

## SUR LE COMPORTEMENT DILATANT D'UN GRÈS DANS LES CONDITIONS DE COMPRESSION TRIAXIALE VRAIE

M. KWAŚNIEWSKI

Ecole Polytechnique de Silésie, Gliwice, Pologne; mak@zeus.polsl.gliwice.pl.

M. TAKAHASHI

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Japan.

X. LI

Research Institute of Innovative Technology for the Earth, Kyoto, Japan.

**Résumé:** Il résulte des essais triaxiaux que la pression de confinement inhibe fortement le processus de dilatance dans les grès à grain moyen testé dans les conditions de compression triaxiale conventionnelle. Le phénomène de dilatance était également limité de façon significative par la contrainte principale intermédiaire. Alors que l'importante déformation dilatante correspondait à la contrainte différentielle ultime avec les faibles contraintes principales intermédiaires, dans les conditions de fortes contraintes intermédiaires, le matériau rocheux subissait l'endommagement de façon beaucoup moins importante.

On a longtemps estimé que le phénomène de dilatance pouvait être considéré comme un important précurseur de la rupture fragile des roches. La dilatance est vue comme la conséquence du développement d'une microfissuration pénétrante dans la roche, avec une augmentation concomitante d'espace vide. On la comprend comme l'augmentation du volume relative aux changements élastiques dus à l'augmentation inélastique du volume pendant la déformation sous la contrainte différentielle appliquée. Mis à part le fait que la compréhension de ce phénomène nous éclaire les processus de rupture fragile, le phénomène de dilatance des roches peut être d'une importance pratique considérable en raison de ses liens avec des signes prémonitoires possibles des tremblements de terre et des coups de terrain.

Malgré beaucoup de recherches destinées à mettre en évidence les traits caractéristiques des changements de volume dans les roches sous contrainte triaxiale, il existe peu d'études ayant réalisé un examen systématique de l'effet de la pression de confinement, de la contrainte principale minimale et de la contrainte principale intermédiaire sur le comportement dilatant des roches (pour un compte-rendu, veuillez vous rapporter à KWAŚNIEWSKI et al. [1]). Notamment, les données pour les roches sédimentaires, y compris les roches élastiques à grain moyen, sont rares. L'objectif des présentes études a été de pallier ce manque.

Le grès à grain moyen carbonifère, macroscopiquement homogène, massif, de la mine « Śląsk » dans le bassin houiller de Haute Silésie en Pologne, a été sélectionné pour

ces études. La masse volumique et la porosité de cette roche sont de 2,438 g/cm<sup>3</sup> et 5,87%, respectivement. Sa résistance à la compression simple est d'environ 90 MPa.

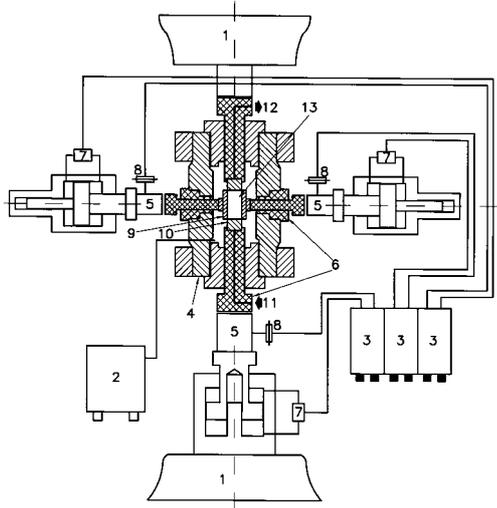


Fig. 1. Représentation schématique de l'appareil triaxial vrai utilisé dans ces études: 1 – plateau supérieur et inférieur fixé, 2 – bloc d'alimentation hydraulique, 3 – unité de contrôle, 4 – cellule triaxiale, 5 – cellules de pression pour la direction axiale ( $\sigma_1$ ) et latérale ( $\sigma_2$ ), 6 – pistons de compression axiale ( $\sigma_1$ ) et latérale ( $\sigma_2$ ), 7 – servovalve, 8 – transducteurs de déplacement pour mesurage de la déformation axiale et latérale, 9 – pièce métallique latérale ( $\sigma_2$ ), 10 – pièce métallique axiale ( $\sigma_1$ ), 11 – entrée de fluide interstitiel, 12 – sortie de fluide interstitiel, 13 – échantillon rocheux (TAKAHASHI [6], TAKAHASHI et KOIDE [7])

