



41^{ème}

Colloque Annuel du
Groupe Français de Rhéologie

RHÉOLOGIE DES SUSPENSIONS

DE
L'ENVIRONNEMENT
ET DE
L'INDUSTRIE



CHERBOURG, 18-20 OCTOBRE 2006



Intéraction sol-structure dans une problématique de pêche en milieu naturel marin

Identification du comportement tribologique des suspensions à l'aide d'un tribomètre

Y. Mélinge*, C. Lanos*, B. Vincent**

*LGCGM – Equipe Matériaux et thermique de l'habitat – EA 3913

INSA Rennes – 20 Av des Buttes de Coësmes – CS14315 – 35043 Rennes Cedex

**IFREMER - Technologie des pêches – Centre de Brest – BP70 – 29280 Plouzane

Résumé : Dans cet article, nous mettons en évidence la loi d'évolution du coefficient de frottement dynamique d'une suspension concentrée issue d'un fond marin sur un corps solide en mouvement. L'hypothèse d'un comportement aux interfaces de type Mohr-Coulomb est formulée et confirmée expérimentalement. Pour réaliser ces travaux, un tribomètre et un modèle de calcul des paramètres de frottement sont développés. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de l'étude d'impact environnemental des chaluts, engins utilisés pour la pêche. Les travaux sont menés en partenariat avec le centre Ifremer de Lorient.

Mots-clé : Suspensions naturelles, tribologie, tribomètre, drainage, cisaillement interfacial

1. Introduction

Dans le cadre de ces travaux nous traitons le thème d'impact environnemental des chaluts sur le milieu naturel. Ces « engins » de pêche, tractés par un chalutier peuvent être utilisés pour la pêche de fond. Dans ce cas, les chaluts sont équipés de part et d'autre de l'entrée du filet de panneaux dont le rôle est de stabiliser sa trajectoire et de maintenir l'entrée ouverte. Ces panneaux s'apparentent à des patins placés en incidence avec la direction principale d'avancement à l'image d'une paire de skis freinant dans une descente.

L'étude du frottement du patin avec le fond marin, contribuant à l'équilibre mécanique de cet élément [1] est présentée.

En condition de laboratoire, nous avons recréé expérimentalement ces conditions interfaciales au moyen d'un tribomètre. Pour les besoins de l'étude, nous avons développé une technologie pion sur plan rotatif à oscillation harmonique utilisée en vitesse de rotation imposée.

Le matériau étudié est issu du milieu naturel et s'apparente à une boue sableuse prélevée à la pelle mécanique en pleine mer.

Dans cet article, nous présentons tout d'abord la technologie que nous avons développée pour réaliser ces travaux ainsi que la méthode d'estimation du coefficient de frottement dynamique. Nous admettons que le matériau présente une loi de contact de type Mohr-Coulomb. Ensuite, nous présentons les protocoles expérimentaux retenus pour la réalisation des essais.

Ces travaux mettent en évidence le comportement tribologique du matériau en contact avec un plan solide en mouvement dans un intervalle de vitesse de cisaillement imposé compris entre 0 et 2 m/s. finalement, nous montrons que le caractère drainant de ce type de matériau conditionne la loi de frottement.

2. Moyens expérimentaux

La caractérisation tribologique des matériaux est réalisée au moyen d'un tribomètre à oscillation harmonique schématisé sur la figure 1. La technologie retenue est de type pion sur plan et l'échantillon à caractériser est de forme cylindre de diamètre D et de hauteur H . La cellule de mesure des efforts fonctionne en porte à faux et utilise quatre points de mesure (capteurs de force ELW-B1 associé à un boîtier de conditionnement MSC6 Entran).

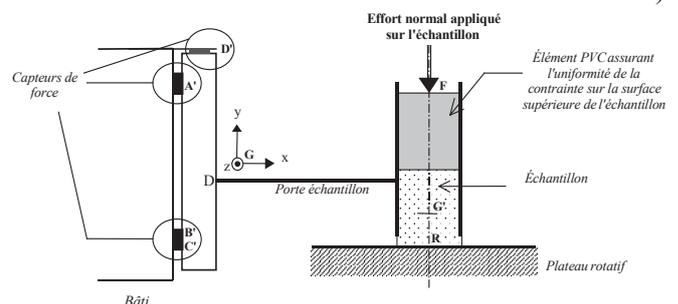


Figure 1 : Schématisation du tribomètre.

