

# CARACTERISATION DES PLANS DE DISCONTINUITES DES SCHISTES DU BRIOVERIEN DE LA REGION DE RENNES

## CHARACTERIZATION OF SHEAR BEHAVIOR OF DISCONTINUITIES OF BRIOVERIAN SCHIST

Simon GUIHENEUF<sup>1</sup>, Damien RANGEARD<sup>1</sup>, Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF<sup>2</sup>,  
Marie-Pierre DABARD<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique, INSA, Rennes, France

<sup>2</sup> CNAM, Equipe Géotechnique, Département ICENER, Laboratoire Géodésie  
Géomatique Géosciences Aménagement et Droit Foncier (GeF), Paris, France

<sup>3</sup> Géosciences-Rennes, Université de Rennes 1, CNRS UMR 6118, Rennes, France

**RÉSUMÉ** – Le comportement mécanique de plans de discontinuités des schistes Briovérien de Rennes (Bretagne) a été caractérisé à partir d'essais de cisaillement direct adaptés. Les résultats ont mis en évidence l'effet de la pétrographie de la roche sur les caractéristiques de cisaillement de ces plans. Par ailleurs l'immersion du matériau avant essai montre la sensibilité à l'eau des plans de cisaillement.

**ABSTRACT** – Mechanical behavior of discontinuities of brioverian schist of Rennes Bassin (Brittany) have been characterized using adapted direct shear tests. The experiments highlight the influence of the petrography of the specimen on the friction angle. Moreover, tests realized under two different water condition (dry and after immersing the joint) show the differentiated influence of the presence of water according to the nature of the rock.

### 1. Introduction

Des schistes briovériens se trouvent dans plusieurs parties de l'Europe, et notamment dans la partie ouest de la France (Figure 1, Debèlmas, 1974). La datation de ces formations reste sujette à discussion parmi les géologues. Les premières estimations situent ces dépôts entre les périodes Archéenne et Cambrienne. Des études plus récentes précisent ces datations et évoquent une période de dépôt différente entre le massif Briovérien de Bretagne et celui de Normandie (Dabard, 1990).

Ainsi, la date de dépôt des sédiments à l'origine des schistes briovériens de Bretagne, est évaluée entre 750 et 540 millions d'années.

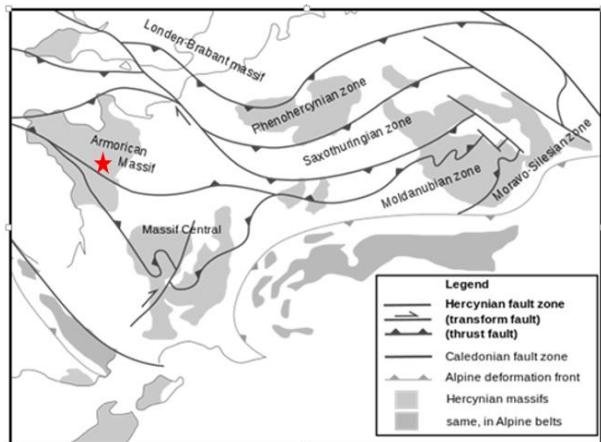


Figure 1. Le massif Briovérien en Europe (modifié par Franke, 1992) et ville de Rennes (étoile rouge)

Les sédiments briovériens ont été déposés au cours de cycles de progradation-rétrogradations induisant une variation de la lithologie et de la granulométrie des strates. En période de progradation (baisse du niveau marin), les apports du continent augmentent (systèmes fluviatiles en érosion), la sédimentation s'intensifie et les strates s'épaissent avec des dépôts de plus en plus grossiers. La fin de cette période de progradation est marquée par les strates les plus épaisses et les sédiments les plus grossiers. La progradation se traduit successivement par le dépôt de siltites, appelées ici schistes, de grès schisteux puis de grès en strates de plus en plus épaisses (jusqu'à plusieurs mètres).

Ensuite, en période de rétrogradations (montée du niveau marin), les apports du continent diminuent (systèmes fluviatiles en sédimentation), les taux de sédimentation diminuent avec des strates de moins en moins épaisses et des sédiments de plus en plus fins. La fin de rétrogradations se caractérise par des strates peu épaisses et les sédiments les plus fins. La phase de rétrogradations contient des alternances silto-gréseuses surmontées par des siltites et des argilites contenant de la matière organique (appelées ici schistes graphiteux); les strates ont une épaisseur de quelques centimètres à quelques décimètres.

