



**UNIVERSITÉ EL HADJ LAKHDAR DE BATNA  
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL**

**Thèse**

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA RÉSISTANCE AU  
CISAILLEMENT À L'INTERFACE SOL COHÉRENT-  
MATÉRIAU SOLIDE DANS LE DOMAINE DES GRANDS  
DÉPLACEMENTS**

**Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat d'État en Génie Civil**

**Option : Mécanique des sols**

**par Farid HAMMOUD**

Diplôme d'Ingénieur en Constructions Civiles et Industrielles (Université de Constantine)

Mphil en Géotechnique (Université de Sheffield, Angleterre)

Soutenue le 25 Novembre 2006 devant le jury, composée de MM.

Président	S. BENMEBAREK	Professeur	(U. de Biskra)
Rapporteur	A. BOUMEKIK	Professeur	(U. de Constantine)
Examineur	M. HAMAMI	Professeur	(U. de Skikda)
Examineur	L. MOKRANI	Maître de conférence	(U. de Sétif)
Examineur	K. ABECHÉ	Maître de conférence	(U. de Batna)

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

*In the name of Allah the Most Gracious the Most Merciful*

*Au nom d'Allah le plus clément et miséricordieux*

---

أَفَمَنْ أَسَّسَ بِنِيَانِهِ عَلَىٰ تَقْوَىٰ مِنَ اللَّهِ وَرِضْوَانٍ خَيْرٌ أَمْ مَنْ أَسَّسَ بِنِيَانِهِ عَلَىٰ شِيفَا جُرْفٍ هَارٍ  
فَانهَارَ بِهِ فِي نَارِ جَهَنَّمَ وَاللَّهُ لَا يَهْدِي الْقَوْمَ الظَّالِمِينَ

*Which then is best ? he who founded his building on piety to Allah and  
His good pleasure ? or he who lays his foundation on an undermined  
sand-cliff ready to collapse ? and it does collapse with him into the fire of hell.  
And God guide not people who do wrong*

*Lequel est plus méritant ? Est-ce celui qui a fondé son édifice sur la piété et  
l'agrément d'Allah, ou bien celui qui a placé les assises de sa construction sur  
le bord d'une falaise croulante et qui croula avec lui dans le feu de l'Enfer ?  
Et Allah ne guide pas les gens injustes*

# AVANT PROPOS

---

Tout d'abord, louange à Allah pour son aide dans l'accomplissement de ce travail.

La direction de cette thèse a été assurée par Monsieur A. BOUMKIK, Professeur à l'université de Constantine, que je remercie d'avoir accepté de diriger ce travail, pour ses précieux conseils et encouragements pour mener à bien ce travail.

Le travail expérimental de cette thèse a été conduit au Laboratoire de Géomécanique, Ouvrages et Environnement (LAEGO) de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Institut Nationale Polytechnique de Lorraine (INPL) de Nancy (France). Dans ce cadre, je remercie vivement la responsable du Laboratoire, le personnel ainsi que les techniciens du laboratoire avec lesquels j'ai eu l'occasion de travailler.

Mes remerciements vont aussi à MM. S. BENMEBAREK, M. HAMAMI, L. MOKRANI et K. ABECHÉ d'avoir accepté d'examiner ce travail. Qu'ils sachent que j'ai été honoré par leur présence en tant que membres du jury, et qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Je voudrais remercier également mes collègues du département de génie civil, de l'université de Batna, pour leur soutien et encouragement.

Enfin, j'adresse ma plus profonde gratitude à mon épouse pour avoir supportée au quotidien les contraintes professionnelles imposées par cette thèse, pour ses encouragements continus et pour tous les sacrifices qu'elle a consentis tout le long de ce travail et particulièrement durant mes séjours à l'étranger. A elle particulièrement, à mes enfants, Amina, Alaa, Youssouf et Yaakoub et mes parents, je dédie ce travail.

# RÉSUMÉ

---

L'interaction des sols avec les matériaux solides constitue un des nombreux problèmes d'interface existant dans la pratique du génie civil. Pour certains ouvrages, tels que les pieux, le frottement latéral le long des fûts est de plus contrôlé par la résistance au cisaillement à l'interface sol-pieu en grands déplacements. L'objectif principal de ce travail, est d'étudier le comportement à l'interface sol cohérent – matériau solide dans le domaine des grandes déformations.

Pour atteindre cet objectif, quatre types de sols cohérents ont servi de support aux études expérimentales, pour réaliser une série d'essais de cisaillement annulaire au moyen de l'appareil de Bromhead, qui permet de simuler de grands déplacements le long d'une surface de rupture. Les essais ont été conduits pour déterminer la résistance au cisaillement sol-sol et la résistance à l'interface sol-matériau solide. Des interfaces d'acier inoxydable et de béton ayant différentes rugosités de surface, dont les profils de rugosités ont été mesurés au moyen d'un profilomètre laser, ont été utilisées. Une analyse microstructurale réalisée au microscope électronique à balayage a permis de mettre en évidence la nature de la texture induite par le cisaillement pour les échantillons pré-cisaillés ayant subis des déformations importantes.

Les résultats obtenus indiquent que le comportement à l'interface sol-matériaux solides varie selon la rugosité de surface. Trois modes de cisaillement peuvent avoir lieu, en cisaillement lent ou rapide : un cisaillement à l'interface, un cisaillement au sein du sol et finalement un cisaillement simultané à l'interface et au sein du sol. La microanalyse effectuée confirme l'existence de ces trois modes.

Concernant l'effet du pré-cisaillement en grand déplacement, les résultats de cette étude suggèrent que quand il s'agit d'un cisaillement sol-sol, on peut avoir soit un effet neutre soit un effet positif. Dans le cas d'un cisaillement sol-acier, trois types d'effets peuvent avoir lieu : négatif (perte de résistance), positif (gain de résistance) et neutre (même résistance).

**Mots clés :** sols cohérents, argiles, résistance résiduelle, appareil de cisaillement annulaire, rugosité de surface, interface, essai de laboratoire, interaction sol-structure, microstructure, grands déplacements

# ABSTRACT

---

The interaction between soils and solid materials is one of the main problems encountered in civil engineering practice. For structures, such as piles, the lateral friction along the shaft is governed by the shearing resistance at the pile soil interface, mobilised at large displacement. The main objective of this work, is to study the behaviour at the interface cohesive soil – solid material for large displacements.

In order to attain this goal, a series of ring shear tests, using four types of cohesive soils, have been carried out by means of the Bromhead apparatus, which allows simulating large displacements along a failure surface. The tests were conducted to determine the soil-soil shearing resistance and that mobilised at the soil-solid material interface. Stainless steel and concrete interfaces of different roughness surfaces, whose profiles have been measured by a laser profilometer, have been used. A microstructural study, using the scanning electron microscope, was able to highlight the shear induced fabric for presheared samples sheared to large displacements.

The results obtained indicate that the behaviour at the soil-solid materials interface vary according to the surface roughness. Three modes of interface shearing are likely to take place, for slow or rapid shearing: shearing at the interface, shearing within the soil and a simultaneous shearing at the interface and within the soil. The microanalysis performed confirmed the existence of these three modes.

Regarding pre-shearing effect for large displacements, the results of this study suggest that for soil-soil shearing, there is either a neutral or a positive effect. For soil-steel shearing, three types of effects are likely to take place: negative (loss of strength), positive (gain of strength) and neutral (same resistance)

**Key words :** cohesive soils, clays, residual strength, ring shear apparatus, surface roughness, interface, laboratory test, soil-structure interaction, microstructure, large displacements.

يعد التفاعل ما بين التربة و المواد الصلبة من بين المشاكل العديدة المتعلقة بالسطح البيئي في تطبيقات الهندسة المدنية. بالنسبة لبعض المنشآت كالأوتاد فإن الاحتكاك الجانبي المتواجد على طول الجذع تتحكم فيه أيضا مقاومة القص على السطح البيئي تربة - وتد في حالة حدوث تشوهات كبيرة. إن الهدف الأساسي لهذا البحث هو دراسة السلوكيات المتعلقة بالسطح البيئي تربة متماسكة-مادة صلبة في حالة حدوث إزاحة مهمة.

ولتحقيق هذا الهدف تم اجراء مجموعة من اختبارات القص الحلقي مستعملين أربعة أنواع من الأتربة المتماسكة وذلك بواسطة جهاز برومهاد الذي بإمكانه تصنع إزاحات مهمة على طول سطح انهييار. لقد تم اجراء الإختبارات لتحديد مقاومة القص تربة- تربة والمقاومة عند السطح البيئي تربة- مادة صلبة وقد تم استعمال مواد الفولاذ الغير قابل للتأكسد والخرسانة وقد تم قياس خشونتيهما بواسطة جهاز قياس المقطع عن طريق الليزر. كما مكنت دراسة مجهرية بواسطة مجهر إلكتروني ماسح لتحديد طبيعة البنية المترتبة عن عملية القص في مجال الإزاحات المهمة بالنسبة للعينات المسبقة القص.

أثبتت النتائج المتحصل عليها أن السلوكيات عند السطح البيئي تربة- مواد صلبة تتغير حسب خشونة السطح. ويمكن لثلاث طرق قص أن تحدث ، خلال قص بطيئ أو سريع : قص على مستوى السطح البيئي ، قص داخل التربة وأخيرا قص على مستوى السطح البيئي وداخل التربة في آن واحد. وقد أثبت التحليل المجهرى المنجز حدوث هذه الطرق الثلاث.

أما بالنسبة لتأثير القص المسبق في حالة حدوث إزاحة مهمة، فمن خلال نتائج هذه الدراسة، يمكن افتراض أن هناك إما تأثير حيادي أو ايجابي بالنسبة لقص تربة- تربة. أما في حالة حدوث قص تربة- فولاذ يمكن لثلاثة تأثيرات أن تحدث: سلبي (خسارة المقاومة)، ايجابي (ربح المقاومة) وحيادي (نفس المقاومة).

**الكلمات المفتاحية:** تربة متماسكة، طين، مقاومة متبقية، جهاز القص الحلقي، خشونة سطح، سطح بيئي، تجربة مخبر، تفاعل تربة-إنشاء، بنية مجهرية، إزاحة مهمة.

# LISTE DES FIGURES

---

Figure	Titre
1.1	Schématisation d'une interface
1.2	Exemples de problèmes d'interface sol-structure
2.1	Courbes typiques contrainte de cisaillement – déformation et enveloppes de rupture résiduelle et de pic
2.2	Principe de l'essai de cisaillement alterné
2.3	Appareil de cisaillement annulaire IC/NGI
2.4	Principe de l'essai de cisaillement annulaire
2.5	Comparaison de résultats d'essais de cisaillement annulaire sur l'argile de Gault obtenus dans les appareils IC/NGI et Bromhead (d'après Hutchinson et al, 1980)
2.6	Essais de cisaillement annulaires sur des mélanges sable – bentonite (d'après Lupini et al, 1981)
2.7	(a) Variation du coefficient de frottement résiduel en fonction de la contrainte normale effective ; (b) Enveloppe de rupture résiduelle (d'après Hawkins & Privett, 1985)
2.8	Effet de la vitesse rapide sur la résistance résiduelle (d'après Lemos et al, 1985)
2.9	Enveloppes de rupture résiduelle déterminées à partir de boîte de cisaillement de 60 et 100 mm et l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead (d'après Hawkins & Privett, 1985)
2.10	Corrélation entre la résistance résiduelle et l'indice de plasticité (d'après Lupini et al, 1981)
2.11	Corrélation entre la résistance résiduelle et la fraction argileuse (d'après Lupini et al, 1981)
2.12	Variation de l'angle de frottement interne résiduel en fonction de (a) l'indice de plasticité ; (b) la fraction argileuse (d'après Hawkins & Privett, 1985)
3.1	Développement des surfaces de cisaillement autour des pieux (d'après Parry & Swain, 1977)
3.2	Déformation du sol au voisinage d'un pieu (d'après Chandler & Martins, 1983)
3.3	Principe de l'essai de cisaillement direct modifié
3.4	Principe de l'essai de cisaillement simple
3.5	Principe de l'essai de cisaillement annulaire par torsion
3.6	Schéma de principe de l'essai de cisaillement simple annulaire (ACSA)
3.7	Résistance résiduelle en fonction de la rugosité d'interface (d'après Lemos & Vaughan, 2000)
4.1	Définition du paramètre de rugosité $R_a$
4.2	Définition des paramètres de $R_e$ , $R_f$ et $R_{max}$
4.3	Définition de la rugosité normalisée $R_n$
4.4	Détermination de $D_{moy}$
4.5	Schéma d'un profilomètre classique à stylet
4.6	Schéma du profilomètre 3D vidéo laser à capteur optique
4.7	Profilomètre 3D vidéo laser à capteur optique
4.8	Interface en acier IA4
4.9	Interface en acier IA3

- 4.10 Interface en acier IA2
- 4.11 Interface en acier IA1
- 4.12 Moule pour la préparation des anneaux de micro béton
- 4.13 Interfaces de microbéton
- 4.14 Relation entre  $R$  et  $D_{moy}$
- 4.15 Profils de surfaces d'acier typiques
- 4.16 Profils de surfaces de microbéton typiques
  
- 5.1 Appareil de Bromhead utilisé dans cette étude
- 5.2 Vue de côté de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead
- 5.3 Vue en plan de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead
- 5.4 Influence de la distribution des contraintes sur la valeur de  $\phi'$  déterminée à partir d'essais de cisaillement annulaire (d'après Bishop et al, 1971)
- 5.5 Placement du sol à l'intérieur du volume annulaire
- 5.6 Position des anneaux dynamométriques par rapport au bras de torsion
- 5.7 Courbe de tassement typique pour le limon de Xeuilley
- 5.8 Echelle du domaine de mouvement (d'après Varnes, 1978)
- 5.9 Dispositif expérimental
- 5.10 Courbes granulométriques des sols utilisés
- 5.11 Anneau d'origine en bronze
- 5.12 Portion d'échantillon de kaolin, à la fin d'un essai d'un essai standard (grossissement 25X)
- 5.13 Anneau en acier fixé au plateau de chargement
  
- 6.1 Structure formée après le cisaillement
- 6.2 Comparaison des courbes obtenues pour trois essais en cisaillement lent
- 6.3 Comparaison des résultats obtenus pour deux courbes en cisaillement rapide
  
- 7.1 Principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage
- 7.2 Exemples d'échantillons de limon de Xeuilley obtenus
- 7.3 Types d'échantillons à observer au microscope électronique à balayage
- 7.4 Aspect général d'une surface de cisaillement (Essai XIOCL ; Echantillon de type H – 30X)
- 7.5 Détails de la surface de cisaillement (Essai XIOCL ; Echantillon H – (1) 30X, (2) 1000X, (3) 3000X)
- 7.6 Section à travers X représentant l'aspect général de toute l'épaisseur de l'échantillon (Essai XIOCL ; Echantillon V – 30X)
- 7.7 Détails au sommet de l'échantillon (Essai XIOCL ; Echantillons V – (1) 300X, (2) 3000X)
- 7.8 Détails à la base de l'échantillon (Essai XIOCL ; Echantillons V – (1) 300X, (2) 3000X)
- 7.9 Surface de cisaillement (Essai XIA4CL ; Echantillon H – (1) 30X, (2) 1000X, (3) 3000X)
- 7.10 Section à travers X représentant l'aspect général de toute l'épaisseur de l'échantillon (Essai XIA4CL ; Echantillon V – 30X)
- 7.11 Détails au sommet de l'échantillon (1) et à la base (2) (Essai XIA4CL ; Echantillons V – (1) 1000X, (2) 1000X)
- 7.12 Détails au sommet de l'échantillon (1) et à la base (2) (Essai XIA4CL ; Echantillons V – (1) 3000X, (2) 3000X)
- 7.13 Surface de cisaillement au sein du sol (Essai XIA3CL ; Echantillon H – 30X)
- 7.14 Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai XIA3CL ; Echantillon V – 35X)

- 7.15 Surface de cisaillement à l'interface sol-acier (Essai XIA2CL ; Echantillon H – 22X)
- 7.16 Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai XIA2CL ; Echantillon V – 30X)
- 7.17 Texture au sommet de l'échantillon (1) et au milieu (2) (Essai XIA2CL ; Echantillons V – (1) 3000X, (2) 3000X)
- 7.18 Surface de glissement (Essai XIA1CL ; Echantillon H – 30X)
- 7.19 Surface de glissement et cavité (Essai XIA1CL ; Echantillon H 600X)
- 7.20 Section à travers une surface de glissement (XIA1CL ; Echantillon V - Photo inférieure 300X ; Photo supérieure 1800X)
- 7.21 Aspect général d'une surface striée (Essai XKIO ; Echantillon H – 22X)
- 7.22 Photo montrant le phénomène de rotation des grains (Essai XKIO ; Echantillon H – 1500X)
- 7.23 (1) Détail d'une zone striée ; (2) Arrangement des plaquettes d'argile (Essai XKIO ; Echantillon H – (1) 1000X, (2) 3000X)
- 7.24 Aspect général d'une section verticale à travers XK (Essai XKIOCL ; Echantillon V – 40X)
- 7.25 (1) Texture du sol adjacent à la surface de rupture ; (2) Texture du sol situé dans la partie inférieure de l'échantillon (Essai XKIOCL ; Echantillon V – (1) 1000X, (2) 1000X)
- 7.26 Aspect général d'une section verticale à travers XK (Essai XKIA4CL ; Echantillon V – 30X)
- 7.27 Détails au sommet de l'échantillon (1) et à la base (2) (Essai XKIA4CL ; Echantillons V – (1) 1000X, (2) 1000X)
- 7.28 Empreintes dues aux aspérités de l'anneau d'acier
- 7.29 Surface de cisaillement (Essai XKI3CL ; Echantillon H – (1) 30X, (2) 1000X, (3) 3000X)
- 7.30 Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai XKIA2CL ; Echantillon V – 30X)
- 7.31 Détails au sommet de l'échantillon (1) et à la base (2) (Essai XKIA3CL ; Echantillons V – (1) 1000X, (2) 1000X)
- 7.32 Aspect d'une surface intensivement striée (Essai XKIA3CL ; Echantillons H –30X)
- 7.33 Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai XKIA2CL ; Echantillon V – 40X)
- 7.34 Surface de glissement (Essai XKIA1CL ; Echantillon H – 30X)
- 7.35 Texture au dessous de la surface de glissement (Essai XKIA1CL ; Echantillon H – (1) 300X, (2) 1000X, (3) 3000X)
- 7.36 Surface de glissement (Essai XKIA1CL ; Echantillon H – (1) 300X, (2) 1000X, (3) 4000X)
- 7.37 Texture au sommet (1), au milieu (2) et à la base (3) de l'échantillon (Essai XKIA1CL ; Echantillon V – (1) 3000X, (2) 3000X, (3) 3000X)
- 7.38 Aspect général d'une section à travers le kaolin (Essai KIOCL ; Echantillon V – 40X)
- 7.39 (1) Texture du sol au niveau de la partie supérieure ; (2) Texture du sol situé dans la partie inférieure de l'échantillon (Essai KIOCL ; Echantillon V – (1) 3000X, (2) 3000X)
- 7.40 Aspect général d'une section verticale à travers le kaolin (Essai KIA4CL ; Echantillon V – 60X)
- 7.41 (1) Structure orientée sous forme de zigzag ; (2) Détail d'une telle structure (Essai KIA4CL ; Echantillon V – (1) 600X, (2) 3000X)
- 7.42 (1) Structure au delà de la zone de cisaillement ; (2) Détail d'une telle structure (Essai KIA4CL ; Echantillon V – (1) 1000X, (2) 3000X)
- 7.43 Aspect général d'une section verticale à travers le kaolin (Essai KIA3CL ; Echantillon V – 40X)
- 7.44 Détails au sommet de l'échantillon (1) et à la base (2) (Essai KIA3CL ; Echantillons V – (1) 1000X, (2) 1000X)
- 7.45 Détails au sommet de l'échantillon (1) et à la base (2) (Essai KIA3CL ; Echantillons V – (1) 3000X, (2) 3000X)

- 7.46 Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai KIA2CL ; Echantillon V – 35X)
- 7.47 Texture au sommet de l'échantillon (Essai KIA2CL ; Echantillon V – 3000X)
- 7.48 (1) Aspect d'une surface de glissement ; (2) Détail d'une telle surface (Essai KIA1CL ; Echantillons H – (1) 35X, (2) 3000X)
- 7.49 Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai KIA1CL ; Echantillon V – 50X)
- 7.50 Texture au sommet de l'échantillon (Essai KIA1CL ; Echantillon V – 3000X)
  
- 8.1 Courbes coefficient de frottement- déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel pour les essais sol-sol
- 8.2 Corrélation entre l'indice de plasticité et l'angle de frottement Résiduel
- 8.3 Corrélation entre la limite de liquidité et l'angle de frottement résiduel
- 8.4 Corrélation entre le pourcentage d'argile et l'angle de frottement résiduel
- 8.5 Effet du pourcentage d'argile sur les conditions au pic et résiduel
- 8.6 Variation de  $\varphi_p'$  en fonction du pourcentage de montmorillonite
- 8.7 Variation de  $\varphi_r'$  en fonction du pourcentage de montmorillonite
- 8.8 Courbes coefficient de frottement – déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel pour les essais sol-sol correspondant à des échantillons pré-cisaillés
- 8.9(a) Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas du limon de Xeuilley dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-acier
- 8.9(b) Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas du limon de Xeuilley dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-béton
- 8.10(a) Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas du mélange limon de Xeuilley-kaolin dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-acier
- 8.10(b) Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas du mélange limon de Xeuilley-kaolin dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-béton
- 8.11(a) Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas du kaolin dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-acier
- 8.11(b) Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas du kaolin dans le cas cisaillement sol-sol et sol-béton
- 8.12(a) Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas de la bentonite dans le cas cisaillement sol-sol et sol-acier
- 8.12 (b) Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas de la bentonite dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-béton
- 8.13 Relations entre  $\tau/\sigma_n'$  et  $R_a$  ; (a) au pic ; (b) résiduel
- 8.14 Relations entre  $\tau/\sigma_n'$  et  $D_{moy}$  ; (a) au pic ; (b) résiduel
- 8.15 Relations entre  $\delta'/\varphi'$  et  $R$  ; (a) au pic ; (b) résiduel
  
- 8.16 Section à travers X représentant l'aspect général de la partie supérieure de l'échantillon (Essai XIA4(a) ; Echantillon V – 100X)
- 8.17 Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas d'échantillons de limon de Xeuilley pré-cisaillés (cisaillement sol-sol et sol-acier)
- 8.18 Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical –

- déplacement tangentiel obtenues dans le cas d'échantillons de limon de Xeuilley-kaolin pré-cisaillés (cisaillement sol-sol et sol-acier )
- 8.19 Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas d'échantillons de kaolin pré-cisaillés (cisaillement sol-sol et sol-acier )
  - 8.20 Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas d'échantillons de bentonite pré-cisaillés (cisaillement sol-sol et sol-acier )
  - 8.21 Relations entre  $\tau/\sigma_n'$  et  $R_a$  pour la deuxième phase de cisaillement ; (a) au pic ; (b) résiduel
  - 8.22 Relations entre  $\tau/\sigma_n'$  et  $D_{moy}$  pour la deuxième phase de cisaillement lent ; (a) au pic ; (b) résiduel
  - 8.23 Variation de  $\delta_r/\varphi'_r$  en fonction de  $R$  pour les échantillons pré-cisaillés
  - 8.24 Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues en cisaillement rapide sol-sol
  - 8.25 Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas d'échantillons de limon de Xeuilley en cisaillement rapide d'interface sol-acier
  - 8.26 Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas d'échantillons du mélange limon de Xeuilley-kaolin en cisaillement rapide d'interface sol-acier
  - 8.27 Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas d'échantillons de kaolin en cisaillement rapide d'interface sol-acier
  - 8.28 Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas d'échantillons de bentonite en cisaillement rapide d'interface sol-acier
  - 8.29 Relation entre  $\tau/\sigma_n$  et  $R_a$  pour la phase de cisaillement rapide
  - 8.30 Relations entre  $\tau/\sigma_n'$  et  $D_{moy}$  pour la phase de cisaillement rapide
  - 8.31 Relation entre  $\delta'/\varphi'$  et  $R$  pour la phase de cisaillement rapide
  - 8.32 Surface de cisaillement au sein du sol (Essai XIA4CR ; Echantillon H – 60X)
  - 8.33 Aspect général à travers une partie de l'épaisseur (Essai XIA4CR(a) ; Echantillon V – 100X)
  - 8.34 Texture au sommet de l'échantillon (1) et au milieu (2) (Essai XIA4CR(a) ; Echantillons V – (1) 3000X, (2) 3000X)
- A.1.a Résultats de l'essai XIO
  - A.1.b Résultats de l'essai XIOCR
  - A.1.c Résultats de l'essai XIOCL
  - A.2.a Résultats de l'essai XIA4
  - A.2.b Résultats de l'essai XIA4CR
  - A.2.c Résultats de l'essai XIA4CL
  - A.3.a Résultats de l'essai XIA3
  - A.3.b Résultats de l'essai XIA3CR
  - A.3.c Résultats de l'essai XIA3CL
  - A.4.a Résultats de l'essai XIA2
  - A.4.b Résultats de l'essai XIA2CR
  - A.4.c Résultats de l'essai XIA2CL
  - A.5.a Résultats de l'essai XIA1
  - A.5.b Résultats de l'essai XIA1CR
  - A.5.c Résultats de l'essai XIA1CL
  - A.6 Résultats de l'essai XIB2

- A.7 Résultats de l'essai XIB1
- A.8.a Résultats de l'essai XKIO
- A.8.b Résultats de l'essai XKIOCR
- A.8.c Résultats de l'essai XKIOCL
- A.9.a Résultats de l'essai XKIA4
- A.9.b Résultats de l'essai XKIA4CR
- A.9.c Résultats de l'essai XKIA4C
- A.10.a Résultats de l'essai XKIA3
- A.10.b Résultats de l'essai XKIA3CR
- A.10.c Résultats de l'essai XKIA3CL
- A.11.a Résultats de l'essai XKIA2
- A.11.b Résultats de l'essai XKIA2CR
- A.11.c Résultats de l'essai XKIA2CL
- A.12.a Résultats de l'essai XKIA1
- A.12.b Résultats de l'essai XKIA1CR
- A.12.c Résultats de l'essai XKIA1CL
- A.13 Résultats de l'essai XKIB2
- A.14 Résultats de l'essai XKIB1
- A.15.a Résultats de l'essai KIO
- A.15.b Résultats de l'essai KIOCR
- A.15.c Résultats de l'essai KIOCL
- A.16.a Résultats de l'essai KIA4
- A.16.b Résultats de l'essai KIA4CR
- A.16.c Résultats de l'essai KIA4CL
- A.17.a Résultats de l'essai KIA3
- A.17.b Résultats de l'essai KIA3CR
- A.17.c Résultats de l'essai KIA3CL
- A.18.a Résultats de l'essai KIA2
- A.18.b Résultats de l'essai KIA2CR
- A.18.c Résultats de l'essai KIA2CL
- A.19.a Résultats de l'essai KIA1
- A.19.b Résultats de l'essai KIA1CR
- A.19.c Résultats de l'essai KIA1CL
- A.20 Résultats de l'essai KIB2
- A.21 Résultats de l'essai KIB1
- A.22.a Résultats de l'essai BIO
- A.22.b Résultats de l'essai BIOCR
- A.22.c Résultats de l'essai BIOCL
- A.23.a Résultats de l'essai BIA4
- A.23.b Résultats de l'essai BIA4CR
- A.23.c Résultats de l'essai BIA4CL
- A.24.a Résultats de l'essai BIA3
- A.24.b Résultats de l'essai BIA3CR
- A.24.c Résultats de l'essai BIA3CL
- A.25.a Résultats de l'essai BIA2
- A.25.b Résultats de l'essai BIA2CR
- A.25.c Résultats de l'essai BIA2CL
- A.26.a Résultats de l'essai BIA1
- A.26.b Résultats de l'essai BIA1CR
- A.26.c Résultats de l'essai BIA1CL
- A.27 Résultats de l'essai BIB2
- A.28 Résultats de l'essai BIB1

# LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau	Titre
4.1	Propriétés du microbéton
4.2	Valeurs de $R_a$ et $R_{max}$ des anneaux utilisés
4.3	Valeurs de $R$
5.1	Equations pour $\phi'$ obtenus à partir d'essais de cisaillement annulaires pour différentes hypothèses de distributions des contraintes (d'après Bishop et al, 1971)
5.2	Dimensions des particules de kaolinite et de montmorillonite
5.3	Caractéristiques physiques des sols utilisés
5.4	Valeurs de bleu de méthylène des sols étudiés
5.5	Résumé des essais conduits sur limon de Xeuilley
5.6	Résumé des essais conduits sur le mélange limon de Xeuilley-Kaolin
5.7	Résumé des essais conduits sur le kaolin
5.8	Résumé des essais conduits sur la bentonite
6.1	Résumé des résultats des essais réalisés sur le limon de Xeuilley lors du cisaillement lent initial
6.2	Résumé des résultats des essais réalisés sur le limon de Xeuilley lors du cisaillement rapide
6.3	Résumé des résultats des essais réalisés sur le limon de Xeuilley lors du deuxième cisaillement lent
6.4	Résumé des résultats des essais réalisés sur le mélange limon de Xeuilley-kaolin lors du cisaillement lent initial
6.5	Résumé des résultats des essais réalisés sur le mélange limon de Xeuilley-kaolin lors du cisaillement rapide
6.6	Résumé des résultats des essais réalisés sur le mélange limon de Xeuilley-kaolin lors du deuxième cisaillement lent
6.7	Résumé des résultats des essais réalisés sur le kaolin lors du cisaillement lent initial
6.8	Résumé des résultats des essais réalisés sur le kaolin lors du cisaillement rapide
6.9	Résumé des résultats des essais réalisés sur le kaolin lors du deuxième cisaillement lent
6.10	Résumé des résultats des essais réalisés sur la bentonite lors du cisaillement lent initial
6.11	Résumé des résultats des essais réalisés sur la bentonite lors du cisaillement rapide
6.12	Résumé des résultats des essais réalisés sur la bentonite lors du deuxième cisaillement lent
6.13	Résumé des résultats obtenus pour trois essais
8.1	Résumé des résultats des essais de cisaillement sol-sol
8.2	Résumé des résultats des essais de cisaillement sol-sol pour des échantillons pré-cisaillés
8.3	Comparaison des valeurs de $\phi_p'$ obtenues avant et après pré-cisaillement
8.4	Comparaison des valeurs de $\phi_r'$ obtenues avant et après pré-cisaillement
8.5	Comparaison des résultats avant et après pré-cisaillement pour X