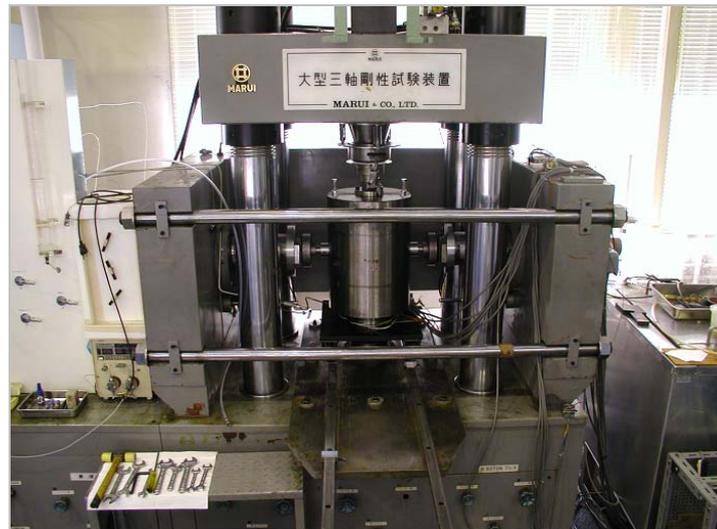


Fig. 2. Photo générale de l'appareil triaxial vrai

Des échantillons du grès de Śląsk ont été testés dans les conditions de compression simple ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ), de compression triaxiale conventionnelle ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p > 0$ ) et de compression triaxiale vraie ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ ). Les essais de compression triaxiale conventionnelle ont été effectués sous les pressions de confinement ( $p$ ) égales à 12,5;

25,0 et 37,5 MPa. Au cours des essais de compression triaxiale vraie, la contrainte principale minimale ( $\sigma_3$ ) était égale à 25,0 MPa et la contrainte principale intermédiaire ( $\sigma_2$ ) était 1,5; 2 et 2,5 fois plus élevée que  $\sigma_3$ .



Fig. 3. Photo d'un échantillon préparé à un essai de compression triaxiale vraie

Pour tous ces essais, des échantillons parallélépipédiques droits aux dimensions de 35 mm × 35 mm × 70 mm ont été utilisés. Les essais triaxiaux ont été réalisés grâce à un appareil véritablement triaxial asservi (figures 1, 2 et 3) développé par KOIDE and TAKAHASHI [7], comme une version moderne de la conception originale de MOGI [3], [4]. Dans la cellule triaxiale de l'appareil, trois contraintes principales peuvent être générées dans les échantillons indépendamment les unes des autres. Les contraintes maximale et intermédiaire sont toutes les deux induites par les pistons rigides, tandis que la contrainte principale minimale est induite par pression d'huile.

Au cours des essais, les échantillons de roche ont reçu la charge axiale (c'est-à-dire la charge dans la direction de  $\sigma_1$ ) à une vitesse de déplacement constante du piston vertical égale à  $5,8 \cdot 10^{-4}$  mm/s. Des mesures et enregistrements des déformations axiale ( $\varepsilon_1$ ) et latérale ( $\varepsilon_2$  et  $\varepsilon_3$ ) ont été effectués, en nous fournissant ainsi une base pour le calcul de la déformation volumique ( $\varepsilon_V$ ).

Les résultats expérimentaux de ces essais ont permis de déterminer la résistance ultime et le seuil de dilatance du grès étudié, et de démontrer la dépendance de ces niveaux de contrainte caractéristiques vis-à-vis de la pression de confinement et de la contrainte principale intermédiaire (tableau). L'effet de  $p$  et  $\sigma_2$  sur la déformation volumique au seuil de dilatance et à la contrainte différentielle ultime a également pu être déterminé.