Ces sédiments ont par la suite été déformés et ont subi un métamorphisme de faible grade lors de l'orogénèse hercynienne. Ces événements ont entraîné un plissement des couches avec des plans de stratification (S0) à pendage variable et l'apparition de plan de schistosité (S1) de pendage très relevé (schistosité souvent sub-verticale). L'orientation relative des plans de stratification S0 et de schistosité S1 est variable.

Enfin, des épisodes de fracturation ont affecté les sédiments du Briovérien entraînant l'apparition de failles.

Ainsi, trois types de plans de discontinuités sont présents et peuvent constituer des plans de résistance mécanique minimale : la stratification (S0), la schistosité (S1) et les plans de fracturation (F).

## 2. Matériaux et méthodes

Le comportement des discontinuités rocheuses est usuellement caractérisé à partir d'essais de cisaillement normalisés (XP-P 94-424). Cependant, compte tenu du caractère altéré, anisotrope et la présence de nombreux plans de discontinuités, la réalisation

d'essais normalisés est difficilement envisageable dans les matériaux du Briovérien prélevés dans les 30 à 40 premiers mètres de profondeur du sous-sol rennais. La caractérisation mécanique des plans de discontinuités a ainsi été réalisée à partir d'essais de cisaillement adaptés, selon la procédure développée dans le cadre des travaux de thèse de Thomas Le Cor (Le Cor et al., 2015). Les essais sont réalisés à l'aide d'une machine de cisaillement directe classiquement utilisée pour la caractérisation des sols.

Les essais sont réalisés sur des discontinuités ouvertes prélevées sur différents sites d'excavation dans la ville de Rennes, au sein de différentes lithologies. La méthodologie adoptée pour préparer les échantillons et réaliser les essais est celle décrite par Le Cor et al. (2014). Selon cette procédure, les épontes supérieure et inférieure de la discontinuité à tester sont scellées dans un mortier, et stockées à 20°C, et 50% HR pendant 7 jours (où jusqu'à stabilisation de la masse). Les essais de cisaillement sont ensuite menés à vitesse de cisaillement constante (0,5 mm/min) et sous un effort normal constant (jusqu'à 5 kN).

Dans l'idéal, il est préférable de réaliser un test de cisaillement sur plusieurs éprouvettes de la même discontinuité sous différentes valeurs de la contrainte normale appliquée. Or, comme le matériau étudié est particulièrement difficile à tailler de façon régulière, et que le prélèvement en place de plans de discontinuité n'est pas aisé, il est très difficile d'avoir suffisamment d'éprouvettes pour réaliser les essais dans ces conditions. La procédure d'essai a alors été adaptée afin de définir les paramètres de cisaillement à partir d'un échantillonnage limité. Cette procédure consiste à réaliser plusieurs cycles de cisaillement (4 à 5 cycles) sur une même éprouvette, comme proposé notamment par Jafari et al. (2003), et Pellet et al. (2013). Après chaque cycle, l'effort normal est augmenté pour la réalisation du cycle suivant. Au fur et à mesure de cycles de cisaillement appliqués à une éprouvette, la surface de cisaillement testée est endommagée et peut entraîner une réduction des caractéristiques de cisaillement. En effet, les aspérités de la discontinuité sont « dégradées » lors de l'application d'un premier cycle de cisaillement. Cependant, le fait d'appliquer au cycle  $n+1$  un effort normal supérieur à celui utilisé au cycle  $n$ , permet de solliciter les aspérités encore intacts de la discontinuité (Lee et al., 2001, Jafari et al., 2003 ; Pellet et al., 2013; Le Cor et al., 2014). L'influence de cette procédure cyclique sur les caractéristiques de cisaillement des discontinuités a été analysée dans le cadre des travaux de Le Cor (2014), en comparant la valeur de l'angle de frottement obtenue à partir d'essais réalisés sur différents échantillons de la même discontinuité testés chacun sous une valeur constante de l'effort normal, et celle obtenue suivant la procédure cyclique décrite ci-dessus. Les résultats montrent que l'influence de la procédure cyclique reste limitée et conduit à une sous-estimation de l'angle de frottement inférieure à 10% lorsque celui-ci est déterminé à partir de la procédure cyclique.