- 8.6 Comparaison des résultats avant et après pré-cisaillement pour XK
- 8.7 Comparaison des résultats avant et après pré-cisaillement pour K
- 8.8 Comparaison des résultats avant et après pré-cisaillement pour B
- 8.9 Indices de fragilité pour la première phase de cisaillement lent
- 8.10 Indices de fragilité pour la deuxième phase de cisaillement lent
- 8.11 Comparaison entre les coefficients de frottement résiduel en cisaillement lent et rapide
- 8.12 Comparaison entre les coefficients de frottement résiduel en cisaillement d'interface lent et rapide pour le limon de Xeuilley
- 8.13 Comparaison entre les coefficients de frottement résiduel en cisaillement d'interface lent et rapide pour le mélange limon de Xeuilley-kaolin
- 8.14 Comparaison entre les coefficients de frottement résiduel en cisaillement d'interface lent et rapide pour le kaolin
- 8.15 Comparaison entre les coefficients de frottement résiduel en cisaillement d'interface lent et rapide pour la bentonite

# PRINCIPALES NOTATIONS

---

## Lettres latines

$a$	Rayon moyen de l'échantillon annulaire (torique)
$AA$	Arithmetical Average
$c'$	Cohésion effective
$c'_p$	Cohésion effective de pic
$c'_r$	Cohésion effective résiduelle
$c_u$	Cohésion non drainée
$CLA$	Centre Line Average
$D$	Diamètre des particules
$D_{moy}$	Diamètre moyen des particules du sol pesé
$D_{50}$	Diamètre de particule pour laquelle 50% des particules sont plus petits en poids
$e_g$	Indice des vides granulaire
$F_A, F_B$	Forces sur les anneaux dynamométriques A et B
$I_b$	Indice de fragilité
$I_p$	Indice de plasticité
$L$	Distance entre les axes des anneaux dynamométriques
$L_a$	Longueur d'analyse
$K_s$	Coefficient de la pression des terres active à l'interface sol-pieu
$MSV$	Valeur quadratique moyenne ou Mean Square Value
$P$	Charge verticale totale sur l'échantillon
$R$	Rugosité relative
$R_a$	Rugosité arithmétique moyenne
$R_e$	Pic maximal
$R_f$	Creux minimal
$R_{max}$	Rugosité définie comme la hauteur entre le plus haut pic et le plus bas creux
$R_n$	Rugosité normalisée
$R_q$	Rugosité quadratique moyenne
$R_p$	Indice de rugosité du profil
$R_\phi$	Résistance au cisaillement relative
$r_1, r_2$	Rayons interne et externe de l'échantillon annulaire
$t$	Epaisseur des particules

$t_f$	Temps de rupture
$T$	Couple de torsion transmis à travers l'échantillon
$Z_2$	RMS de la dérivée première du profil $Z_2$

## Lettres grecques

$\alpha$	Facteur d'adhésion
$\beta$	Facteur empirique de Burland
$\Delta_h$	Déplacement relatif tangentiel ou horizontal
$\Delta_{hp}$	Déplacement horizontal nécessaire pour atteindre le pic
$\Delta_{hr}$	Déplacement horizontal nécessaire pour atteindre l'état résiduel
$\Delta_v$	Déplacement relatif normal ou vertical
$\delta'$	Angle de frottement effective
$\delta_p'$	Angle de frottement de pic à l'interface
$\delta_r'$	Angle de frottement résiduel à l'interface
$\sigma'_n$	Contrainte normale effective
$\sigma'_v$	Contrainte verticale effective
$\tau$	Contrainte de cisaillement
$\tau_p$	Contrainte de cisaillement de pic
$\tau_r$	Contrainte de cisaillement résiduelle
$\tau_p / \sigma'_n$	Coefficient de frottement maximum ou de pic
$\tau_r / \sigma'_n$	Coefficient de frottement résiduel
$\phi$	Angle de frottement interne
$\phi_{CV}$	Angle de frottement interne mobilisé à volume constant
$\phi'_d$	Angle de frottement interne remanié
$\phi'_p$	Angle de frottement interne maximum ou au pic
$\phi'_r$	Angle de frottement interne résiduel

# TABLE DES MATIÈRES

---

AVANT PROPOS . . . . .	3
RÉSUMÉ . . . . .	4
ABSTRACT . . . . .	5
ملخص . . . . .	6
LISTE DES FIGURES . . . . .	7
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	13
PRINCIPALES NOTATIONS . . . . .	15
<b>1 INTRODUCTION GÉNÉRALE . . . . .</b>	<b>20</b>
1.1 Problématique . . . . .	20
1.2 Objectifs de la recherche . . . . .	23
1.3 Plan de la thèse . . . . .	24
<b>2 RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT RÉSIDUELLE DES SOLS COHÉRENTS . . . . .</b>	<b>26</b>
2.1 Introduction . . . . .	26
2.2 Mesure de la résistance résiduelle . . . . .	28
2.3 Mécanisme de rupture résiduelle . . . . .	32
2.4 Facteurs affectant la résistance résiduelle . . . . .	35
2.4.1 Influence de la procédure de préparation des échantillons et de la structure initiale . . . . .	35
2.4.2 Influence de l'amplitude des contraintes normales . . . . .	36
2.4.3 Influence de la vitesse de cisaillement . . . . .	38
2.4.4 Influence du type d'appareil d'essai . . . . .	42
2.4.5 Influence de la minéralogie et de la forme des particules . . . . .	44
2.4.6 Influence des paramètres d'identification . . . . .	45
2.5 Conclusions . . . . .	49
<b>3 RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT A L'INTERFACE . . . . .</b>	<b>51</b>
3.1 Généralités . . . . .	51
3.2 Résistance au cisaillement à l'interface entre deux matériaux de nature différente . . . . .	51
3.3 Résistance au cisaillement à l'interface pieu-sol cohérent . . . . .	52
3.3.1 Méthode des contraintes totales . . . . .	53
3.3.2 Méthodes des contraintes effectives . . . . .	53
3.4 Angle de frottement mobilisé à l'interface sol-pieu . . . . .	54
3.5 Déformation du sol autour des pieux . . . . .	55
3.6 Mesure de la résistance au cisaillement à l'interface au laboratoire . . . . .	57
3.6.1 Essai de cisaillement direct modifié . . . . .	58
3.6.2 Essai de cisaillement direct simple . . . . .	58
3.6.3 Essai de cisaillement annulaire . . . . .	59
3.7 Effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement à l'interface sol-structure . . . . .	61
3.8 Résistance au cisaillement résiduelle à l'interface sol – structure . . . . .	63
3.9 Effet de la vitesse de cisaillement . . . . .	66
3.10 Conclusions . . . . .	66

<b>4</b>	<b>INTERFACES UTILISÉES ET QUANTIFICATION DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE</b>	<b>69</b>
4.1	Introduction	69
4.2	Quantification de la rugosité d'un profil	69
4.3	Méthodes de mesures des profils de rugosité	74
4.4	Principe de mesure de la rugosité avec un profilomètre à capteur laser	76
4.5	Interfaces utilisés	75
	4.5.1 Anneaux d'acier	77
	4.5.2 Anneaux de béton	77
4.6	Echantillonnage	80
4.7	Résultats des mesures de rugosité	80
4.8	Conclusions	83
<b>5</b>	<b>MATERIEL D'ESSAI ET PROCÉDURE EXPERIMENTALE</b>	<b>84</b>
5.1	Introduction	84
5.2	Description de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead et principe de fonctionnement	84
5.3	Préparation de l'échantillon	91
5.4	Procédure expérimentale	94
5.5	Acquisition des données	96
5.6	Matériaux étudiés	97
5.7	Essais sol-sol et d'interface	100
5.8	Programme expérimentale	102
5.9	Conclusions	105
<b>6</b>	<b>RÉSULTATS EXPERIMENTAUX</b>	<b>106</b>
6.1	Introduction	106
6.2	Résultats des essais	107
	6.2.1 Essais sur le limon de Xeuilly	108
	6.2.2 Essais sur le mélange limon de Xeuilly-kaolin	112
	6.2.3 Essais sur le kaolin	116
	6.2.4 Essais sur la bentonite	119
6.3	Répétitivité des essais	122
6.4	Conclusion	125
<b>7</b>	<b>ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE</b>	<b>126</b>
7.1	Introduction	126
7.2	Microscope électronique à balayage	127
7.3	Définition de la texture d'un sol	128
7.4	Préparation des échantillons	128
7.5	Observations au microscope électronique à balayage	131
	7.5.1 Observations effectuées sur le limon de Xeuilly	131
	7.5.1.1 Essai de cisaillement annulaire standard (XIOCL)	131
	7.5.1.2 Essai de cisaillement d'interface	134
	7.5.2 Observations effectuées sur le mélange limon de Xeuilly- kaolin	141
	7.5.2.1 Essai de cisaillement annulaire standard (XKIOCL)	141
	7.5.2.2 Essai de cisaillement d'interface	144
	7.5.3 Observations effectuées sur le kaolin	150
	7.5.3.1 Essai de cisaillement annulaire standard (KIOCL)	151
	7.5.3.2 Essai de cisaillement d'interface	152
7.6	Conclusions	157

<b>8</b>	<b>INTERPRÉTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS</b>	<b>159</b>
<b>8.1</b>	<b>Introduction</b>	159
<b>8.2</b>	<b>Cisaillement sol-sol</b>	159
	8.2.1 Effet du type de sol	159
	8.2.2 Relation entre les angles de frottement, les limites d'Atterberg et la fraction argileuse	163
	8.2.2.1 Relation entre $\varphi_r'$ et $I_p$	163
	8.2.2.2 Relation entre $\varphi_r'$ et $w_L$	164
	8.2.2.3 Relation entre $\varphi_r'$ et la fraction argileuse	165
	8.2.3 Effet du pré-cisaillement	166
<b>8.3</b>	<b>Cisaillement à l'interface sol-matériau solide</b>	170
	8.3.1 Echantillons non pré-cisailés	171
	8.3.2 Mécanismes de cisaillement d'interface pour les sols non pré-cisailés	185
	8.3.3 Effet du pré-cisaillement	187
	8.3.4 Mécanismes de cisaillement d'interface pour les sols pré-cisailés	196
<b>8.4</b>	<b>Discussion sur l'indice de fragilité</b>	198
<b>8.5</b>	<b>Comportement de cisaillement de zones pré-existantes sous chargement rapide</b>	200
<b>8.6</b>	<b>Limitations de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead</b>	211
<b>8.7</b>	<b>Conclusions</b>	212
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>	<b>214</b>
<b>9.1</b>	<b>Conclusions générales</b>	214
<b>9.2</b>	<b>Perspectives de recherche et de développement</b>	217
	<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>220</b>
	<b>ANNEXE</b>	<b>226</b>

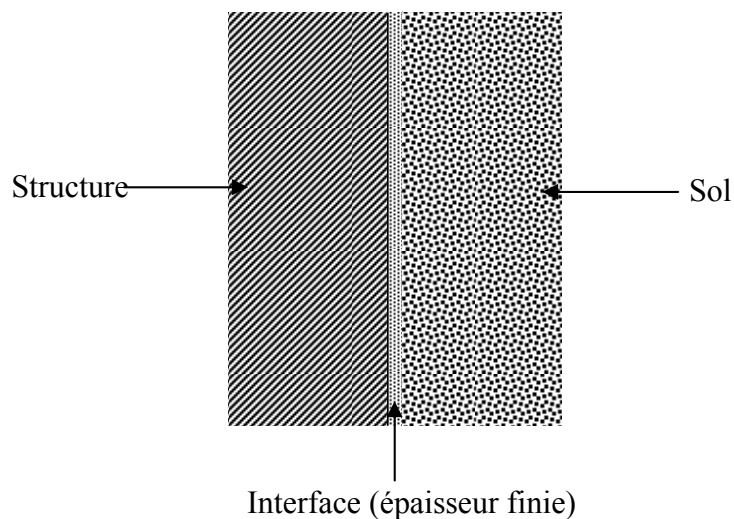
# 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

## 1.1 Problématique

Dans le domaine du génie civil, la plupart des structures peuvent être assimilées à un assemblage de solides déformables en contact. La stabilité d'ensemble de ces structures dépend sensiblement du comportement des surfaces de contact (interfaces). En effet, une grande partie des ruptures observées dans ces structures se produit le long des surfaces de discontinuités.

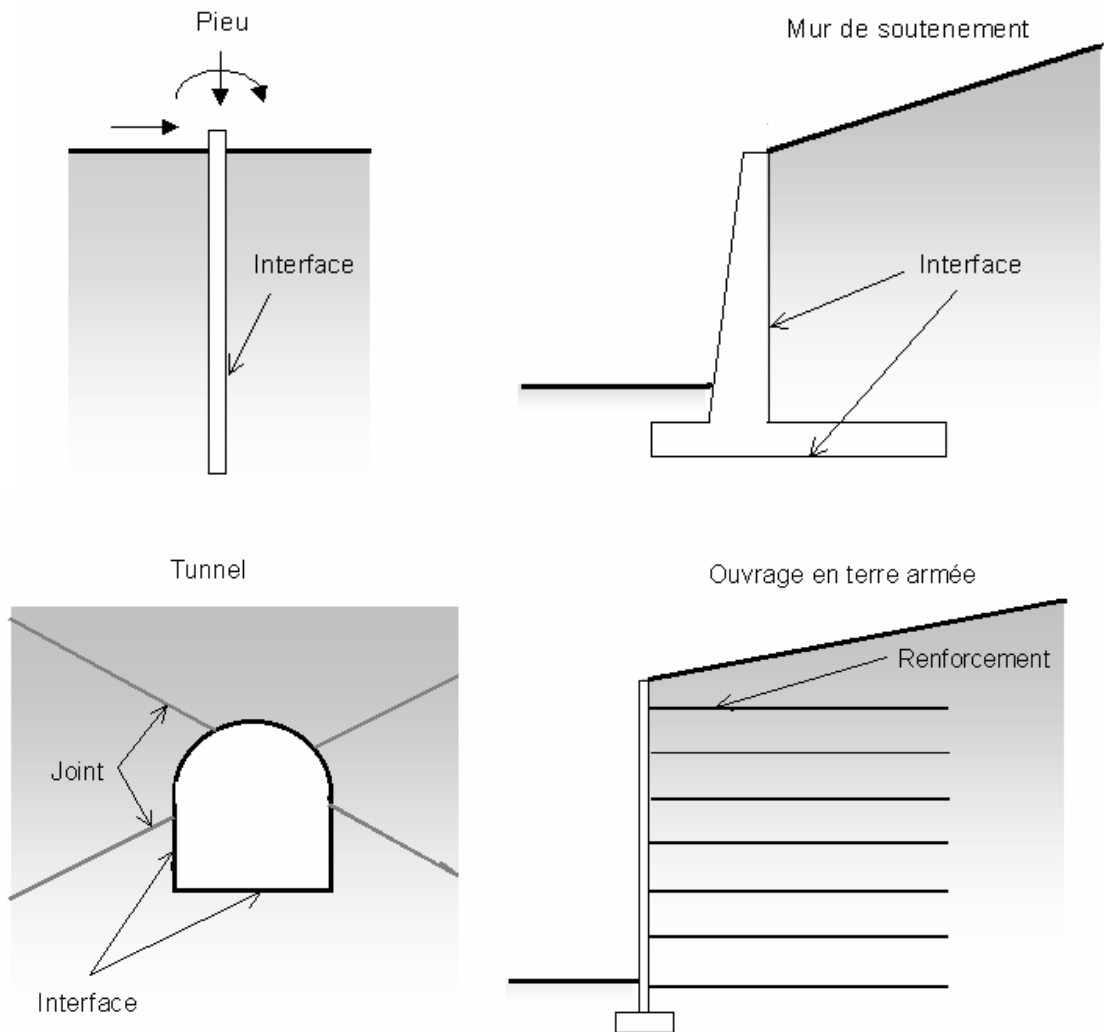
Les interfaces (Figure 1.1) sont des zones de cisaillement intense intéressant une épaisseur finie de matériau. Ils ont la particularité d'être placés à la frontière entre deux milieux, généralement de caractéristiques notablement différentes et dont l'emplacement est connu.



**Figure 1.1** Schématisation d'une interface

Les situations pratiques où le problème d'interface est présent sont nombreuses en géotechnique. Qu'il s'agisse d'un problème de contact entre deux ou plusieurs couches de sol (interface d'un remblai et du sol de fondation, par exemple), ou de contact d'un sol et d'un substratum rocheux, de fissures et de joints dans les masses rocheuses, de contact sol-structure (interface sol-mur de soutènement, sol-pieux ou sol-ouvrages souterrains, par exemple), ou d'un problème de renforcement (terre armée). La figure 1.2 montre certains exemples. Dans ces cas le transfert des charges se fait à travers l'interface et les paramètres de frottement à l'interface sont essentiels, particulièrement, pour l'évaluation de la stabilité des

ouvrages.



**Figure 1.2** Exemples de problèmes d'interface sol-structure

Dans certains problèmes pratiques la stabilité est contrôlée par la résistance au cisaillement du sol dans le domaine des grands déplacements. Dans le cas des pieux en particulier, l'évaluation du frottement le long des fûts implique la détermination de la résistance au cisaillement à l'interface sol-pieu à des vitesses de cisaillement modérées et importantes (Potts, Dounia & Vaughan, 1990; Jardine & Christoulas, 1991; Bond & Jardine, 1995). En effet quand un pieu est installé puis soumis à un chargement axial, une contrainte

de cisaillement est imposée au sol le long du fût. De ce fait une déformation du sol a lieu et un plan de cisaillement se développe dans le sol situé à proximité du pieu, au moment de la rupture. Du moment qu'un remaniement important est susceptible de se produire durant l'installation et le chargement ultérieur, le comportement du pieu à la rupture dépend de la résistance et des propriétés de déformation du sol adjacent au pieu dans le cas de déplacements relatifs importants. La résistance au cisaillement à l'interface, dans le domaine des grands déplacements, devient alors une donnée nécessaire à toute étude.

La résistance au cisaillement entre sols fins et surfaces solides dépend des conditions de sa mobilisation, c'est à dire en condition drainée ou non drainée. En conséquence, il y'a deux approches pour évaluer la résistance à l'interface. La première est la méthode des contraintes totales ou de la résistance non drainée, dans laquelle la résistance à l'interface est reliée à la résistance au cisaillement non drainée par un facteur d'adhésion empirique,  $\alpha$ . Dans la deuxième approche, connue par la méthode des contraintes effectives, la résistance à l'interface est reliée à la contrainte normale effective ( $\sigma'_n$ ) agissant sur l'interface et l'angle de frottement effectif ( $\delta'$ ). Dans le cas des pieux, la déformation de cisaillement se produit au sein d'une zone relativement mince autour du fût du pieu. Le drainage à partir de cette zone étroite a lieu rapidement durant le chargement. De ce fait, dans la plupart des cas de chargement des pieux, on tend à être en condition drainée. La résistance à l'interface ( $\tau$ ) dans cette approche est exprimée par :

$$\tau = \sigma'_n \operatorname{tg} \delta'$$

Il y'a plusieurs suggestions dans la littérature concernant l'angle de frottement à l'interface  $\delta'$  mobilisé à ou près de l'interface pieu – sol. Bond & Jardine (1991) ont assumé qu'il est approprié d'utiliser l'angle de frottement interne résiduel  $\varphi_r'$ . Cependant, du moment que  $\varphi_r'$  est susceptible d'être affecté par la rugosité d'interface et les conditions de cisaillement, il paraît plus approprié de prendre en compte l'angle de frottement résiduel à l'interface sol-matériau solide  $\delta'_r$  obtenu dans le domaine des grands déplacements (Tika-Vassilikos et. al., 1992).

La résistance à l'interface sol-structure peu être différente de celle du sol lui-même. Elle dépend du matériau d'interface, de sa dureté et de sa rugosité ainsi que des propriétés du sol telles que la composition minéralogique, la granulométrie et la forme des particules du sol, l'amplitude de la contrainte normale et de la vitesse de cisaillement. En somme, elle dépend en même temps à des facteurs reliés à l'interface et au sol. Dans le cas des pieux, le matériau d'interface est dur, étant constitué essentiellement d'acier et de béton.

## 1.2 Objectifs de la recherche

Dans le cas de l'étude du cisaillement à l'interface entre les sables et des surfaces solides, la littérature est relativement abondante. Ce qui n'est pas le cas concernant les argiles, et a eu pour résultat moins d'études sur les mécanismes impliqués dans le cisaillement à l'interface dans les argiles. De plus les études concernant le domaine des grands déplacements sont encore plus rares et n'ont jamais fait l'objet, à notre connaissance, d'études approfondies. Les études précédentes concernant le frottement entre le sol et les matériaux de construction ont été conduites par l'intermédiaire d'appareils de cisaillement direct permettant un déplacement limité dans une direction. L'utilisation de l'appareil de cisaillement annulaire a été conçue pour pallier certaines difficultés rencontrées avec l'appareil de cisaillement direct. L'échantillon peut être soumis au cisaillement à travers un déplacement illimité, continuellement, sans avoir à stopper et changer la direction du cisaillement. Il permet également d'assurer une bonne homogénéité des conditions mécaniques de l'essai sur toute la surface de contact sol-structure. De ce fait, cette étude à caractère expérimental porte sur le cisaillement à l'interface matériau solide-sol cohérent pour des déplacements importants en utilisant l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead. Un certain nombre de facteurs pouvant affecter l'interaction sol – pieu, particulièrement le type de sol, la minéralogie, la rugosité de surface, le matériau constituant l'interface, l'effet du pré-cisaillement et la vitesse de cisaillement, sont examinés.

Les facteurs susceptibles d'affecter la mobilisation de l'angle de frottement interne résiduel dans l'appareil de cisaillement annulaire peuvent avoir la même influence sur la mobilisation de la résistance à l'interface sol – pieu, en particulier concernant l'angle de frottement à l'interface sol – pieu et le mode de rupture susceptible d'être observé.

Les résultats de séries d'essais de cisaillement en grands déplacements entre des sols cohérents et des matériaux solides de différentes rugosités sont présentés. Quatre types de sol, représentant des sols se comportant selon différents modes de cisaillement résiduel postulés par Lupini et al (1981), à savoir le kaolin, la bentonite, le limon de Xeuilley et un mélange limon de Xeuilley – kaolin, ont servi de support aux études expérimentales. Les matériaux solides considérés sont l'acier et le béton. Des essais de cisaillement annulaire standard impliquant un cisaillement sol-sol ont été également conduits en plus des essais d'interface.

Pour conduire une étude significative sur les mécanismes fondamentaux susceptibles de contrôler le cisaillement à l'interface, il est nécessaire tout d'abord de caractériser les matériaux impliqués. Pour les milieux constitués de particules tels que les sols, la caractérisation peut s'effectuer à travers une série d'essais d'identification au laboratoire. Pour un matériau solide d'interface, une évaluation quantitative de la rugosité de surface est

nécessaire. Dans les applications géotechniques, la rugosité de surface doit être définie en terme d'échelle de longueur prédominante des particules de sol à l'interface. En conséquence, les mesures de la rugosité ont été effectuées au moyen d'un profilomètre laser, pour déterminer les paramètres de rugosité.

L'étude s'est attachée premièrement d'indiquer une vue réaliste du mécanisme de cisaillement d'interface entre sols cohérents et surfaces solides au delà d'une large région de déformation par cisaillement du pré-pic au post-pic jusqu'à l'établissement des conditions résiduelles. Ensuite, l'angle de frottement à l'interface, actif sera clarifié sur la base des résultats d'essais de cisaillement annulaire d'interface en insistant particulièrement sur l'effet de la rugosité de surface et comparé avec l'angle de frottement interne correspondant. Du moment que deux types de matériaux d'interface ont été considérés, en l'occurrence l'acier et le béton, l'effet du type de matériau d'interface est également considéré

Les essais ont été réalisés en trois phases. La première phase consiste à appliquer une vitesse de cisaillement de 0,0356 mm/mn jusqu'à l'établissement des conditions résiduelles. La deuxième phase concerne l'application d'une vitesse relativement importante de 44,52 mm/mn (soit une augmentation de 1250 fois) pour des déplacements très importants. Après stabilisation, on effectue la troisième phase, dans laquelle la vitesse initiale est ré-établie. Ce qui a permis également d'étudier l'effet du pré-cisaillement sur la résistance au cisaillement lent et d'autre part considérer également le comportement de sols pré-cisaillés. Pour acquérir une meilleure compréhension de la manière avec laquelle la variation de la rugosité de surface affecte la microstructure des sols pré-cisaillés et pour identifier les différences de microstructure ainsi que la nature des surfaces de cisaillement, une microanalyse systématique a été effectuée en utilisant le microscope électronique à balayage.

La présente étude vise globalement à contribuer à la conception de systèmes d'interface plus efficaces en vue d'être utilisés dans les applications géotechniques et permettre entre autres à améliorer la détermination du frottement latéral des pieux.

### **1.3 Plan de la thèse**

Cette thèse comprend neuf chapitres. Du moment que ce travail concerne le comportement d'interface en grand déplacement avec référence au frottement latéral le long des pieux, les Chapitres 2 et 3 sont dédiés à la résistance résiduelle et la résistance à l'interface sol – matériau solide, dans lesquelles est présentée une étude bibliographique qui donne un aperçu sur les connaissances actuelles concernant ces deux thèmes. Le chapitre 2 comprend la définition de la résistance résiduelle et les mécanismes de la rupture progressive qui conduisent à son développement. Une revue des principaux facteurs ayant une influence

sur la résistance au cisaillement est aussi donnée dans ce chapitre. Le troisième chapitre est consacré à la résistance au cisaillement d'interface, avec une attention particulière à celle mobilisée à l'interface pieu – sol cohérent. Les propositions concernant l'angle de frottement mobilisé à l'interface ainsi que les déformations susceptibles de se produire sont exposées. Il consiste ensuite en une revue des principaux résultats existants sur la résistance au cisaillement à l'interface sol cohérent-structure, ainsi que l'inventaire des techniques expérimentales utilisées. Le chapitre 4 décrit les moyens d'obtention des interfaces d'acier et de béton et traite les méthodes de quantification des rugosités des surfaces et les paramètres utilisés. Les profils de rugosité obtenus sont également présentés. Le chapitre 5 présente une description de l'appareil de cisaillement annulaire développé par Bromhead (1979). Il présente aussi les caractéristiques des matériaux utilisés dans le programme expérimental. La méthodologie des essais réalisés est aussi décrite. L'ensemble des résultats expérimentaux sont ensuite résumés au Chapitre 6, alors que les courbes coefficient de frottement - déplacement horizontal et déplacement vertical – déplacement horizontal obtenus pour chaque essai sont présentées en annexe. La technique de préparation des échantillons et les observations obtenues à la suite de la microanalyse effectuée au moyen du microscope électronique à balayage sont présentées au Chapitre 7. Les résultats sont alors discutés et analysés au chapitre 8. L'interprétation des résultats fait également appel à un certain nombre d'essais de cisaillement sol-sol. Le Chapitre 9 présente les principales conclusions concernant les résultats obtenus et les analyses faites. Finalement, une liste de suggestions est également discutée pour ce qui est des expériences futures, que nous estimons utiles.

## 2 RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT RÉSIDUELLE DES SOLS COHÉRENTS

---

### 2.1 Introduction

Le concept de résistance au cisaillement résiduelle, qui a été initialement mis en valeur par le travail de Skemton (1964), a contribué significativement à la compréhension du comportement des sols sujets à d'importants déplacements.

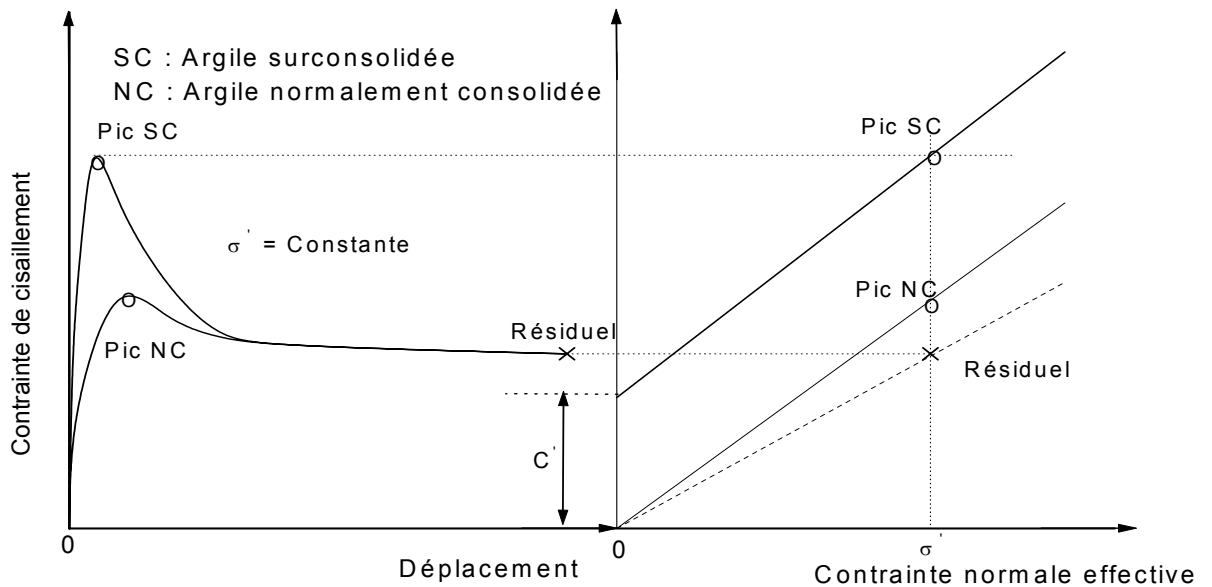
Les résistances au pic et résiduelle peuvent être définies comme suit:

Quand un sol, présentant un comportement fragile, subit un cisaillement dans des conditions drainées, sa résistance augmente progressivement et atteint pour des déplacements relativement faibles, une résistance maximale appelée résistance de pic ou maximum. Les essais de cisaillement au laboratoire sont fréquemment arrêtés une fois ce pic atteint. Cependant, la poursuite du cisaillement entraîne éventuellement une diminution de la résistance au cisaillement pour atteindre une valeur stable qui reste constante même pour des déplacements supplémentaires importants. Cette valeur limite est la résistance au cisaillement résiduelle qui peut être beaucoup plus petite que la résistance au pic. La figure 2.1 montre deux courbes typiques contrainte de cisaillement-déformation dans le cas d'argiles normalement consolidée et surconsolidée, ainsi que les enveloppes de ruptures au pic et résiduelle correspondantes.

