ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

Résistance au cisaillement des interfaces roche/coulis représentatives de pieux offshore

Eleni Stavropoulou¹, Christophe Dano^{1,*}, Marc Boulon¹, Matthieu Briffaut¹, Ankit Sharma¹ et Alain Puech²

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP (Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes), 3SR, 38000 Grenoble, France

² Fugro GeoConsulting, 92000 Nanterre, France

Résumé – Dans le cadre des projets éoliens offshore, la conception optimisée des fondations de type monopieux forés dans des massifs rocheux carbonatés demande une estimation réaliste de la résistance au cisaillement mobilisable. Dans cette optique, une campagne d'essais de cisaillement d'interface roche/coulis est conduite sur la machine BCR3D qui permet, en particulier, d'appliquer une condition de rigidité imposée sur la normale à l'interface, condition jugée représentative de ce qui se passe au droit du pieu. On présente dans une première partie le dispositif expérimental, la préparation des éprouvettes d'essai et le choix des paramètres expérimentaux. Puis, au travers de différents résultats expérimentaux, on montre l'importance de la rigidité normale dans le développement de la résistance au cisaillement. Dans un second temps, on met en évidence que la rugosité, son évolution sous chargement et le contraste de propriétés mécaniques entre une roche (calcaire tendre ou calcarénite) et le coulis conditionnent le frottement mobilisable. L'élément commun à toutes les observations est la dilatation empêchée de l'interface et l'évolution associée de la contrainte normale à l'interface.

Mots clés : cisaillement / interface roche/coulis / rigidité imposée / monopieu / rugosité

Abstract – **Shear strength of grout/rock interfaces for the design of offshore foundations.** For the development of offshore wind turbines farms, the optimized design of monopiles drilled and grouted in carbonate rocks requires a realistic assessment of the mobilized shaft friction. Therefore, a series of grout/rock interfaces shear tests were carried out on the BCR3D set-up, which allows the application of a specific boundary condition of constant normal stiffness orthogonally to the interface considered as representative of field conditions. In a first section, the experimental set-up, the preparation of the specimens as well as the design of experimental parameters are presented. On the one hand, through typical test results, the importance of the normal stiffness in the development of the shear strength is shown. On the other hand, the influence of the interface roughness, its evolution upon loading as well as of the contrast in the mechanical properties of the grout and the rock parts are highlighted. The common feature to those observations lies in the constrained dilatancy due to the normal stiffness condition and the correlated evolution of the normal stress.

Keywords: shearing / rock/grout interface / controlled stiffness / monopile / roughness

1 Introduction

Le futur développement de parcs éoliens au large des côtes françaises amène les concepteurs de fondations à s'interroger sur les méthodes de dimensionnement existantes et sur les valeurs des paramètres de frottement latéral à considérer. En effet, les règles usuelles utilisées pour le dimensionnement des fondations terrestres ne couvrent pas toutes les situations rencontrées en mer. Les principales spécificités des fondations

marines tiennent à leurs dimensions, souvent plus imposantes (diamètre largement supérieur au mètre). On ne peut non plus faire abstraction de la variabilité temporelle des chargements qui s'y appliquent (généralement représentées par une succession de chargements cycliques), ni de la relative importance de la composante horizontale de ces charges. Enfin, les terrains rencontrés sont souvent des roches de résistance modérément faible à forte (Puech et Quiterio-Mendoza, 2019a, b), dans lesquelles une solution de type pieux forés et scellés est envisageable. Dans ce cas, on s'intéresse au comportement de l'interface constituée par la roche encaissante et le coulis de scellement considéré comme étant mécaniquement la plus faible.

* Auteur de correspondance :
christophe.dano@3sr-grenoble.fr

Fig. 1. Principe de l'essai de cisaillement d'interface en condition CNS (Heuze, 1979).

Fig. 1. Principle of the interface shear test in Constant Normal Stiffness (CNS) mode (Heuze, 1979).