Les discontinuités testées dans cette étude proviennent de 8 sites différents, et concernent trois lithologies différentes : une siltite fine (25 échantillons, 8 sites), un grès (13 échantillons, 4 sites) et un schiste graphiteux (7 échantillons, 3 sites). Le nombre plus faible d'échantillons disponibles pour cette dernière lithologie est liée au fait que ces matériaux se présentent en couches de très faible épaisseur, et sont ainsi plus rarement interceptés par les travaux d'excavation. Les discontinuités testées sont généralement des plans de schistosité S1 (qui sont dans certains cas parallèles à la stratification S0). Dans les matériaux gréseux, où la schistosité est moins exprimée, quelques plans de fractures F prélevés sur le site 5 ont également été testés (Tableau 1). La granulométrie des échantillons indiquée dans le tableau 1 a été évaluée à partir d'observations en lames minces en adoptant la classification proposée par Blott et Pye (2001).

Pour chaque lithologie, des échantillons sont testés sous deux conditions différentes : une condition dite 'sèche' correspond à un cisaillement réalisé directement après stockage à 20°C et 50% d'humidité relative, et une condition dite 'humide' pour laquelle

l'échantillon est immergé avant (10 minutes) et pendant l'essai afin de tester le comportement avec une surface de discontinuité humide.

Table 1. Nature, granulométrie et type de discontinuités testées

Site	1	2	3	4	5	6	7	8
Siltite			FSi S1	FSi S1		FSi S1	FSi S1	FSi S1
Grès	FSa S1		FSa S1		FSa S1,F			MSa S1
Schiste graphiteux	VFSi S1	VFSi S1		VFSi S1				

(VFSi : very fine siltstone :  $2 \mu\text{m} < X < 4 \mu\text{m}$ ; FSi : fine siltstone :  $4 \mu\text{m} < X < 8 \mu\text{m}$ ; FSa : Fine sandstone :  $125 \mu\text{m} < X < 250 \mu\text{m}$ ; Medium sandstone :  $250 \mu\text{m} < X < 500 \mu\text{m}$ )

### 3. Résultats

La figure 2 présente les résultats des essais réalisés sur des discontinuités dans des siltites fines échantillonnées sur le site 3. La figure 2a présente les courbes d'évolution de la contrainte de cisaillement avec le déplacement horizontal obtenues pour 4 cycles réalisés sur une même éprouvette.

Les courbes de cisaillement ne présentent pas de pic de contrainte dans ce cas, mais une valeur constante de la contrainte de cisaillement est atteinte pour un faible déplacement horizontal (0,2 à 0,5 mm).

Pour un cycle donné, on note que le cisaillement en sens retour conduit à une valeur de la contrainte de cisaillement plus faible que celle mesurée dans le sens aller. Cette tendance a été observée sur la plupart des discontinuités présentant la rugosité la plus marquée, et peut être expliquée par la dégradation des aspérités générée par la première partie de l'essai (cisaillement en sens aller). Dans ce cas, seule une augmentation de la contrainte normale permet de mobiliser une contrainte de cisaillement plus importante. Ce phénomène a été observé par d'autres auteurs sur différents matériaux rocheux (Krahn & Morgenstern, 1979; Jing et al., 1992).

Les valeurs moyennes de la contrainte de cisaillement mesurées pour chaque valeur de la contrainte normale et pour l'ensemble des éprouvettes testées (par lithologie et par site) représentées dans le plan de Mohr permettent la détermination des paramètres de Mohr-Coulomb (figure 2b). Dans cette étude, nous nous concentrerons uniquement sur la valeur de l'angle de frottement. En effet, la cohésion mesurée est liée à l'orientation relative du plan de discontinuité et de la direction de cisaillement, et n'a donc pas de réel sens mécanique.

Les valeurs de l'angle de frottement ainsi identifiées en condition 'sèche' sont présentées sur les figures 3a à 3c pour les trois lithologies (siltite, grès, schiste graphiteux).