Le phénomène décrit précédemment est observé principalement dans les argiles surconsolidées et les sables denses, ainsi que pour les argiles normalement consolidées avec une forte teneur en particules argileuses. Dans le cas des sables lâches et certaines argiles normalement consolidées, les résistances au pic et résiduelle sont généralement les mêmes. La diminution de la résistance au-delà du pic dans les argiles normalement consolidées est due à la rupture des liens entre les particules et leur orientation le long de la surface de rupture. Pour les argiles surconsolidées, elle est associée partiellement à une dilatation et partiellement à une réorientation des particules dans la direction du mouvement. L'angle de frottement interne résiduel correspondant,  $\phi'_r$ , peut être significativement inférieur à l'angle de frottement interne au pic,  $\phi'_p$ , et ce en fonction de la nature, la minéralogie et la teneur en particules argileuses.

Les premiers chercheurs à s'être intéressés à la résistance des argiles ayant fait l'objet d'importantes déformations, sont Tiedeman (1937) et Haefeli (1938, 1939) dans les années

trente. Le terme résistance au cisaillement résiduelle a été initialement introduit par Haefeli (1951) pour désigner le résidu de la résistance au cisaillement dans la courbe contrainte-déformation. Il a le mérite d'avoir insisté sur l'importance pratique de cet aspect de propriété de cisaillement des argiles.



**Figure 2.1** Courbes typiques contrainte de cisaillement – déformation et enveloppes de rupture résiduelle et de pic

L'intérêt portant sur la résistance au cisaillement a été renouvelé par Skempton (1964) en démontrant que la résistance au cisaillement d'un certain nombre de glissements de terrain à la rupture est proche de la résistance résiduelle drainée. Bjerrum (1967) a décrit la résistance résiduelle comme étant la résistance ultime acquise par un échantillon cisailé au-delà de la rupture et conservant une valeur constante pour des déformations supplémentaires. La Gatta (1970) a défini la résistance au cisaillement comme étant la résistance au cisaillement atteinte par un sol après une déformation continue sous un état constant de contraintes effectives et d'indice des vides.

Si les résistances au pic et résiduelle sont représentées graphiquement en fonction de la contrainte effective, comme illustré dans la figure 2.1, ceci indiquerait une relation pratiquement conforme avec la loi de Mohr-Coulomb. Ainsi la résistance au pic peut être exprimée par l'équation:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \operatorname{tg} \phi'_p \quad (2.1)$$

et la résistance résiduelle par l'équation:

$$\tau_r = c'_r + \sigma'_n \operatorname{tg} \phi'_r \quad (2.2)$$

où,

$\sigma'_n$  : contrainte effective normale,

$c'_p$  et  $\phi'_p$  : cohésion effective et angle de frottement interne effective correspondant au pic,

$c'_r$  et  $\phi'_r$  : cohésion effective et angle de frottement interne effective correspondant à l'état résiduelle.

$c'_r$  a une valeur relativement petite qui est généralement prise égale à zéro. En conséquence, l'équation de la résistance au cisaillement devient :

$$\tau_r = \sigma'_n \tan \phi'_r \quad (2.3)$$

La résistance résiduelle drainée des sols cohérents est d'une grande importance en géotechnique particulièrement pour les argiles naturelles dures où la perte de résistance est souvent importante. En pratique certains sols peuvent être sujets à d'importants mouvements ou peuvent contenir des surfaces de cisaillement pré-existantes. Dans de tels cas, il est très important de prendre en considération la résistance résiduelle pour une étude rationnelle de tout projet de construction. Ces conditions peuvent exister également, par exemple, dans les anciens glissements de terrain qui sont susceptibles d'être soumis à des déformations supplémentaires, dans les dépôts de sols contenant des surfaces de cisaillement pré-existantes et à proximité des pieux où, en raison des procédures d'installation, un remaniement important du sol peut avoir lieu. Autrement dit ceci est le cas là où il y'a un risque de rupture progressif du sol.

Skempton (1964) a montré que la résistance résiduelle peut être atteinte dans les talus, particulièrement ceux ayant subis auparavant d'importants mouvements. Concernant les pieux, et particulièrement les pieux battus, certains chercheurs (tels que Randolph & Wroth ; 1981, Bond & Jardine ; 1991, Tika-Vassilikos et al ; 1992, etc.) suggèrent que, en raison de leurs installations, des déformations importantes ont lieu et une surface de cisaillement se développe aux alentours des pieux et par conséquent, lors du chargement ultérieur il est plus approprié de considérer les caractéristiques de cisaillement au niveau du sol où à l'interface entre le sol et le pieu, dans le domaine des grands déplacements.

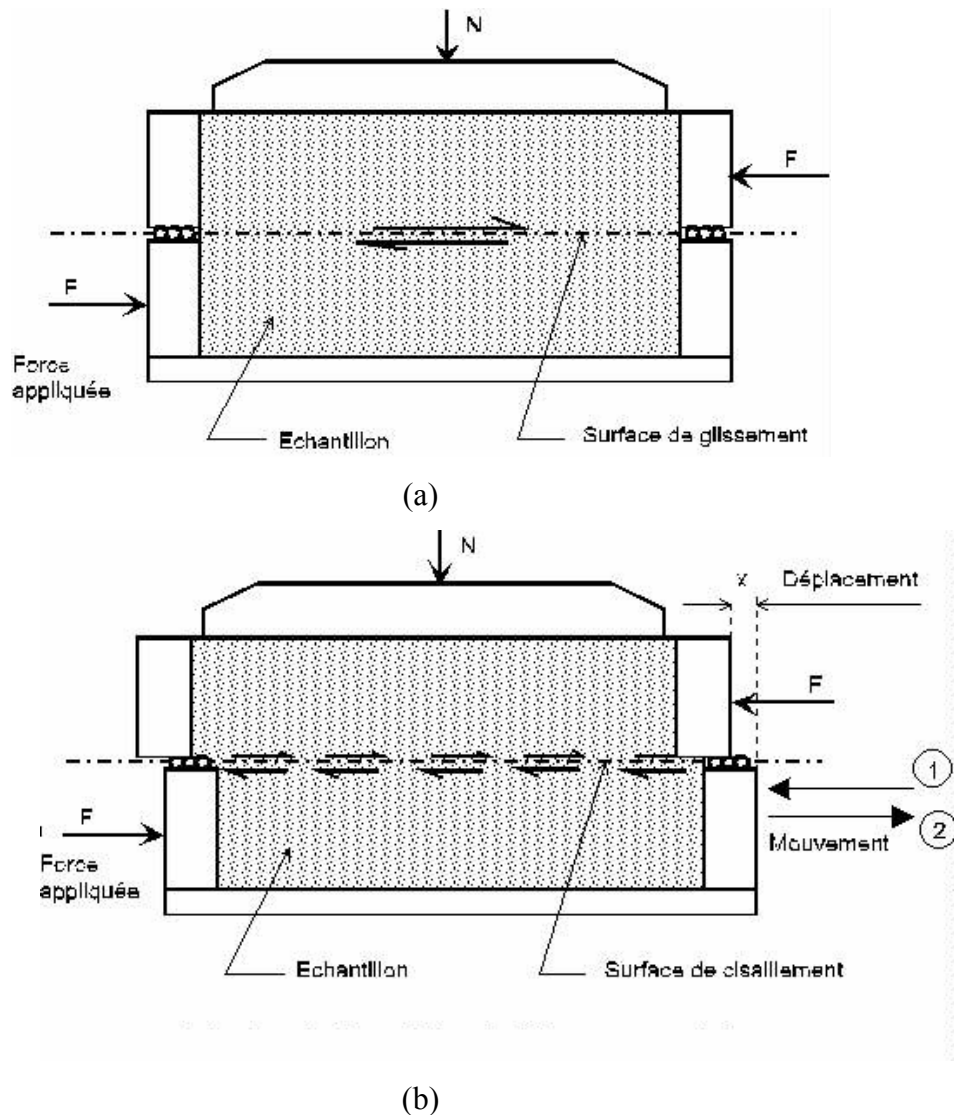
## 2.2 Mesure de la résistance résiduelle

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la détermination de la résistance résiduelle des sols cohérents. Elles peuvent être divisées en deux catégories:

- essais impliquant des échantillons contenant des surfaces de cisaillement naturelles, et
- essais sur des échantillons avec des surfaces de cisaillement pré-découpées.

La première approche comprend l'essai de cisaillement direct et l'essai triaxial drainé. La deuxième approche comprend essentiellement l'essai de cisaillement alterné et l'essai de cisaillement annulaire.

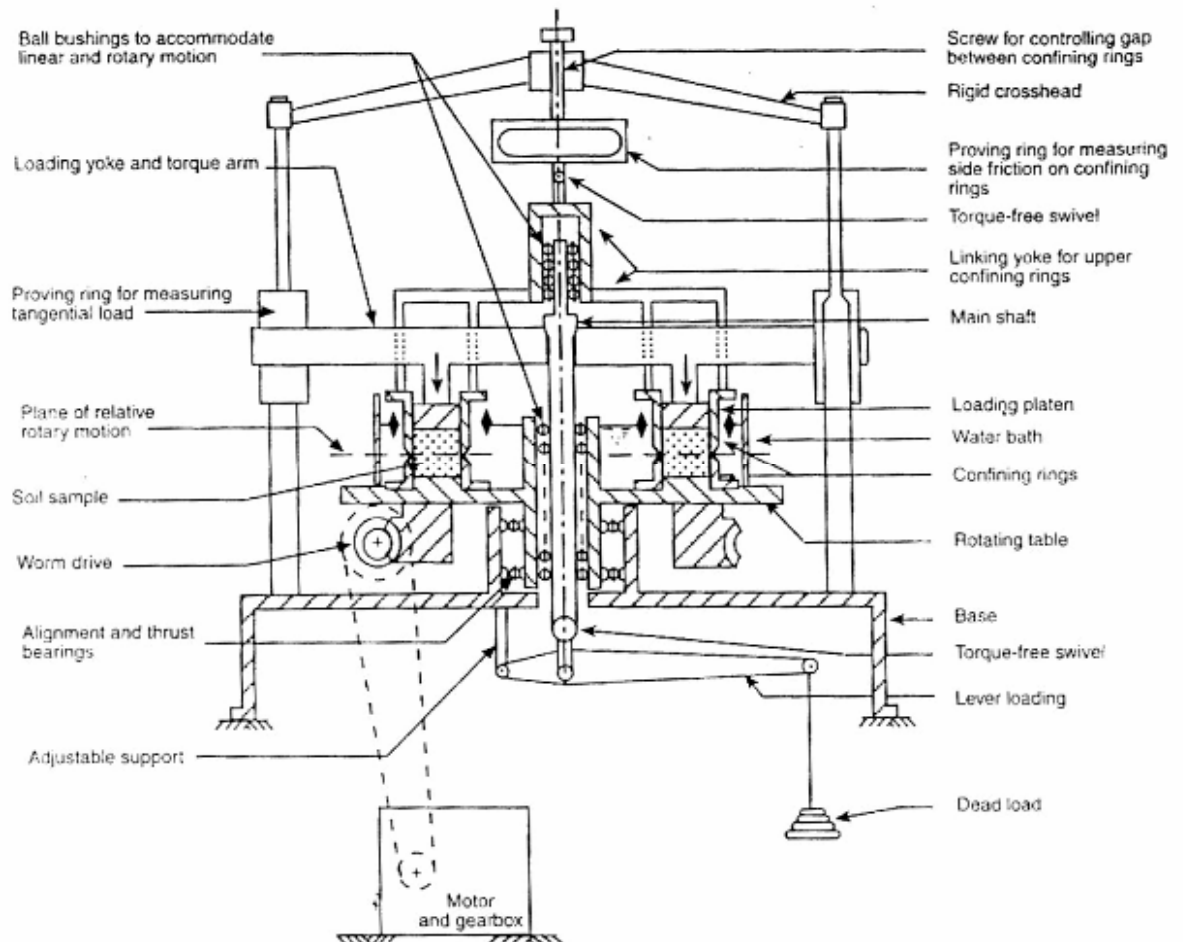
Il est maintenant établi (voir paragraphe 2.4.4) que l'appareil de cisaillement annulaire fournit le meilleur moyen d'étudier la résistance au cisaillement des sols en grands déplacements. Cette machine a été conçue pour surmonter certains problèmes rencontrés avec la boîte de cisaillement alterné dont le principe est illustré dans la Figure 2.2.



**Figure 2.2** Principe de l'essai de cisaillement alterné ; (a) début de l'essai ; (b) durant le déplacement relatif : (1) en avant, (2) en arrière

Dans le cas de cet essai, l'échantillon est placé dans une boîte de type Casagrande, consolidé sous une pression verticale puis soumis à un cisaillement alterné dans un sens puis dans l'autre, autour de sa position initiale. La rupture a lieu le long du plan de séparation entre les demi-boîtes supérieure et inférieure. Le principal inconvénient de cet essai réside dans la

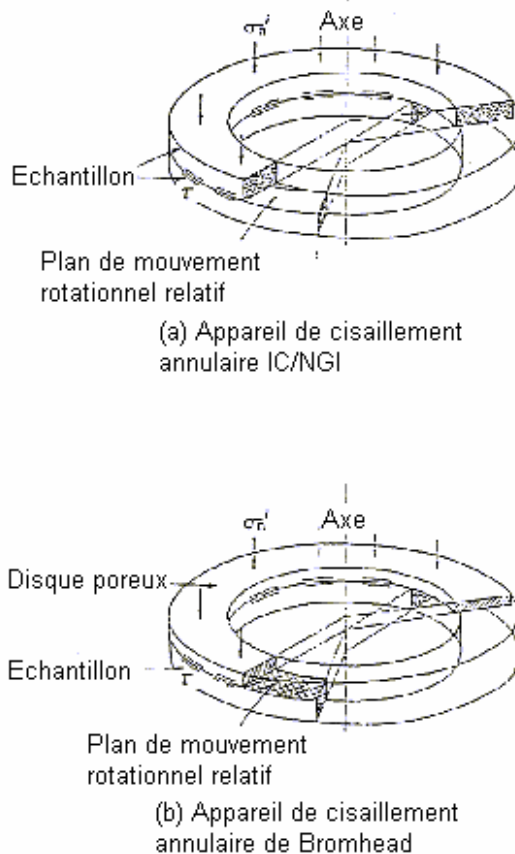
variation de la surface au cours du cisaillement, ce qui entraîne une distribution des contraintes de cisaillement qui n'est pas uniforme. De plus le changement du sens de cisaillement à chaque alternance provoque un ré-arrangement des particules le long de la surface de cisaillement provoquant ainsi un pic secondaire à chaque alternance.



**Figure 2.3** Appareil de cisaillement annulaire IC/NGI

L'appareil de cisaillement annulaire, par contre, permet de faire subir à l'échantillon un cisaillement continu et illimité sur des échantillons toriques sans avoir à stopper et changer la direction du mouvement de cisaillement. Plusieurs appareils ont été développés durant les trente dernières années (Bouček, 1979; La Gatta, 1970; Berche & Blondeau, 1973; Bishop et al, 1971; Bromhead, 1979; Bosdet, 1980). Actuellement les deux appareils les plus utilisés et qui sont disponibles commercialement chez Wykeham Farrance (Angleterre) sont ceux décrits par Bishop et al (1971) et Bromhead (1979). Le premier, connu sous le nom de l'appareil IC/NGI (Figure 2.3), a été développé conjointement par NGI (Norwegian Geotechnical Institute, Norvège) et IC (Imperial College, Angleterre). Le deuxième, l'appareil de Bromhead a été conçu et évalué à la Polytechnique de Kingston (Angleterre). Une description

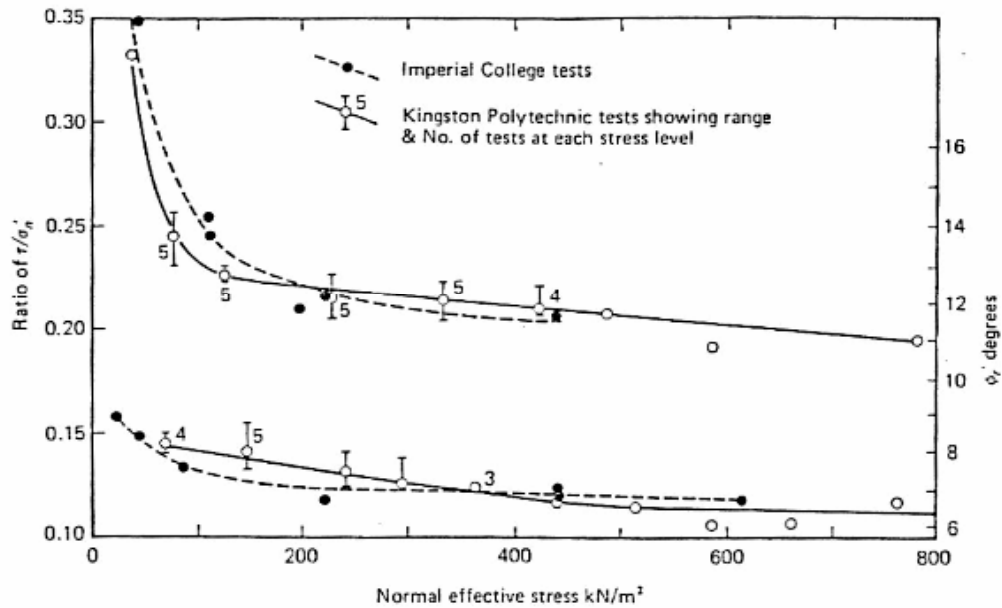
détaillée de cet appareil sera donnée au chapitre 5. La différence fondamentale entre les essais réalisés dans chacun des deux appareils réside dans le mode de cisaillement (Figure 2.4). Dans l'appareil IC/NGI le cisaillement se produit dans un plan prédéterminé à l'intérieur du corps de l'échantillon loin de la plaque de chargement supérieure alors que dans l'appareil de Bromhead, il a lieu adjacent à la plaque de chargement supérieure.



**Figure 2.4** Principe de l'essai de cisaillement annulaire

Bien qu'ayant des principes différents, des essais réalisés sur des échantillons apparemment identiques dans les deux appareils ont montré qu'il y'a une bonne concordance entre les résultats obtenus, comme illustré sur la figure 2.5. De même, La Gatta (1970) a montré que la résistance résiduelle est la même lorsque la surface de cisaillement se forme au sein de l'échantillon ou près du disque poreux.

Du fait de sa simplicité, l'appareil de Bromhead est de plus en plus utilisée durant ces dernières années dans les travaux de recherche (Anayi, 1990; Rouaiguia, 1990; Collota et al, 1991; Moore, 1991; Tsiambaos, 1991; Stark & Vettel, 1992; Stark et Eid, 1994). D'autre chercheurs ont proposé des modifications pour améliorer les performances de l'appareil ou résoudre certains problèmes rencontrés (Anayi et al., 1989 ; Stark & Eid, 1993; Stark & Contreras, 1996)



**Figure 2.5** Comparaison de résultats d'essais de cisaillement annulaires sur l'argile de Gault obtenus dans les appareils IC/NGI et Bromhead (d'après Hutchinson et al, 1980)

### 2.3 Mécanisme de rupture résiduelle

Plusieurs tentatives ont été faites pour étudier les mécanismes régissant la résistance résiduelle des sols cohérents à la suite d'essais de cisaillement au laboratoire en utilisant une multitude de techniques expérimentales.

D'après Skempton (1964), le comportement post pic des sols surconsolidés est dû à une augmentation de la teneur en eau ainsi qu'au développement de minces bandes ou domaines dans lesquels les particules argileuses plates sont orientées le long d'une surface de cisaillement qui a une épaisseur d'environ 20  $\mu\text{m}$ . Associées à cette dernière, il y'avait plusieurs domaines secondaires au sein d'une matrice argileuse, pas nécessairement parallèle à la surface de cisaillement et pouvant atteindre une épaisseur de 25,4 mm. Au delà de cette zone, il n' y avait pratiquement aucune orientation des particules. Il ajouta que l'orientation complète des particules argileuses ne peut avoir lieu dans les échantillons contenant des grains de quartz. C'est la raison pour laquelle la résistance résiduelle des argiles limoneuse est plus grande que celle contenant une grande quantité de minéraux d'argile. Pour Skempton & Petley (1967), les surfaces de glissement polies (striations) sont dues à l'orientation des particules et que ces caractéristiques indiquent que l'état résiduel est atteint.

Morgenstern & Tchalenko (1967a & 1967b), en étudiant la microstructure de zones de cisaillement d'argiles cisailées au laboratoire, ont pu montrer qu'une intense orientation de

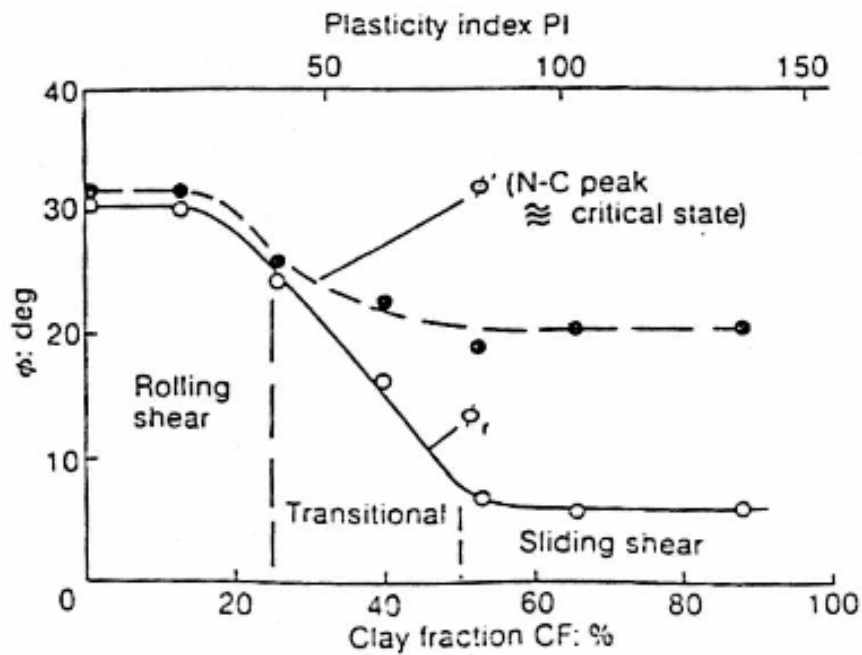
particules a lieu, surtout pour les échantillons prélevés de glissements naturels. Deux types de structures induites ont été observés, une famille de plans de cisaillement continus dans la direction de cisaillement et des plans inclinés par rapport aux plans continus.

Kanji & Wolle (1977) ont pu mettre en évidence le fait qu'une augmentation de la quantité de limon ou de sable est susceptible d'entraîner une diminution de la valeur de l'indice de plasticité. De ce fait, l'interférence des particules granulaires empêche le réarrangement des particules argileuses produisant ainsi des résistances au cisaillement résiduelles plus grandes.

Hight et al. (1979) ont effectué des essais de cisaillement annulaires sur des glaciaires moraines sableuses avec une faible teneur en particules argileuses. Ils ont tout d'abord conduit des essais sur des échantillons normalement consolidés. Lorsque le cisaillement a été initié, il n'a pas produit un comportement fragile. Quand le même échantillon est déchargé puis cisailé une seconde fois en conditions surconsolidées, il a montré alors un comportement fragile, avec une résistance au pic supérieure à la résistance résiduelle développée lors de l'étape de cisaillement initiale. En conséquence, ils ont été en mesure de conclure qu'il n'existait pas une zone dans laquelle les particules étaient orientées et que le sol mis à l'essai avait eu un comportement comparable à celui d'un sable. Par contre, une argile plastique même normalement consolidée aurait eu un comportement fragile, en raison de l'orientation des particules dans la direction de cisaillement. Un cisaillement ultérieur dans des conditions de surconsolidation aurait montré un comportement non fragile, du moment que la rupture se produirait alors sur la surface de cisaillement formée antérieurement.

Dans le but d'étudier les mécanismes de rupture résiduelle, Lupini et al (1981) ont conduit des essais de cisaillement annulaires sur des argiles mélangées artificiellement. Ils ont enregistré l'évolution de la structure post pic et ont montré une orientation progressive des particules d'argile le long de la surface de cisaillement. Une orientation partielle a lieu dans les zones immédiatement adjacentes à la surface de glissement. Ils ont également proposé trois modes de comportement résiduel : le mode turbulent, le mode transitoire et le mode glissant. Ces trois modes sont illustrés dans la figure 2.6, qui montre des résultats d'essais de cisaillement annulaires sur des mélanges sable- bentonite.

Le mode turbulent qui implique en même temps le roulement et la translation a lieu dans les argiles contenant une forte proportion de particules rondes, ainsi que dans les argiles ayant un important coefficient de frottement inter-particules. Les particules de dimensions importantes contrôleraient également l'arrangement final des particules du sol. Ce mode est caractérisé par des angles de frottement interne résiduels importants.



**Figure 2.6** Essais de cisaillement annulaires sur des mélanges sable – bentonite (d’après Lupini et al, 1981)

Le mode glissant se produit dans les argiles pour lesquelles la teneur en particules plates de faible frottement, c’est à dire dont les caractéristiques d’interaction sont faibles, est importante. Dans les argiles montrant un tel mode de comportement, une surface bien définie de particules argileuses fortement orientées se développe. Par conséquent les angles de frottement interne résiduels sont relativement faibles.

Le mode transitoire implique en même temps les deux types de comportement de cisaillement résiduel précédents et se produit lorsque les proportions de particules plates et rondes sont du même ordre. Des surfaces de cisaillement orientées et discontinues ainsi que des poches de sols sans orientation particulière contenus dans une épaisse zone de cisaillement caractérisent ce mode.

Skempton (1985) a confirmé que le développement de la résistance résiduelle des argiles surconsolidée est due à la dilatance et l’orientation des particules. Au début de l’essai, pour des déplacements modérés, la résistance atteint sa valeur critique. Ensuite, pour des déplacements importants, elle décroît pour atteindre sa valeur résiduelle. Pour les argiles normalement consolidées, cependant, l’orientation des particules est la principale cause de la diminution de la résistance. Il a également renforcé le point de vue de Lupini et al (1981), concernant la dépendance du mécanisme de résistance résiduelle sur la proportion relative des

particules plates et rondes et l'existence des trois modes de comportement de résistance au cisaillement résiduelle. Si une argile contient plus de 50% de particules plates, l'effet de l'orientation des particules est très important et la résistance résiduelle est contrôlée alors essentiellement par le glissement des minéraux d'argile. Si la fraction argileuse est inférieure à 20% à 25% la mobilisation de la résistance résiduelle est due presque entièrement à la dilatance dans le cas des sols surconsolidés. Elle est dans ce cas légèrement inférieure à la valeur de pic. Quand la fraction argileuse est comprise entre 25% et 50%, le sol montre un mode de cisaillement transitoire qui dépend du pourcentage de particules d'argiles et de leur nature.

Mesri & Cepeda-Diaz (1986) ont indiqué, pour leur part, que du moment que la chute de la résistance de la valeur de pic à la valeur résiduelle est due à l'orientation des particules d'argiles le long de la surface de cisaillement, le concept de résistance résiduelle a un sens uniquement pour les sols contenant des particules ayant une forme plate. La diminution de la résistance est due en premier lieu au fait que la pression de contact entre particules pour l'interaction face-face est plus petite que l'interaction côté-face qui correspond à un arrangement aléatoire.

## **2.4 Facteurs affectant la résistance résiduelle**

Une revue des principaux facteurs ayant une influence sur la résistance résiduelle des sols cohérents est donnée dans cette section. L'effet de l'interface sera discuté dans le chapitre suivant.

### **2.4.1 Influence de la procédure de préparation des échantillons et de la structure initiale**

Des essais conduits sur différents types d'échantillons (intacts, remaniés, pré-découpés) ont montré que la résistance résiduelle n'est généralement pas affectée par la structure initiale du sol et le type d'échantillon.

La Gatta (1970) a montré que la procédure de préparation de l'échantillon ne semble pas avoir un effet sur la résistance résiduelle de l'argile de Londres, la schiste de Pepper et la schiste de Cucurasha mis à l'essai dans un appareil de cisaillement rotationnel en utilisant soit un échantillon annulaire soit un échantillon sous forme de disque.

Bishop et al. (1971) ont démontré que des valeurs presque identiques de la résistance résiduelle ont été déterminées sur des échantillons remaniés et intact en utilisant l'appareil de cisaillement développé conjointement par l'Imperial College et le Norwegian Geotechnical Institute.

Ramiah & Purushothamaraj (1971) ont démontré au moyen d'essais de cisaillement alterné que la structure initiale d'une argile constituée de kaolonite, compactée et consolidée ne semble pas avoir un effet sur l'angle de frottement interne résiduel.