Le chemin de frottement est lisse et circulaire de rayon R ($R \gg D$). L'originalité de ce banc d'essai est donnée par l'inclinaison de l'axe réel du plateau de frottement par rapport à l'axe vertical. Cette inclinaison impose un déplacement alterné vertical de l'échantillon par rapport au porte échantillon et qui induit une composante de

frottement sur la génératrice du cylindre. L'évolution de la position du plateau au cours du temps est de forme sinusoïdale. La mise en mouvement du plateau est réalisée par un moteur CC CEM M26 de 5kW de puissance. Le couple maximum est imposé par le circuit de puissance et de contrôle de la vitesse de rotation et présente une valeur de 15 mN. La vitesse de rotation maximum est de 3000tr/min. Celle ci est contrôlée au moyen d'une sonde tachymétrique. Les essais sont réalisés à vitesse imposée et un chargement normal est imposé en tête de l'échantillon (z = H) au moyen de masses étalons. Celles ci reposent sur un système d'application d'effort placé sur l'échantillon et qui permet d'équi-répartir le chargement. L'ensemble des données délivrées par les capteurs de force et la sonde tachymétrique sont enregistrées au moyen d'une centrale d'acquisition de données SI3535F Schlumberger et pilotée par le logiciel scorio. Une analyse préliminaire permet d'adapter la fréquence d'échantillonnage en fonction des besoins par l'analyse du contenu énergétique des signaux enregistrés.

L'étude mécanique du système est réalisée en deux étapes successives. Tout d'abord, on procède à l'étude de l'équilibre de l'échantillon au moyen des théorèmes généraux. Le bilan des torseurs, leurs simplifications et le transport de chacun d'eux au centre de gravité du porte échantillon (point G) est recensé dans le tableau 1. La figure 2 présente le système de notation des efforts pris en compte.

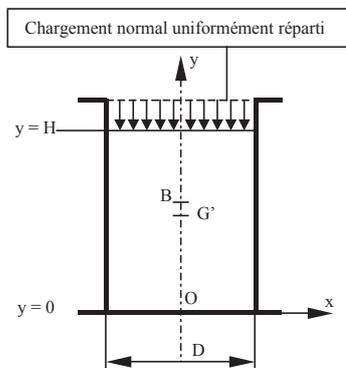


Figure 2 : Bilan des torseurs appliqués sur l'échantillon : en F, torseur résultant de l'application du chargement ; en G', le poids propre de l'échantillon ; en B, le torseur résultant de l'application du frottement sur la génératrice du cylindre ; en R, torseur résultant de l'application du frottement sur la face inférieure de l'échantillon.

Tableau 1 : Recensement des torseurs appliqués à l'échantillon.

Expression des torseurs au point d'application des forces	transport des torseurs en G

$\{\bar{\tau}_{PE \rightarrow E}\}_B = \begin{Bmatrix} B_x & M_{Bx} \\ B_y & M_{By} \\ B_z & M_{Bz} \end{Bmatrix}_B$	$\{\bar{\tau}_{PE \rightarrow E}\}_G = \begin{Bmatrix} B_x & GG'_y \cdot B_z + M_{Bx} \\ B_y & -GG'_x \cdot B_z + M_{By} \\ B_z & GG'_x \cdot B_y - GG'_y \cdot B_x + M_{Bz} \end{Bmatrix}_G$
$\{\bar{\tau}_{F \rightarrow E}\}_F = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ F & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_F$	$\{\bar{\tau}_{F \rightarrow E}\}_G = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ F_y & 0 \\ 0 & GF'_x \cdot F_y \end{Bmatrix}_G$
$\{\bar{\tau}_{P \rightarrow E}\}_{G'} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ P & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{G'}$	$\{\bar{\tau}_{P \rightarrow E}\}_G = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ Py & 0 \\ 0 & GG'_x \cdot Py \end{Bmatrix}_G$
$\{\bar{\tau}_{R \rightarrow E}\}_R = \begin{Bmatrix} R_x & M_{Rx} \\ R_y & M_{Ry} \\ R_z & M_{Rz} \end{Bmatrix}_R$	$\{\bar{\tau}_{R \rightarrow E}\}_G = \begin{Bmatrix} R_x & M_{Rx} + GR'_y \cdot R_z \\ R_y & M_{Ry} - GR'_x \cdot R_z \\ R_z & M_{Rz} + GR'_x \cdot R_y - GR'_y \cdot R_x \end{Bmatrix}_G$

Ensuite on procède à l'étude de l'équilibre du porte-échantillon, figure 1 et tableau 2. Aux torseurs précédents s'ajoute le poids propre de cet éléments et les torseurs mécaniques appliqués au point de mesure A', B', C', D'.

