



Laboratoire 3SR, UMR CNRS 5521
1270 rue de la piscine
Domaine Universitaire
38400 SAINT MARTIN D'HERES

DOCUMENT DE SYNTHÈSE

Etude de la réponse de l'interface sol-pieu pour les pieux battus dans la craie

Lettre de commande IREX : LC/18/SOL/69

Rédacteur : Christophe DANO

11 décembre 2019

Ce document constitue la synthèse des essais réalisés au laboratoire 3SR sur le comportement au cisaillement des interfaces craie / acier. Il comporte deux parties :

- Le rapport de stage de Master M2 de M. Timo KOPF
- La présente synthèse, avec un complément par rapport au travail de T. KOPF dans la section 3.4.

1 – CONTEXTE

La construction des fondations d'éoliennes offshore dans la craie se heurte à une méconnaissance partielle du comportement mécanique au cisaillement de l'interface entre l'acier des pieux battus et le massif de craie. En particulier, le possible regain de capacité après battage n'a été que très peu exploré dans ce matériau. Cela constitue un des objectifs de ce travail.

2 - MATERIAU

Le matériau a été prélevé in situ par Fugro au large des côtes françaises, à des profondeurs comprises entre 37m et 50.5m, dans la région du Tréport. Il est constitué de craie, de densité faible à moyenne, de propriétés faibles à très faibles (Grade A2/A3 selon la classification de Lord et al., 2002¹). Les essais réalisés conduisent à une limite de plasticité w_p de 20% (méthode du rouleau) et une limite de liquidité w_L de 26% (méthode au cône).

Pour la réalisation des essais, le matériau naturel a préalablement été séché puis broyé pour ne retenir que la fraction inférieure à 400 μm . Cette fraction est ensuite mélangée à de l'eau déminéralisée, à une teneur en eau de 20%, pour obtenir une pâte plastique sensée reproduire le remaniement de la craie induit par le battage le long du fût du pieu. Dans ces conditions, la cohésion non drainée du matériau, en état de saturation partielle, est comprise entre 65 kPa (essai au scissomètre de laboratoire) et 85 kPa (essai de compression simple). Les essais triaxiaux réalisés sur des éprouvettes saturées, consolidées de manière isotrope et cisillées en conditions drainées, conduisent à un angle de frottement de 32,1 degré et un comportement purement contractant.

Le pieu est simulé par une plaque en acier doux dont la surface est rendue rugueuse (R_{CLA} de l'ordre de 10 μm). Par la suite, on utilise également des plaques en acier inoxydable pour étudier le phénomène de vieillissement de la craie (« *ageing* »).

3 – CAMPAGNE D'ESSAIS DE CISAILLEMENT D'INTERFACE

3.1 – Méthode de reconstitution

Le matériau est reconstitué dans une boîte de cisaillement de section circulaire, de 60mm de diamètre, à une densité sèche de 1,5 g/cm^3 et une teneur en eau initiale de 20%. L'échantillon est ensuite consolidé à des niveaux de contraintes normales comprises entre 30 et 250 kPa. Pendant cette phase de consolidation, l'échantillon est imbibé d'eau déminéralisée pour tendre vers un état de saturation (S_r de l'ordre de 85%). Cette imbibition induit une contractance additionnelle.

L'échantillon est finalement cisailé à une vitesse de 0,1 mm/min.

La campagne expérimentale comprend :

- Des essais de cisaillement d'interface acier doux/craie et acier inoxydable/craie ;
- Des essais après différents temps de consolidation ;
- Des essais à contrainte normale constante (CNL) et à rigidité normale imposée (CNS).

Pour les essais CNS, la rigidité normale choisie est estimée à partir du diamètre prévu pour les pieux et du module de cisaillement du massif de craie.