Townsend & Gilbert (1973, 1974, 1976) ont conclu à la suite d'essais de cisaillement annulaires sur des échantillons intacts, remaniés et pré-découpés que l'angle de frottement interne résiduel est indépendant de la méthode de préparation des échantillons et de la densité.

Concernant l'historique des contraintes et l'ordre d'application des charges, d'après les recherches effectuées, il semblerait que l'angle de frottement interne n'est généralement pas affecté par ces deux facteurs, également.

Skempton (1964) a reporté que l'angle de frottement interne résiduel de l'argile de Walton, quand elle est normalement consolidée, était compatible avec les valeurs obtenues à partir d'échantillons intacts surconsolidés.

Kenney (1965) a montré que les valeurs de  $\phi'_r$  obtenues à la suite d'essais de cisaillement alterné, pour une contrainte normale donnée, étaient pratiquement les mêmes quelque soient l'ordre d'application des charges. De même, Ramiah et al (1970) ont mis en évidence le fait que la résistance résiduelle de sols fins traités chimiquement et mis à l'essai dans la boîte de cisaillement alterné est la même lorsque le sol est normalement consolidé ou surconsolidé. Il a conclu que ce résultat montre qu'une fois l'état résiduel est atteint l'orientation des particules d'un sol se produit selon une direction parallèle quelque soit son historique de contraintes.

Bishop et al (1971) ont démontré également, à la suite d'essais de cisaillement annulaire réalisés sur des argiles de Weald et Londres que  $\phi'_r$  est indépendante de son historique de consolidation.

D'après Townsend & Gilbert (1973, 1974, 1976) l'ordre d'application des contraintes normales n'a pas d'effet significatif sur les valeurs des résistances résiduelles obtenues à partir d'essais de cisaillement directs. Une conclusion similaire a été avancée également par Petley (1966) et Garga (1970).

Cependant, les résultats obtenus par La Gatta (1970) ont montré que la résistance résiduelle d'échantillons de schiste argileuse surconsolidés, est légèrement supérieure à celle obtenue lorsqu'ils sont normalement consolidés.

#### **2.4.2 Influence de l'amplitude des contraintes normales**

Plusieurs auteurs ont confirmé d'après leurs expérimentations que l'angle de frottement interne résiduel dépend généralement de l'amplitude des contraintes normales et de ce fait

l'enveloppe de résistance résiduelle obtenue est courbée. Cependant le degré de dépendance de  $\phi'_r$  par rapport à la contrainte normale varie en fonction du type de matériau.

Kenney (1965, 1967) a rapporté à ce sujet que les résultats d'essais de cisaillement alterné indiquent que  $\phi'_r$  pour la schiste de Bearpaw varie légèrement avec la contrainte normale alors que des essais similaires sur la schiste de Pepper montrent une dépendance plus marquée de  $\phi'_r$  par rapport à  $\sigma'_n$ . Il a suggéré en outre que les sols contenant une grande proportion de montmorillonite ont des valeurs de  $\phi'_r$  qui varient en fonction de  $\sigma'_n$  par contre les sols composés de lourds minéraux non argileux ont un comportement différent.

Skempton & Petley (1967) ont indiqué que les valeurs de  $\phi'_r$  tendent à se stabiliser pour des contraintes normales supérieures à  $200\text{kN/m}^2$  pour les argiles d'Atterfield, Weald et Londres.

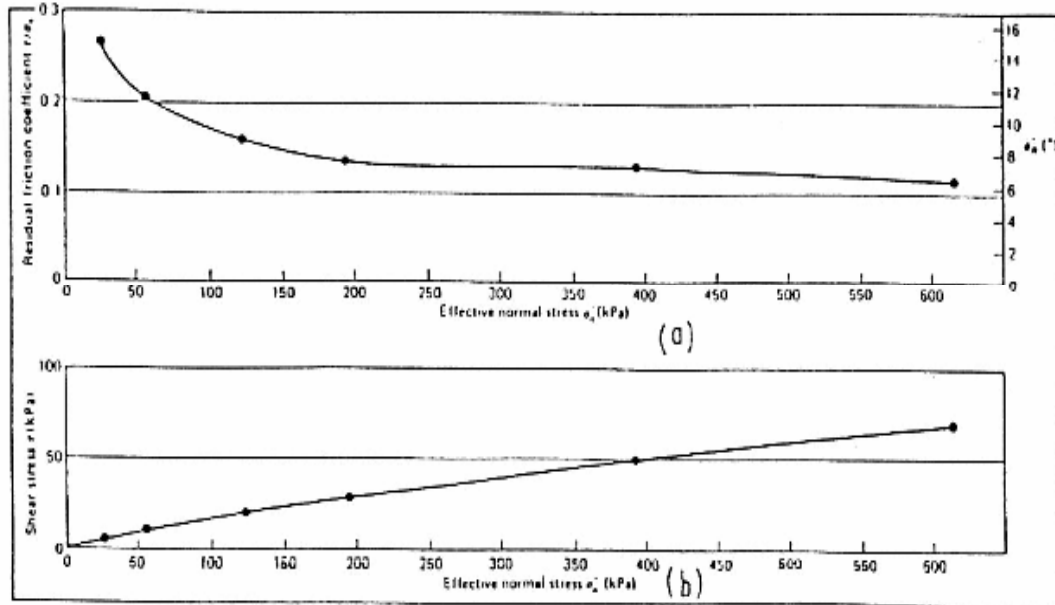
Bishop et al (1971) ont étudié l'influence de la contrainte normale sur l'angle de frottement interne résiduel des argiles de Londres bleue et brune et l'argile de Weald ainsi que des schistes argileux d'Amérique du nord en utilisant un appareil de cisaillement annulaire. Pour l'argile de Londres bleue, ils ont trouvé qu'elle est relativement indépendante de l'amplitude des contraintes. D'autre part, l'argile de Londres brune, l'argile de Weald et les schistes argileux présentaient des enveloppes de rupture résiduelle courbées.

Pour les schistes argileuses, Townsend & Gilbert (1976) sont arrivés à la conclusion que  $\phi'_r$  ne dépend pas du niveau de contrainte normale pour  $\sigma'_n > 150\text{ kN/m}^2$ . Cependant un sable limoneux de mica du Brésil a montré une légère dépendance pour des contraintes normales basses. Ils ont attribué la diminution de  $\phi'_r$  avec une augmentation de la contrainte normale à l'augmentation possible du degré d'orientation des particules argileuses. Cette hypothèse a été confirmée par Cotecchia & Federico (1980) qui ont déduit à partir d'une étude microscopique que l'orientation des particules des surfaces de cisaillement qui se sont formées à la suite d'essais de cisaillement alterné sur une argile plastique, est plus importante quand les sols sont soumis à des cisaillement sous de hautes contraintes normales. Privett (1980) a mis en évidence que  $\phi'_r$  est susceptible de varier de  $9^\circ$  en augmentant la contrainte effective de  $27\text{kN/m}^2$  à  $615\text{kN/m}^2$ .

Lupini (1980) a rapporté des résultats d'essais de cisaillement annulaires effectués sur une large gamme de sols naturels. Ces résultats ont montré une diminution du coefficient de frottement,  $\tau/\sigma'_n$ , qui est plus prononcée pour les contraintes effectives normales basses.

D'après Lawrence (1984), le degré de courbure de l'enveloppe de rupture résiduelle pour de faibles contraintes normales (jusqu'à  $150\text{ kN/m}^2$ ) dépend des propriétés intrinsèques

des constituants du sol considéré. De plus la courbure est plus prononcée lorsque  $\sigma'_n$  tend vers zéro.



**Figure 2.7** (a) Variation du coefficient de frottement résiduel en fonction de la contrainte normale effective ; (b) Enveloppe de rupture résiduelle (d'après Hawkins & Privett)

Des essais de cisaillement annulaire reportés par Hawkins et Privett (1985) ont permis à ces auteurs de conclure également que l'angle de frottement interne résiduel est dépendant du niveau de contrainte. Comme indiqué sur la figure 2.7, l'augmentation de l'amplitude des contraintes a pour effet de stabiliser le sol vis à vis du coefficient de frottement résiduel dans le sens où ce dernier diminue progressivement puis tend à se stabiliser pour des valeurs de  $\sigma'_n$  de plus en plus importantes. La valeur constante atteinte est appelée " la plus basse résistance résiduelle ". Une fois cette valeur obtenue l'enveloppe de rupture obtenue est dite " complète ".

### 2.4.3 Influence de la vitesse de cisaillement

La plupart des recherches effectuées avec pour objectif l'étude de l'effet de la vitesse de cisaillement ont montré que la résistance résiduelle n'est généralement pas affectée par un tel facteur pour des vitesses de cisaillement relativement lentes.

Ainsi Petley (1966) a présenté une étude dans laquelle pour la première fois, les effets de la vitesse étaient systématiquement analysés. Il a montré que la résistance résiduelle d'échantillons pré-découpés d'argile de Londres brune déterminée à la suite d'essais de cisaillement alternés augmente de 4% lorsque la vitesse de cisaillement varie dans un domaine allant de  $4 \times 10^{-5}$  mm/mn à 1,0 mm/mn. Il en est de même pour Garga (1970) qui a confirmé d'après ses expérimentations que la résistance résiduelle du même type de sol mesuré au moyen de l'appareil IC/NGI augmentait également de 4% lorsque la vitesse augmentait de  $2,5 \times 10^{-5}$  à  $2,5 \times 10^{-1}$  mm/mn.

La Gatta (1970) a rapporté qu'une fois l'état résiduel est atteint, la multiplication de la vitesse de cisaillement par un facteur de 100 ne semble pas avoir un effet sur la résistance résiduelle. Cette conclusion a été mise en évidence à la suite d'essais de cisaillement annulaires réalisés sur trois types de sols : la shiste de Cucarasha, la shiste de Pepper et l'argile de Londres.

Ramiah et al (1970) ont étudié l'influence de la vitesse de cisaillement sur la résistance résiduelle. Ils ont montré qu'en modifiant la vitesse de 0,025 mm/mn à 10,2 mm/mn après l'établissement des conditions résiduelles, dans des essais de cisaillement alternés réalisés sur un limon argileux, ne semble pas avoir un effet significatif sur la résistance résiduelle.

Il en est de même pour Blondeau & Pilot (1971) qui ont démontré à la suite d'essais de cisaillement alternés sur sept échantillons d'argile identiques, consolidés sous la même contrainte normale et cisailé à différentes vitesses de cisaillement de 0,002 mm/mn à 0,06 mm/mn, que la vitesse de cisaillement ne semble pas avoir d'effet sur la résistance résiduelle.

Les avis cités ci-dessus ne sont pas partagés par l'ensemble des chercheurs qui se sont intéressés à l'effet de la vitesse de cisaillement sur la résistance résiduelle. Bucher (1975), utilisant deux types d'appareils de cisaillement annulaire (l'un d'eux est l'appareil IC/NGI), a démontré que l'augmentation de la vitesse de cisaillement par un facteur de 1000, c'est à dire entre 0,0145 et 14,6 mm/mn augmente la résistance au cisaillement résiduelle d'une argile de plasticité moyenne de 24%. Pour un domaine de vitesse compris entre 0,0145 mm/mn et 0,10 mm/mn la différence est de 3% seulement.

De Beer (1967) a observé une tendance pour les essais de cisaillement annulaires sur l'argile de Boom sous des vitesses importantes à donner des résistances au cisaillement plus petites quand la vitesse est augmentée. Les comparaisons ont été faites sur différents échantillons pour des vitesses allant de 0,395 mm/h à 2,1 mm/h.

Les recherches décrites ci-dessus s'intéressaient particulièrement à la détermination de la résistance au cisaillement des sols cohérents à des vitesses de cisaillement relativement faibles. Elles ont mis en évidence le fait que la résistance au cisaillement n'est pas affectée de

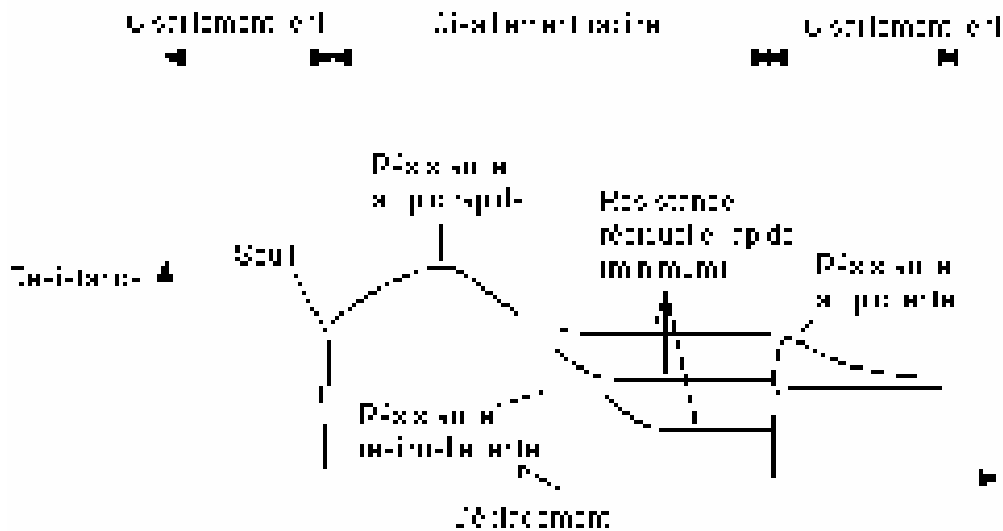
manière significative par de telles vitesses. L'existence d'un effet non négligeable a été initialement mise en évidence par les travaux de Lupini (1980) qui a mené une étude systématique sur ce sujet. Des essais de cisaillement muti-phase en utilisant une grande plage de vitesses ont été conduit sur quatre différents types de sols : la glaciaire moraine de Happisburgh, l'argile de Londres, l'argile de Fiji et le kaolin. Pour le premier sol cité, qui se comporte selon le mode de cisaillement résiduel turbulent, Lupini a montré que  $\tau_r/\sigma_n$ , diminue lorsque la vitesse augmente. Cette tendance est attribué par l'auteur à une augmentation de l'indice des vides granulaire,  $e_g$ , dans la zone de cisaillement.  $e_g$  est égale au rapport entre le volume des particules plates et l'eau d'une part et le volume des particules rondes, d'autre part. Les autres sols, qui sont régis par le mode glissant, tel que défini dans la section 2.3, n'ont pas montré un effet significatif de la vitesse de cisaillement quand cette dernière est faible. Pour des vitesses plus importantes, cependant, ces sols ont montré une certaine sensibilité. L'argile de Fiji a présenté une augmentation du coefficient de frottement de 40% suite à une augmentation de la vitesse dans la plage 0,0157 mm/mn à 1,569 mm/mn. Il en est de même pour le kaolin qui a montré une augmentation de 28% pour le domaine étudié (de  $10^{-5}$  mm/mn à 133 mm/mn). Il a attribué ce résultat à une augmentation du frottement entre particules due à des effets visqueux, qui sont probablement la cause principale des effets de vitesses, concernant les sols se comportant selon le mode glissant. Par conséquent, il est supposé que le mode de comportement résiduel change du glissant au turbulent.

Lemos et al (1985) ont montré, à la suite d'essais de cisaillement annulaire, que si une surface de cisaillement est formée par cisaillement lent drainé, un cisaillement rapide supplémentaire entraîne le comportement typique suivant (Figure 2.8) :

- (a) Il y'a un seuil initial de résistance immédiate mobilisée sur la surface de cisaillement à un déplacement pratiquement négligeable. Le seuil de résistance qui est largement plus grand que la résistance résiduelle lente dépend de la vitesse de cisaillement. Cette augmentation de résistance peut être due à la pression interstitielle négative passagère, générée par la tendance du sol à se dilater.
- (b) Il y'a souvent une augmentation supplémentaire de la résistance sur la surface de cisaillement jusqu'à une valeur maximum, la résistance au pic rapide qui dépend aussi de la vitesse de cisaillement. Cette augmentation de la résistance est associée à une dilatation du sol dans la zone de cisaillement et le changement de la structure de la zone de cisaillement formée à l'état résiduel lent.
- (c) La résistance est alors susceptible de descendre à une valeur minimum avec des déplacements supplémentaires, la résistance minimum rapide : cette dernière peut

être égale (effet neutre de la vitesse), supérieure (effet positif de la vitesse) ou inférieure (effet négatif de la vitesse) à la résistance au cisaillement lente.

- (d) Si, après le cisaillement rapide d'un sol qui montre un mode de cisaillement glissant ou transitoire, la surface de cisaillement est testée lentement, une résistance de pic initiale lente plus grande la résistance résiduelle drainée lente est mesurée, indiquant que le cisaillement rapide entraîne des désordres dans la surface de cisaillement.



**Figure 2.8** Effet de la vitesse rapide sur la résistance résiduelle (d'après Lemos et al, 1985)

Tika et al (1996) ont présenté des résultats expérimentaux ayant permis d'étudier l'influence de la vitesse de cisaillement rapide sur la résistance résiduelle d'un sol pré-cisaillé, au moyen de l'appareil de cisaillement annulaire. Les zones de cisaillement sont créées par cisaillement lent, drainé, puis sont soumises à des vitesses de cisaillement alternativement rapides puis lentes. Les résultats obtenus pour une large gamme de sols montrent que tous les sols présentent un accroissement initial de leur résistance lorsqu'ils sont cisailés à une vitesse importante. Cette résistance tend ensuite à décroître, pour des vitesses de plus en plus importantes, jusqu'à une valeur minimale appelée résistance résiduelle rapide. Trois effets différents de la vitesse, identiques à ceux présentés par Lemos et al. (1985), ont été mis en évidence :

- un effet positif pour les sols présentant une résistance résiduelle rapide supérieure à la résistance résiduelle lente ;
- un effet neutre pour les sols ayant une résistance résiduelle rapide constante et égale à la résistance résiduelle lente, et ce indépendamment de la vitesse de cisaillement ;

- un effet négatif pour les sols présentant une chute importante de la résistance résiduelle rapide qui devient inférieure à la résistance résiduelle lente pour des vitesses de cisaillement supérieures à une valeur critique.

Tika & Hutchinson (1999) ont présenté les résultats d'essais de cisaillement annulaires, effectués sur deux échantillons prélevés sur la surface de cisaillement du glissement de terrain Vaiont dans le nord de l'Italie. Les essais ont été menés des vitesses de cisaillement lentes (0,0145mm/mn) et rapides de manière à pouvoir déterminer les valeurs des coefficients frottement se rapportant aux phases statiques et dynamiques du glissement de terrain. Les deux échantillons ont montré une perte de vitesse considérable (effet de vitesse négatif), allant jusqu'à 60% au dessous de la résistance résiduelle lente, lorsqu'ils subissaient un cisaillement à des vitesses dépassant 100mm/mn.

#### **2.4.4 Influence du type d'appareil d'essai**

Plusieurs chercheurs ont examiné l'effet de l'appareil utilisé pour mesurer la résistance résiduelle des sols cohérents. Leurs études ont permis de conclure que la résistance résiduelle est affectée par le type d'appareillage et la procédure expérimentale utilisée.

La majorité des auteurs semblent s'accorder sur les limitations de l'appareil triaxial pour l'étude des résistances au cisaillement des sols cohérents dans le domaine des grands déplacements (Hemann & Wolfskill, 1966 ; La Gatta, 1970 ; Bishop et al, 1970 ; Blondeau & Josseaume, 1976 ; etc).

L'appareil de cisaillement annulaire est sans conteste l'appareil capable de donner les résultats les plus proches de la réalité concernant les résistances post-pic (Hvorslev, 1939 ; Garga , 1970 ; etc).

Les avis divergent concernant les qualités de mesure de la résistance résiduelle au moyen de l'essai alterné à la boîte de cisaillement direct. Cette dernière a été sujette à un certain nombre de critiques, dans la littérature, à cause de la perturbation de la zone de cisaillement au cours du mouvement inverse de la boîte. Selon certains auteurs, les angles de frottement interne résiduel obtenus au moyen de l'essai de cisaillement annulaire et l'essai de cisaillement alterné ont des valeurs identiques. D'autres chercheurs, en revanche, ont trouvé que les valeurs de  $\phi_r$  déterminés par le deuxième essai sont supérieures.

Ainsi, Hermann & Wolfskill (1966) ont étudié l'effet de l'appareillage en soumettant des échantillons à des essais de cisaillement annulaire, alterné et triaxial ; ces derniers essais avec et sans pré-découpage des échantillons. Les résultats obtenus ont permis de montrer que les essais triaxiaux donnaient les plus grandes valeurs alors que pour les deux autres essais les valeurs mesurées étaient comparables.

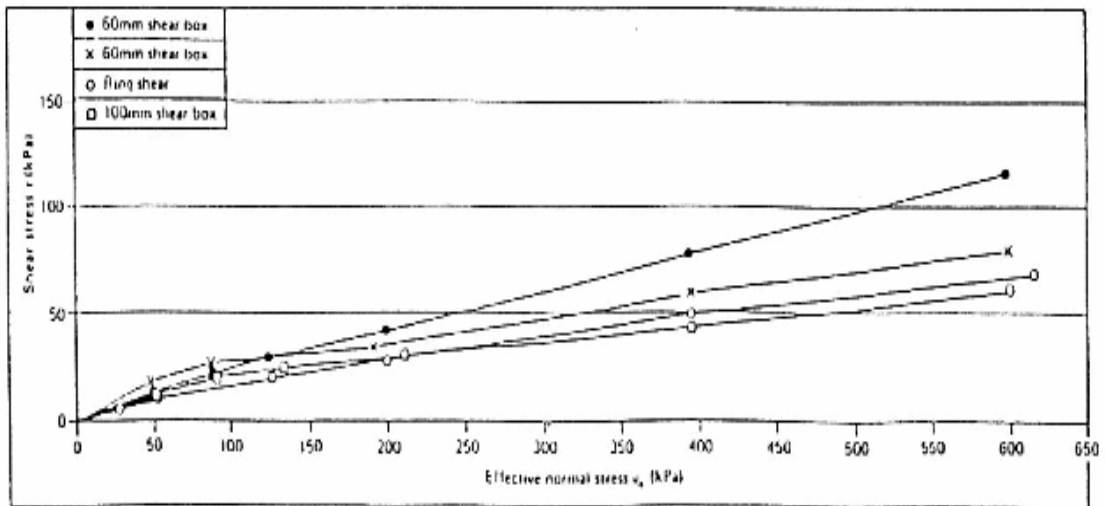
Selon Bishop et al, (1971), les valeurs de l'angle de frottement interne résiduel pour des échantillons intacts de l'argile de Londres obtenus au moyen de l'appareil IC/NGI étaient de 13% à 58% inférieures à ceux données par l'essai de cisaillement alterné. Ce résultat est attribué à la perturbation de l'orientation des particules sur la surface de glissement et le changement dans la direction des contraintes principales dans l'essai de cisaillement alterné. Ceci est dû au changement du sens de cisaillement à chaque alternance, de ce fait empêchant la résistance résiduelle d'être complètement mobilisée. Dans le cas du schiste de Cucarasha les valeurs de  $\phi'_r$  données par les deux appareils étaient pratiquement identiques.

Townsend & Gilbert (1973, 1974, 1976) ont présenté des essais comparatifs annulaires, alternés et rotationnels sur différents schistes argileux. Ils ont mis en évidence le fait que pour les échantillons avec des plans pré-découpés, les essais de cisaillement annulaire et alterné donnaient des résultats en bonne conformité.

Blondeau & Josseaume (1976) ont mesuré la résistance au cisaillement résiduelle de plusieurs types d'argiles en utilisant des essais de cisaillement alterné sur des échantillons intacts et prédécoupés et des essais triaxiaux sur des éprouvettes pré-découpées. Les résultats donnés par les essais triaxiaux étaient supérieurs à ceux obtenus par les essais de cisaillement alterné. Ils ont également comparés les résultats d'essais effectués sur des argiles intacts au moyen de l'appareil de cisaillement annulaire construit au Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, et l'appareil de cisaillement alterné. Les deux machines ont donné des résultats équivalents.

Hutchinson et al (1980) ont trouvé que les valeurs de  $\phi'_r$  données par l'essai de cisaillement alterné étaient jusqu'à 7° supérieures à ceux mesurées au moyen de l'appareil de cisaillement annulaire pour des échantillons soumis à de faibles contraintes normales effectives.

Dans le but d'étudier l'effet de l'équipement d'essai sur la résistance résiduel, Hawkins & Privett (1985) ont mis à l'essai des échantillons remaniés dans des boîtes de cisaillement alternées de 60 mm et 100 mm de côté et dans l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 2.9. Comme on peut le noter, il y'a une bonne corrélation entre les valeurs de  $\phi'_r$  obtenus dans les deux machines pour différents niveaux de contraintes normales. Dans le cas de la boîte de cisaillement alternée de 60 mm, cependant, les valeurs de  $\phi'_r$  obtenues sont plus grandes. Concernant le facteur temps et la reproductibilité, l'enveloppe de rupture peut être définie dans beaucoup moins de temps dans l'appareil de cisaillement annulaire et les résultats obtenus dans cette machine sont plus reproductibles.



**Figure 2.9** Enveloppes de rupture résiduelle déterminées à partir de boîtes de cisaillement de 60 et 100 mm et l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead (d'après Hawkins & Privett, 1985)

Bouazza & Ghili (1999) ont présenté une étude comparative des caractéristiques résiduelles obtenues à l'aide de l'appareil de cisaillement annulaire et de l'appareil de cisaillement alterné. Les échantillons de sol étudiés provenaient du site instable de Boucheouf (Algérie). Il a été, notamment montré que les résultats obtenus à l'aide de l'appareil de Bromhead sur des échantillons remaniés sont très voisins de ceux obtenus à l'aide du cisaillement alterné sur des échantillons intacts quand la fraction argileuse est importante

#### 2.4.5 Influence de la minéralogie et de la forme des particules

L'influence de la minéralogie et la forme des particules sur la résistance résiduelle est bien couverte dans la littérature. Kenny (1967) a étudié l'influence de plusieurs facteurs sur l'angle de frottement interne résiduel et a conclu que la minéralogie était le facteur le plus important. Bjerrum (1967) a indiqué que la taille, la forme et la minéralogie des particules constituant le sol ont un effet sur le comportement résiduel. Plusieurs autres chercheurs ont confirmé que la proportion relative des minéraux d'argile par rapport aux minéraux massifs, la forme des particules, la nature et les propriétés de frottement des minéraux constituant le sol sont d'une importance primordiale. De plus il est établi que lorsque les sols avec une quantité significative de particules plates (minces feuilletés entourés de films d'eau adsorbée) sont soumis à un cisaillement jusqu'à l'état résiduel, une surface de cisaillement dans laquelle

il y'a peu ou pas d'enchevêtrement se forme à cause de la réorientation de ces minéraux dans la direction de cisaillement.

Skempton (1964) et Borowicka (1965) ont démontré que les faibles résistances au cisaillement de sols, contenant une grande quantité de particules argileuses, mis à l'essai dans la boîte de cisaillement alternée sont dues au glissement entre les particules argileuses ayant un faible frottement. Chattopadhyay (1972) a indiqué que les particules plates entraînent de faibles angles de frottement interne résiduelles alors que les particules sous angulaires et en forme d'aiguille donnent des valeurs de  $\phi'_r$  plus importantes.

Une série d'essais destinés à obtenir la résistance au cisaillement résiduelle de différents sols en utilisant plusieurs moyens, rapportée par Blondeau & Josseume (1976), ont permis à ces auteurs de conclure que la présence de montmorillonite en tant que constituant prépondérant implique de faibles résistances résiduelles associées à d'importants indices de fragilité.

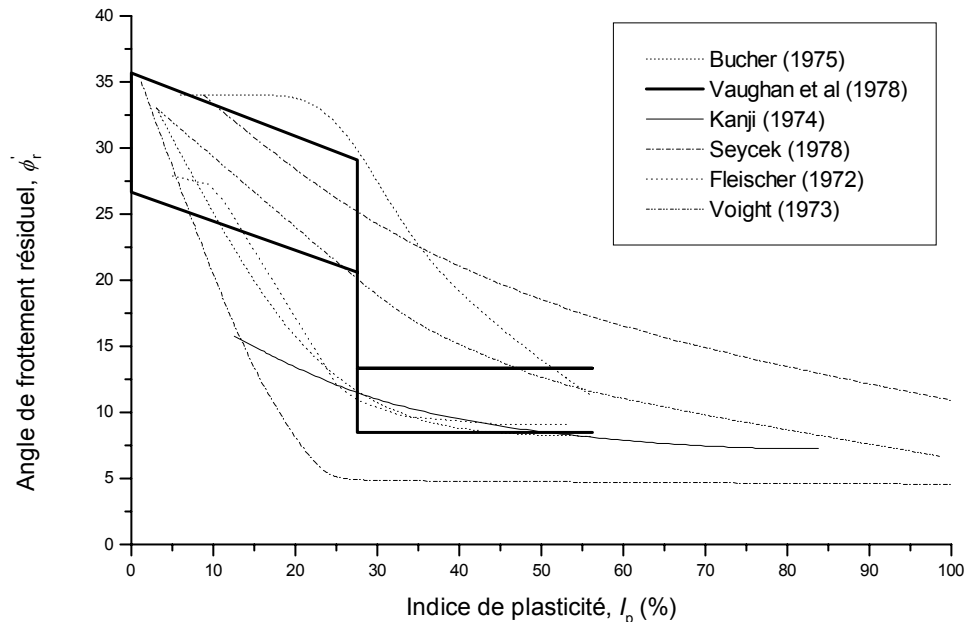
Kenney (1977) a confirmé la dépendance de la résistance au cisaillement de sols naturels et artificiels vis à vis de leur composition minérale et de la proportion relative des particules argileuses et massives. Des essais de cisaillement alternés sur des mélanges de minéraux composés de minéraux massifs (quartz) et de minéraux argileux (montmorillonite, mica hydreuse, grandite ou kaolinite) ont montré que la résistance résiduelle augmente avec l'augmentation des minéraux massifs et lorsque le volume de ces derniers dépasse environ 50% du volume totale du mélange, la résistance résiduelle du mélange est plus ou moins la même que celle du quartz. La résistance résiduelle était très faible pour les mélanges contenant une forte proportion de montmorillonite, de ce fait confirmant les résultats obtenus par Blondeau & Josseume (1976).