Tableau 2 : Recensement des torseurs appliqués au porte échantillon.

Expression des torseurs au point d'application des forces	Expression des torseurs en G
$\{\bar{\tau}_{E \rightarrow PE}\}_B = \begin{Bmatrix} -B_x & -MBx \\ -B_y & -MB_y \\ -B_z & -MB_z \end{Bmatrix}_B$	$\{\bar{\tau}_{E \rightarrow PE}\}_G = \begin{Bmatrix} -B_x & -M_{Bx} - GB'_y \cdot B_z \\ -B_y & -M_{By} + GB'_x \cdot B_z \\ -B_z & -M_{Bz} - GB'_x \cdot B_y + GB'_y \cdot B_x \end{Bmatrix}_G$
$\{\bar{\tau}_{A' \rightarrow PE}\}_{A'} = \begin{Bmatrix} A'_x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{A'}$	$\{\bar{\tau}_{A' \rightarrow PE}\}_G = \begin{Bmatrix} A'_x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -GA'_y \cdot A'_x \end{Bmatrix}_G$
$\{\bar{\tau}_{B' \rightarrow PE}\}_{B'} = \begin{Bmatrix} B'_x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{B'}$	$\{\bar{\tau}_{B' \rightarrow PE}\}_G = \begin{Bmatrix} B'_x & 0 \\ 0 & GB'_z \cdot B'_x \\ 0 & -GB'_y \cdot B'_x \end{Bmatrix}_G$
$\{\bar{\tau}_{C' \rightarrow PE}\}_{C'} = \begin{Bmatrix} C'_x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{C'}$	$\{\bar{\tau}_{C' \rightarrow PE}\}_G = \begin{Bmatrix} C'_x & 0 \\ 0 & GC'_z \cdot C'_x \\ 0 & -GC'_y \cdot C'_x \end{Bmatrix}_G$
$\{\bar{\tau}_{D' \rightarrow PE}\}_{D'} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ D'_y & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{D'}$	$\{\bar{\tau}_{D' \rightarrow PE}\}_G = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ D'_y & 0 \\ 0 & -GD'_x \cdot D'_y \end{Bmatrix}_G$

L'écriture des termes d'accélération conduit finalement à la mise en évidence des torseurs équivalents en B correspondant au frottement sur la génératrice de l'échantillon et en R correspondant au frottement au contact de l'échantillon et du plateau. La relation entre l'enregistrement des mesures sur les capteurs et les conditions de frottement aux interfaces est alors exploitable.

3. Application

3.1 Matériaux utilisés

les matériaux utilisés sont issus du milieu marin et prélevés à la pelle mécanique lors de sorties en mer réalisées par les services de l'Ifremer. Le mélange liquide-solide disponible présente une teneur en eau moyenne de 33,8% qui est conservée dans la suite des travaux. La granulométrie effectuée au granulomètre laser est étendue entre 10^{-4} et 1 mm, figure 3. Les granulats, coquillages, ... sont rejetés de l'analyse. Sur la figure, on distingue un mode principal centré à 100 μm tandis qu'un second se distingue autour de 10 μm . L'identification du comportement mécanique en condition statique révèle un comportement intrinsèque de type Mohr-Coulomb. L'angle de frottement, ϕ , est de 0,54 rad tandis que la cohésion est de 37 kPa.

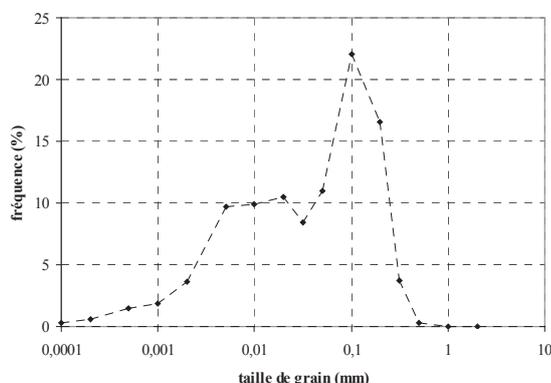


Figure 3 : Courbe granulométrique du matériau étudié.