L'estimation du frottement mobilisable peut être réalisée par le biais d'essais de cisaillement d'interface en laboratoire, à l'instar de ce qui est fait pour les joints rocheux. Néanmoins, les conditions expérimentales doivent être choisies de telle sorte que l'essai soit le plus représentatif des conditions *in situ*. Deux conditions, en plus des propriétés propres du coulis et de la roche, de l'état de saturation du milieu ainsi que du niveau de contrainte retenu, apparaissent critiques de ce point de vue : la condition aux limites imposée sur la normale à l'interface d'une part et la rugosité de l'interface d'autre part.

Sur la normale à l'interface, trois conditions peuvent être considérées : soit une condition de force normale constante (dite condition CNL) pour laquelle l'interface est libre de se contracter ou se dilater, soit une condition de volume constant ou de déplacement normal nul (condition CV) retenue par exemple dans le cas d'interface sol / structure en condition non drainée, soit une condition de rigidité normale imposée (condition CNS). Ces trois situations correspondent respectivement à une rigidité normale à l'interface nulle (CNL), infinie (CV) ou intermédiaire (CNS), avec une conséquence directe sur le frottement mobilisable et les mécanismes amenant à la rupture de l'interface. Dans le cas des fondations profondes d'éoliennes offshore, le déplacement relatif entre le coulis de scellement adhérent au pieu et la roche encaissante s'accompagne d'une variation de la contrainte normale à l'interface associée à un phénomène de dilatation empêchée, le glissement le long des aspérités étant contraint par la roche encaissante. De ce fait, des essais en condition CNS sont préférés dans cette étude.

L'importance de la rugosité dans le développement de la résistance au cisaillement a été signalée par de nombreux auteurs (Johnston, 1977 ; Horvath et Kenney, 1979 ; Pells *et al.*, 1980 ; Johnston et Lam, 1989). Nam et Vipulanandan (2008) suggèrent que la rugosité de l'interface peut être représentée par un profil régulier en dents de scie, caractérisée par une hauteur d'aspérité Δh_a et une longueur entre les sommets des aspérités valant $2l_a$, formant ainsi une inclinaison des aspérités θ telle que $\tan(\theta) = \Delta h_a / l_a$ (Fig. 1).

Fig. 2. Machine BCR3D.

Fig. 2. BCR3D set-up.

Nous présentons ici le résultat d'essais de cisaillement d'interface réalisés sur la machine BCR3D (boîte de cisaillement des roches en 3 dimensions) du laboratoire 3SR de Grenoble (Boulon, 1995), avec différentes configurations en termes de propriétés géométriques et mécaniques des interfaces coulis / roche.

2 Campagnes expérimentales

2.1 Dispositif expérimental

La machine de cisaillement BCR3D (Fig. 2) dispose de trois axes orthogonaux indépendants les uns des autres, pilotables en force ou en déplacement grâce à des moteurs asservis :

- l'axe vertical Z normal à l'interface permettant d'appliquer la contrainte normale ;
- l'axe horizontal X parallèle à l'interface permettant de cisailier l'interface ;
- l'axe horizontal Y non utilisé au cours de cette étude.

Contrairement aux machines de cisaillement de type Casagrande utilisées en mécanique des sols, où une des deux demi-boîtes est fixe et l'autre mobile, sur la machine BCR3D, selon l'axe X, les deux demi-boîtes, inférieure et supérieure, sont entraînées en mouvement par deux moteurs indépendants (X1 et X2), si bien que l'effort normal reste constamment

Fig. 3. Préparation des échantillons roche / coulis.
Fig. 3. Preparation of rock/grout specimens.

centré sur l'axe vertical médian de l'interface. La rotation des demi-boîtes est ainsi fortement atténuée.

À chaque moteur est associé une mesure de force par une cellule de force TME F522TC d'une capacité de 100 kN et une mesure de déplacement par un capteur LVDT de course appropriée. Ainsi, selon l'axe X, les deux capteurs LVDT ont une course de 6 cm, autorisant un déplacement relatif tangentiel total de 12 cm. Une mesure locale de déplacement relatif vertical au niveau de l'interface est également possible par le biais d'un capteur LVDT de course réduite ($\pm 2,5$ mm) mais de précision accrue.