Mesri & Diaz (1986) ont indiqué que la minéralogie argileuse est caractérisée par deux facteurs, la taille et la forme des particules. La plupart des argiles ont une forme plate. Pour ces argiles, la taille des particules et le degré de platitude sont les plus importantes caractéristiques. Lorsque la taille des particules diminue et la platitude augmente, la pression de contact entre particules diminue, l'enchevêtrement côté-côté est minimisé et la résistance résiduelle diminue.

#### **2.4.6 Influence des paramètres d'identification**

Plusieurs tentatives ont été entreprises pour corréler la résistance résiduelle de sols cohérents avec leurs paramètres d'identification. Des points de vue conflictuels ont émergé concernant la convenance de ces corrélations.

Certains auteurs, tels que Fleisher (1975), Voight (1973), Kanji (1974), Bucher (1975), Vaughan et al (1978), Seycek (1978), etc, ont établi des relations entre  $\phi'_r$  et  $I_p$ , à partir de différents types de sols, qui ont été reproduites dans la figure 2.10, et ont montré que l'angle de frottement interne résiduel diminue lorsque l'indice de plasticité  $I_p$  augmente.

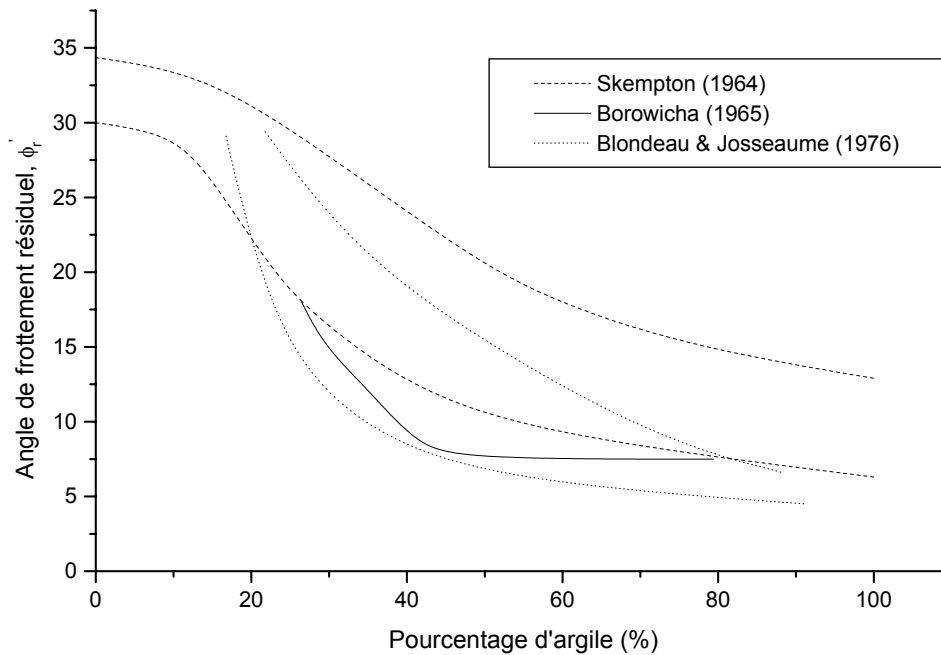


**Figure 2.10** Corrélation entre la résistance résiduelle et l'indice de plasticité

Kanji (1974) a établi sa relation à partir de résultats d'essais de cisaillement alterné sur des interfaces entre des sols et des surfaces de roches. La relation discontinue de Vaughan et al (1978) est due à une série d'essais de cisaillement annulaire sur des argiles naturelles au moyen de l'appareil IC/NGI. Seycek (1978) a étudié les relations entre les sols et certains caractéristiques physiques telles que : la limite de liquidité, l'indice de plasticité, la teneur en fraction argileuse et le coefficient d'activité colloïdale. Ce qui lui a permis de conclure que la meilleure corrélation semble être celle existant entre  $\phi'_r$  et  $I_p$ .

Il y'a également un consensus presque total concernant la diminution de  $\phi'_r$  lorsque la teneur en fraction argileuse (particules  $< 2\mu\text{m}$ ) augmente. Skempton (1964) a proposé la relation présentée dans la figure 2.11 qui montre une diminution de  $\phi'_r$  avec l'augmentation de la teneur argileuse d'une valeur équivalente à  $\sigma'_n \text{tg}(\phi_{CV})$ , où  $\phi_{CV}$  est l'angle de frottement interne mobilisé à volume constant, à une faible valeur pour les sols à haute teneur en particules argileuses.

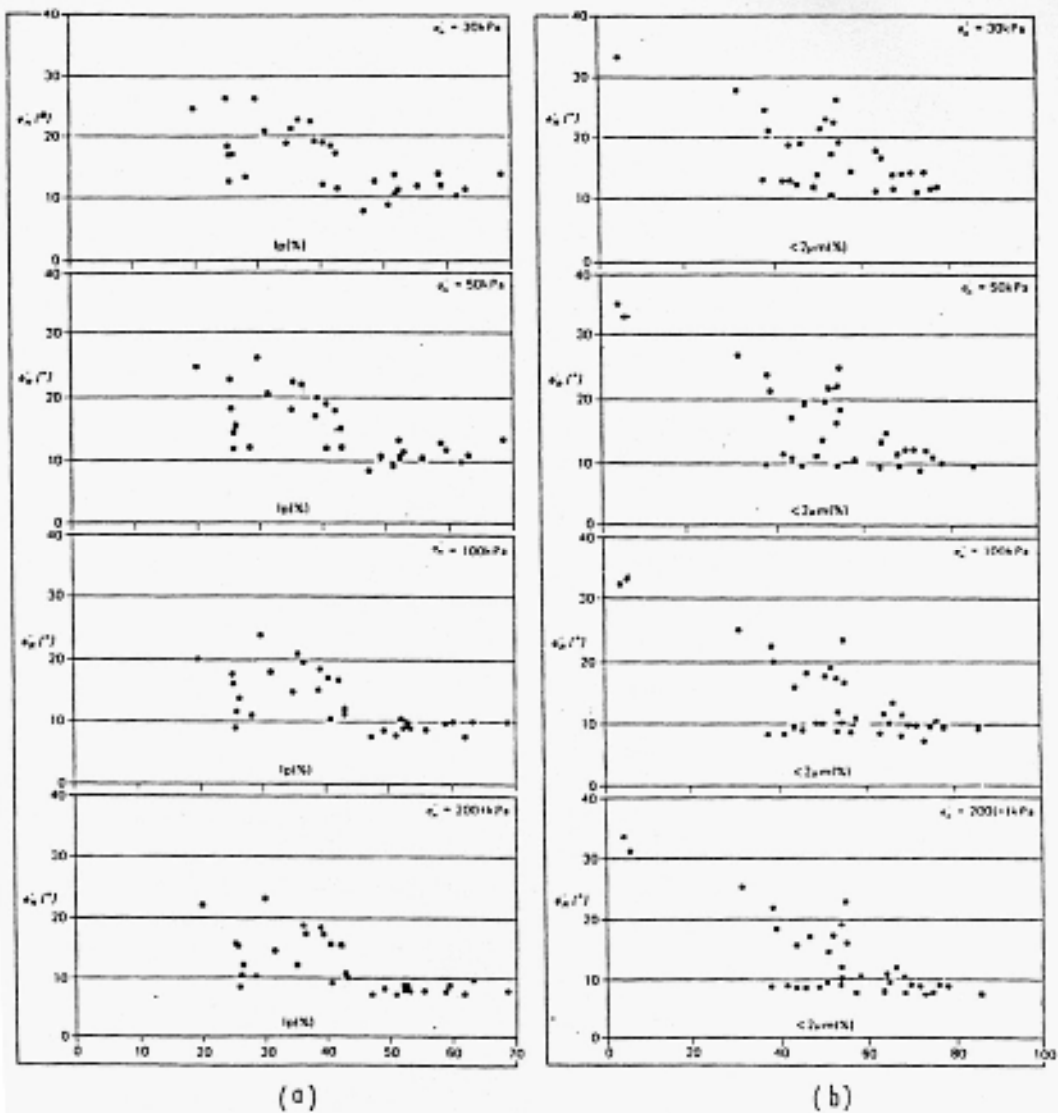
Borowicka (1965) a déduit à partir d'essais de cisaillement alterné sur des échantillons produits artificiellement avec différentes distributions granulométriques que  $\phi'_r$  diminue avec l'augmentation de la fraction argileuse, selon la relation présentée dans la figure 2.11. Il est clair à partir de cette figure que pour une teneur colloïdale supérieure à 43%, la valeur de  $\phi'_r$  est constante.



**Figure 2.11** Corrélation entre la résistance résiduelle et la fraction argileuse

Il en est de même concernant la relation présentée par Blondeau & Josseume (1976), dans la même figure, qui montre une influence nette de ce paramètre. Plus la valeur de la fraction argileuse est importante, plus la résistance résiduelle est faible. L'angle de frottement interne résiduel pour les limons et les argiles de faible plasticité est supérieur à  $12^\circ$  alors que pour les argiles très plastiques contenant de la montmorillonite il chute à  $5^\circ$ .

Par contre, Kenney (1967) conclut à partir d'essais de cisaillement alternés conduits sur une large gamme de sols, allant de minéraux massifs à des minéraux d'argile pure, qu'il n'y a pas de relation satisfaisante entre l'indice de plasticité, la taille des grains et  $\phi'_r$ . Pour Cancelli (1980), il faut être prudent quant à l'utilisation des corrélations empiriques entre  $\phi'_r$  et certains indices de propriétés. Lupini et al (1981) ont ajouté qu'une simple corrélation avec les paramètres d'identification est inadéquate dans la prédiction de la résistance résiduelle.



**Figure 2.12** Variation de l'angle de frottement interne résiduel en fonction (a) de l'indice de plasticité ; (b) la fraction argileuse (d'après Hawkins & Privett, 1985)

Hawkins & Privett (1985) ont pour leur part démontré que parce que  $\phi'_r$  varie en fonction de la contrainte normale, les corrélations publiées entre  $\phi'_r$  et d'autres paramètres devraient être modifiés. L'approche adoptée consistait à montrer la variation de  $\phi'_r$  avec l'indice de plasticité et la fraction argileuse pour quatre différents niveaux de contraintes normales. Les résultats, qui sont présentés dans la figure 2.12, montrent qu'il y a une dispersion des résultats principalement pour les échantillons ayant des valeurs de  $I_p$  compris entre 25% et 45%. Concernant la relation entre  $\phi'_r$  et la fraction argileuse les données disponibles montrent une grande variation de  $\phi'_r$  avec la fraction argileuse dans le domaine 35% - 60%.

## 2.5 Conclusions

Cette synthèse bibliographique a permis de faire le point sur les connaissances liées à la résistance résiduelle des sols cohérents. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1- Trois modes de cisaillement résiduel peuvent avoir lieu : turbulent, glissant et transitoire.

Le mode turbulent se produit quand la proportion des minéraux massive non plate est supérieure à 75% à 80%. Une autre condition possible pour laquelle le cisaillement turbulent peut se produire concerne les sols pour lesquels la fraction dominante est constituée de particules plates avec un grand angle de frottement inter-particule. Dans les deux cas, la résistance résiduelle est importante mais l'orientation des particules dans une direction donnée ne se produit pas. Une zone de cisaillement, avec une porosité différente, se forme.

Le mode glissant a lieu quand la proportion des minéraux de faible frottement inter-particule est supérieure à environ 50%. La fragilité est due partiellement à la ré-orientation des minéraux sous forme de feuillets pour former une surface de cisaillement, un processus nécessitant de grands déplacements si le cisaillement a lieu au sein du sol. Dans ce mode la résistance au cisaillement résiduelle est sensible à la minéralogie contrôle des facteurs tels que la forme dominante des particules et le coefficient de frottement inter-particules.

Le mode transitoire se produit quand il n'y a pas de forme de particules dominante et implique une combinaison du comportement turbulent et glissant. Le cisaillement a lieu dans une zone de cisaillement qui contient des poches de sol subissant des cisaillements dans les modes turbulent et glissant.

2- L'appareil de cisaillement annulaire est en mesure de donner les valeurs les plus fiables de la résistance au cisaillement résiduelle. L'appareil de cisaillement alterné donne généralement des valeurs plus grandes. L'appareil triaxial est inadapté pour la détermination de la résistance résiduelle.

3- La résistance au cisaillement n'est généralement pas affectée par la structure initiale de l'échantillon et la procédure de préparation des échantillons mis à l'essai.

4- Elle n'est pas affectée pour des vitesses de cisaillement faibles, par contre une influence significative a lieu dans le cas de vitesses importantes.

5- Elle dépend de l'amplitude des contraintes normales utilisées particulièrement les contraintes faibles, l'enveloppe de rupture résiduelle est alors courbée particulièrement pour de faibles contraintes normales effectives. De plus cette dépendance est plus importante pour le mode glissant.

6- Les corrélations entre la résistance résiduelle et les paramètres d'identification ne peuvent être généralisées car elles ne sont pas en mesure de refléter les changements dans des

propriétés plus fondamentales tels que la forme des particules, la minéralogie, la granulométrie.

## 3 RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT À L'INTERFACE

---

### 3.1 Généralités

Le frottement entre deux surfaces est dû essentiellement à l'adhésion qui se produit au niveau des points de contact des aspérités. En se concentrant sur les détails des surfaces, la théorie d'adhésion indique que les petites surfaces au niveau des aspérités qui sont réellement en contact entraînent d'importantes contraintes qui produisent à leur tour un écoulement plastique au niveau des points de contact réels (Bowden & Tabor, 1945 ; Lambe & Whitman, 1969). Si le mouvement relatif se poursuit, les liens aux points de contacts sont continuellement détruits, puis se reforment lorsque d'autres aspérités sont à nouveau en contact. La surface de contact réelle entre deux corps dépend de la topographie de surface et des propriétés de déformation des aspérités. Des mesures précises ont montré que le plus important facteur est la pente moyenne des aspérités de surface (Tabor, 1987).

La théorie du frottement "global" à l'échelle macroscopique examine la résistance moyenne au frottement tout en faisant abstraction du détail de surface. Cette approche permet d'utiliser l'évidence expérimentale montrant que la force de frottement résistante est proportionnelle à la force normale qui unit deux corps ensemble. Cette loi empirique simple due à Coulomb (1736-1806), est généralement utilisée pour décrire le cisaillement des sols.

### 3.2 Résistance au cisaillement à l'interface entre deux matériaux de nature différente

Dans un matériau argileux, les particules sont liées entre elles par des forces pré-existantes qui opposent une résistance à la désunion directe. La loi de Mohr-Coulomb est généralement admise comme critère de rupture pour caractériser l'état d'équilibre limite d'une argile :

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi \quad (3.1)$$

Où,

$\tau$  : Résistance au cisaillement

$\sigma_n$  : Contrainte normale au plan de rupture

$c$  : Cohésion

$\phi$  : Angle de frottement interne du sol

La cohésion et l'angle de frottement interne sont les paramètres essentiels qui définissent les propriétés mécaniques d'un sol.

L'interface sol-structure est une zone très fine au voisinage immédiat du contact entre le sol et la structure. Cette zone a fait l'objet de nombreuses recherches en vue d'identifier son comportement. En effet il s'agit d'un mélange de propriétés de deux matériaux de nature différente. Dans le cas d'un contact entre un sol et un matériau quelconque au niveau de l'interface, Potyondy (1961) a proposé d'exprimer la résistance à l'interface sous une forme similaire à la loi de Coulomb. Les efforts développés sur la surface de contact sont alors de deux natures :

- un effort de frottement dépendant de la rugosité des surfaces en contact,
- un effort d'attraction intermoléculaire maintenant jointes l'une à l'autre ces deux surfaces.

On appelle adhérence la valeur de cette dernière force par unité de surface de contact des deux matériaux. Les forces d'adhérence qui assurent une liaison entre un sol et une surface quelconque sont de même nature que celles qui assurent la cohésion pour le même matériau.

En conséquence, la résistance au cisaillement à l'interface sol-surface quelconque, s'écrit:

$$\tau = a + \sigma_n \operatorname{tg} \delta \quad (3.2)$$

Avec,

$a$  : adhérence

$\delta$  : angle de frottement sol-surface

$\sigma_n$  : contrainte normale à la surface

L'adhérence  $a$  est souvent négligée. Dans ce cas, la résistance au cisaillement devient alors :

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \delta \quad (3.3)$$

La résistance au cisaillement à l'interface est caractérisée par le coefficient de frottement à l'interface :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (3.4)$$

De nombreux exemples d'interaction sol-structure existent en pratique, par exemple dans les murs de soutènement, les éléments de renforcement des sols ou dans les pieux.

### 3.3 Résistance au cisaillement à l'interface pieu-sol cohérent

La capacité portante d'un pieux est la somme de deux termes, l'un concernant la résistance sous la pointe et l'autre le frottement latéral le long du fût. Ce dernier est dû à la résistance au cisaillement susceptible d'être mobilisée. Il est généralement admis que c'est la composante la plus importante dans le cas des sols cohérents. Son évaluation numérique peut

être empirique et découler de l'expérience ou au contraire basée sur un calcul. Sa valeur dépend en particulier de la nature du pieu, de son mode de mise en place, du type de sol et de l'état dans lequel il est autour du pieu.

Deux principales méthodes de calcul sont utilisées:

- la méthode des contraintes totales,
- la méthode des contraintes effectives.

### 3.3.1 Méthode des contraintes totales

Dans les sols dotés de cohésion, la résistance au cisaillement le long du fût  $\tau_s$  peut être évaluée à partir de la cohésion non drainée.

$$\tau_s = \alpha c_u \quad (3.5)$$

où,

$\alpha$  : facteur empirique

$c_u$  : cohésion non drainée

En général les valeurs de  $\alpha$  varient entre 0,3 et 1,5 et dépendent des types de sols et de pieux (Burland, 1973).

Cette méthode, cependant, a été développée à partir d'une corrélation empirique plutôt insatisfaisante et sa fiabilité en pratique est quelque fois mise en doute (Burland, 1973; Parry & Swain, 1977; Focht & O'Neil, 1985; Hamilton & Murf, 1988, etc).

### 3.3.2 Méthode des contraintes effectives

Dans cette méthode la résistance au cisaillement à l'interface  $\tau_s$  est obtenue à partir de la contrainte effective verticale  $\sigma'_v$ . Chandler (1968) a été le premier à introduire cette méthode dans l'analyse des résultats d'essais de chargement de pieux forés installés dans l'argile de Londres. Il proposa l'expression suivante:

$$\tau_s = c' + \sigma'_h tg \delta' \quad (3.6)$$

Où,

$c'$  : cohésion effective,

$\sigma'_h$  : contrainte effective horizontale agissant sur le pieu,

Cette dernière peut être écrite sous la forme :

$$\sigma'_h = K_s \sigma'_v \quad (3.7)$$

$K_s$  : coefficient de pression des terres à l'interface pieu-sol,

$\sigma'_v$  : contrainte effective verticale,

$\delta'$  : angle de frottement entre le sol et le pieu.

Pour les argiles normalement consolidées  $c'=0$  et pour les argiles surconsolidées  $c'$  peut être négligée également en raison du remaniement qui a lieu dans le sol autour du pieu lors de l'installation de ce dernier.

D'où,

$$\tau_s = K_s \sigma'_v \operatorname{tg} \delta' \quad (3.8)$$

Burland (1973) introduit un nouveau facteur  $\beta$  pour donner à l'équation la forme suivante:

$$\tau_s = \beta \sigma'_v \quad (3.9)$$

où,

$$\beta = K_s \operatorname{tg} \delta' \quad (3.10)$$

Il a mis en évidence également que pour les pieux installés dans les argiles molles la valeur de  $\beta$  varie entre 0,25 et 0,40, quel que soit le type d'argile et recommande d'utiliser une valeur égale à 0,3 dans les calculs. Dans le cas des argiles dures, il recommande une valeur de  $\beta$  égale à 0,8.

### 3.4 Angle de frottement mobilisé à l'interface sol-pieu

Plusieurs propositions ont été avancées concernant la valeur de l'angle de frottement  $\delta'$  à prendre en considération. Chandler (1968) présume qu'il est approprié d'utiliser l'angle de frottement interne effectif  $\phi'$ . Tomlinson (1970), dans sa significative contribution à la compréhension du comportement des pieux dans l'argile juge qu'il est important de se concentrer sur le comportement d'une mince couche de sol adjacent au pieu. Il suggère que le battage du pieu dans le sol a pour effet de causer une succession de ruptures à l'interface pieu-sol entraînant un alignement intense des particules de sol. Il propose une valeur égale à l'angle de frottement interne drainé remanié du sol. De même Burland (1973) recommande de prendre  $\delta'$  égale à l'angle de frottement remanié  $\phi'_d$  en raison de la rupture qui survient dans la zone remaniée, située autour du pieu.

Parry & Swain (1975) ont montré que, pour des argiles surconsolidées et dures,  $\delta'$  est inférieur à  $\phi'_d$  et ont suggéré d'effectuer des recherches complémentaires pour trouver si  $\delta'$  correspond à l'angle de frottement interne résiduel ou remanié du sol.

Searl (1980) a utilisé la méthode des contraintes effectives en considérant la résistance résiduelle. Une revue des cas qui ont été précédemment considérés pour établir la méthode

des contraintes totales a montré qu'il y'avait une bonne concordance entre ces prédictions et les valeurs mesurées du frottement latéral le long du fût, concernant l'argile de Londres.

Chandler & Martins (1982) ont examiné les critères de rupture et les variations de contraintes qui ont lieu lors de l'installation des pieux. Ils ont conduit des essais de chargement sur des modèles réduits de pieux insérés dans le kaolin en réduisant au minimum le remaniement de la structure du sol. L'angle de frottement interne mobilisé à l'interface pieu-sol était légèrement inférieur à la valeur de pic de l'angle de frottement interne effective déterminée à partir d'essais triaxiaux.

O'Riordan (1982) a démontré à la suite d'un essai conduit sur un pieu de 1,53m de diamètre pour mesurer le frottement latéral et la résistance de pointe, que pour des déplacements dépassant 4mm le frottement latéral atteint une valeur résiduelle constante pour les argiles de Woolwich et Reading, de ce fait indiquant qu'il est plus approprié d'utiliser l'angle de frottement interne résiduel du sol pour  $\delta'$ .

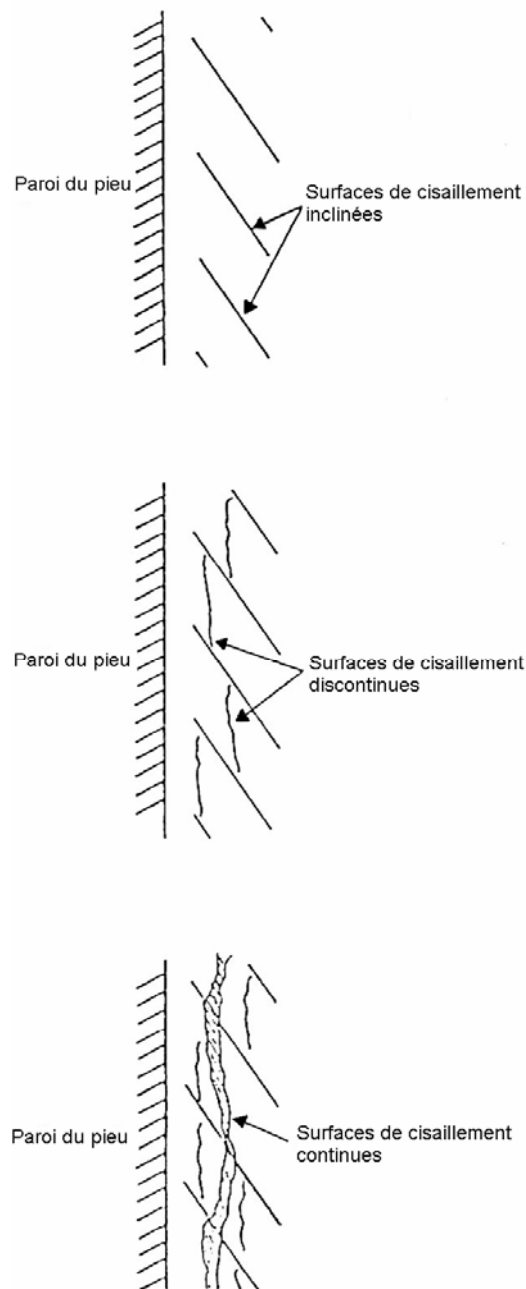
Les résultats obtenus par Anderson et al (1985) sont conformes aux précédentes conclusions. Ils ont démontré que l'angle de frottement à la rupture est proche de la valeur résiduelle mesurée au moyen de l'appareil de cisaillement annulaire. Cette conclusion a été tirée à la suite de résultats d'essais de cisaillement sur des modèles réduits de pieux forés et coulés sur place dans des argiles normalement consolidées et surconsolidées.

Cependant du moment que  $\phi'_r$  est susceptible d'être affectée par la rugosité d'interface et les conditions de cisaillement, il semble qu'il est plus approprié de prendre en compte l'angle de frottement interne résiduel à l'interface sol-matériau solide (Tika-Vassilikos et al., 1992). Ceci est dû au fait que lorsqu'un sol est chargé axialement, une contrainte de cisaillement est imposée au sol le long du fût du pieu. En conséquence une déformation du sol a lieu. Lorsque la rupture est approchée une surface de cisaillement est susceptible de se développer dans le sol situé autour du pieu ou à l'interface si le pieu est lisse. Du moment qu'un remaniement important est susceptible de se produire durant l'installation et le chargement ultérieur, le comportement du pieu à la rupture dépend des propriétés de résistance et de déformation du sol adjacent au pieu dans le domaine des déplacements importants.

### **3.5 Déformation du sol autour des pieux**

Parry & Swain (1977), suite à une étude consacrée au frottement latéral le long du fût, a mis en évidence le fait que la rupture initiale se développe au voisinage du pieu et se présente sous forme de surfaces de cisaillement inclinées d'angles entre 10° et 38° par rapport à la vertical. Un mouvement vertical supplémentaire du pieu entraîne le développement de

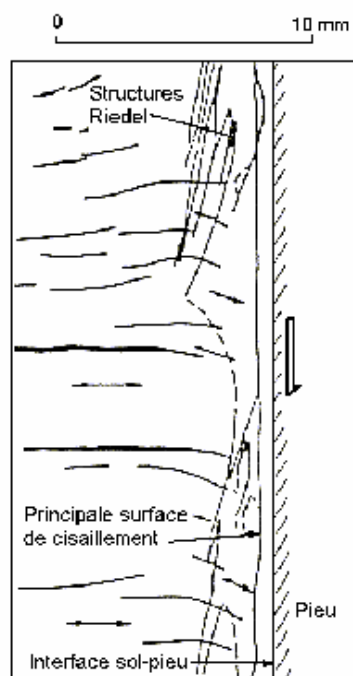
nouvelles surfaces de cisaillement approximativement parallèles à l'interface sol-pieu. Ces surfaces vont se joindre l'une à l'autre pour former une surface de cisaillement continue comme illustré sur la Figure 3.1.



**Figure 3.1** Développement des surfaces de cisaillement autour des pieux (d'après Parry & Swain, 1977)

Ces prédictions concordent assez bien avec les résultats établis par Chandler & Martins (1982) qui ont pu étudier le mécanisme de rupture en interrompant des essais à différentes étapes de chargement et en faisant de minces sections de kaolin au voisinage du fût d'un modèle de pieu en utilisant la technique de l'imprégnation à la cire de carbone. Ils ont été en mesure de montrer que des surfaces de cisaillement inclinées (Structures Riedel) se

développent initialement. Un mouvement supplémentaire du pieu, entraîne la formation d'une étroite zone de cisaillement (environ 0,05 mm) à environ 0,5 mm du pieu avec des particules argileuses fortement inclinées. Ces détails sont représentés dans la figure 3.1, dans laquelle le déplacement total du pieu est d'environ 13 mm



**Figure 3.2** Déformation du sol au voisinage d'un pieu (d'après Chandler & Martins, 1983)

### 3.6 Mesure de la résistance au cisaillement à l'interface au laboratoire

Les essais de cisaillement à l'interface au laboratoire sont très utiles pour l'étude du comportement fondamental du frottement latéral autour des pieux parce qu'ils ont des conditions aux limites bien définies et seulement de petits échantillons de sols sont nécessaires pour conduire des essais. Les essais de cisaillement à l'interface au laboratoire peuvent être classés en deux types :

- essais de type cisaillement direct, tels que la boîte de cisaillement, le cisaillement simple et le cisaillement annulaire,
- essais de cisaillement indirect, tel que l'essai triaxial.

Chaque essai a fait ses preuves et présente des avantages et des inconvénients. Les avantages et inconvénients de chaque méthode ont été résumés par Kishida et Uesugi (1987) et Paikowski et al (1995).

Le premier type d'essais permet de mesurer directement les contraintes normales et tangentielles à l'interface. D'autre part dans le cas du deuxième type ces contraintes sont mesurées indirectement. On notera enfin que des essais d'arrachement (Brumund et Leonards, 1973), ainsi que des pieux modèles ont été également utilisés pour ce type de recherches.

### 3.6.1 Essai de cisaillement direct modifié

La plupart des études antérieures concernant la résistance au cisaillement entre l'interface et le sol ont été réalisées en utilisant souvent des appareils du type boîte de cisaillement. Dans ce type d'essais, la boîte de cisaillement est modifiée en plaçant le matériau solide à l'intérieur de la demi-boîte inférieure et le sol dans la demi-boîte supérieure (Figure 3.1). Au cours de l'essai, la surface de l'interface varie. Dans certaines recherches, c'est dans la partie supérieure qu'a été placé le matériau solide et le sol dans la partie inférieure. L'essai fournit des caractéristiques mécaniques le long d'une surface de rupture imposée et les déformations sont limitées et ne permettent pas l'établissement de la résistance résiduelle. Ils sont adéquats pour les applications géotechniques où les déformations à l'interface ne sont pas importantes, comme dans le cas des murs de soutènement par exemple.

