

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Essais en place de terrains rocheux et mise en compression des revêtements de galeries

In-Situ Tests on Rocky Soils and Prestressing of Tunnel-Linings

par A. MAYER, ingénieur général des Mines, 51, rue Raynouard, Paris XVI^e, France

Sommaire

Dans cette communication, l'auteur résume tout d'abord les recherches faites au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics et en liaison avec celui-ci sur les roches en place au cours des dernières années. Ces recherches comportent :

- la mise au point de deux méthodes de mesure du module d'élasticité des roches en place, la première au moyen de vérins, étudiée par *Habib* et *Delarue*, la seconde par auscultation acoustique, étudiée par *L'Hermite* et *Chefdeville*, ces deux méthodes ayant été appliquées dans les travaux d'Electricité de France et au Maroc ;
- la mise au point d'une méthode de mesure des contraintes au voisinage d'une cavité dans une masse rocheuse, au moyen du vérin plat et l'application qui a été faite de cette méthode par *Tincelin* dans les mines de fer de l'Est de la France, pour déterminer les contraintes et les coefficients caractéristiques dans la masse rocheuse ;
- l'application de ces résultats à la détermination de l'épaisseur du revêtement d'une galerie en charge.

L'auteur termine par l'exposé d'une méthode de mise en précompression des revêtements au moyen d'injections derrière ceux-ci de coulis expansifs qui permet de réduire très sensiblement les épaisseurs et le ferrailage des revêtements.

La présente communication est relative à des terrains qui n'ont jusqu'ici que rarement attiré l'attention des spécialistes de la mécanique des sols, les sols à module d'élasticité élevé, les roches. *Terzaghi* et *Richart* (1952) ont publié une étude théorique sur les contraintes dans les roches au voisinage des vides. Ils y ont fait allusion à des mesures faites par le Bureau of Reclamation des Etats-Unis et à un rapport non encore publié mais dont le laboratoire a reçu une copie en son temps grâce à l'amabilité de *McHenry*.

Ces questions ont depuis longtemps retenu l'attention de l'auteur de cette communication du fait sans doute de sa formation d'ingénieur des mines et un certain nombre d'études ont été publiées par les soins du Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics depuis le Congrès de Rotterdam, qui montrent qu'aussi bien la mesure des contraintes au voisinage des

Summary

In this report the author sums up the research work carried out at the Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics in Paris, and work done on rock in situ in recent years.

Two methods for measuring the modulus of elasticity of rocks in situ have been devised, one using jacks, by *Habib* and *Delarue*, the other using an acoustic measuring device, by *L'Hermite* and *Chefdeville*. Both methods have been applied in the field, on Electricité de France projects, and in Morocco.

A method for measuring stresses around a cavity in rock by means of a flat jack *Freyssinet* type, has been worked out and applied by *Tincelin* in the iron ore mines of France for determining the stresses and elastic coefficients within the rock.

Finally a method of computing the thickness of the lining of a pressure channel in rock has been worked out by *Delarue*.

At the end of this report the author indicates how such a lining can be precompressed by grouting with expansive mortar, thus permitting an important reduction of the thickness of the lining and the amount of steel.

cavités que la détermination, également sur le terrain, du module d'élasticité des roches, sont maintenant des problèmes dont la solution peut être considérée comme complètement connue. Dans la présente note ces publications seront d'abord rapidement résumées. Puis une méthode sera décrite qui, se basant sur l'ensemble des résultats déjà atteints, permet de réduire dans une large proportion, sinon de supprimer tout à fait, les armatures dans les galeries au rocher destinées à être utilisées sous charge d'eau.

Les premières publications faites par le Laboratoire du bâtiment et des travaux publics remontent à 1950. *Habib* (1950), ingénieur chef du Service des recherches de mécanique du sol au laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics, a exposé une méthode de mesure du module, utilisant des vérins ordinaires. Ces essais ont montré l'intérêt des mesures en place

et l'existence d'une déformation initiale, même dans les roches d'apparence compacte, très supérieure à celle qui résulterait d'essais sur échantillons.

Dans la même publication, *Delarue*, directeur du Laboratoire de Casablanca, a donné les résultats de l'application de cette méthode dans les roches tendres. Il a donné également les résultats de mesures de contraintes auxquelles il a procédé en provoquant comme *McHenry* la détente d'une portion de la paroi d'une cavité, limitée par un sillon; la relaxation produite lors du creusement du sillon est mesurée au moyen d'extensomètres. La méthode implique malheureusement la connaissance du module d'élasticité de la roche en place et ne donne les contraintes qu'indirectement.