Tableau

Données des essais triaxiaux sur la dilatance et la résistance du grès de Śląsk

La contrainte principale minimale $\sigma_3$ , MPa	La contrainte principale intermédiaire $\sigma_2$ , MPa	La contrainte principale maximale sur le seuil de dilatance ${}^{TD}\sigma_1$ , MPa	La contrainte principale maximale ultime ${}^F\sigma_1$ , MPa
0,0	0,0	57,4	87,4
0,0	0,0	60,9	87,4
0,0	0,0	65,6	96,4
12,5	12,5	147,7	173,4
12,5	12,5	144,0	185,0
25,0	25,0	207,3	233,8
25,0	25,0	201,4	242,7
25,0	25,0	200,0	226,0
25,0	25,0	200,2	240,5
25,0	37,5	207,6	268,9
25,0	37,5	177,0	256,3
25,0	37,5	209,2	263,6
25,0	50,0	212,9	281,2
25,0	50,0	(230,2)	289,0
25,0	50,0	242,0	291,7
25,0	62,5	223,8	283,8
25,0	62,5	223,9	287,8
25,0	62,5	235,1	290,5
37,5	37,5	268,3	303,0
37,5	37,5	189,1	293,4

Le terme « seuil de dilatance » est utilisé dans cet article pour indiquer le niveau de contrainte différentielle  ${}^{TD}(\sigma_1 - \sigma_3)$  auquel la déformation volumique contractante (positive) atteint son maximum, le volume de la roche testée atteint son minimum, et le coefficient incrémentiel de Poisson présente une valeur égale à 0,5. Si l'on poursuit l'augmentation de la contrainte différentielle, la déformation volumique commence normalement à baisser et le volume de la roche devient de plus en plus important, c'est-à-dire que la roche subit une dilatance absolue.

Des essais au cours desquels les contraintes principales minimale ( $\sigma_3$ ) et intermédiaire ( $\sigma_2$ ) étaient de valeur égale (les essais de compression triaxiale conventionnelle) ont mis en évidence une augmentation monotone typique de la résistance du grès de Śląsk lors de l'augmentation de la pression de confinement de 0 à 37,5 MPa (figure 4a). L'influence de la pression de confinement sur le seuil de dilatance était similaire, avec le ratio  ${}^{TD}(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$  en augmentation, à un taux en baisse graduelle, de 0,68 dans les conditions non-confinées à 0,87 pour une pression de confinement égale à 37,5 MPa.

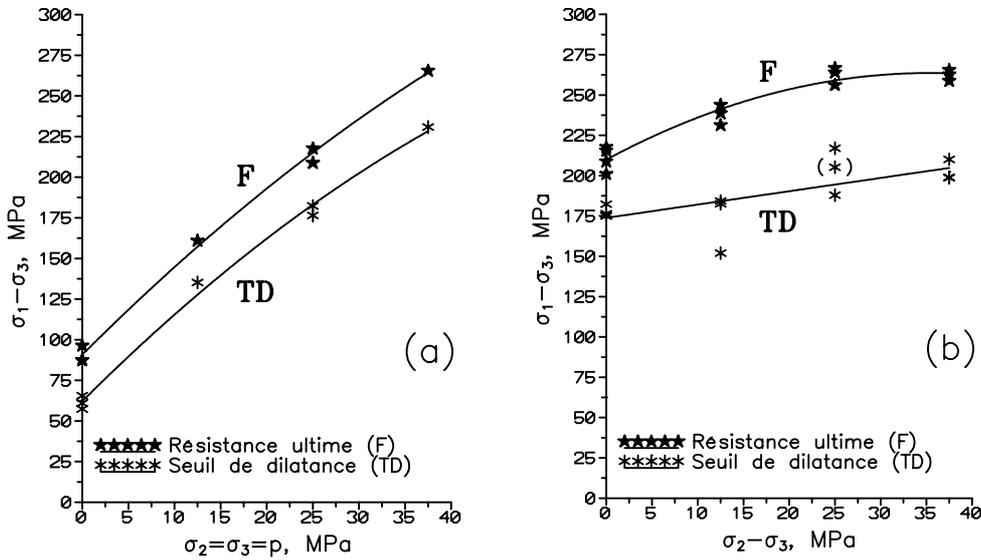


Fig. 4. Effet de la pression de confinement (a) et de la contrainte principale intermédiaire (b) sur la résistance ultime ( $F$ ) et le seuil de dilatance absolue ( $TD$ ) du grès de Śląsk

Les résultats des essais de compression triaxiale vraie ont démontré que l'effet de  $\sigma_2$  sur la résistance ultime et le seuil de dilatance, bien qu'il soit moins prononcé que l'effet de la pression de confinement, est également d'une importance évidente (figure 4b).

