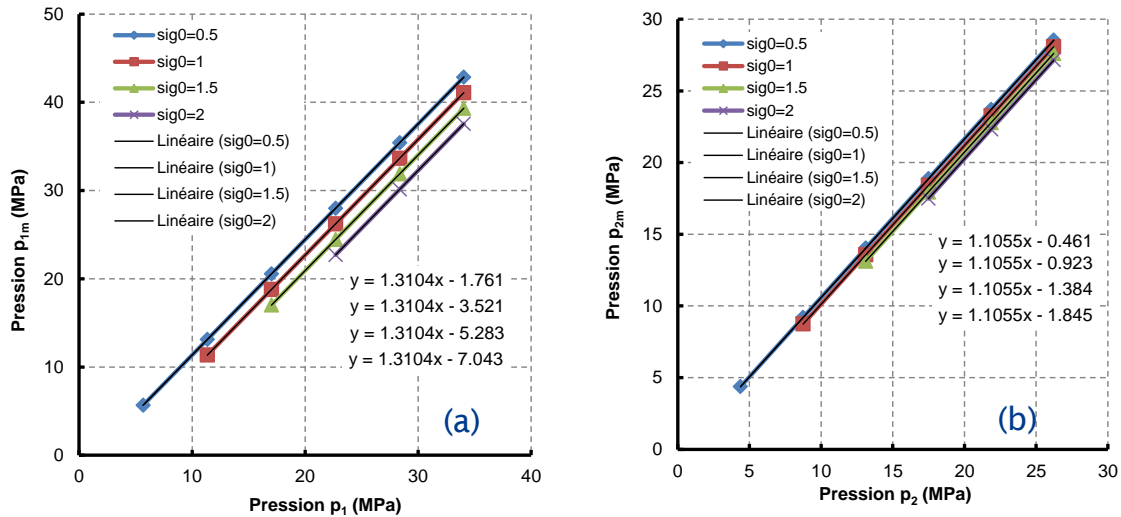


Figure 6. Relations entre p_1 vs p_{1m} et p_2 vs p_{2m}

La démarche peut être utilisée pour d'autres tunnels mais les coefficients devront être identifiés de nouveau en fonction de la géométrie du vérin plat, de la distance entre les plots et de la géométrie du tunnel.

4. Application de la méthode proposée à l'interprétation des mesures au LSMHM

Deux mesures de pression p'_{1m} , p'_{2m} au vérin plat sont déduites en fonction de l'éloignement des plots de mesures (1 et 2 dans la Figure 3a). Ces deux pressions donnent les pressions appliquées aux lèvres de la saignée p_{1m} , p_{2m} après la correction par la **MT** (équation (1)). La **NM** montre que p_{1m} , p_{2m} correspondent à un seul état de contrainte dans le revêtement. L'évolution des trois valeurs p_{1m} , p_{2m} et $\sigma_{\theta\theta}$ en fonction du temps sont montrées dans la Figure 7 pour une section à trois vérins dans la galerie GCR. On observe que la différence entre les deux méthodes est de plus en plus marquée au cours du temps ce qui est logique selon l'équation (10). Que ça soit en comparant directement avec p_{1m} et p_{2m} ou avec leur moyenne. La contrainte issue de cette interprétation du test au vérin plat est proche de celle déduite par la mesure de cordes vibrantes.

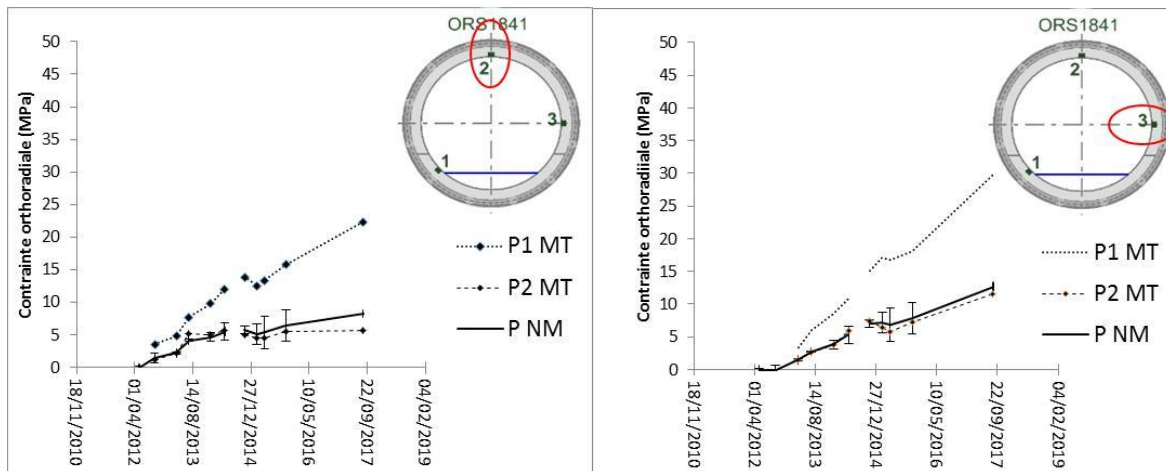


Figure 7. Comparaison des évolutions de la contrainte dans le revêtement de la galerie GCR obtenues par la MT et la NM

5. Conclusions

Ce travail propose une nouvelle méthode d'interprétation de l'essai au vérin plat installé au revêtement des tunnels afin de suivre l'évolution de la contrainte au cours du temps. Il s'agit d'une formulation analytique exprimant la relation linéaire entre la contrainte orthoradiale appliquée dans le revêtement, et la pression d'huile dans le vérin plat, pour restaurer le déplacement des plots de mesure à un instant t à la position avant sciage. Cette relation dépend de la géométrie de la galerie, de la géométrie de l'essai (saignée, vérin plat, position des plots, ...) et du chargement initial. Le chargement à l'extrados du revêtement est supposé uniforme.

La méthode est utilisée actuellement au LSMHM pour déterminer et suivre l'évolution des contraintes dans les revêtements. Cette méthode d'interprétation permet d'avoir une meilleure détermination de la contrainte orthoradiale cohérente avec les mesures déduites par d'autres techniques expérimentales.

6. Références bibliographiques

- ASTM C 1196-04. (2004). Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements. ASTM International, West Conshohocken, USA.
- ASTM C 1197-04. (2004). Standard Test Method for in situ measurement of masonry mortar joint shear strength index. ASTM International, West Conshohocken, USA.
- Abdunur C., (1985) – Mesure de contraintes sur ouvrages d'art par une méthode de libération miniaturisée. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°138, juillet-août 1985, LCPC, pp 5-14.
- Le Mouel A., Philippe J., Robert J. (1994). Essai au vérin plat: suivi des déformations et contraintes. XIII ICSMFE New Delhi, Inde.
- Rossi P. (1987). Recent Developments of the Flatjack Test on Masonry Structures. Proceedings of the Second joint USA-Italy Workshop on Evaluation and Retrofit of Masonry Structures. August 18-29, 1987.
- Zghondi J., Vu M.N., Armand G. (2017). Mechanical behavior of different concrete lining supports in the Callovo Oxfordian claystone. 7th International conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Davos, Switzerland, 24-27 Septembre 2017.