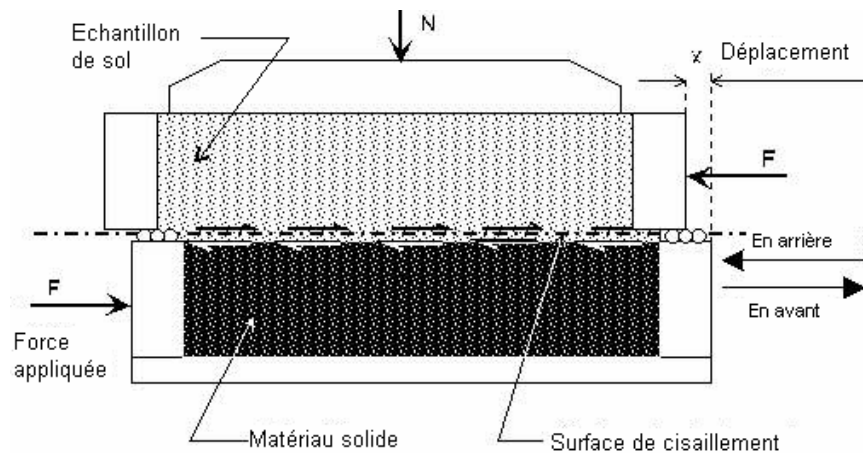
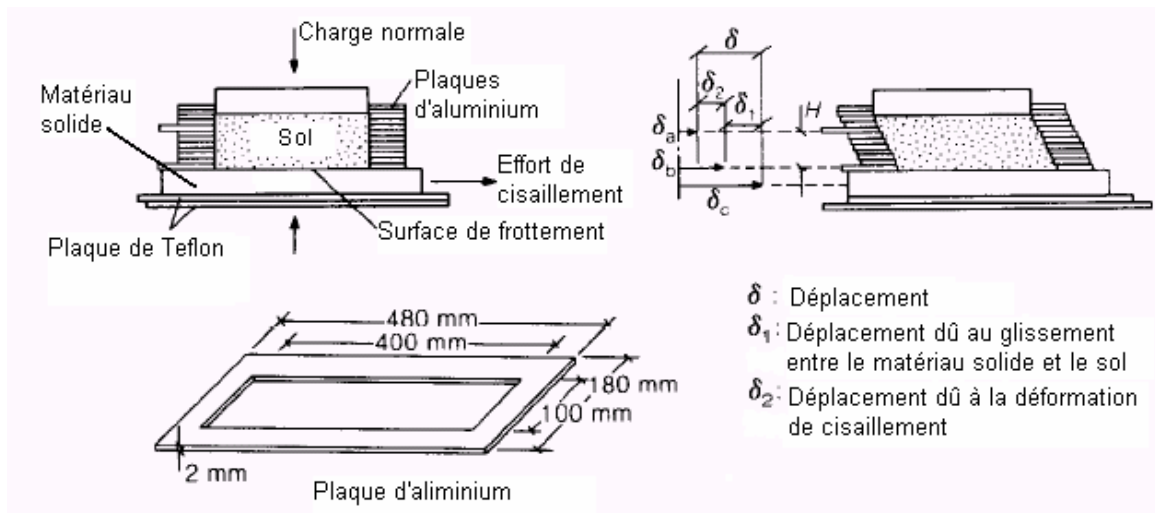


Figure 3.3 Principe de l'essai de cisaillement direct modifié

### 3.6.2 Essai de cisaillement direct simple

De conception semblable à l'essai de cisaillement direct, à quelques exceptions, cet essai permet à l'échantillon de se déformer librement et uniformément. La différence par rapport au premier type d'essai porte essentiellement sur les conditions aux limites appliquées au sol.

Des études ont été conduites en ayant recours à un appareil de ce type au Japon (Kishida & Uesugi, 1987 ; Tsubikahara et al. 1993 ; Tsubikahara & Kishida, 1993, etc.) Dans cet appareil, l'échantillon de sol est enfermé dans une demi-boîte rectangulaire. Celle-ci est construite d'un empilement de plaques en aluminium (Figure 3.2). Ainsi, le glissement à l'interface est mesuré séparément de la déformation de cisaillement au sein de l'échantillon. Cet essai n'implique pas de localisation ; pour cette raison il semble inapproprié pour les études d'interface.

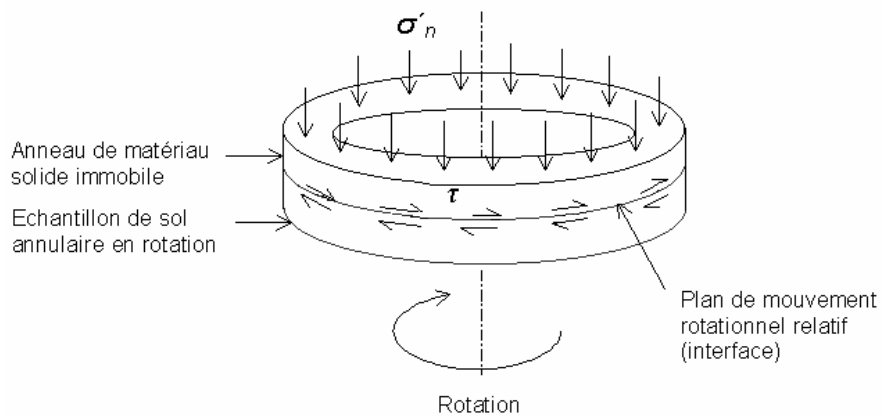


**Figure 3.4** Principe de l'essai de cisaillement simple (d'après Kishida & Uesugi, 1987)

### 3.6.3 Essai de cisaillement annulaire

C'est une des techniques expérimentales relativement récentes en interaction sols-structures. Cette technique, grâce aux possibilités qu'elle offre et sa fiabilité, a eu un succès important ces dernières années, comme en témoigne le nombre de prototype qui ont été réalisés. Dans ce type d'essais, dont le principe est illustré sur la figure 3.5, l'échantillon de sol et la partie matériau solide ont une forme annulaire. Le cisaillement dans un plan horizontal est généré par l'application d'un couple de torsion à l'embase inférieure ou supérieure. Les conditions aux limites sur les parois assurent une bonne homogénéité circonférentielle de l'échantillon. Par ailleurs on peut atteindre un niveau de déformation très important avec une bonne estimation de la résistance résiduelle.

Plusieurs études concernant l'interaction sol-structure dans le domaine des grands déplacements relatifs ont été réalisées pour différents matériaux en utilisant des appareils de cisaillement annulaire (Negussey et al, 1989; Tika, 1991 et 1999; Stark & Poeppel, 1994; Evans & Fennick, 1995; Lemos & Vaughan, 2000 ; etc.). Kishida & Uesugi (1987), après avoir passé en revue différents appareils utilisés dans l'étude de la résistance à l'interface sol-matériau solide, ont conclu que l'appareil de cisaillement annulaire est l'appareil idéal pour ce genre d'expérimentation en raison de son interface continue.



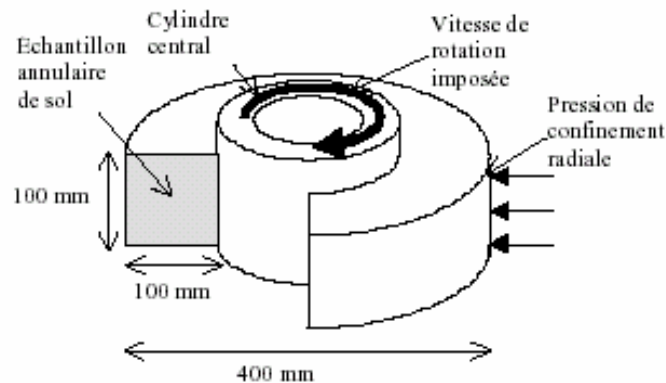
**Figure 3.5** Principe de l'essai de cisaillement annulaire par torsion

Dans les appareils pour lesquels la rupture a lieu à l'intérieur du corps de l'échantillon, tel que l'appareil IC/NGI, les essais de cisaillement à l'interface sont réalisés après placement d'une surface torique dans la partie supérieure de la demi boîte inférieure de façon à ce que le cisaillement ait lieu entre le sol et le matériau constituant l'interface. L'appareil de Bromhead, de par sa conception, est bien adapté pour les essais d'interface. Il suffit en effet de remplacer l'anneau d'origine par un anneau de mêmes dimensions, constitué d'un matériau différent pour déterminer la résistance à l'interface entre le sol et le matériau en question. La différence entre les deux appareils cités précédemment, concernant les essais d'interface, réside dans le fait que dans le premier le sol surmonte le matériau solide alors que dans le second, le sol est situé dans la partie inférieure et le matériau solide dans la partie supérieure. L'appareil de Bromhead a été utilisé par Stark & Poeppel (1994) et Evans & Fennick (1995) dans des études d'interface relatives aux géotextiles.

Du point de vue type d'essais, Tika (1999) a présenté une série d'essais de cisaillement annulaire à l'interface limon sableux de carbonate-acier pour simuler le cisaillement du sol causé durant l'installation et le chargement du pieu, en utilisant des essais dans des conditions de contrainte normale constante et des essais dans des conditions de rigidité normale constante. Les résultats pour les deux types d'essais, avec la même rugosité, ont donné des résultats similaires.

On mentionnera également l'appareil de cisaillement simple annulaire (ACSA) décrite par Lerat et al. (1997) et développé au CERMES en France et destiné essentiellement à l'étude des interfaces sols granulaires-structures. Le principe mécanique de l'essai est donné dans la figure 3.6 : l'échantillon annulaire a un volume de l'ordre de  $9,4 \text{ dm}^3$ . Il est disposé autour d'un cylindre central dont la mise en rotation assurera le cisaillement de l'échantillon. Sur l'autre bord cylindrique, une pression de confinement est exercée par l'intermédiaire d'une membrane en néoprène elle-même soumise à une pression d'eau. Un tel principe assure

l'homogénéité des conditions aux limites de déplacement sur toute l'interface et minimise les effets de bord comme ceux que présente une boîte de cisaillement direct modifiée. De par sa conception, l'appareil peut être utilisé pour de très longs déplacements. Toutefois la taille de l'appareil et sa sophistication le destinent davantage à des travaux de recherche qu'à des essais de routine.



**Figure 3.6** Schéma de principe de l'essai de cisaillement simple annulaire (ACSA)

### 3.7 Effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement à l'interface sol cohérent-structure

La rugosité de surface a depuis longtemps été reconnu comme ayant une influence significative sur la résistance d'interface. Cependant en raison des limitations dans les méthodes expérimentales pour la quantification des caractéristiques de rugosité de surface, l'effet sur la résistance d'interface s'est limité à des analyses qualitatives malgré les contributions faites auparavant.

La plupart des études antérieures sur le comportement du cisaillement sol-interface reportée par la bibliographie ont été réalisés pour les sables. La résistance au cisaillement à l'interface sable-matériau solide dépend de la rugosité de la surface de contact par rapport à la taille des grains, du type de sable, de la contrainte normale appliquée, de la densité du sable et la vitesse de cisaillement. Les grains de sable ont tendance à glisser sur des surfaces très lisses donnant des frottement latéraux pouvant atteindre  $10^\circ$  (Yoshimi & Kishida ;1981 ; Uesugi et al., 1988,1989,1990). Plus la rugosité augmente, plus le cisaillement se produit au sein du sol et pour des surfaces très rugueuses la résistance de l'interface de sable est égale à celle du sable (Potyondy, 1961 ; Butterfield & Adrawes, 1972 ; Yoshimi & Kishida, 1981 ; Uesugi & Kishida, 1986a, b). Cependant, Brumund & Leonards (1973) ont conclu que quand la surface de la structure a une importante rugosité par rapport au dimensions des grains de sable,

l'angle de frottement à l'interface est susceptible d'être supérieure à l'angle de frottement interne du sol et la surface de cisaillement a lieu au sein du sol.

Quand les sols argileux sont soumis à un cisaillement contre des surfaces solides, la résistance au cisaillement au pic dépend de l'historique des contraintes, de la méthode de préparation des échantillons, de la teneur en eau, du pourcentage de fraction argileuse, de la vitesse de cisaillement et de la rugosité de l'interface. La résistance au cisaillement sol-interface est normalement légèrement plus petite que la résistance sol-sol et tend à diminuer avec des rugosités de surface de plus en plus faibles (Meyerhof & Murdock, 1953 ; Potyondy, 1961 ; Kanji, 1974 ; Littleton, 1976 ; Martins, 1983). Des observations de surfaces de cisaillement entre l'argile et l'acier ont montré qu'une grande partie est susceptible d'impliquer un cisaillement argile-argile (Littleton, 1976).

Tsubakihara & Kishida (1993) ont étudié le frottement entre l'argile de Kawasaki et l'acier en utilisant deux appareils de type cisaillement simple et de type boîte de cisaillement. A la suite de cette étude, il ont postulé une rugosité critique pour l'acier de  $R_{max} = 10 \mu\text{m}$  ( $L_a = 0,2 \text{ mm}$ ) approximativement (voir au paragraphe 4.2 la définition de  $R_{max}$ ). Quand la surface d'acier est plus lisse que la rugosité critique, un glissement à l'interface a lieu pour la résistance de pic; quand la rugosité de l'acier dépasse la valeur critique, cependant, il y a une rupture par cisaillement au sein de l'échantillon d'argile plutôt qu'un glissement au niveau de l'interface et la valeur limite de la résistance est celle de l'argile. Pour les essais du type boîte de cisaillement, cependant la résistance au cisaillement argile-acier n'a pas pour limite supérieure celle de l'argile.

Tsubakihara et al. (1993) ont mis à l'essai des sols cohérents contre des interfaces d'acier doux en utilisant un appareil de type cisaillement simple. Les sols cohérents utilisés sont l'argile de Kawasaki et quatre types de mélanges sable-argile. Ils ont observé trois modes de rupture : glissement complet à l'interface ; rupture par cisaillement au sein du sol et un comportement mixte où le glissement à l'interface et la déformation par cisaillement de l'échantillon ont eu lieu en même temps. Pour le frottement des mélanges sable-argile avec des rugosités d'acier entre 20 et 30  $\mu\text{m}$  ( $R_{max}$  ( $L_a = 0.2 \text{ mm}$ )), le glissement à l'interface et la déformation par cisaillement à l'intérieur du sol ont lieu simultanément.

Subba Rao et al. (2000), ont utilisé un appareil de cisaillement direct modifié pour étudier l'influence de la rugosité de surface du matériau d'interface, du type de sol et de l'indice de surconsolidation sur la résistance au cisaillement sols fins-acier. Trois types de sol ont été utilisés : terre rouge (red earth), argile illitique et argile kaolinitique et cinq plaques consistant d'acier inoxydable (matériau 1 lisse), acier doux (matériaux 2 et 3, de rugosité intermédiaire) et béton (matériaux 4 et 5, rugueux). Les degrés de rugosité des surfaces

métalliques ont été obtenus par moletage et polissage. Pour la confection des plaques de béton deux types de sables ont été utilisés pour obtenir deux surfaces rugueuses distinctes. Les valeurs de  $R_a$  sont situées dans le domaine  $0,056 \mu\text{m} - 13,98 \mu\text{m}$ . Les résultats obtenus indiquent que le rapport entre l'angle de frottement de pic à l'interface  $\delta_p'$  et l'angle de frottement interne du sol  $\phi_p'$ ,  $\delta_p'/\phi_p'$ , est indépendant de l'indice de surconsolidation du sol.  $\delta_p'/\phi_p'$  augmente avec la rugosité et sa valeur limite maximum pour des surfaces très rugueuse est l'unité. Une corrélation empirique entre  $\delta_p'/\phi_p'$  et la rugosité relative  $R$  (voir la définition au paragraphe 4.2) a été proposé pour la détermination de  $\phi_p'$ .

### 3.8 Résistance au cisaillement résiduelle à l'interface sol – structure

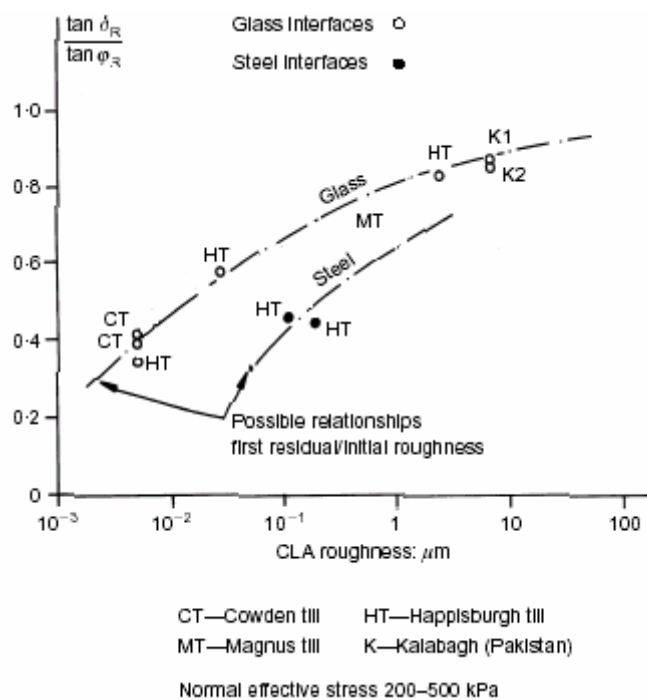
Peu de chercheurs ont étudié la résistance au cisaillement à l'interface sol-structure pour des déformations importantes. Les travaux publiés concernaient généralement des déplacements faibles qui ne permettaient pas de mobiliser l'état résiduel. Skempton & Petley (1967) ont montré que le concept de résistance résiduelle s'applique aussi à la résistance au cisaillement le long des discontinuités structurelles dans les argiles pour lesquelles après un petit déplacement, la résistance au cisaillement le long de ces discontinuités atteint une valeur résiduelle. La plupart des recherches qui se sont intéressées à la résistance au cisaillement à l'interface sol – structure dans le domaine des grands déplacements ont été réalisées à Imperial College (Université de Londres) et concernent des essais de cisaillement annulaires, au moyen de l'appareil IC/NGI, destinés à simuler l'installation et le chargement des pieux et ce pour permettre l'interprétation d'essais de pieux instrumentés (Jardine, 1985 ; Bond, 1989 ; Lehane, 1992).

D'après Lemos (1986), la présence d'une interface rigide limite le degré d'interface entre les particules massives et plates et peut affecter le mécanisme de cisaillement considérablement. En particulier, des sols qui se comportent selon le mode transitoire dans des essais sol-sol tendent à avoir un comportement glissant lors d'un cisaillement à l'interface. La diminution dans la résistance qui en résulte dépend de la rugosité et la rigidité de l'interface.

Lehane & Jardine (1992) ont présenté une série d'essais de cisaillement annulaire pour faciliter l'interprétation des résultats d'essais de pieux instrumentés à Bothkennar. Des résultats sont présentés pour des essais sol-sol et des essais d'interface. L'interface utilisée était un anneau d'acier inoxydable décapé à la sableuse avec une rugosité arithmétique moyenne  $R_a = 8,5 \mu\text{m}$  (voir la définition au paragraphe 4.2). Les essais ont été effectués pour un grand nombre de vitesses de déplacement. Les résultats obtenus montrent que le

comportement au cisaillement dans le domaine des grands déplacements était du type turbulent malgré une teneur en argile et un indice de plasticité élevé, avec un angle de frottement interne résiduel lent  $\phi' = 30^\circ$ . Contrairement aux argiles pour lesquels  $\phi'$  est élevé, la différence entre les résultats des essais sol-sol et sol-acier n'était pas importante.

Tika (1999) a présenté une série d'essais de cisaillement annulaire réalisés sur un limon sableux de carbonate pour simuler le cisaillement du sol causé durant l'installation et le chargement du pieu. Les essais ont été conduits pour un cisaillement sol-sol et un cisaillement à l'interface sol - acier. Quand le sol est soumis à un cisaillement contre une interface d'acier lisse pour laquelle la rugosité arithmétique moyenne  $R_a = 2,5 \mu\text{m}$ , la résistance au cisaillement résiduelle chute à une valeur minimum (83 % de la résistance résiduelle du sol); elle augmente ensuite vers la résistance résiduelle et conserve une valeur constante par la suite, indépendamment de la vitesse de cisaillement à 0,026 mm/mn et 3,47 mm/mn. Quand le sol est soumis à un cisaillement contre une interface d'acier plus rugueuse pour laquelle  $R_a = 3,5 \mu\text{m}$ , la résistance au cisaillement diminue pour atteindre une valeur minimum constante (75 % de la résistance résiduelle du sol). Lorsque le cisaillement est prolongé à 3,47 mm/mn, la résistance chute encore et atteint une valeur plus basse (60 % de la résistance résiduelle du sol). Après rétablissement du cisaillement lent à 0,026 mm/mn, la résistance au cisaillement atteint la résistance résiduelle du sol.



**Figure 3.7** Résistance résiduelle en fonction de la rugosité d'interface (d'après Lemos & Vaughan, 2000)

Lemos & Vaughan (2000) ont étudié le cisaillement, dans le domaine des grands déplacements, d'argiles de différentes plasticités contre des interfaces de matières diverses (verre, acier doux et acier inoxydable) et rugosités variables, au moyen de l'appareil de cisaillement annulaire IC/NGI.

Des essais de cisaillement annulaire ont été réalisés sur des argiles de faible plasticité, à savoir les glaciaires moraines de Happisburgh, Magnus et Cowden (Grande Bretagne) ainsi que des échantillons de Kalabagh (Pakistan), contre des interfaces en verre, acier doux et acier inoxydable. Les essais sol-sol ont montré des comportements selon soit le mode turbulent soit le mode transitoire. La résistance résiduelle à l'interface a été atteinte pour des déformations inférieures à celles nécessaires pour atteindre les conditions résiduelles dans le cas d'un cisaillement sol-sol et a toujours été inférieure à la résistance résiduelle sol-sol et varie avec la rugosité initiale. Les angles de frottement d'interface résiduels  $\delta_r$  dépendent du matériau d'interface, l'acier donnant des valeurs plus petites que le verre, comme le montre la figure 3.7. Ils ont également pu déduire à partir de cette figure que l'interface cesserait d'avoir une influence sur la résistance lorsque la rugosité devenait équivalente aux dimensions des grains de sable fin présent dans ces argiles sableuses.

Pour étudier l'effet de l'interface sur les modes de cisaillement résiduel postulés par Lupini et al. (1981), des mélanges de glaciaire moraine de Happisburgh - argile de Londres ont été testés contre des interfaces de verre de rugosité  $R_a = 2,3\mu\text{m}$ . Des essais standards sol-sol ont été conduits également sur les mêmes sols pour déterminer la résistance au cisaillement sol-sol. Ils ont montré que pour les échantillons caractérisés par une forte teneur argileuse, pour lesquelles le mécanisme de cisaillement résiduel est le mode glissant dans le cas d'un cisaillement sol-sol, la résistance au cisaillement ultime à l'interface est égale approximativement à la résistance résiduelle du sol et ne dépend pas de la rugosité de surface. Si la surface d'interface est très lisse et polie, la résistance à l'interface peut être inférieure à celle du sol. Dans le cas d'échantillons à faible teneur en particules argileuses, pour lesquelles le mécanisme de cisaillement résiduel est soit le mode transitoire soit le mode turbulent pour un cisaillement sol-sol, la présence d'une interface a pour effet de faciliter le cisaillement glissant comme postulé par Lupini et al. (1981) et ce en fonction du matériau et de la rugosité d'interface. Cet effet est dû au fait que l'interface empêche l'interférence entre les minéraux massives présents de telle sorte qu'une mince zone de cisaillement d'argile orientée est susceptible de se former contre elle.

### 3.9 Effet de la vitesse de cisaillement

Tika–Vassilikos (1991) a présenté les résultats d'essais de cisaillement annulaires d'interface effectués sur l'argile de Londres surconsolidée, ayant un indice de surconsolidation égale à 2, contre des interfaces d'acier, à des vitesses comparables à ceux utilisés lors de l'installation des pieux battus. Les interfaces utilisées étaient en acier inoxydable de 8,4  $\mu\text{m}$  de rugosité. L'effet de la vitesse de cisaillement sur la résistance au cisaillement entre le sol et l'acier en grand déplacement a été examiné pour des vitesses rapides de 110 mm/mn, 1100 mm/mn et 2600 mm/mn. Les résultats obtenus montrent que durant une série de phases de cisaillement rapides successives (simulant l'installation de pieux) suivie par un cisaillement lent à 0,005 mm/mn (chargement de pieux) et enfin d'un cisaillement rapide (battage supplémentaire après chargement), le coefficient de frottement entre le sol et l'acier, durant toutes les phases de l'essai, dépend significativement de la vitesse de cisaillement rapide, particulièrement pour des vitesses plus grande que 110 mm/mn.

Lemos & Vaughan (2000) ont étudié l'effet de la vitesse de cisaillement en conduisant des essais de cisaillement annulaire d'interface sur des mélanges d'argile de Londres et de glaciaire moraine de Happisburgh soumis à un cisaillement contre une interface en verre pour laquelle  $R_a = 2,3\mu\text{m}$  à des vitesses de cisaillement atteignant 133 mm/mn. Les conditions résiduelles ont été tout d'abord établies par cisaillement lent drainé. Les résultats indiquent que de nouvelles résistances au pic et résiduelle avec des valeurs plus importantes sont mobilisées lorsque la vitesse de cisaillement est de 133 mm/mn. Cependant, à des vitesses supérieures (800mm/mn et 6200mm/mn) des échantillons d'argile de Kalabagh (Pakistan) cisailés contre une interface en verre pour laquelle  $R_a = 7\mu\text{m}$ , ont montré des pertes de résistance, avec des valeurs inférieures à la résistance résiduelle lente. Ceci a été attribué au fait que l'eau a la possibilité d'accéder à la zone de cisaillement. Le cisaillement rapide a pour effet de causer des désordres dans la zone de cisaillement orientée ce qui entraîne un pic de résistance lors d'une phase ultérieure de cisaillement lent.

### 3.10 Conclusions

A la suite de ce chapitre, il est possible de faire les conclusions suivantes :

1- La résistance au cisaillement à l'interface sol-surface quelconque d'un matériau solide, est -donnée par une loi de type Coulomb qui s'écrit sous la forme :  $\tau = \sigma_n \text{tg} \delta$ . Une approche similaire basée sur les contraintes effectives peut être utilisée pour prédire le frottement latéral le long des fûts des pieux. Toutefois le problème réside dans le choix de l'angle de frottement mobilisé à l'interface sol-pieu. Ce dernier peut être assimilé à l'angle de frottement résiduel entre le sol et le matériau solide constituant le pieu, développé dans le domaine des grands

déplacements et ce en raison des déformations importantes qui sont susceptibles de se produire autour du pieu, à la suite de l'installation et du chargement ultérieur du pieu.

2- Les études au laboratoire concernant le cisaillement d'interface, peuvent être généralement effectués par l'intermédiaire de trois types d'essais, à savoir : l'essai de cisaillement direct modifié, l'essai de cisaillement direct simple et l'essai de cisaillement annulaire. Ce dernier, à l'instar des études concernant un cisaillement sol-sol, est en mesure de fournir les meilleurs résultats, en ce qui concerne les études à l'interface sol cohérent-matériau solide dans le domaine des grands déplacements. Il est également recommandé pour les situations impliquant un cisaillement en petit déplacement.

3- Les études d'interface concernant les sols cohérents sont relativement peu nombreux par rapport aux études traitant le comportement des sables. La résistance au cisaillement sol-matériau solide en petits et en grands déplacements est influencée par la rugosité de surface. En petits déplacements, elle augmente avec la rugosité et a généralement comme limite supérieure la résistance au cisaillement du sol. Selon la rugosité de surface de l'interface, trois types de cisaillement peuvent avoir lieu :

- un cisaillement au sein du sol ;
- un cisaillement au niveau de l'interface ;
- un cisaillement impliquant en même temps les deux types de cisaillements cités précédemment.

4- Dans le domaine des grands déplacements, les travaux revus ont permis de conclure que les valeurs des angles de frottement d'interface résiduels  $\delta_r$ , sont inférieures aux valeurs obtenues dans le cas d'un cisaillement sol-sol et augmentent avec la rugosité jusqu'à une valeur correspondant aux particules de sable présentes dans le sol. Au delà, la rugosité ne semble plus avoir d'effet. Les interfaces de verre tendent à donner des valeurs plus importantes que l'acier.

On notera toutefois que les surfaces utilisées sont relativement lisses et les modèles de texture des rugosités varient d'un essai à un autre. D'où la nécessité d'adopter des rugosités de surfaces plus importantes ainsi qu'un même modèle pour toutes les surfaces. En effet, il est probable que le modèle soit susceptible d'avoir une influence sur les résultats obtenus.

Cette revue bibliographique a aussi fait ressortir certains manques sur la connaissance du comportement à l'interface sols cohérents-matériaux solides en grand déplacement. En effet quelques questions restent encore en suspens, comme notamment, le comportement d'interface et l'effet de la rugosité de surface, en particulier pour des rugosités importantes, l'effet du pré-cisaillement, l'effet de la minéralogie, la texture induite par le cisaillement en fonction de la rugosité, le comportement en cisaillement rapide, l'effet d'autres matériaux

d'interface. L'objectif des chapitres suivants est d'apporter quelques éléments de réponse à l'ensemble des interrogations soulevées par l'étude bibliographique.