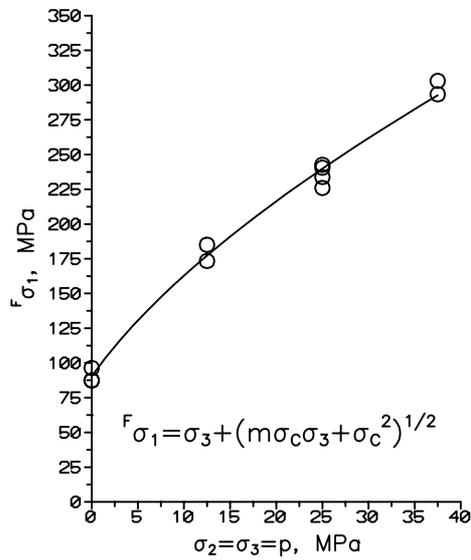


Fig. 5. Résultats expérimentaux des essais triaxiaux conventionnels sur les échantillons de grès de Śląsk, ajustés par le critère de rupture de Hoek et Brown ( $\sigma_c = 90,4$  MPa,  $m = 16,80$ ;  $r^2 = 0,99235$ )

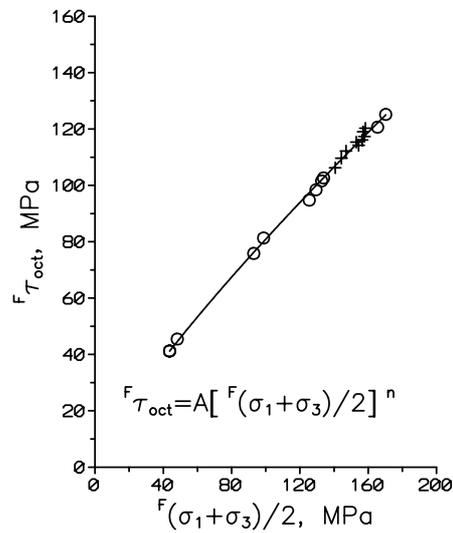


Fig. 6. Résultats expérimentaux des essais triaxiaux conventionnels (cercles) et des essais triaxiaux vrais (croix) sur les échantillons de grès de Śląsk, ajustés par le critère de rupture de Mogi ( $A = 1,876$ ,  $n = 0,817$ ;  $r^2 = 0,99792$ )

Les données sur la résistance provenant des essais de compression triaxiale conventionnelle ont été très bien représentées par le critère empirique de Hoek et Brown (figure 5), tandis que le critère empirique de Mogi s'est avéré convenir le mieux à toutes les données sur la résistance triaxiale (figure 6).

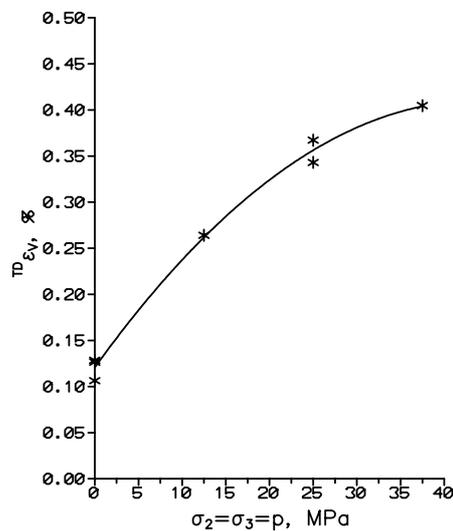


Fig. 7. Déformation volumique contractante du grès de Śląsk au seuil de dilatance absolue en fonction de la pression de la confinement