3.2 Protocoles expérimentaux

Dans le cadre de cette étude, le porte échantillon est équipé d'un chemisage dont la rugosité et la nature du matériau est identique au plateau. Ceci permet d'exploiter les deux torseurs simultanément en couvrant une large gamme de vitesse pour l'identification d'une même loi d'interface. Avant son utilisation, il convient de procéder à l'étalonnage du système. Celui-ci est réalisé de façon statique par application de charges étalons sur le porte échantillon. Cette procédure permet d'identifier les lois de calage de chaque capteur de force. Au cours de la caractérisation, le tassement de l'échantillon est négligé. Le mélange liquide solide est préparé à teneur en eau fixée en utilisant un protocole traditionnel de mouillage. Après une phase de mise au repos pour homogénéiser le mélange, l'échantillon est conditionné dans le porte échantillon et sa masse est imposée. Celui-ci subit une consolidation pendant 3 heures en accord avec la réponse statique du matériau (cisaillement direct). Le chargement de consolidation retenu correspond à un chargement statique équivalent au poids relatif d'un panneau de chalut reposant sur le massif naturel. Au terme de cette période, l'échantillon est pesé et sa hauteur est contrôlée.

L'ensemble porte échantillon et échantillon est placé sur le tribomètre. Les interfaces sont cisailées pour différentes valeurs de chargement normaux appliqués en tête de l'échantillon sans que chaque phase de cisaillement n'excède une durée de quelques secondes (afin de pouvoir négliger l'échauffement des interfaces). Il convient d'enregistrer, néanmoins, au moins une période complète d'oscillation de l'échantillon (notamment pour les très faibles vitesses de rotation).

3.3 Traitement des données

Dans le cadre de ces travaux, on admet que la loi de frottement aux interfaces est de type Mohr-Coulomb. On distingue un paramètre de cohésion, C_d et le paramètre de frottement dynamique, μ_d , à l'image du comportement intrinsèque. Chaque signal enregistré fait l'objet d'une analyse de régression. Le caractère sinusoïdal des réponses est patent. Toutefois, la pulsation du signal modèle est estimée en moyenne et la valeur de l'écart type permet de tester la fiabilité de l'hypothèse d'incompressibilité du mélange considérée pour la modélisation. La présence de déphasages est également imposés par cette hypothèse. Le traitement et l'interprétation des paramètres de frottement sont possibles si pour une vitesse de cisailment identique à l'interface matériau/plateau et pour les différents chargements il correspond une vitesse de cisailment identique à l'interface matériau/porte échantillon. Ce critère est illustré sur l'organigramme du tableau 3 indiquant bien un comportement tribologique de type Mohr-Coulomb.

Tableau 3 : Etapes de traitement des données d'un essai au tribomètre.

1 – Identification de l'intervalle de vitesse linéaire commun aux différents chargements normaux au point de contact R	
2 – Construction du plan de Mohr-Coulomb au point de contact R, pour une condition de vitesse V_i	
<p>Exemple de résultat de type Mohr-Coulomb obtenu.</p>	
3 – Construction du plan de Mohr-Coulomb au point de contact B pour une condition de vitesse V_j	
Test du plan Mohr au point de contact B : Vérification de la condition de vitesse à cette interface et Valeur du R^2	
OUI ?	NON ?

Courbe de frottement VALIDE Modification de la condition Vi (cas de l'illustration) (ETAPE 2)	Abandon de la courbe de frottement Modification de la condition Vi (ETAPE 2)
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------

4. Résultats

La figure 4 synthétise les résultats tribologiques identifiés dans un intervalle de vitesse de cisaillement compris entre 0 et 2 m/s qui correspond à la gamme de vitesse utilisée par des engins de pêche. Les résultats liés au paramètre de frottement sont exprimés en moyenne pour chaque condition de vitesse. Les données disponibles en condition quasi statique (1,5 mm/s) sont obtenues par l'interprétation du torseur équivalent au contact matériau/porte échantillon. L'angle de frottement dans ce cas est de 0,18 rad. L'augmentation de la vitesse entraîne une diminution de l'angle de frottement et nous proposons une modélisation de la forme : $\mu_d = -0,046.V + 0,179$. Le coefficient de régression est de 0,86. Une série d'essais réalisés en condition non consolidée montre la répétabilité des résultats bien que dans ces conditions les valeurs du coefficient de frottement présente logiquement de grandes disparités.