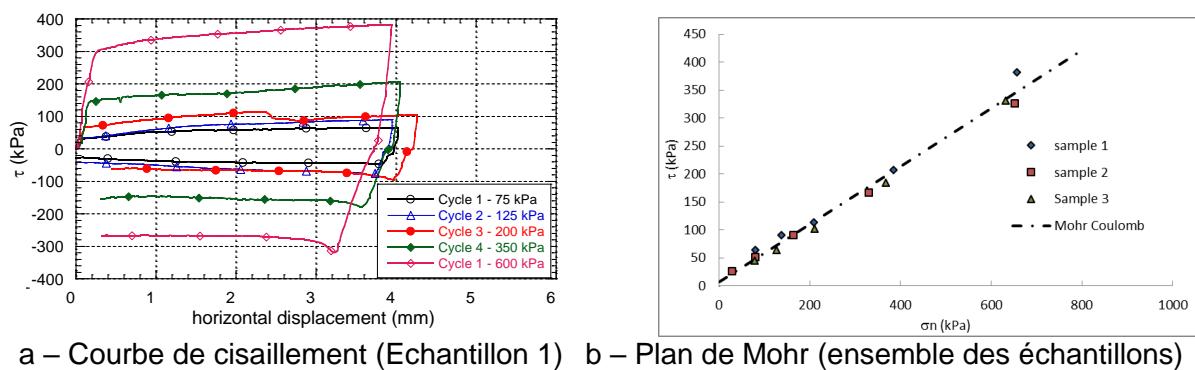


Figure 2. Résultat d'un essai de cisaillement sur une siltite fine prélevée site 3.

L'angle de frottement des discontinuités prélevées dans les schistes graphiteux est faible (inférieure à 20°). La valeur moyenne est identique pour les trois sites de prélèvements. Cette faible valeur est corrélative à une faible granulométrie de ces matériaux constitués de grains très fins avec des minéraux argileux abondants. De plus, la déformation et le métamorphisme ont défini des plans de schistosité dans lesquels l'iso orientation des phyllosilicates et du graphite peut donner un aspect "lustré" (Figure 4). Ces plans ont alors une résistance au cisaillement faible à très faible.

Pour les discontinuités prélevées dans les siltites fines, les angles de frottement mesurés sont plus élevés que ceux obtenus dans les schistes graphiteux. Ces siltites, quoique "fines" ont une granulométrie plus grossière que les schistes graphiteux et sont moins "lustré" que ces derniers, ces deux effets peuvent influencer l'angle de frottement. Au sein des "siltites fines", les résultats obtenus conduisent à séparer le faciès en deux catégories. La première regroupe les prélèvements pour lesquels l'angle de frottement moyen est d'environ 21° (sites 4 et 7) ; la seconde regroupe les prélèvements pour lesquels l'angle de frottement moyen est plus élevé (supérieur à 26°), et correspond aux prélèvements des sites 3,6 et 8. Ces différences ne sont pas liées à un effet de granulométrie (celle-ci est similaire pour tous ces échantillons), mais peut être en partie attribuée à d'autres facteurs telle la minéralogie des argiles présentes dans le plan de discontinuité. En effet, les plans de discontinuité présentant les caractéristiques de cisaillement les plus faibles (sites 4 et 7) sont ceux pour lesquels la présence d'argile gonflante (famille de la smectite) a été identifiée par l'analyse de la diffraction des rayons X, tandis que les argiles présentes dans les siltites des autres sites (3,6 et 8) ne contiennent que des chlorites et des illites. La première catégorie d'échantillons contenant des argiles gonflantes est notée « type I » et la seconde catégorie, échantillons sans argiles gonflantes, est notée « type II » sur la figure 3b.

Enfin, les discontinuités prélevées dans les faciès de type gréseux, présentent des surfaces plus rugueuses liées à la granulométrie du matériau constitutif des éponges (grains beaucoup plus grossiers). Les angles de frottement sont en moyenne plus élevés (valeurs moyennes systématiquement supérieures à 30°) que ceux mesurés dans les lithologies de granulométries plus fines. De plus, la valeur obtenue dans les grès présentant la granulométrie la plus grossière testée (grès moyen, site 8) est plus élevée que celles mesurées dans les grès fins (sites 1,3 et 5). La granulométrie n'est cependant pas le seul paramètre influençant la valeur de l'angle de frottement. Pour le site 5, l'angle de frottement mesuré le long de plans de fracturation est plus élevé que celui mesuré le long de plan de schistosité. Ces derniers constituent alors les plans principaux de faiblesse mécanique du matériau. Pour un même faciès, la résistance au cisaillement pourrait donc dépendre du type de discontinuités, mais le nombre d'essais est insuffisant pour pouvoir en tirer une règle générale.