2.2 Préparation des échantillons

L'élément rocheux de l'interface, scellé au mortier dans la demi-boîte inférieure, est soit découpé dans des blocs de roche-mère sous une forme parallélépipédique, soit carotté sur le site d'intérêt sous une forme cylindrique. Cet élément rocheux a des dimensions légèrement plus faibles que les dimensions intérieures de la demi-boîte en acier inoxydable ($10 \times 10 \text{ cm}^2$ de surface horizontale et 6 cm de profondeur), afin d'assurer l'horizontalité de l'élément rocheux et également avoir un nombre entier d'aspérités (multiple de $2l_a$). Les aspérités sont rainurées mécaniquement pour donner une géométrie en dents de scie, contrôlée préalablement à la mise en place dans la demi-boîte grâce à une cartographie de la surface par mesure laser.

Le coulis est ensuite coulé dans la demi-boîte supérieure, en maintenant grâce à un élément en plexiglas amovible, un écartement d'un centimètre entre les deux demi-boîtes, qui constituera le plan de cisaillement de l'interface (Fig. 3).

Le coulis est un mélange de ciment CEM I 52.5 N PM et d'eau, avec un rapport massique eau / ciment E/C de 0,40 et un dosage en ciment de $694,5 \text{ kg/m}^3$, respectant les recommandations en vigueur (rapport E/C < 0,45, dosage en ciment > 600 kg/m^3). La maturité du coulis est d'au moins 28 jours lors des essais.

Il est également possible de tester l'interface en conditions imbibées d'eau grâce à une membrane souple positionnée sur la demi-boîte inférieure.

2.3 Choix de la rigidité normale imposée

Lorsque les deux demi-boîtes subissent un déplacement tangentiel relatif, la condition de rigidité normale imposée

Fig. 4. Chemins de cisaillement appliqués.
Fig. 4. Shear stress paths during tests.

revient à considérer, selon l'axe vertical Z, un ressort de raideur k_n telle que :

$$k_n = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta u_n},$$

où $\Delta\sigma_n = \sigma_n - \sigma_{n0}$ représente la variation de la contrainte normale à l'interface entre l'instant t (σ_n) et l'instant initial t_0 (σ_{n0}) correspondant au début du cisaillement et $\Delta u_n = u_n - u_{n0}$ représente la variation du déplacement relatif normal entre ces mêmes instants.

Ce ressort simule l'effet du massif de roche encaissante qui s'oppose à la libre dilatation de l'interface rugueuse. Pour que les résultats d'essais en laboratoire soient transposables au calcul du frottement latéral du pieu, il faut faire en sorte de choisir une valeur de rigidité normale représentative des conditions de terrain. Ce choix repose sur l'analogie couramment admise entre la dilatation empêchée autour du pieu et le problème d'expansion de cavité cylindrique (Boulon *et al.*, 1986). Cette analogie conduit à la relation suivante :

$$k_n = \frac{4 \cdot G_{\text{massif}}}{D_{\text{pieu}}},$$

entre la rigidité normale k_n imposée dans l'essai de laboratoire, le module de cisaillement du massif de roche encaissant G_{massif} , déduit du module de la roche saine pondéré de l'effet de la fracturation du massif (Puech et Quiterio-Mendoza, 2019a, b) et du diamètre du pieu D_{pieu} . À titre d'exemple, pour un module de cisaillement G_{massif} de 6 GPa, et un diamètre de pieu représentatif des structures offshore compris entre 2 et 10 m, la rigidité normale à imposer sur l'interface varie entre 2400 et 12 000 kPa/mm. Un essai à contrainte normale constante (CNL) est ainsi un essai à rigidité normale nulle ($\Delta\sigma_n = 0$) au cours duquel l'interface est libre de se contracter ou se dilater et l'essai à volume constant (CV) un essai à rigidité normale infinie ($\Delta u_n = 0$) où la rugosité est complètement détruite lors du cisaillement.

2.4 Essais de cisaillement

La caractérisation du comportement de l'interface roche / coulis comprend généralement une première campagne d'essais CNL pour identifier les paramètres de rupture de l'interface, en faisant l'hypothèse *a priori* d'un critère de

Fig. 5. Réponse en cisaillement d'interfaces coulis/calcarénite : a : évolution de la contrainte de cisaillement ; b : évolution des déplacements relatifs normaux en condition CNL ; c : évolution de la contrainte normale en condition CV.