¹ Lord J., Clayton C.R. & Mortimore R.N. (2002). Engineering in chalk. CIRIA

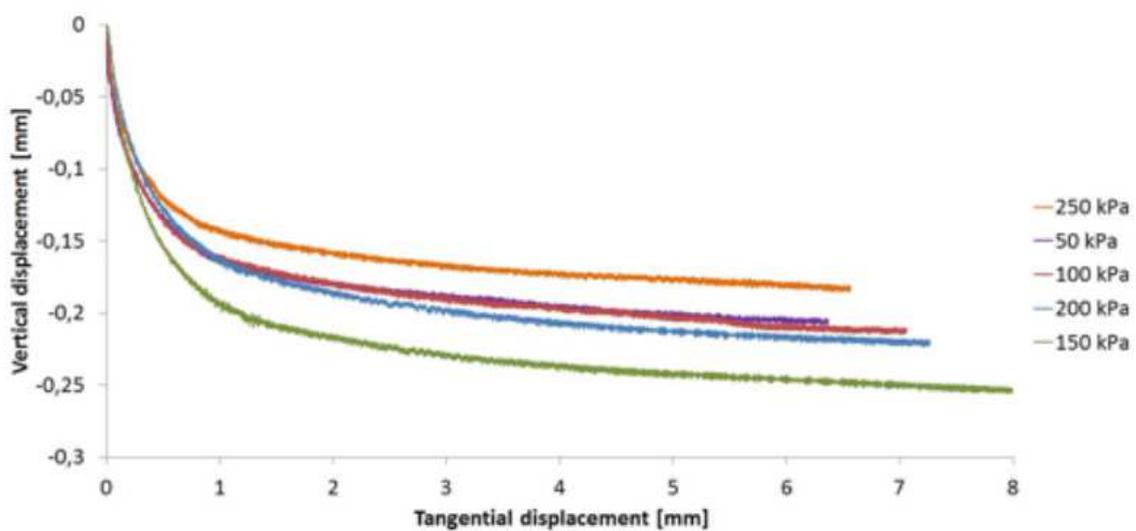
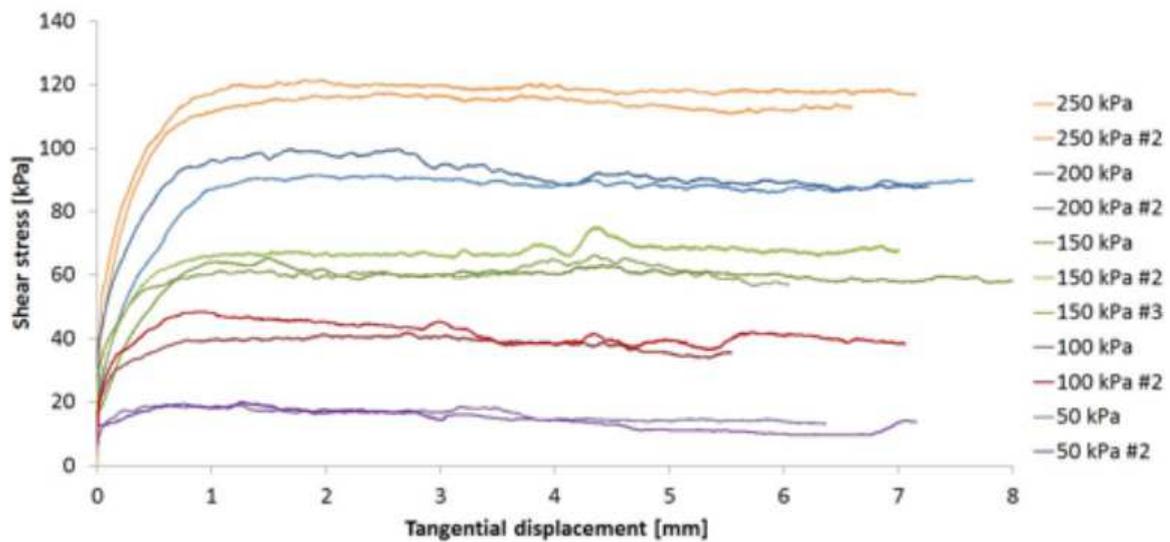
3.2 – Essais CNL d'interface acier doux/craie sans « ageing »

Une première série d'essais CNL sur des interfaces acier doux/craie, pour lesquels le cisaillement démarre dès la fin de la consolidation, est réalisée. Les résultats montrent une évolution monotone de la contrainte de cisaillement jusqu'à un palier et un comportement volumique contractant.

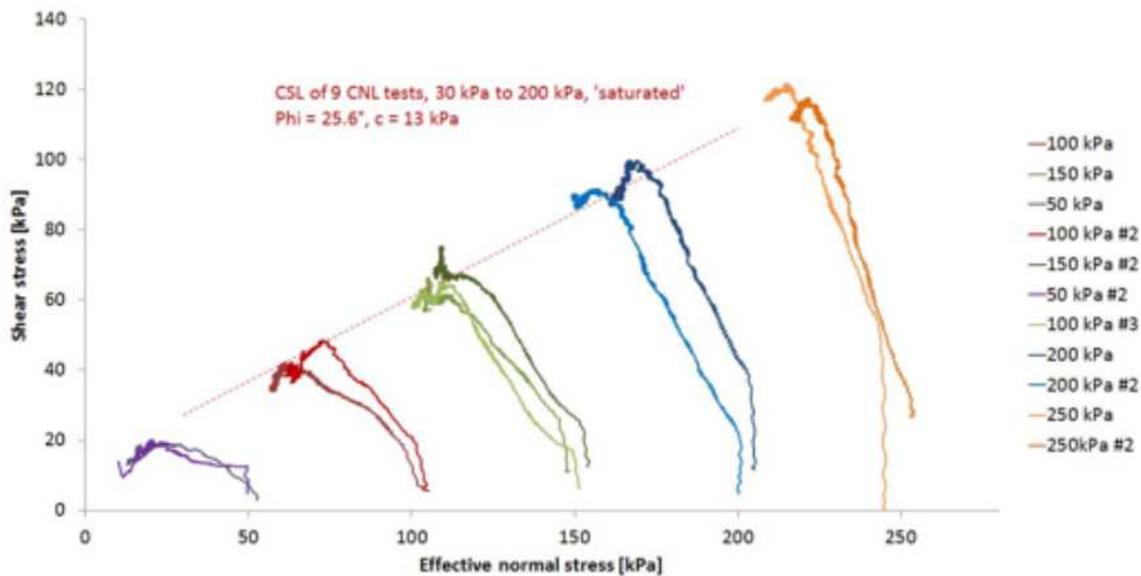
On en déduit un angle de frottement d'interface de 25,6 degrés et une cohésion apparente de 13 kPa.