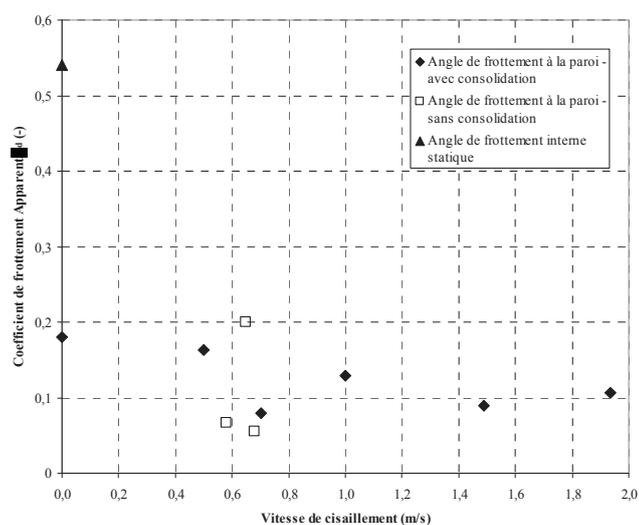


Figure 4 : Evolution de l'angle de frottement dynamique en fonction de la vitesse de cisaillement.

La mesure de la teneur en eau avant et après chaque essai montre une variation moyenne de 26,4%, ce qui suggère la possible création d'un film fluide aux interfaces et les faibles valeurs de l'angle de frottement. Pour compléter ce point de vue, nous avons été amené à suivre les conditions de drainage au cours d'un essai pour la condition de vitesse de cisaillement à 2m/s. Le test de frottement entraîne l'abrasion de l'interface matériau/plateau qui peut conduire à un dépôt sur le plateau. Au cours des phases de cisaillement, pour chaque chargement, celui ci est prélevé pour estimer la variation

de masse de l'échantillon. Celle ci est reliée au chargement normal compte tenu que les durées de cisaillement sont équivalents. Les résultats sont présentés sur la figure 5. Au cours de l'essai, l'évolution du chargement imposé en tête de l'échantillon est monotone et croissant. On remarque que le drainage est permanent durant l'essai même si une valeur asymptotique apparaît assez rapidement, ce qui pourrait confirmer que la loi de frottement proposée est influencée par le drainage du matériau.

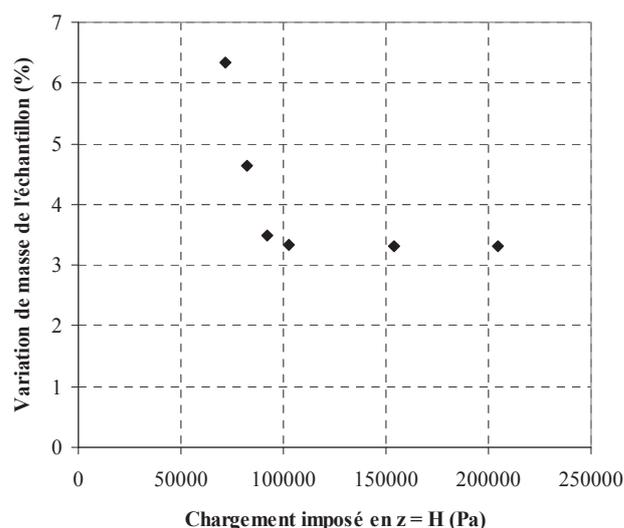


Figure 5 : Estimation de l'aptitude au drainage du mélange liquide/solide au cours d'un test de cisaillement $V = 2\text{m/s}$.

5. Conclusion

Dans cet article nous avons présenté l'étude tribométrique de mélanges sableux vaseux en contact avec une paroi lisse dans le but de simuler le frottement d'éléments stabilisateur des chaluts en contact avec le fond marin. Ces travaux intègrent une problématique d'étude d'impact des engins de pêche sur les fonds marins. A cet effet, un tribomètre a été mis en œuvre et les essais réalisés permettent d'évaluer l'évolution du coefficient de frottement dynamique en fonction de la vitesse frottante. La réalisation d'un test d'aptitude au drainage du matériau laisse penser qu'un problème de lubrification apparaît au cours de la caractérisation et qu'il conviendrait d'étudier plus en détail.

6. Références

- [1] Vincent, B. Mélinge, Y. Laguionie, P. Vuez, A. Lanos, C. *Modélisation des efforts exercés sur un panneau de chalut*. Synthèse de travaux de recherche pour l'ifremer (2006).
- [2] Bureau, L. *Elasticité et rhéologie d'une interface macroscopique : du piégeage au frottement solide*. Thèse de doctorat, Université de Paris VII, Paris, France (2002).