Fig. 5. Grout/calcaremite interface shear behaviour: a: evolution of the shear stress; b: evolution of the normal relative displacements in CNL mode; c: evolution of the normal stress in CV mode.

Mohr-Coulomb ou du critère bilinéaire de Patton (1966). Une seconde campagne comprend les essais en conditions CNS, monotones et/ou cycliques.

Le choix des contraintes normales initiales est fait de manière à représenter le niveau des contraintes effectives radiales le long du pieu. Ces contraintes dépendent du type d'installation de la fondation, foré (cas des roches moyennement dures à dures, objet de cette étude) ou battu (cas de la craie par exemple).

Les chemins de cisaillement retenus dans les essais décrits ici sont de deux types (Fig. 4) :

- le premier type (Fig. 4a) comprend un cisaillement dans une direction, jusqu'à un déplacement relatif tangentiel u_t égal à un certain pourcentage (par exemple 75 % comme indiqué sur la Fig. 4) de la distance entre les sommets $2l_a$, suivi par un déplacement relatif en direction opposée jusqu'à un certain pourcentage de la distance entre sommets, puis retour en position initiale ;
- le second type (Fig. 4b) intègre, après le premier cisaillement jusqu'à un pourcentage de la distance entre sommets, un cycle de cisaillement « one-way » (par exemple entre 25 et 75 % de la distance entre sommets), suivi d'un cisaillement alterné (« two-way »).

Dans ce qui suit, la discussion portera sur l'effet de la condition normale (CNS, CV) à l'interface entre le coulis et une calcarénite puis sur l'effet de la rugosité d'interfaces roche/coulis en condition CNS pour deux natures de roche différentes. Pour des raisons de confidentialité sur certains projets, certaines quantités seront adimensionnalisées.

3 Résultats expérimentaux

3.1 Effet des conditions aux limites normales à l'interface

Dans cette partie, des interfaces constituées d'un coulis et d'une calcarénite, de résistance à la compression simple deux fois plus faible que le coulis, sont cisailées en conditions CNL puis CV, sous une même contrainte normale initiale $\sigma_{n0} = 300$ kPa et pour un même profil de rugosité ($\Delta h_a = 0,5$ mm et $2l_a = 10$ mm).

La réponse mécanique est représentée sur la figure 5. En condition CNL, la contrainte de cisaillement maximale est atteinte pour un faible déplacement relatif tangentiel. La réponse volumétrique (Fig. 5b) montre une courte phase de contractance (avec perte de la cohésion entre le coulis et la roche) suivie par une large phase de dilatance libre jusqu'à ce

Fig. 6. Effet de la rigidité normale sur la résistance au cisaillement d’une interface coulis/calcarénite : a : évolution de la contrainte de cisaillement ; b : évolution des déplacements relatifs normaux ; c : évolution de la contrainte normale.

Fig. 6. Effect of the normal stiffness on the shear strength of a grout/calcarene interface : a : evolution of the shear stress ; b : evolution of the normal relative displacements ; c : evolution of the normal stress.

que le déplacement relatif tangentiel u_t soit égal à la distance l_a (passage sur les pics des épontes). Quand le cisaillement est inversé, la dilatance est plus faible probablement en raison de l’usure des aspérités. Cette réponse volumétrique reproduit donc le profil de rugosité et son évolution au cours du cisaillement.

Au contraire, la réponse en condition CV est caractérisée par un pic marqué de la résistance au cisaillement suivi par une dégradation brutale liée à la rupture des épontes sous la condition de déplacement relatif normal nul. En contrepartie, on note une forte augmentation de la contrainte normale

jusqu’au pic de contrainte de cisaillement (Fig. 5c). Lorsque le cisaillement est inversé, la contrainte normale n’évolue quasiment plus, témoignant là encore de la dégradation forte des aspérités pendant le premier chargement.

3.2 Influence de la nature de la roche lors d’essais CNS

Dans cette partie, on analyse les résultats d’essais de cisaillement en condition CNS, sous une contrainte normale

Fig. 7. Effet de la rigidité normale sur la résistance au cisaillement d'une interface coulis/calcaire: a: évolution de la contrainte de cisaillement; b: évolution des déplacements relatifs normaux; c: évolution de la contrainte normale.