## **4 INTERFACES UTILISÉES ET QUANTIFICATION DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE**

---

### **4.1 Introduction**

Pour être en mesure d'examiner les mécanismes fondamentaux qui contrôlent le cisaillement à l'interface il est nécessaire en premier lieu de caractériser les matériaux impliqués. Pour les milieux constitués de particules tels que les sols, la caractérisation se fait à travers une série d'essais d'identification au laboratoire. Pour les interfaces constituées de matériaux solides, une évaluation quantitative des surfaces est également importante. Cette dernière comprend la rugosité qui est étymologiquement l'état d'une surface rugueuse. Une surface rugueuse est une surface qui présente des aspérités (irrégularités) à caractère micrographique et macrographique. L'aspérité est la partie saillante d'une surface irrégulière. Les matériaux de construction utilisés dans les ouvrages géotechniques présentent des irrégularités. De nombreuses recherches ont montré que la rugosité de surface de ces matériaux est un facteur intervenant et jouant un rôle important dans le comportement mécanique à l'interface sol-matériau. Toutes les surfaces sont rugueuses à l'échelle microscopique. La rugosité englobe des caractéristiques morphologiques comme l'amplitude, l'angularité, l'ondularité, l'anisotropie. Habituellement l'analyse de la rugosité passe par l'analyse des profils de surface par diverses méthodes d'analyse. Le profil correspond à la trace de l'intersection d'un plan et de la surface du matériau considéré. La rugosité est le plus souvent décrite à l'aide de paramètres dits linéaires calculés à partir de profils individuels.

La mesure précise de cette rugosité est donc nécessaire pour la caractérisation morphologique des interfaces. Dans ce chapitre nous exposerons les différentes approches de caractérisation de la rugosité des interfaces. Les profils typiques des interfaces utilisées sont également présentés.

### **4.2 Quantification de la rugosité d'un profil**

Les informations utilisées pour décrire ou caractériser les surfaces du point de vue rugosité sont généralement obtenues à la suite de mesures de profils de surfaces. La topographie de la surface peut être obtenue à partir d'un grand nombre de profils couvrant la totalité de la surface. Une telle surface ou profile à deux dimensions est difficile à produire et à analyser. Les paramètres sont généralement définis le long d'une longueur d'échantillonnage (profil). On doit cependant s'assurer de la représentativité de la surface

entière. En pratique, un paramètre est alors calculée en prenant une moyenne arithmétique des paramètres obtenus pour chaque profile.

D'après Ward (1982), il y'a environ 23 différents paramètres normalisés de mesures de la rugosité. Les indices les plus utilisés en géomécanique pour la description de la rugosité sont cités ci-dessous.

**Rugosité arithmétique moyenne ( $R_a$ ) :**

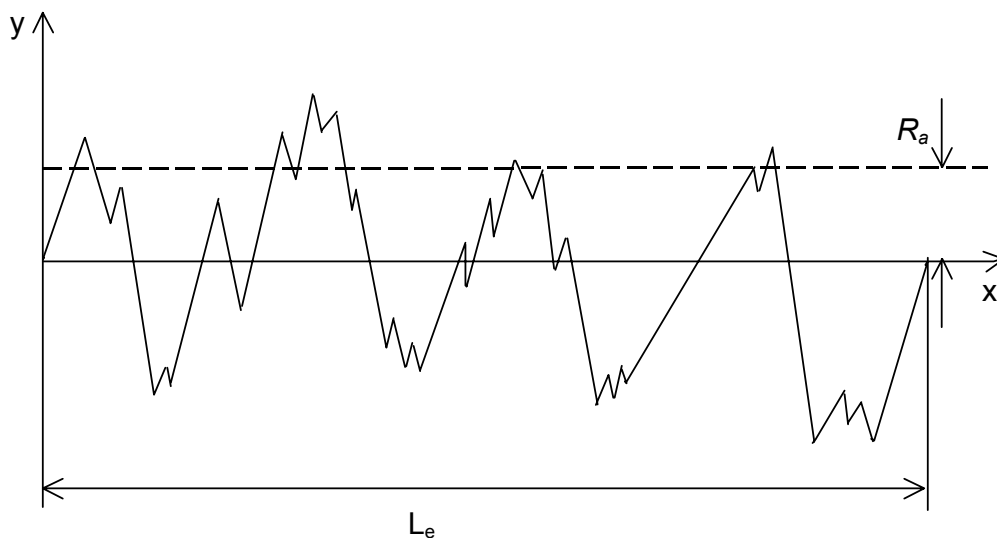
La rugosité arithmétique moyenne  $R_a$ , dénommée CLA (Centre Line Average) en Angleterre et AA (Arithmetical Average) aux USA, est basée sur les mesures de l'amplitude. C'est de loin le paramètre le plus utilisé. Il est défini comme la moyenne arithmétique des surfaces de toutes les valeurs du profil de rugosité :

$$R_a = \frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} |y(x)| dx \tag{4.1}$$

Où  $y(x)$  : Amplitude du profile par rapport à la droite moyenne

$L_e$  : Longueur de la droite moyenne du profile ou longueur d'échantillonnage prise en compte pour la définition de la rugosité

Les valeurs de  $y$  sont données par rapport à la ligne moyenne qui est parallèle à la direction de la surface générale et divise la surface de telle manière que la somme des surfaces formées au dessus de la ligne est égale à la somme des surfaces formées en dessous. La figure 4.1 illustre la définition de ce paramètre.



**Figure 4.1** Définition du paramètre de rugosité  $R_a$

Ce paramètre est souvent utilisé par les fabricants de matériau pour fournir des informations sur la rugosité des surfaces de matériau. Il donne une bonne description de la variation de la hauteur par rapport à la surface du matériau considéré.

$R_a$  s'écrit sous forme discrète :

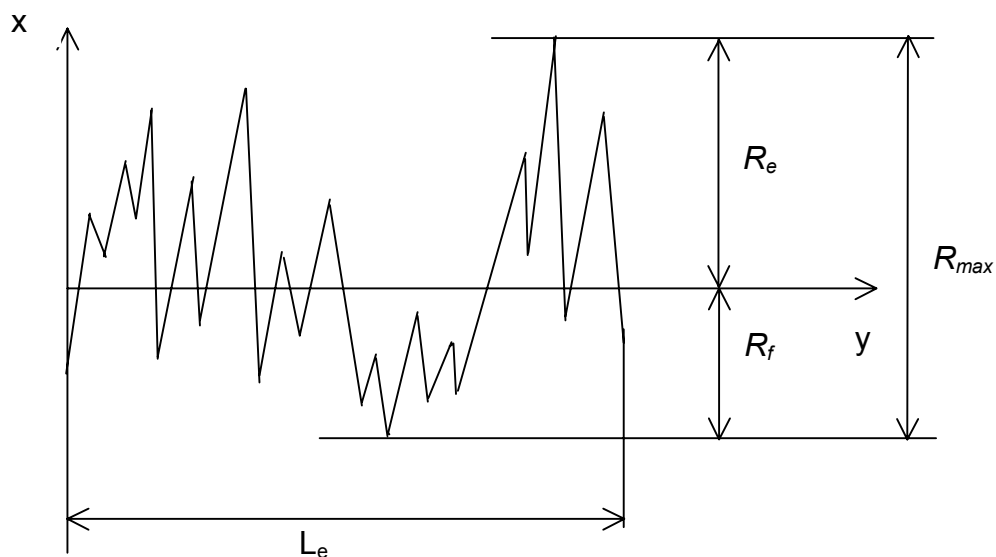
$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \quad (4.2)$$

Où  $N$  : Nombre de mesures de l'amplitude

$y_i$  : Amplitude discrète du profil par rapport à la droite moyenne

### Hauteur maximum entre pic et creux ( $R_{max}$ ) :

La hauteur maximum entre pic et creux  $R_{max}$  est défini comme la hauteur relative entre le plus haut pic et le plus bas creux le long d'un profil de surface qui s'étend sur une longueur d'échantillonnage ( $L_e$ ) (Figure 4.2).



**Figure 4.2** Définition des paramètres de  $R_e$ ,  $R_f$  et  $R_{max}$

### Pic maximal ( $R_e$ ) et creux minimal ( $R_f$ )

Le pic maximal mesure la distance vertical entre le plus haut pic et la ligne centrale du profil. Le creux minimal est la distance vertical entre la ligne moyenne du profil et le creux le plus bas.

Comme on peut le noter à partir de la figure 4.2 :  $R_{max} = R_e + R_f$  (4.3)

### Rugosité quadratique moyenne ( $R_q$ )

La rugosité quadratique moyenne, dénommée également RMS (Root Mean Square,) est une mesure de la déviation moyenne à partir de la ligne centrale :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} y^2 dx} \quad (4.4)$$

Dans une forme discrète, il s'écrit :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2} \quad (4.5)$$

### Valeur quadratique moyenne ou Mean Square Value ( $MSV$ ) :

Une autre variation du RMS est la valeur du MSV :

$$MSV = \frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} y^2 dx \quad (4.6)$$

Sous forme discrète le MSV s'écrit :

$$MSV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2 \quad (4.7)$$

### RMS de la dérivée première du profile ( $Z_2$ ) :

La racine carrée de la moyenne quadratique de la dérivée première du profile est un paramètre qui caractérise un profile en se basant sur sa pente moyenne :

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx} \quad (4.8)$$

Sous forme discrète le  $Z_2$  s'écrit :

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{(N-1)\Delta x^2} \sum_{i=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (4.9)$$

Où  $\Delta x$  : pas de discrétisation ou d'échantillonnage

### Indice de rugosité du profile ( $R_p$ )

L'indice de rugosité du profile,  $R_p$ , est le rapport entre la longueur réelle du profile à une hauteur donnée  $l$  et la longueur totale de la trace  $L$  :

$$R_p = \frac{l}{L} \quad (4.10)$$

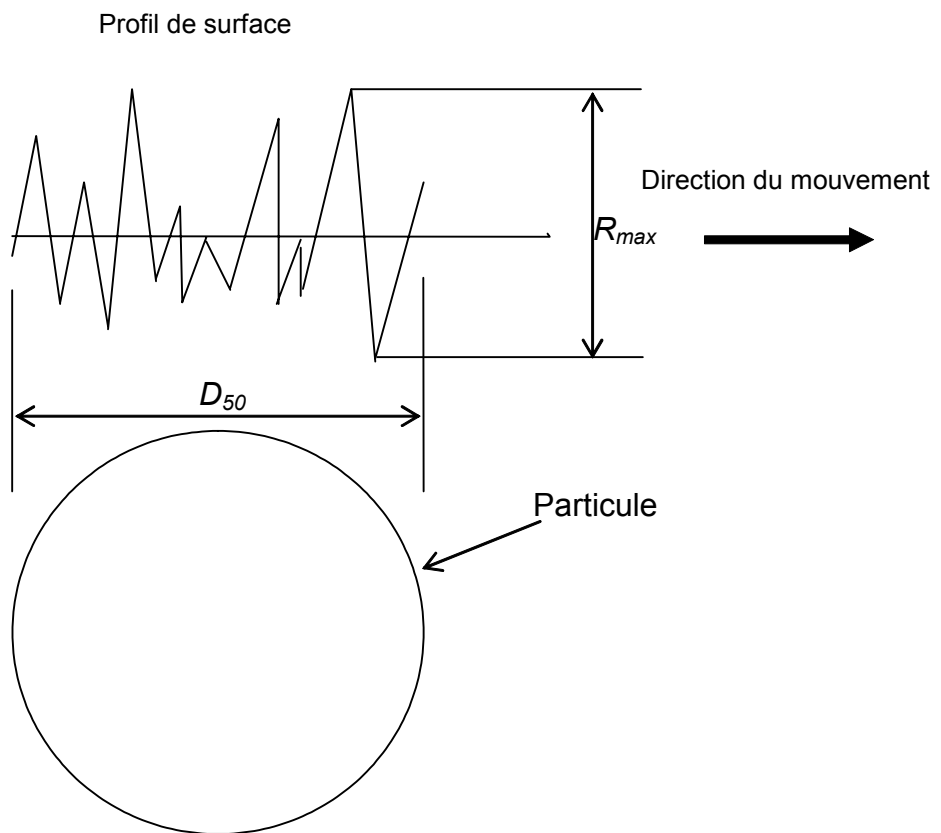
Les paramètres cités ci-dessus sont des paramètres de rugosité absolue qui représentent différents aspects de la distribution spatiale des caractéristiques de surfaces. Cependant, dans le cas d'interface sol – matériau solide, l'effet de la rugosité de surface du matériau solide est lui même dépendant des caractéristiques du sol. A cause de cette

interaction, la rugosité de surface devrait être caractérisé en relation avec le sol en contact. Les valeurs de  $R_{max}$  et  $R_a$  ne fournissent aucune information sur les pentes, formes et tailles des aspérités. Ce sont des paramètres de rugosité de surface uniquement et n'impliquent pas la taille des particules. Concernant les études de cisaillement à l'interface sol – matériau solide, les paramètres suivants ont été proposés :

### Rugosité normalisée $R_n$

Uesugi & Kishida (1986) et Kishida & Uesugi (1987) ont proposé une rugosité normalisée  $R_n$ , donnée par la relation suivante :

$$R_n = \frac{R_{max}}{D_{50}} \quad (4.11)$$



**Figure 4.3** Définition de la rugosité normalisée  $R_n$

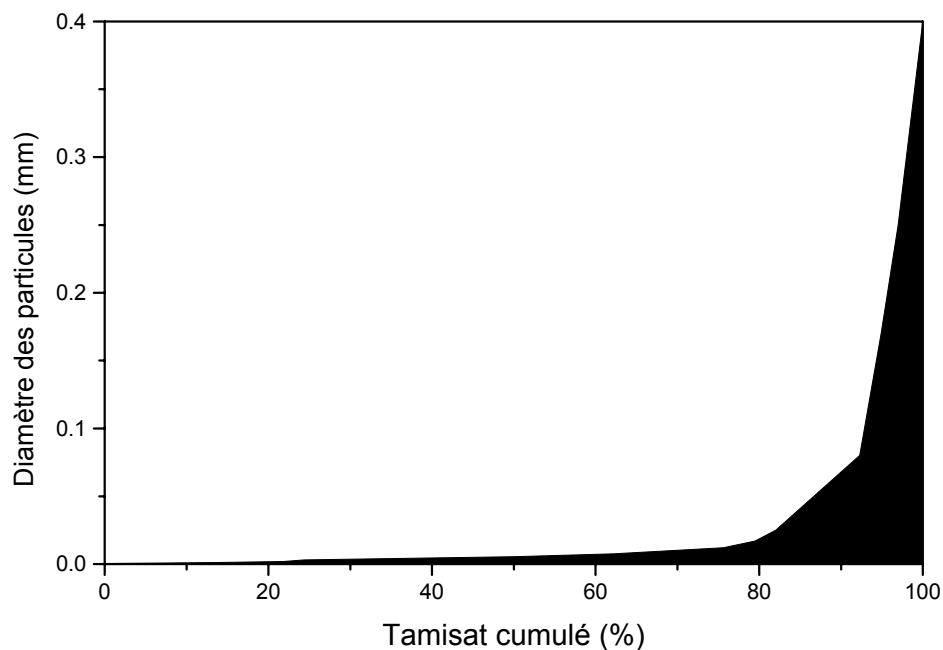
### Rugosité relative $R$

Un autre type d'indice de rugosité, appelé rugosité relative  $R$ , pouvant être adopté pour les données relatives aux interfaces sols cohérents-matériaux solides en conditions drainées, a été reporté par Subba Rao et al. (1998) et (2000). Il consiste à normaliser  $R_a$  avec le diamètre

moyen des particules du sol  $D_{moy}$ . Ce dernier peut être obtenu à partir de la surface de la courbe granulométrique du sol.  $R$  est défini comme :

$$R = \frac{R_a}{D_{moy}} \quad (4.12)$$

Un exemple de détermination de  $D_{moy}$  est représenté ci-dessous. En se référant à la figure 4.4,  $D_{moy}$  pour le limon de Xeuilley est obtenu en divisant la surface située au dessous de la courbe granulométrique par 100. Les diamètres moyens des quatre sols étudiés sont donnés dans le tableau 5.3, au chapitre suivant.



$$D_{moy} = \frac{2,871}{100} = 0,02871 \text{ mm} = 28,71 \mu\text{m}$$

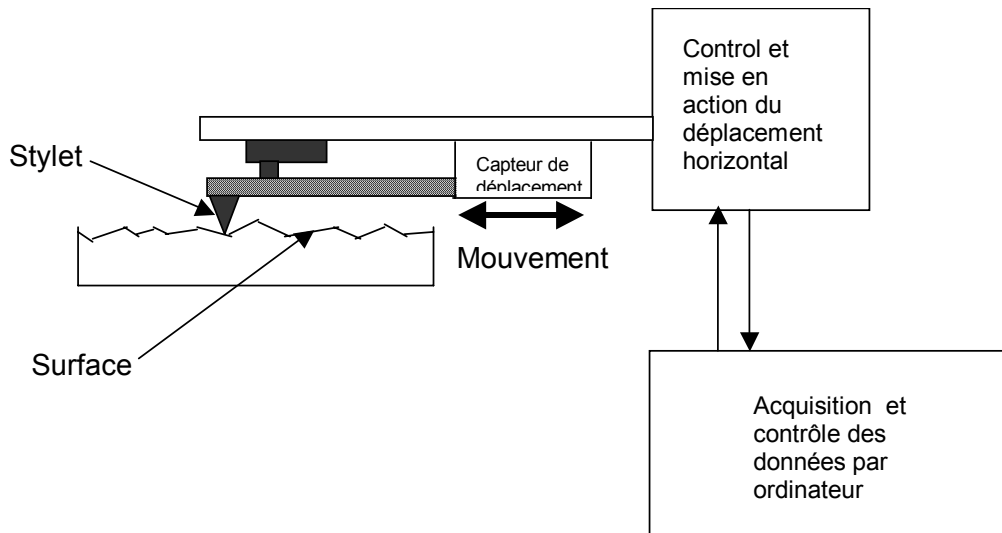
**Figure 4.4** Détermination de  $D_{moy}$  pour le limon de Xeuilley

### 4.3 Méthodes de mesure des profils de rugosité

L'acquisition des données morphologiques sous forme de digitalisation des profils topographiques peut être obtenus par divers moyens. Les plus courants sont :

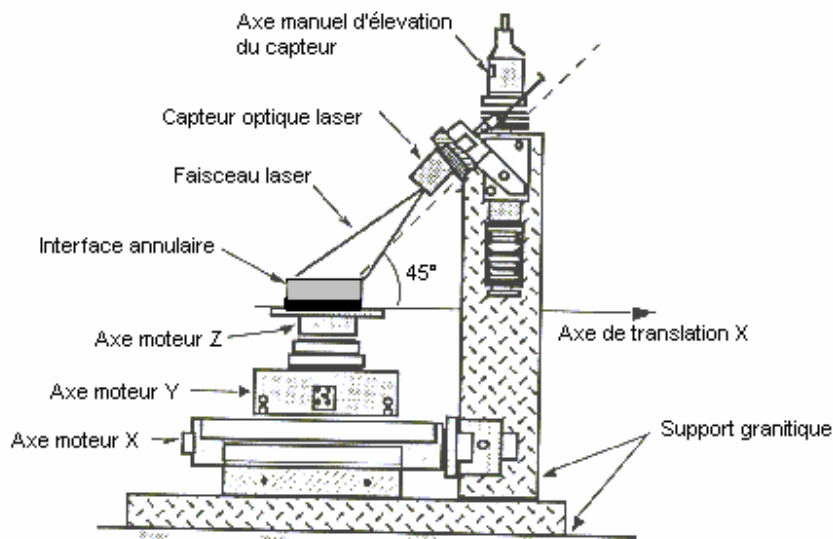
- les profilomètres classiques à stilet (Figure 4.5). Leurs systèmes reposent sur le déplacement dans une direction fixée d'un stilet sur la surface, couplé avec un système d'enregistrement automatique ou non. Le déplacement du stilet est, soit manuel soit automatique. Le déplacement suivant l'axe x est contrôlé par un capteur horizontal tandis qu'un capteur vertical permet l'enregistrement vertical de la pointe sur les aspérités. C'est pour cette raison qu'ils sont souvent appelés rugosimètres à

capteurs de déplacements. Du moment que le stylet est en contact avec le matériau, cette méthode est appelée méthode de contact. Cet instrument a été utilisé par Yoshimi & Kishida (1981) et par Kishida & Uesugi (1987) pour mesurer la valeur  $R_{max}$  de surfaces d'acier pour des études de cisaillement à l'interface sable-acier.



**Figure 4.5** Schéma d'un profilomètre classique à stylet

- les profilomètres à capteur laser (Figures 4.6 & 4.7). Il s'agit d'un système optique de prise d'empreinte d'une ligne de mesure par l'intermédiaire de la trace d'un faisceau laser sur celle-ci. Le profil de rugosité correspond à l'intersection du faisceau laser avec la surface considérée. Nous avons utilisé ce type de profilomètre dans le cadre de ce travail. Une description détaillée sera donnée au sous-chapitre suivant.



**Figure 4.6** Schéma du profilomètre 3D vidéo laser à capteur optique

#### 4.4 Principe de mesure de la rugosité avec un profilomètre à capteur laser

Le profilomètre laser (Figures 4.6 & 4.7) est principalement constitué d'un capteur optique intégré 3D vidéolaser équipé d'une caméra CCD (Charge Couple Device) de 50  $\mu\text{m}$  de résolution et d'un laser.

Le procédé 3D-VIDEOLASER utilise les propriétés de la triangulation laser entre un plan de faisceau laser et de la caméra CCD déportée vis-à-vis de celui-ci. L'ensemble laser/caméra constitue un capteur optique (émission du faisceau laser, captage de la trace laser par la caméra) et qui est incliné de 45° de la platine porte échantillon. Il permet de fournir une longueur représentative de la surface et une haute résolution de mesure.



**Figure 4.7** Profilomètre 3D vidéolaser à capteur optique

L'interface sur laquelle les mesures sont à effectuer est placée sur la platine (porte échantillon). Après avoir défini les trajectoires de digitalisation ainsi que le nombre total de profils ou méridiens désirés, la digitalisation proprement dite s'effectue de la manière suivante :

- le plan laser intercepte la surface de l'échantillon et produit une trace laser qui est une génératrice de la surface de l'échantillon
- la caméra vidéo CCD 50  $\mu\text{m}$  reçoit alors l'image de cette trace laser
- le calibrage préliminaire établit la relation directe entre un pixel allumé de la caméra et les coordonnées du point correspondant dans le plan laser.

Les coordonnées obtenues sont exprimées sous forme de fichiers de données (x, y, z). Dans cette étude, pour obtenir les profils, on imprime une rotation au porte échantillon suivant l'axe z, avec un pas correspondant à des rotations de 12°. Ce qui nous permet de relever au total 30 profils de 15 mm de longueur.

#### **4.5 Interfaces utilisés**

Pour concevoir des interfaces homogènes, une combinaison de deux facteurs doit être considérée, la rugosité de surface (hauteur des aspérités) d'une part et le modèle de texture (distribution des aspérités) d'autre part. La texture peut être difficile à analyser quantitativement. Des surfaces peuvent être totalement différentes, néanmoins fournissent la même valeur de la rugosité. Dans certaines applications, elles peuvent avoir des comportements différents. Dans les précédentes recherches (Lemos & Vaughan, 2000 ; Subba et al, 2000 ; etc.) on a comparé des résultats d'essais obtenus pour différentes valeurs de rugosité correspondant à des modèles de textures différents, obtenus par différents procédés (décapage à la sableuse, moletage, corrosion de l'acier doux, etc.).

##### **4.5.1 Anneaux d'acier**

Dans cette étude, la rugosité de la surface inférieure de chaque anneau a été obtenue par moletage, l'interface lisse étant obtenue par rectification de plan. Pour obtenir des interfaces rugueuses des molettes à dentures quadrillées, permettant un moletage bien formé et précis, ont été utilisées. Elles sont fixées sur une porte-molette qui se fixe sur la tourelle porte-outil du tour. Le moletage s'effectue alors que les anneaux qui sont initialement parfaitement lisse subissent une rotation. La profondeur d'impression peut être pré-réglée, en fonction des pressions exercées par les molettes, pour obtenir différentes rugosités. Les anneaux résultants sont représentés sur les figures 4.8, 4.9, 4.10 & 4.11.

##### **4.5.2 Anneaux de béton**

Une série d'essais de cisaillement d'interface en utilisant des interfaces en béton lisse et rugueuse ont été conduits dans le but d'étudier l'effet de l'interface sol-béton sur la résistance au cisaillement. Du moment que seulement un petit volume de béton est nécessaire et l'exagération de la rugosité de surface des interfaces qui se produirait si de gros agrégats avaient été utilisés, du microbéton a été utilisé. Un béton ayant une grande maniabilité est nécessaire pour être placé dans le moule. Pour cela du microbéton, qui est un mélange de ciment, d'agrégats finement gradué (sable) et d'eau a été utilisé pour former l'anneau en béton. Les propriétés du mélange sont données au tableau 4.1.



**Figure 4.8** Interface en acier IA4



**Figure 4.9** Interface en acier IA3



**Figure 4.10** Interface en acier IA2

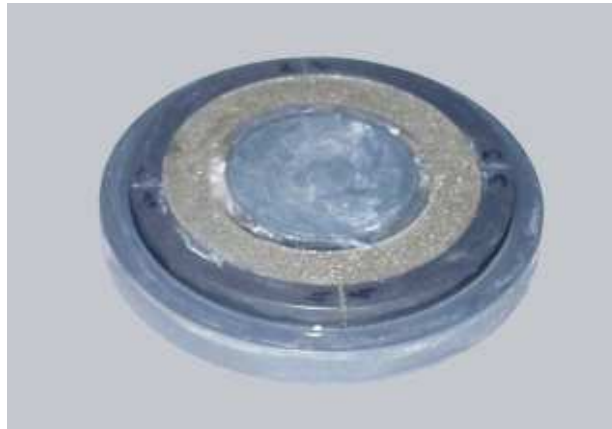


**Figure 4.11** Interface en acier IA1

**Tableau 4.1** Propriétés du microbéton

Constitution du mélange		Rapport en poids
Ciment CPA 55R		-
Rapport eau/ciment		0,65
Rapport agrégats fins (sable)/ciment		2,0
Tamisage		
tamisat	- refus	pourcentage
2,0 mm	- 1,0 mm	15
1,0 mm	- 0,495 mm	35
0,495 mm	- 0,250 mm	30
0,250 mm	- 0,125 mm	20

Les anneaux en microbéton ont été préparés dans un moule démontable avec des diamètres intérieurs et extérieurs de 70 mm et 100 mm, respectivement et une épaisseur de 6 mm, comme illustré sur la figure 4.12.



**Figure 4.12** Moule pour la préparation des anneaux de micro béton

Pour obtenir une interface lisse, l'interface en béton obtenu a été on a polie dans un touret à polir en utilisant un abrasif fin. L'interface rugueuse est obtenue en utilisant cette fois du papier verre. Pour pouvoir enlever facilement les anneaux du moule, on a appliqué une solution anti-adhérente de teflon sur les surfaces de ce dernier. Après séchage on a utilisé de la graisse silicone pour graisser les parois avant de couler le béton. Les anneaux ont été renforcés avec deux fils de fer de 0,4 mm de diamètre parce qu'ils ont une épaisseur de 6 mm uniquement. Après avoir coulé le béton, ce dernier est damé avec une baguette pour assurer une densité maximale. Pour éviter au béton de diminuer de volume (retrait) les anneaux sont conservés dans l'eau plusieurs jours avant d'être utilisés dans des essais de cisaillement. La figure 4.13 montre les interfaces lisses et rugueuses utilisées dans cette étude.



**Figure 4.13** Interfaces de microbéton

#### 4.6 Echantillonnage

Une surface d'acier ou de béton comprend virtuellement un nombre infini de profils linéaires de longueurs, orientations et localisations variées. Un nombre infini de mesures est nécessaires pour caractériser complètement une surface. Les sciences statistiques montrent que, en fonction de la variabilité des mesures, on a besoin relativement de peu de mesures pour représenter approximativement les résultats d'une manière acceptable. Ces mesures doivent être cependant basées sur un échantillonnage aléatoire ou systématique.

Si la rugosité sur une surface ne varie pas, c'est à dire, qu'elle est homogène et isotrope alors il n'y a pas de variation dans la procédure de mesure. La rugosité mesurée sur un seul profil serait la rugosité de cette surface. Si la surface mesurée n'est pas homogène, c'est à dire, qu'elle est plus rugueuse dans un endroit par rapport à un autre, plus d'un échantillon peut être nécessaire, en fonction de la précision désirée. Généralement les surfaces rencontrées ne sont pas homogènes. Enfin, si la surface n'est pas isotrope, c'est à dire qu'elle est plus rugueuse dans une direction par rapport à une autre, alors on a besoin de plus d'échantillons selon des orientations différentes. Alternativement, la détermination de la rugosité est indiquée pour une orientation donnée.

Dans le cas de cette étude, les surfaces des interfaces de béton et d'acier sont supposées plus ou moins homogènes et isotropes. Ainsi différents échantillons en des endroits différents mais avec la même orientation (la direction radiale) sont considérées dans le but de caractériser les surfaces. Du moment que la distribution des aspérités le long des surfaces n'est pas uniforme, chaque longueur d'analyse est susceptible de donner une valeur correspondante différente du paramètre de rugosité, pour la même texture de surface. La valeur moyenne représentative du paramètre de rugosité doit être déterminée pour un certain nombre de longueurs d'analyse. Pour la présente étude, la rugosité de surface de chaque anneau est représentée par la moyenne des valeurs de  $R_a$  en 10 endroits le long de la circonférence et la longueur d'analyse prise en compte est  $L_a = 5$  mm.