Mayer, Habib et Marchand (1951) ont exposé au Congrès de Liège d'avril 1951 une méthode directe de mesure des contraintes sur les roches en place. Cet exposé a été repris dans un article paru dans le numéro d'octobre des *Annales du bâtiment et des travaux publics*. *Tincelin* (1952), ingénieur chef du Service technique de la Chambre syndicale des mines de fer de France, exposait les résultats très intéressants obtenus lors de l'application, faite en liaison avec notre laboratoire, des mesures de pression dans les mines. La méthode, extrêmement simple dans son principe, comporte l'ouverture d'une saignée dans une paroi rocheuse dont on a repéré l'état initial au moyen de deux cordes vibrantes placées de part et d'autre de l'orifice. On scelle un vérin plat dans la saignée et on monte la pression jusqu'au moment où on a rétabli l'état de tension initiale des cordes sonores. On a ainsi directement la valeur de la pression. Appliquée par *Tincelin*, qui a également donné une théorie mathématique des pressions au voisinage des vides très voisine de celle de *Terzaghi et Richart*, cette méthode a permis la mesure des contraintes dans deux directions orthogonales. On a pu ainsi vérifier les résultats des calculs basés sur l'hypothèse de l'élasticité. Elle a permis non seulement la mesure des contraintes mais aussi de déterminer le rapport des déformations verticale et horizontale dont la valeur dans les calculs de *Terzaghi et Richart* est simplement estimée.

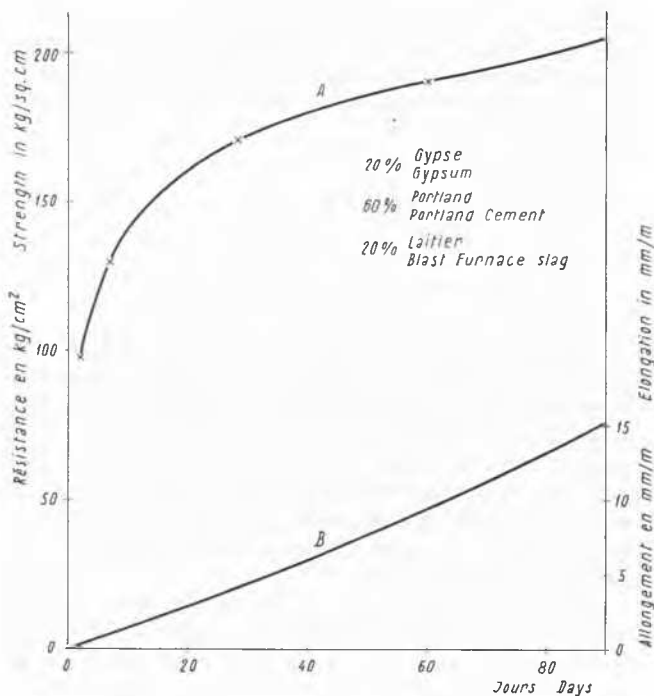


Fig. 1 Essais en pâte pure: gonflement et variation de la résistance
Neat Cement Paste Tests: Swelling During the Setting Process

Une deuxième série d'essais faite en liaison avec les services de l'Electricité de France a comporté la mesure du module d'élasticité des roches en place par la mesure de la vitesse du son, mise au point au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics par *L'Hermitte et Chetdeville*. Cette méthode n'est malheureusement précise que lorsqu'il s'agit de massifs non fissurés. On retrouve alors les valeurs du module d'élasticité obtenues sur échantillons, par la méthode du vérin, ou par l'essai en galerie étanche que notre laboratoire du Maroc a appliqué à plusieurs reprises.

Bien entendu, ces mesures ne constituent pas des fins en soi; la connaissance des différents éléments doit permettre dans les mines exploitées sans soutènement, comme les mines de fer de l'est de la France, de déterminer les dimensions des vides de façon à utiliser au maximum la résistance à l'écrasement du minerai qui constitue les piliers que l'on abandonne au fur et à mesure, de l'exploitation. Dans les galeries au rocher elles permettent de réduire l'épaisseur du béton et surtout l'importance des armatures du revêtement. Moyennant certaines hypothèses *Delarue* avait déterminé que p étant la pression qui règne dans le massif, E le module élastique du béton, E' celui du rocher, e l'épaisseur du revêtement, R son rayon, l'effort de traction dans le béton était donné par la formule

$$t = \frac{p}{\frac{e}{R} + \frac{E'}{E}}$$

qui permet de déterminer e connaissant la résistance à la traction admissible du béton t .