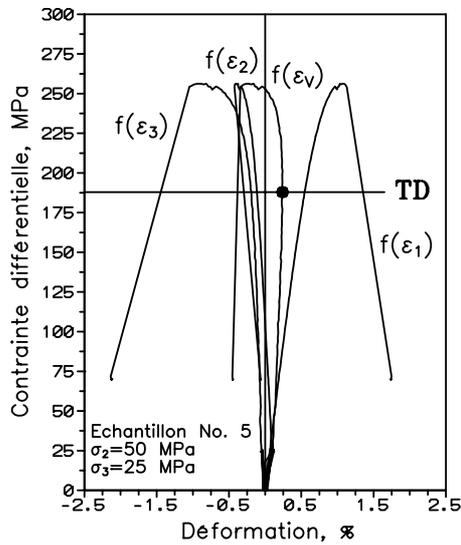


Fig. 8. Un exemple des courbes contrainte-déformation du grès de Śląsk testé dans les conditions de compression triaxiale vraie

La pression de confinement a eu un effet inhibiteur sur le comportement dilatant des échantillons de roche testés dans les conditions de compression triaxiale conventionnelle; l'augmentation du confinement a eu pour résultat le compactage croissant de la roche (figure 7).

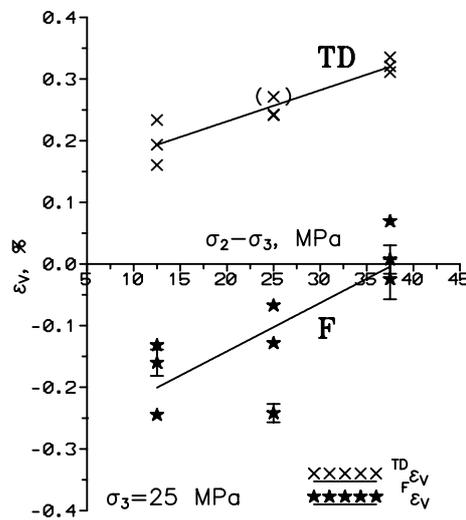


Fig. 9. Déformation volumique du grès de Śląsk au seuil de dilatance absolue (*TD*) et à la contrainte différentielle ultime (*F*) en fonction de la contrainte principale intermédiaire

Dans les conditions de compression triaxiale vraie, le grès se déformait beaucoup plus faible dans la direction de la contrainte  $\sigma_2$  que dans la direction de la contrainte  $\sigma_3$  (figure 8). La contrainte principale intermédiaire a fortement réprimé l'effet de la dilatance (figure 9). Tandis qu'une importante déformation dilatante correspondait à la contrainte différentielle ultime dans des conditions de contrainte principale intermédiaire faible, la roche était beaucoup moins endommagée sous l'effet d'une contrainte intermédiaire forte. Par conséquent, le faillage des échantillons de roche au stade post-maximum était beaucoup plus violent et accompagné d'un effet acoustique audible.

## REFERENCES

- [1] KWAŚNIEWSKI M., TAKAHASHI M., LI X., *Volume changes in sandstone under true triaxial compression conditions*, Proc. 10th Int. Congr. Rock Mech., 2003, Vol. 1, pp. 683–688, The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg.
- [2] MOGI K., *Effect of the triaxial stress system on rock failure*, Rock Mechanics in Japan, 1970, Vol. I, pp. 53–55.
- [3] MOGI K., *Effect of the triaxial stress system on the failure of dolomite and limestone*, Tectonophysics, 1971a, Vol. 11, pp. 111–127.
- [4] MOGI K., *Fracture and flow of rocks under high triaxial compression*, J. Geophys. Res., 1971b, Vol. 76, pp. 1255–1269.
- [5] MOGI K., *Effect of the triaxial stress system on fracture and flow of rocks*, Phys. Earth. Planet. Inter., 1972, Vol. 5, pp. 318–324.
- [6] TAKAHASHI M., *Fundamental Study of Mechanical Characteristics of Rocks under Combined Stress Conditions*, Doctoral Thesis, Hokkaido University, Sapporo, 1984.
- [7] TAKAHASHI M., KOIDE H., *Effect of the intermediate principal stress on strength and deformation behavior of sedimentary rocks at the depth shallower than 2000 m*, [in:] V. Maury and D. Fourmaintraux (eds.), *Rock at Great Depth*, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, 1989, pp. 19–26.