Fig. 7. Effect of the normal stiffness on the shear strength of a grout/calcareous rock interface: a: evolution of the shear stress; b: evolution of the normal relative displacements; c: evolution of the normal stress.

initiale de 100 kPa. Deux roches de nature différente, de même rugosité ($\Delta h_a = 0,5$ mm et $2l_a = 10$ mm) sont testées :

- une calcarénite (différente de celle testée précédemment) dont les propriétés mécaniques sont meilleures que celles du coulis. Cette calcarénite est testée sous deux niveaux de rigidité normale k_1 et k_2 avec $k_1 = 2k_2$. Le chemin de chargement est celui représenté sur la figure 4b ;

Fig. 8. Observation post-mortem de l'interface coulis/calcaire.

Fig. 8. Post-mortem observation of the calcareous rock/grout interface.

- une roche calcaire (calcaire de Saint-Maximin) relativement poreuse (20 à 30 %) dont les propriétés mécaniques sont moins bonnes que celles du coulis. L'interface calcaire/coulis est testée en condition imbibée.

Le contraste de résistance entre le coulis et la roche induit la position de la rupture, qui se produit dans le matériau le moins résistant.

La figure 6 montre l'influence de la rigidité normale sur la résistance au cisaillement d'une interface coulis/calcarénite. Elle est d'autant plus élevée que la rigidité normale est importante, ce qui s'explique par une augmentation de la contrainte normale au cours du cisaillement qui permet de mobiliser plus de frottement tandis que le déplacement relatif normal est lui plus faible.

Dans le cas de l'interface coulis/calcaire, le comportement vis-à-vis du cisaillement est différent. On rappelle que les propriétés mécaniques de la roche sont plus faibles que celles du coulis, et qu'une dégradation (endommagement) de l'interface pendant l'application de la contrainte normale initiale est possible. La figure 7 représente le résultat d'essais de cisaillement pour trois niveaux de rigidité normale, entre 500 et 2500 kPa/mm. On observe que la contrainte de cisaillement maximale à la fin du premier chargement dépend peu du niveau de la rigidité normale et que le comportement est caractérisé par un plateau de résistance plutôt que par un pic. Ce comportement est typique des interfaces sans rugosité, ce qui laisse présager du broyage complet des aspérités pendant les phases de consolidation et de cisaillement. Ceci est confirmé par l'observation post-mortem des interfaces, où on note qu'une partie de la roche calcaire est restée adhérente au coulis (Fig. 8).

Il est par conséquent clair que le comportement de l'interface dépend des conditions aux limites qui lui sont imposées ainsi que du contraste entre les propriétés mécaniques des deux constituants. Il transparaît également que la rugosité et son évolution au cours du cisaillement jouent un rôle fondamental dans la mobilisation du frottement. C'est ce que l'on démontre ci-après en comparant la résistance au cisaillement de deux interfaces coulis/calcarénite, caractérisées par la même distance entre pointes $2l_a$ mais deux hauteurs Δh_a d'aspérités différentes (rapport sur les hauteurs de 3,06),

Fig. 9. Effet du profil de rugosité sur le comportement d'une interface coulis/calcarénite : a : évolution de la contrainte de cisaillement ; b : évolution des déplacements relatifs normaux ; c : évolution de la contrainte normale.

Fig. 9. Influence of the roughness of a grout/calcarene interface: a : evolution of the shear stress; b : evolution of the normal relative displacements; c : evolution of the normal stress.

pour une même rigidité normale. Les résultats sont présentés sur la [figure 9](#).

Il apparaît que la résistance au cisaillement est corrélée positivement avec la hauteur des aspérités : elle est ici 6 fois plus importante pour la rugosité présentant la hauteur la plus élevée. Elle est clairement liée au travail de dilatance empêchée du fait de la rigidité normale imposée, ce qui se matérialise par une plus forte augmentation de la contrainte normale à l'interface. Quand la direction du cisaillement est inversée, les résistances au cisaillement sont généralement

moins importantes, en raison de la dégradation des aspérités. Le profil de rugosité impacte également le mode de rupture, des aspérités moins marquées induisant une rupture plus ductile marquée par un plateau de résistance plutôt que par un pic de contraintes.