3.3 – Essais CNS d'interface acier doux/craie sans « ageing »

Pour cette seconde série d'essais, la rigidité normale imposée est de 200 kPa/mm et différents niveaux de contrainte normale initiale sont appliqués. Les essais sont répétés. Les résultats sont présentés ci-dessous.

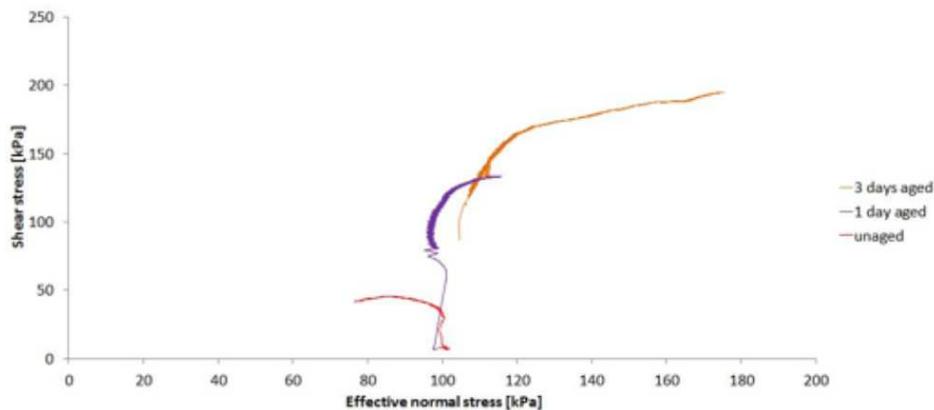


Dans le plan de Mohr, ces essais rejoignent l'enveloppe de Mohr-Coulomb identifiée à partir des essais CNL.



3.4 – Essais CNS d'interface acier doux/craie avec différents temps de consolidation

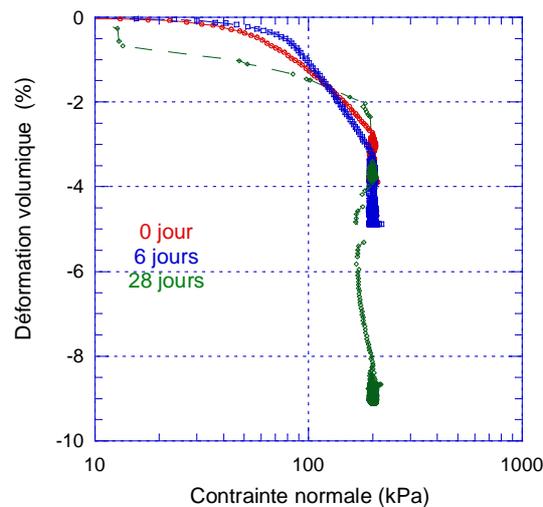
Dans cette série d'essais, 3 échantillons sont reconstitués en condition partiellement saturée (pas d'imbibition en cours de consolidation) et cisailés après 0 jour, 1 jour et 3 jours en condition CNS. On observe une évolution radicalement différente du comportement : de contractant pour l'essai à 0 jour à dilatant pour les essais à 1 et 3 jours, avec une augmentation de la résistance au cisaillement avec le temps de consolidation. Ceci est dû au développement de la corrosion de la plaque en acier doux et à la génération d'une cimentation entre la craie et la plaque en acier doux. Le cisaillement ne se produit plus à l'interface sol – structure mais est rejeté dans la craie.



3.4 – Essais CNS d'interface acier inoxydable/craie avec « ageing »

Il a fallu séparer l'effet de la corrosion entre la structure et le sol et l'effet du vieillissement du matériau (regain de capacité). Pour cela, la plaque en acier doux a été remplacée par une plaque en acier inoxydable. Trois essais à 0 jour, 6 jours et 28 jours ont ainsi été réalisés en conditions CNS (200 kPa/mm) et imbibée sous une contrainte de consolidation initiale de 200 kPa.