La méthode indiquée ci-dessous permet de réduire très sensiblement cette épaisseur en exerçant sur le revêtement un effort radial de précompression qui réduira d'une quantité correspondante les sollicitations du béton à la traction.

Elle comporte le creusement de la galerie au rocher, la pose d'un revêtement préfabriqué, mis en place par éléments et l'exécution derrière ce revêtement d'un bourrage prenant appui sur le rocher d'une part, sur le revêtement d'autre part. Le béton du bourrage est étudié de manière à exercer sur le revêtement une pression extérieure uniforme; celle-ci équilibre la pression de l'eau dans la conduite ou réduit tout au moins les efforts de traction dus à la pression interne de l'eau. L'exécution comporte la confection du béton derrière un revêtement préfabriqué et l'obtention d'une pression interne dans ce béton.

Pour l'exécution du béton derrière le revêtement on met en place à sec un squelette d'agrégats et on injecte ceux-ci au moyen d'un coulis de mortier, activé par application des méthodes classiques. Des fenêtres doivent être prévues à cet effet dans le revêtement, permettant d'introduire les agrégats; une fois ceux-ci en place jusqu'à la partie supérieure de la voûte, on referme les fenêtres, on injecte le coulis par des orifices disposés à cet effet. Un dispositif doit être prévu sur la face du revêtement pour assurer l'étanchéité de l'espace annulaire compris entre le revêtement et le rocher. Toutes ces dispositions sont appliquées d'une façon courante et n'offrent pas de grandes difficultés pratiques. Le point délicat est, une fois l'espace annulaire rempli d'agrégats, d'assurer la mise en charge de celui-ci. On utilise à cet effet un coulis comportant comme liant, en proportions convenables, du ciment Portland, du laitier broyé et du gypse. Des études de *Lafuma*, directeur du Centre d'études et des Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques, poursuivies depuis une vingtaine d'années, ont montré qu'il se formait dans ces conditions du sel de Candlot dont la production s'accompagne d'une augmentation de vo-

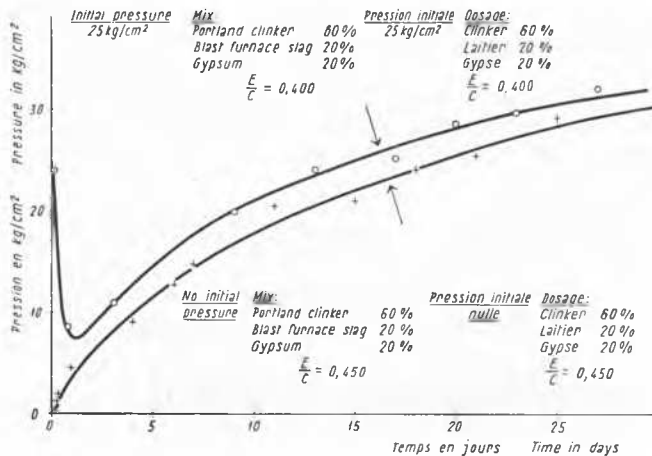


Fig. 2 Essai en pâte pure: pression développée dans une enceinte limitée
Neat Cement Paste Tests: Pressure Developed During the Setting Process

lume. Cette tendance au gonflement à l'intérieur d'un volume limité produira la pression interne recherchée.

On trouvera ci-joint le compte rendu d'une série d'essais donnant pour une proportion constante de 20% de laitier et des proportions variables de portland et de gypse, la dilatation linéaire d'éprouvettes conservées dans l'eau (Fig. 1).

Un mortier, injecté à l'intérieur d'un volume fini, aura tendance à augmenter de volume. Toute expansion étant impossible, la pression interne croîtra jusqu'au moment où la pression modifie les conditions d'hydratation du ciment. La pression limite à partir de laquelle la réaction est très ralentie est de plus de 30 kg/cm² environ. C'est la précompression maximale que l'on peut espérer (Fig. 2).