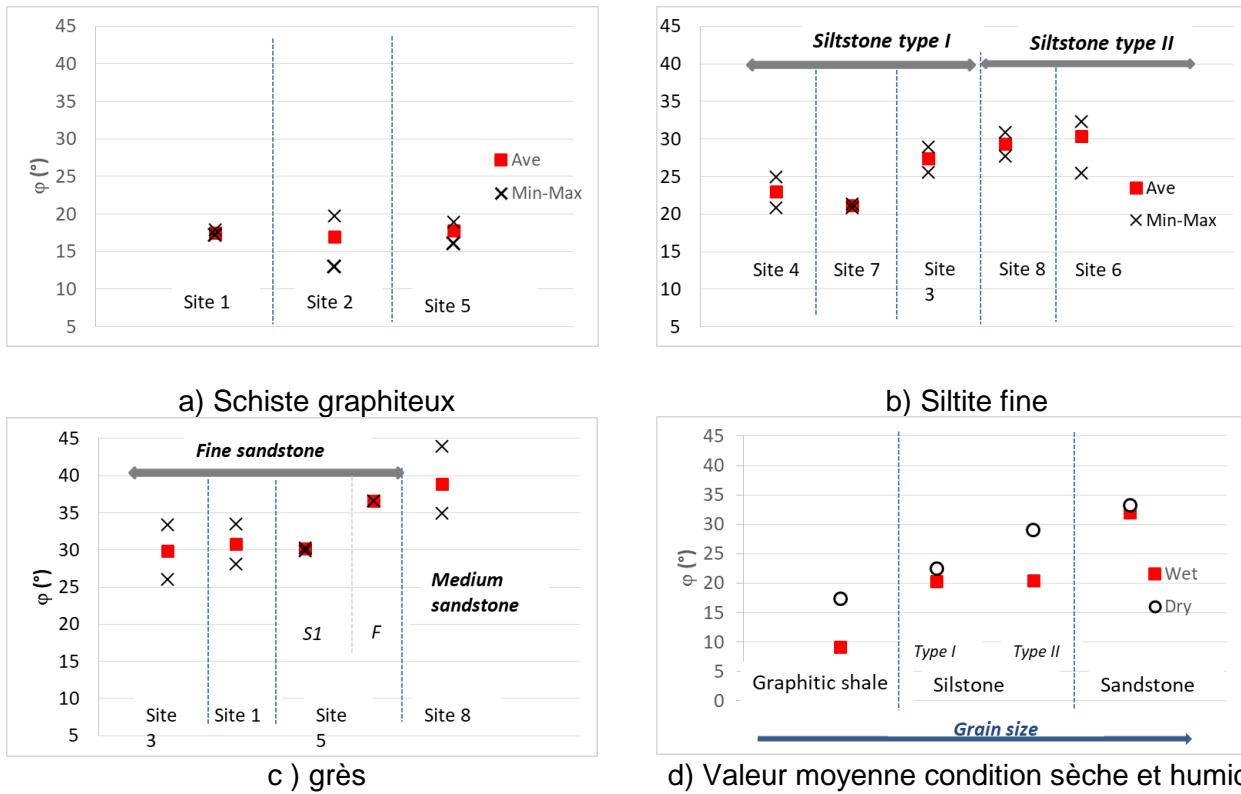


Figure 3. Valeurs de l'angle de frottement mesurées par lithologie et par site (Ave= moyenne)

La synthèse de l'ensemble des résultats, présentée figure 3d en fonction du faciès contenant la discontinuité, met en évidence l'influence de la granulométrie sur le comportement au cisaillement des discontinuités. Sur cette figure sont également indiqués les résultats obtenus en condition 'humide'. On note une diminution de la résistance au cisaillement en présence d'eau, comme observé par différents auteurs sur des discontinuités rocheuses (Hoang, 2010; Pellet et al., 2013, Barros et al. 2014). L'effet est particulièrement marqué pour les discontinuités des schistes graphiteux : l'angle de frottement moyen passe de  $17^\circ$  en condition sèche à  $9^\circ$  en condition humide. Pour les siltites fines, quelle que soit la nature des argiles, l'angle de frottement après hydratation du plan de discontinuité est identique. Enfin, pour les matériaux gréseux, la présence d'eau a un impact limité ; le frottement est dans ce cas principalement conditionné par la granulométrie des grains à l'interface.