4 Conclusions

Ce papier décrit le principe et les résultats d'essais de cisaillement d'interface entre un coulis de scellement et des

échantillons de roches carbonatées, pour tenter de mieux prédire les résistances au cisaillement attendues pour les fondations d'éoliennes au large des côtes françaises. On montre l'influence prépondérante (i) du contraste de résistance entre les deux constituants de l'interface (coulis ou roche), la rupture se produisant dans la partie mécaniquement la plus faible de l'interface, (ii) de la rigidité normale à l'interface déduite des mesures de modules de cisaillement *in situ* et du diamètre de la fondation et (iii) de la rugosité de l'interface générée *in situ* par l'outil de forage. Pour des interfaces où la rugosité évolue peu sous le cisaillement, plus la rigidité normale est importante, plus la résistance au cisaillement mobilisée est également importante, du fait de la dilatance empêchée qui se traduit par une forte augmentation de la contrainte normale. Ce n'est plus le cas pour des roches facilement altérables pour lesquelles la rigidité normale joue un rôle négligeable, car la rugosité est effacée soit pendant la phase de consolidation soit pendant la phase de cisaillement. De ce fait, il est également normal d'observer qu'une hauteur d'aspérités plus importante implique une mobilisation de la résistance au cisaillement plus importante.

Remerciements. Ce travail a bénéficié des Fonds d'Investissements d'Avenir du programme ANR ITE FEM ANR-10-IEED-0006-18. Que France Energies Marines et l'Agence Nationale pour la Recherche en soient remerciés.

Références

Armand G. 2000. Contribution à la caractérisation en laboratoire et à la modélisation constitutive du comportement mécanique des joints rocheux. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.

- Boulon M, Plytas C, Foray P. 1986. Comportement d'interface et prévision du frottement latéral le long des pieux et tirants d'ancrage. *Revue française de géotechnique* 35: 31–48.
- Boulon M. 1995. A 3-d direct shear device for testing the mechanical behaviour and the hydraulic conductivity of rock joints. In: *Proceedings Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Balkema, Rotterdam, pp. 407–413.
- Heuze FE. 1979. Dilatant effects of rock joints. In: *4th ISRM Congress*, pp. 169–175.
- Horvath RG, Kenney TC. 1979. Shaft resistance of rock-socketed drilled piers. In: *Symposium on Deep Foundations*, ASCE, pp. 182–214.
- Johnston IW. 1977. Rock-socketing down-under. *Contract J* 279: 50–53.
- Johnston IW, Lam TS. 1989. Shear behavior of regular triangular concrete/rock joints – Analysis. *J Geotech Eng* 115(5): 711–727.
- Nam MS, Vipulanandan C. 2008. Roughness and unit side resistances of drilled shafts socketed in clay shale and limestone. *J Geotech Geoenviron Eng* 134(9): 1272–1279.
- Patton FD. 1966. Multiple modes of shear failure in rock. In: *1^{er} Congrès de la Société Internationale de Mécanique des Roches*, Lisbonne, pp. 509–513.
- Pells PJN, Rowe RK, Turner RM. 1980. An experimental investigation into side shear for socketed piles in sandstone. In: *Proceedings of the International Conference on Structural Foundations on Rock*, pp. 291–302.
- Puech A, Quiterio-Mendoza B. 2019a. Caractérisation des massifs rocheux pour le dimensionnement de pieux forés en mer. *Revue française de géotechnique* 158: 5.
- Puech A, Quiterio-Mendoza B. 2019b. Characterization of rock masses for designing drilled and grouted offshore windfarm pile foundations. In: *Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Reykjavik.

Citation de l'article : Eleni Stavropoulou, Christophe Dano, Marc Boulon, Matthieu Briffaut, Ankit Sharma, Alain Puech. Résistance au cisaillement des interfaces roche/coulis représentatives de pieux offshore. Rev. Fr. Geotech. 2019, 158, 6.