On n'a envisagé jusqu'ici que le cas d'une galerie dans un massif rocheux compact. Les travaux effectués dans la galerie d'Im-Fout, sous la direction des Services de l'hydraulique du Maroc, qui ont été suivis par le Laboratoire de Casablanca, ont montré que la même méthode pourrait donner des résultats en terrain compressible ou fissuré. Ces travaux feront l'objet d'un rapport séparé de Bernard (voir Session 7/1, p. 145 de ce volume). Dans ce cas, après confection du bourrage derrière le revêtement préfabriqué, par les méthodes d'injection, il faudra exécuter une deuxième série d'injections dans le terrain au-delà du béton. L'expérience a montré qu'effectuée avec du mortier ordinaire, cette injection, pénétrant dans les fissures et se propageant au-delà du bourrage en béton, consolidait le terrain naturel et augmentait son module d'élasticité. L'effet sera certainement plus important avec un coulis de ciment expansif. Comme d'autre part l'effet de dilatation du coulis injecté dans le bourrage lui-même ne se produira qu'après un certain nombre de semaines, les deux opérations iront en se superposant et le résultat sera très voisin de celui constaté dans le cas d'un massif rocheux étanche.

Il est à remarquer que cette méthode, qui doit pouvoir donner des résultats très intéressants, ne met en jeu aucune pro-

priété nouvelle. Même l'emploi de ciments expansifs pour la mise en précontrainte de galeries au rocher a été proposé par Lossier (1951), il y a plusieurs années. Il n'envisageait alors que la confection de claveaux en béton expansif, placés à la clé de voûte de la galerie, pour appliquer celle-ci au terrain. D'autre part le ciment expansif fabriqué en usine qu'il avait alors en vue présentait l'inconvénient de s'éventer rapidement, tandis que le mélange ternaire laitier, portland, gypse, peut facilement être effectué sur le lieu d'emploi.

Tel est l'ensemble des études réalisées au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics ou en liaison avec lui depuis plusieurs années. Une partie des résultats a déjà été publiée. Il a semblé intéressant de les résumer ici et de les compléter par les résultats encore inédits en raison de l'intérêt que la question paraît commencer à soulever dans tous les pays.

En terminant nous tenons à remercier tous les ingénieurs qui, soit au Laboratoire du Bâtiment, soit au Laboratoire de Casablanca qui en dépend, ont fait avancer cette branche de la technique et en particulier M. L'Herminier, chef du Service des études de terrain au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics, M. Habib, chef de la Section recherches du même service, M. Delarue, directeur du Laboratoire de Casablanca. Nous remercions également la Chambre syndicale des Mines de fer de France et son ingénieur M. Tincelin, ainsi que les services de l'équipement de l'Electricité de France et en particulier MM. Rousselier et Talobre pour la part qu'ils nous ont confiée dans leurs travaux.

Références

- Delarue, J. et Mariotti, M. (1950): Quelques problèmes de mécanique des sols au Maroc. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics - Septembre.
- Goria, C. et Appiano, M. (1951): Perspectives d'emploi des ciments expansifs dans la construction de routes et de pistes d'envol. Industr. ital. cemento (Janvier-Février), n° 1-2.
- Habib, P. (1950): Détermination du module d'élasticité des roches en place. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics - Septembre.
- Habib, P. et Marchand, R. (1952): Mesure des pressions de terrain par l'essai de vérin plat. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics - Octobre.
- Henry, D. Mc. et Olsan, O. S. (1949): Measurement of Stresses in Rock by the Strain Relief Method. Documents non publiés de l'U.S. Bureau of Reclamation.
- Lafuma, H. (1952): Les ciments expansifs. Rapport au 2^e Congrès de la Chimie du Ciment (Juillet).
- Lossier, H. (1951): La précontrainte intégrale et les ciments expansifs. Communication au 1^{er} Congrès du Béton précontraint.
- Mayer, A., Habib, P., Marchand, R. (1951): Mesure en place des pressions de terrain. Communication à la Conf. int. des pressions de terrain de Liège - Avril.
- Rousselier, M. (1952): Le revêtement de galeries au rocher. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics - Novembre.
- Talobre, J. (1952): L'état actuel de la technique des conduites forcées souterraines. Communication à l'Institut Hydrotechnique de France - 28 mars. La Houille Blanche (1952).
- Terzaghi, K. et Richart jr., F. E. (1952): Stresses in Rock About Cavities. Géotechnique, Juin, vol. 3.
- Tincelin, E. (1952): Mesure des pressions de terrains dans les mines de fer de l'Est de la France (méthodes de mesure). Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics - Octobre.