Figure 4. Discontinuité ouverte dans les schistes graphiteux Plan S1 d'aspect lustré, site 3).

## 4. Conclusions

L'utilisation d'une boite de cisaillement directe de type boite de Casagrande est une alternative simple et intéressante pour la caractérisation des paramètres de cisaillement de discontinuités de roches tendres. Cette méthode est plus économique que l'utilisation de machine de cisaillement pour joint rocheux, et permet l'étude du comportement sous des efforts normaux faibles représentatifs d'états de contrainte proches de la surface.

A notre connaissance, les essais de cisaillement sur discontinuités dans les matériaux du briovérien breton sont rares. Notre étude contribue à une meilleure connaissance de ces matériaux, et principalement du comportement mécanique de ses discontinuités.

Les essais réalisés ont mis en évidence l'importance de la granulométrie du faciès contenant la discontinuité et de la présence d'eau sur le comportement de celle-ci. L'effet de la présence d'eau est particulièrement marqué dans les schistes graphiteux. Ces faciès représentent de faibles volumes, difficiles à repérer et à échantillonner à partir de sondages verticaux, car ils ne sont présents que sous la forme de couche de très faibles épaisseurs. Cependant leurs très faibles caractéristiques peuvent avoir des conséquences importantes pendant les travaux, lors de l'excavation ou sur le dimensionnement des ouvrages de soutènements.

## 5. Références bibliographiques

- Barros, R. S., Oliveira, D. V., Varum, H., Alves, C. A. S., Camoes, A. (2014). Experimental characterization of physical and mechanical properties of schist from Portugal. *Construction and Building Materials*, 50, 617–630. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.008.
- Blott S. J., Pye K. (2001). Technical communication gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. and Landforms*, 26, pp. 1237–1248.
- Dabard, M.P. (1990). Lower Brioverian formations (Upper Proterozoic) of the Armorican Massif (France): geodynamic evolution of source areas revealed by sandstone petrography and geochemistry, *Sedimentary Geology*, 69, 45-58.
- Debelmas, J. (1974) - Géologie de la France, 1: vieux massifs et grands bassins sédimentaires, In : French Doin éditeurs, Paris.
- Franke, W. (1992). Phanerozoic structures and events in central Europe . In D.J. Blundell, R. Freeman & S. Mueller (Eds.) A continent revealed – The European Geotraverse, 297 pp., Cambridge University Press.
- Hoang T. T. N. (2010). - Etude du comportement d'un milieu rocheux fracturé : Application à la réalisation du tunnel de St Béat. Doctoral dissertation from l'école des ponts Paristech. 279 pages.
- Jafari, M., Amini Hosseini, K., Pellet, F., Boulon M., Buzzi O. (2003). Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23, (7), pp. 619–630. doi:10.1016/S0267-7261(03)00063-0.
- Jing L., Nordlund E., Stephansson O. (1992). - An experimental study on the anisotropy and stress-dependency of the strength and deformability of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 29 (6), pp. 535-542.
- Krahn J., Morgenstern N.R. (1979). - The ultimate frictional resistance of rock discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, vol. 16, pp. 127-133.

- Le Cor T., Rangeard D., Merrien-Soukatchoff V., Simon J. (2014). Mechanical characterization of Weathered Schists. *Engineering Geology for Society and Territory*, Vol. 6, pp. 809-812. (Proceedings of 12th International IAEG Congress, Torino, Italy, 15-19 sept. 2014).
- Le Cor T. (2014). Etude du comportement de terrains anisotropes lors de travaux de génie civil. Phd Thesis, INSA de Rennes, France.
- Lee H., Park Y., Cho T., You K. (2001). - Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(7), pp. 967–980. doi:10.1016/S1365-1609(01)00060-0.
- Nagy E.A., Samson S.D., D'Lemos R.S. (2002) – U-Pb geochronological constraints on the timing of Brioherian sedimentation and regional deformation in the St. Brieuc region of the Neoproterozoic Cadomian orogen, northern France. *Precambrian Res.*, 116, 1-17.
- Pellet, F.L., Keshavarz M., Boulon M. M. (2013). Influence of humidity conditions on shear strength of clay rock discontinuities. *Engineering Geology*, 157, 33–38. doi:10.1016/j.enggeo.2013.02.002.