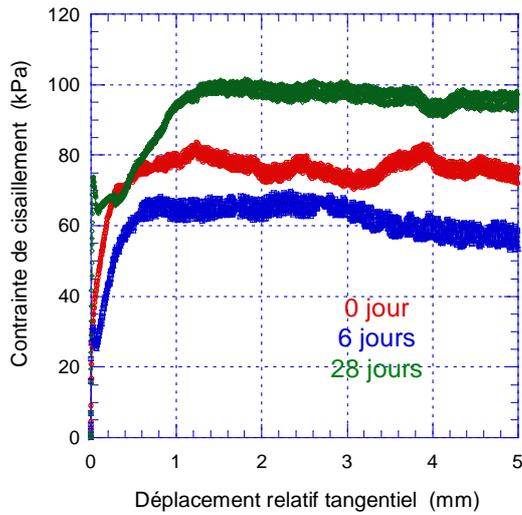
Les figures suivantes reprennent les résultats présentés dans le rapport de T. Kopf. Cependant, les données sont corrigées de manière à ne pas tenir compte de la contrainte de cisaillement initiale à l'issue de la phase de consolidation.



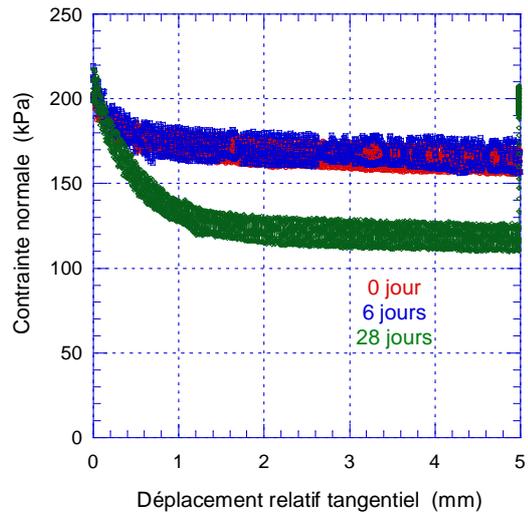
Courbes de consolidation

Les courbes de cisaillement montrent l'apparition d'un pic de contraintes de cisaillement pour un déplacement tangentiel relatif inférieur à 0,2 mm, d'autant plus marqué que le temps de consolidation est long. Ce pic est attribué au phénomène de vieillissement, mais son effet disparaît assez rapidement.

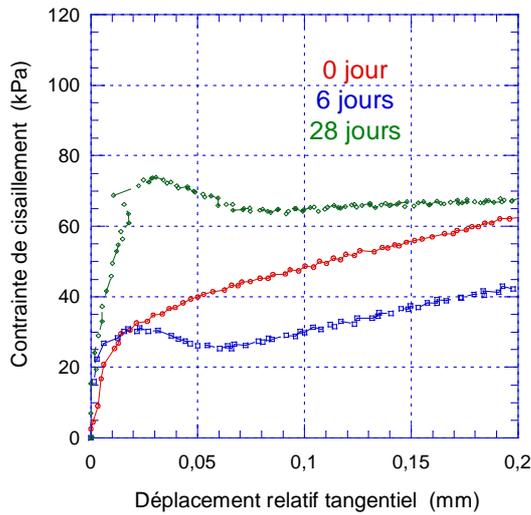
On retrouve par ailleurs systématiquement la nature contractante du comportement, qui se traduit par une diminution de la contrainte normale à l'interface et une diminution de volume en conditions CNS.



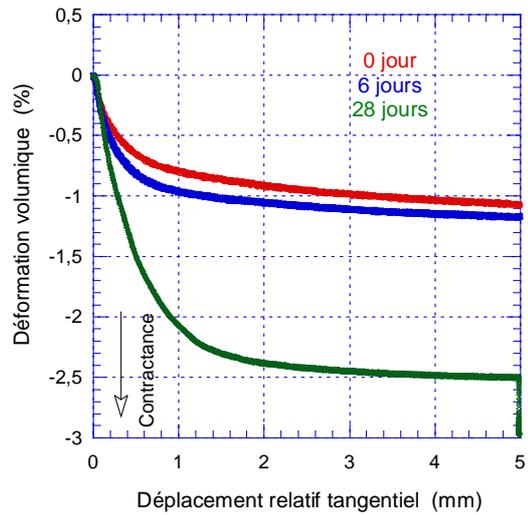
Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel relatif



Contrainte normale en fonction du déplacement tangentiel relatif



Zoom sur les 0,2 premiers millimètres



Déformation volumique en fonction du déplacement tangentiel relatif

3 – PERSPECTIVES

Ce travail va se poursuivre avec la réalisation d'essais monotones de répétabilité et d'essais de cisaillement cycliques, en collaboration avec l'Université de Lille afin de calibrer un modèle t-z cyclique.