#### 4.7 Résultats des mesures de rugosité

Le tableau 4.2 donne les valeurs de  $R_a$  et  $R_{max}$  pour les anneaux utilisés. Le tableau 4.3 donne les valeurs de  $R$ . Dans ces tableaux, IA1, IA2, IA3 et IA4 représentent les interfaces d'acier et, IB1 et IB2 les interfaces de microbéton. Pour l'ensemble des interfaces la valeur de la rugosité moyenne est comprise entre 1,6 et 40,2  $\mu\text{m}$  et hauteur maximale entre pic et creux varie entre 6,8 et 176,6  $\mu\text{m}$ . La relation entre la rugosité relative et le diamètre moyen, pour l'ensemble des interfaces utilisées, est illustré dans la figure 4.14. Pour l'ensemble des interfaces, la rugosité relative diminue avec une augmentation du diamètre moyen. Cette

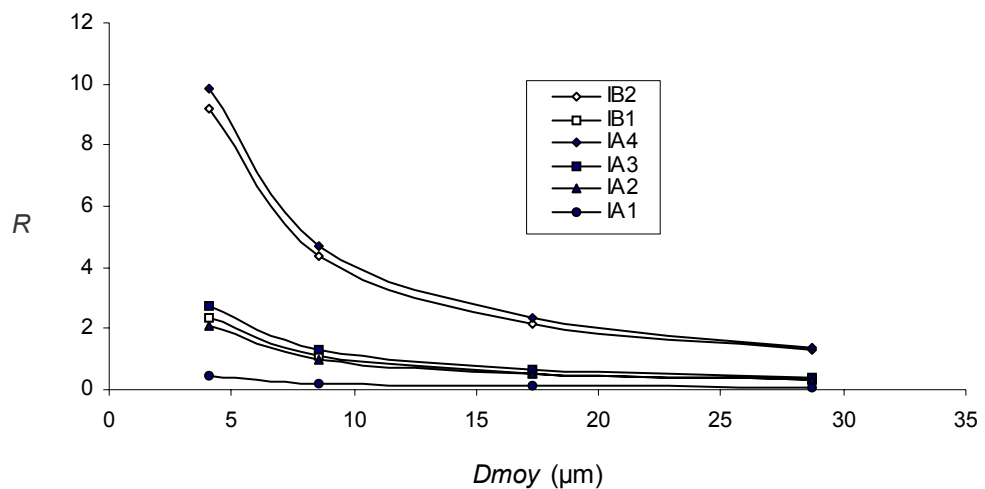
diminution de la rugosité relative reflète le fait que les plus grosses particules ont tendance à se déplacer plus facilement que les plus petites lorsqu'elles glissent le long d'une surface caractérisée par la même rugosité. Les figures 4.15 et 4.16 montrent des profils de rugosité de surface typiques obtenues pour l'acier et le microbéton respectivement. Pour permettre une bonne représentation de la forme des aspérités, l'échelle des amplitudes (distance verticale) a été exagérée par rapport à celle des distances horizontales, particulièrement pour l'interface lisse (IA1). Ces profils illustrent la différence dans la microtopographie entre les interfaces d'acier et de microbéton. Les profils d'acier indiquent des périodicités plus perceptibles par rapport à ceux du microbéton.

**Tableau 4.2** Valeurs de  $R_a$  et  $R_{max}$  des anneaux utilisés

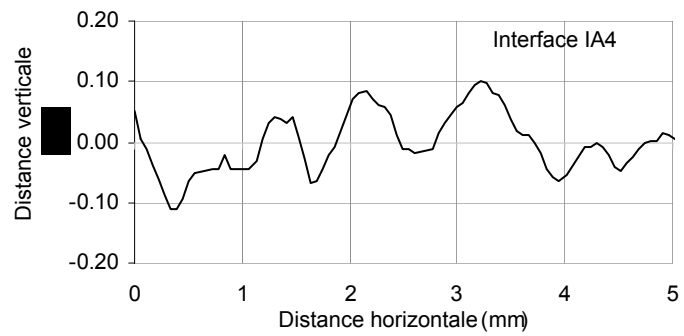
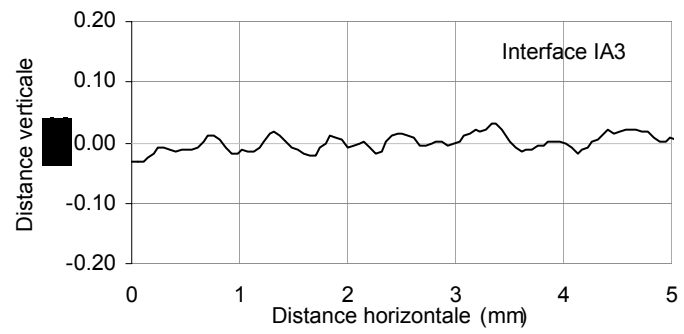
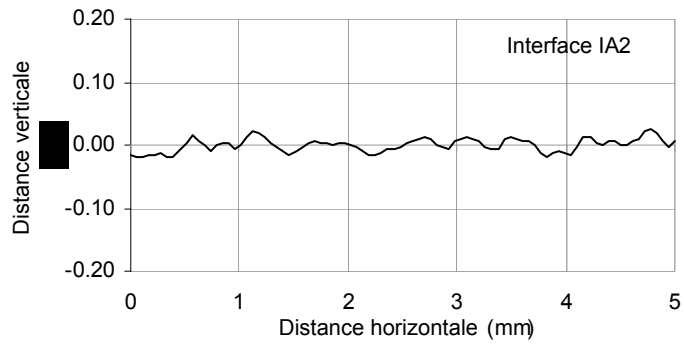
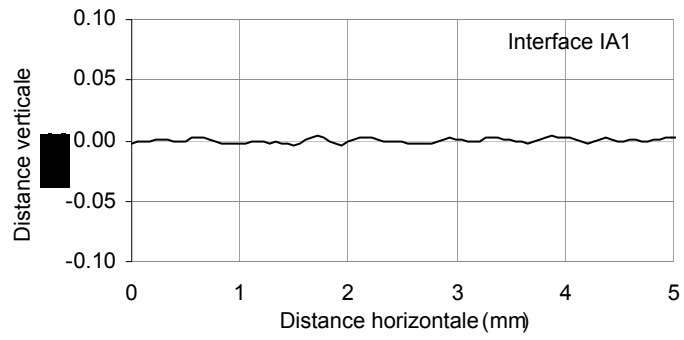
Paramètres de rugosité	IA1	IA2	IA3	IA4	CI1	CI2
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	1,6	7,6	12,1	40,2	9,6	37,4
$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	6,8	37,6	54,6	176,6	50,2	136,4

**Tableau 4.3** Valeurs de  $R$

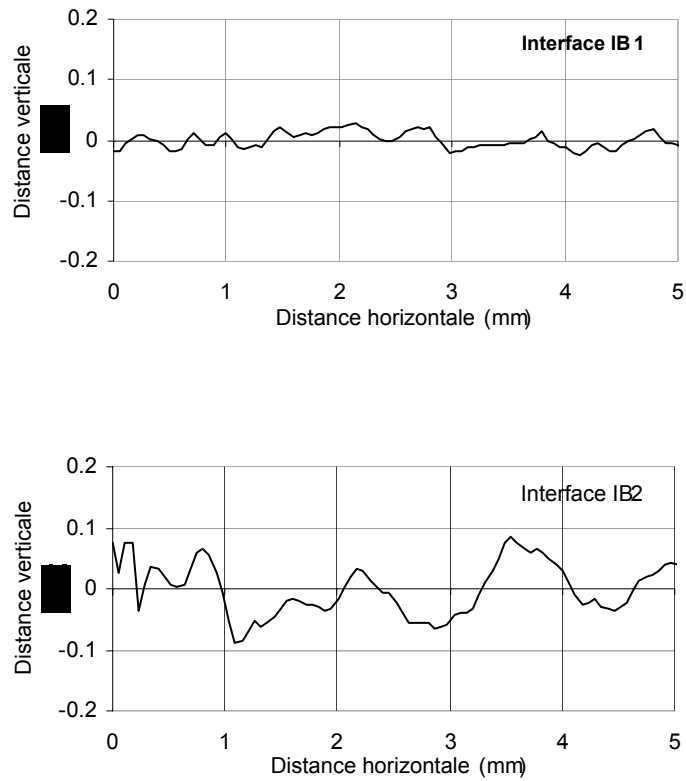
Interfaces	Kaolin	Bentonite	Limon de Xeuilley	Limon de Xeuilley-kaolin
IA1	0,18	0,39	0,06	0,09
IA2	0,88	1,86	0,26	0,44
IA3	1,41	2,97	0,42	0,70
IA4	4,68	9,85	1,4	2,32
IB1	1,12	2,35	0,33	0,55
IB2	4,35	9,17	1,30	2,16



**Figure 4.14** Relation entre  $R$  et  $D_{moy}$



**Figure 4.15** Profils de surfaces d'acier typiques



**Figure 4.16** Profils de surfaces de béton typiques

Les valeurs de  $R_a$  des anneaux d'acier utilisés couvrent un domaine compris entre  $1,6 \mu\text{m}$  et  $40,2 \mu\text{m}$  qui est considéré inclure le domaine de rugosité de surface de la majorité des matériaux de construction. Des mesures de rugosité de surfaces de pieux et modèles de pieux en acier utilisés en pratique, rapportée par Tika-Vassilikos (1991), indiquent que les valeurs de  $R_a$  varient approximativement entre 2 et  $25 \mu\text{m}$ .

#### 4.8 Conclusions

Ce chapitre a été l'occasion de présenter une revue des différents paramètres de quantification de la rugosité de surface et les moyens permettant leur mesure, en particulier le profilomètre laser utilisé dans cette étude, qui a permis de mesurer avec précision les profils de rugosité obtenus pour les anneaux d'acier et de béton utilisés. De même les techniques d'obtention de ces anneaux sont décrits. Les résultats des mesures de rugosités sont donnés, particulièrement les valeurs de  $R_a$  et  $R_{max}$ . Des profils de rugosité de surface typiques obtenues pour l'acier et béton sont également présentés.

# 5 MATERIEL D'ESSAI ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

---

## 5.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des dispositifs expérimentaux utilisés et les matériaux étudiés. L'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead a été utilisé pour mesurer la résistance au cisaillement de quatre types de sol : le kaolin, la bentonite, le limon de Xeuilley et un mélange kaolin-limon de Xeuilley, dans le domaine des petits et grands déplacements. L'appareil de Bromhead a également été utilisé pour conduire des essais d'interface sol-matériau solide. Les matériaux solides considérés sont l'acier et le béton. La caractérisation de la rugosité des interfaces étudiées a été abordée au chapitre précédent. La méthode adoptée pour l'analyse microstructurale des échantillons obtenus à l'issue des essais, au moyen du microscope électronique à balayage, est décrite au chapitre 7.

## 5.2 Description de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead et principe de fonctionnement

L'étude de la résistance au cisaillement des sols requiert l'utilisation de dispositifs expérimentaux permettant d'imposer d'importantes déformations de cisaillement. C'est le cas de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead, pour lequel une description détaillée est présentée par Bromhead (1979). Cette machine de part la simplicité de sa conception et son mode de construction a permis de fournir un moyen économique et relativement rapide pour la détermination de la résistance au cisaillement résiduelle des sols cohérents. Le principe de base de l'appareil consiste à appliquer une force normale centrée, se traduisant par une contrainte normale sur un anneau. Cet anneau agit sur l'échantillon de sol qui est ensuite soumis à une contrainte de cisaillement. L'essai réalisé est à contrainte normale constante. Dans ces conditions, la charge normale appliquée à l'échantillon demeure constante durant le processus de cisaillement. La figure 5.1 représente l'appareil de Bromhead utilisé dans cette étude.

Les principales caractéristiques de l'appareil sont schématisées dans les figures 5.2 & 5.3. Un mince échantillon de 5 mm d'épaisseur, de 70 mm de diamètre intérieur et 100 mm de diamètre extérieur est confiné radialement entre deux anneaux de confinement. L'échantillon est drainé à travers deux plateaux de bronze entre lesquels il est comprimé verticalement. La charge verticale est appliquée à l'échantillon par l'intermédiaire d'un bras de levier porteur de

poids avec un rapport de 1 à 10. La contrainte verticale maximale pouvant être appliquée est de  $1000 \text{ kN/m}^2$ .

Le conteneur de l'échantillon, par l'intermédiaire de l'embase mécanisée, subit une rotation par rapport au plateau supérieur. Ce mouvement circulaire est produit par un moteur électrique accouplé à une boîte de vitesse à rapports interchangeables qui est solidaire d'un engrenage à vis sans fin. Le plateau supérieur reste stationnaire par la réaction d'un bras de torsion sur une paire d'anneaux dynamométriques, munis de comparateurs ainsi que de capteurs de déplacements. Alors que le sol en contact avec le plateau poreux inférieur est forcé de subir une rotation avec le conteneur d'échantillon, la partie supérieure de l'échantillon s'oppose à tout mouvement de rotation jusqu'à ce que, éventuellement, les contraintes à l'intérieur de la masse de sol provoquent une rupture par cisaillement durant les premiers stades de l'essai. De ce fait une surface de cisaillement proche ou à l'interface supérieure (selon la rugosité et le type de sol) se développe le long de la zone de déformation provoquée par le cisaillement. Le couple de torsion subi par l'échantillon à la rotation est mesuré par les deux anneaux dynamométriques. Durant la consolidation et le cisaillement, la déformation verticale (tassement) est enregistrée par un capteur de déplacement placé sur le haut du bras de mise en charge.



**Figure 5.1** Appareil de Bromhead utilisé dans cette étude

## Légende

- 1- Support de capteur de déplacement
- 2- Support de poids
- 3- Balancier
- 6- Tige réglable d'appui
- 8- Supports
- 10- Bras de mise en charge
- 11- Rotule
- 12- Contre-écrou de blocage
- 13- Contre-poids
- 15- Orifice de remplissage d'huile
- 16- Boulon trop plein – contrôle de niveau
- 17- Levier commande changement de vitesse
- 23- Cercle gradué
- 30- Vis de mise à niveau du bras de chargement

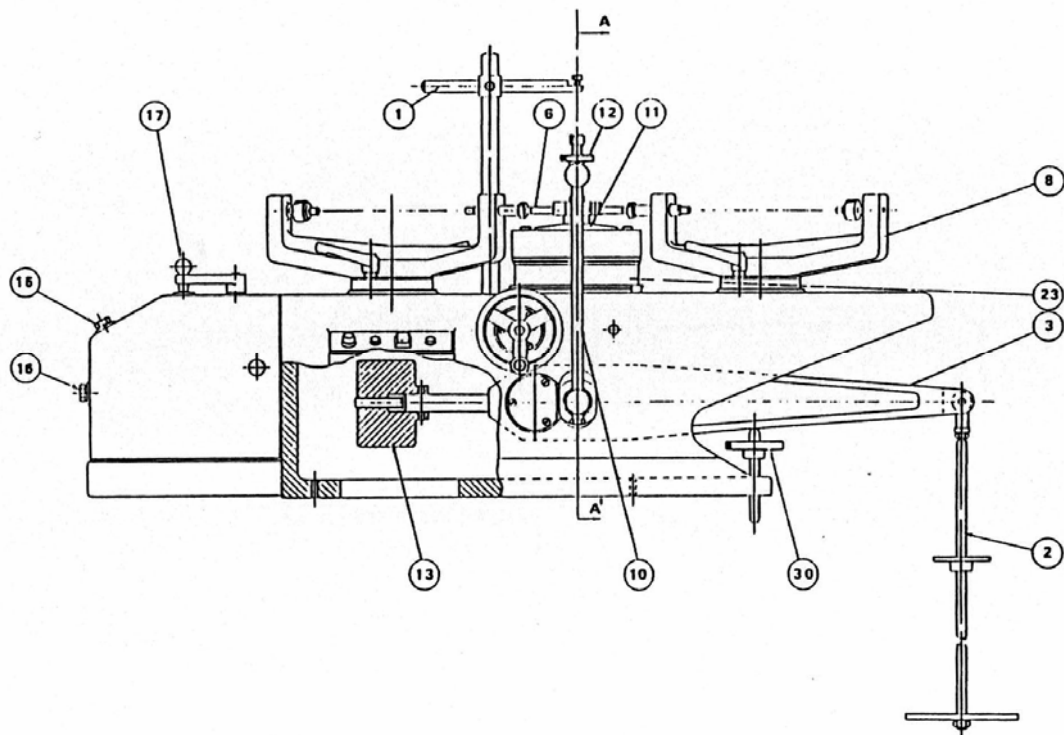
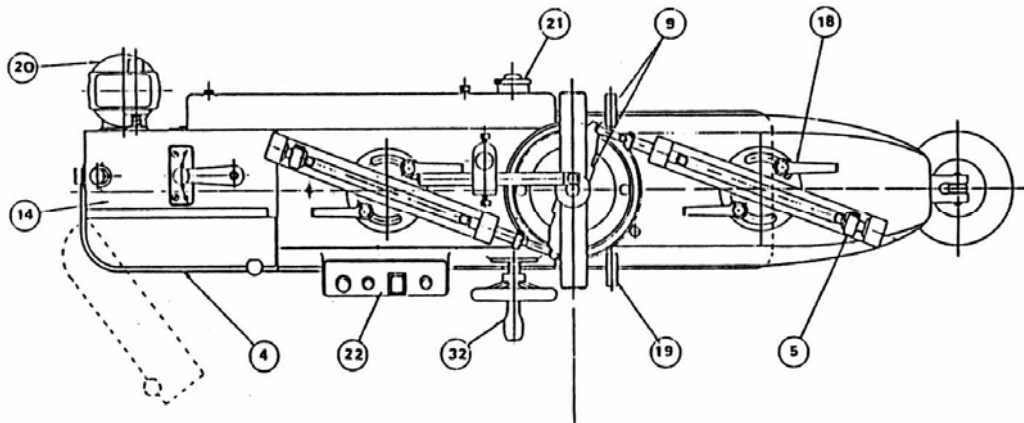


Figure 5.2 Vue de côté de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead

## Légende

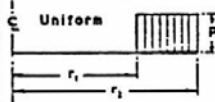
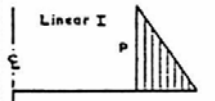
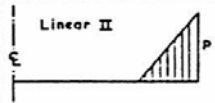
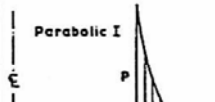
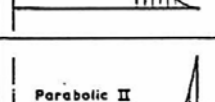
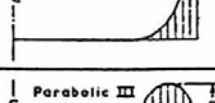
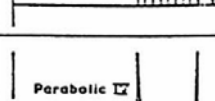
- 4- Couvercle de la boîte à vitesse
- 5- Adaptateur pour anneaux dynamométrique
- 9- Appuis d'anneau dynamométrique
- 14- Boîte à vitesse
- 18- Levier de serrage
- 19- Butées
- 20- Moteur
- 21- Commande d'embrayage
- 22- Interrupteur
- 32- Volant



**Figure 5.3** Vue en plan de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead

Dans les essais de cisaillement annulaire par torsion, la différence entre les valeurs maximale et minimale des contraintes de cisaillement distribuées au sein de l'échantillon annulaire n'est pas aussi importante que pour les échantillons circulaires pour lesquels elles varient entre zéro au centre à une valeur maximale sur la périphérie. De plus la non-uniformité dans la distribution de la contrainte normale sur le plan de rupture est également réduite.

**Tableau 5.1** Equations pour  $\phi'$  obtenus à partir d'essais de cisaillement annulaires pour différentes hypothèses de distributions des contraintes (d'après Bishop et al, 1971)

Normal stress distribution	$\sigma'_n$	$\frac{P_{non-uniform}}{P_{uniform}}$	$\tan \phi'$	$\tan \phi'$ for $r_1 = 2.0r_2$ $r_1 = 3.0r_2$	$\frac{\tan \phi'_{non-uniform}}{\tan \phi'_{uniform}}$
Uniform 	P	1.0	$\frac{3M}{2W} \cdot \frac{(r_1 + r_2)}{(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}$	$0.395 \frac{M}{W}$	1.000
Linear I 	$\frac{P(r_2 - r)}{(r_2 - r_1)}$	2.14	$\frac{2M}{W} \cdot \frac{(r_1 + 2r_2)}{(r_1^2 + 2r_1 r_2 + 3r_2^2)}$	$0.424 \frac{M}{W}$	1.075
Linear II 	$\frac{P(r - r_1)}{(r_2 - r_1)}$	1.87	$\frac{2M}{W} \cdot \frac{(2r_1 + r_2)}{(3r_1^2 + 2r_1 r_2 + r_2^2)}$	$0.372 \frac{M}{W}$	0.943
Parabolic I 	$\frac{P(r_2 - r)^2}{(r_2 - r_1)^2}$	3.33	$\frac{5M}{2W} \cdot \frac{(r_2 + 3r_1)}{(r_1^2 + 3r_1 r_2 + 6r_2^2)}$	$0.441 \frac{M}{W}$	1.116
Parabolic II 	$\frac{P(r - r_1)^2}{(r_2 - r_1)^2}$	2.73	$\frac{5M}{2W} \cdot \frac{(r_1 + 3r_2)}{(6r_1^2 + 3r_1 r_2 + r_2^2)}$	$0.362 \frac{M}{W}$	0.916
Parabolic III 	$\frac{4P(r - r_1)(r_2 - r)}{(r_2 - r_1)^2}$	1.50	$\frac{5M}{W} \cdot \frac{(r_1 + r_2)}{(3r_1^2 + 4r_1 r_2 + 3r_2^2)}$	$0.397 \frac{M}{W}$	1.006
Parabolic IV 	$\frac{P(2r - r_1 - r_2)^2}{(r_2 - r_1)^2}$	3.00	$\frac{5M}{2W} \cdot \frac{(r_1 + r_2)}{(2r_1^2 + r_1 r_2 + 2r_2^2)}$	$0.391 \frac{M}{W}$	0.990

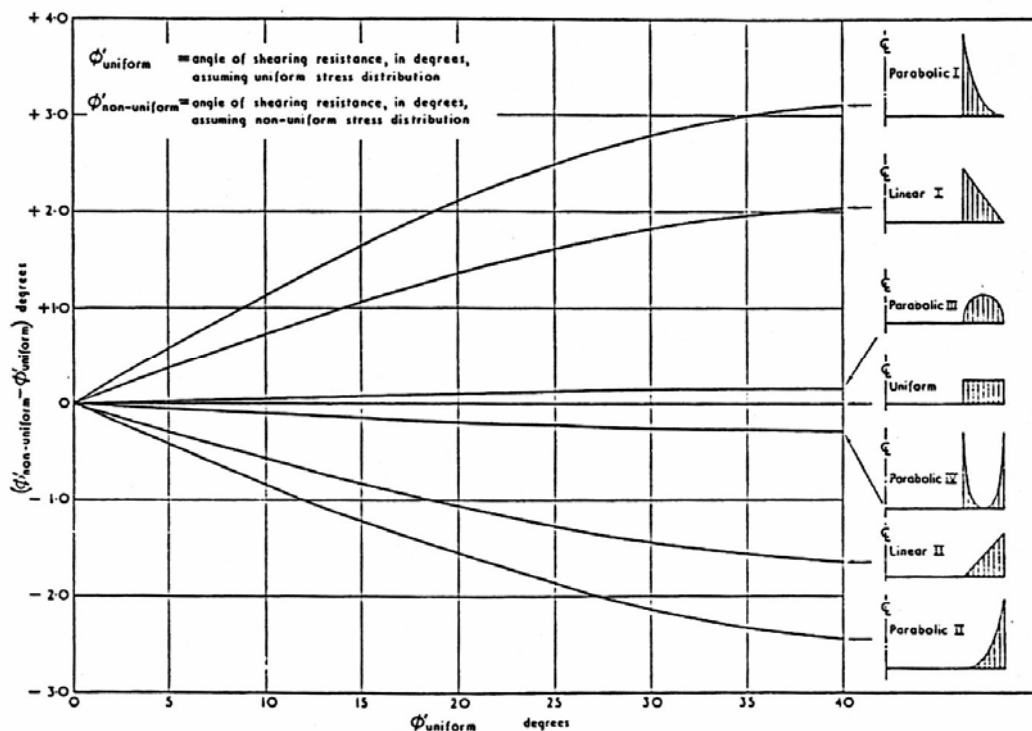
Comme indiqué par Bishop et al (1971), plusieurs hypothèses peuvent être avancées concernant les distributions de la contrainte normale et la contrainte de cisaillement. Les choix les plus simples sont ceux qui considèrent que:

- 1- la contrainte normale,  $\sigma'_n$ , et la contrainte de cisaillement,  $\tau$ , sont uniformément distribuées à travers le plan de déformation relative.

2- la contrainte normale a une forme de variation spécifiée et la contrainte de cisaillement a une distribution similaire correspondante.

Cependant la première hypothèse correspond au choix le plus réaliste particulièrement lorsque l'échantillon est étroit en regard de son diamètre. Dans le cas de la deuxième hypothèse, plusieurs distributions de la contrainte normale peuvent être analysées pour déterminer leurs effets sur la valeur de l'angle de frottement calculée  $\phi'$ .

Le tableau 5.1 donne les formules de  $\phi'$  obtenus à partir d'essais de cisaillement annulaires en considérant différentes distributions de la contrainte normale. Concernant les dimensions de l'appareil IC/NGI, Bishop et al (1971) ont défini l'influence des différentes distributions de contraintes de cisaillement au sein de l'échantillon annulaire lors d'un essai, en particulier l'incertitude sur la valeur de l'angle de frottement interne. Ils ont montré que, en considérant une telle distribution, l'erreur est de l'ordre de  $\pm 2^\circ$  pour  $\phi' < 20^\circ$  pour la distribution la moins probable (voir Figure 5.4).



**Figure 5.4** Influence de la distribution des contraintes sur la valeur de  $\phi'$  déterminée à partir d'essais de cisaillement annulaire (d'après Bishop et al, 1971)

En considérant une distribution uniforme, le déplacement moyen est calculé en considérant un rayon moyen,  $a$ , donné par:

$$a = \frac{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 dr}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{2(r_2^3 - r_1^3)}{3(r_2^2 - r_1^2)} \quad (5.1)$$

Où

$r_1$  et  $r_2$  sont les rayons intérieur et extérieur de l'échantillon.

Lorsque les conditions d'obtention de la résistance résiduelle sont atteintes, la contrainte de rupture, donc le couple de torsion transmis est donné par:

$T = \text{Contrainte de cisaillement} \times \text{Surface} \times \text{Rayon moyen}$

$$T = \tau \times \pi(r_2^2 - r_1^2) \times \frac{2(r_2^3 - r_1^3)}{3(r_2^2 - r_1^2)} \quad (5.2)$$

$$\text{Par conséquent, } T = \frac{2}{3} \pi(r_2^3 - r_1^3) \tau \quad (5.3)$$

La mesure du couple de torsion est donnée par les deux anneaux dynamométriques dont les axes sont distants de  $L$ . La force moyenne mesurée est multipliée par  $L$  pour donner le moment nécessaire pour empêcher la rotation de la plaque supérieure:

$$T = \frac{(F_A + F_B)L}{2} \quad (5.4)$$

Où :

$F_A$  et  $F_B$  sont les forces mesurées par les anneaux dynamométriques A et B respectivement

A partir des équations (5.2) et (5.3), la contrainte de cisaillement a pour équation:

$$\tau = \frac{3(F_A + F_B)L}{4\pi(r_2^3 - r_1^3)} \quad (5.5)$$

La contrainte normale effective agissant sur l'échantillon est donnée par:

$$\sigma'_n = \frac{P}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (5.6)$$

Où

$P$  est la charge totale appliquée sur l'échantillon (c'est à dire: 10x(la charge sur le plateau de la machine) + le poids de la plaque supérieure + le poids propre de l'étrier).

En supposant que la cohésion résiduelle  $c'_r$  est égale à zéro:

$$\tau_r = \sigma'_n \tan \phi_r \quad (5.7)$$

$$\text{Donc : } \tan \phi_r = \frac{\tau}{\sigma'_n} = \frac{3(F_A + F_B)(r_2^2 - r_1^2)L}{4(r_2^3 - r_1^3)P} \quad (5.8)$$

Le déplacement horizontal peut être obtenu soit en degrés à partir de l'échelle graduée ou en mm en multipliant le temps à partir du début de cisaillement par la vitesse de cisaillement en mm/mn.

### 5.3 Préparation de l'échantillon

La préparation de l'échantillon d'un sol cohérent pour les essais de cisaillement annulaire réalisés au moyen de l'appareil de Bromhead ne présente pas de difficultés particulières. La préparation des échantillons a été effectuée de la même manière pour les essais sol-sol et les essais d'interface. La résistance résiduelle est une propriété de sol remanié et il est pratiquement impossible de préparer des échantillons intacts pour des essais de cisaillement annulaire. Il a également été établi que la structure initiale du sol n'a pas d'effet significatif sur la résistance résiduelle. De ce fait, un échantillon dans un état remanié est utilisé. Les sols utilisés sont initialement à l'état sec et pulvérisés en poudre pour le sol naturel étudié (le limon de Xeuilly). Du moment que la teneur en eau initiale n'a pas d'influence sur la résistance résiduelle (Voight, 1973), la procédure suivante a été utilisée dans la préparation des échantillons. De l'eau distillée est ajoutée au sol, sous forme de poudre, de façon à amener le mélange à une teneur en eau égale à la limite de liquidité. On obtient alors une boue qui est desséchée jusqu'à ce que sa teneur en eau atteigne approximativement à  $1.5w_p$ . Cette procédure a été adoptée pour d'une part faciliter le mélange de l'eau et du sol et de ce fait obtenir des échantillons homogènes et d'autre part limiter la perte d'échantillons au cours de la consolidation et du cisaillement. Quand ils sont plus humides, les échantillons sont extraits du conteneur plus facilement. Après s'être assuré d'un mélange homogène de l'échantillon, ce dernier est mis en place ensuite dans le conteneur. Pour cela, le plateau inférieur poreux et le conteneur d'échantillon sont retirés de la machine. L'échantillon est déposé par petites quantités dans le volume annulaire. Il est ensuite pétri uniformément en utilisant une spatule flexible en acier et ensuite arasé de niveau, comme le montre la Figure 5.4, tout en s'assurant qu'il n'y a pas d'air piégé.



**Figure 5.5** Placement du sol à l'intérieur du volume annulaire

Après avoir remplacé le conteneur en position dans les supports de guidage, le plateau supérieur est glissé sur l'axe de centrage. Ce dernier doit être bien graissé pour minimiser le frottement. Les points d'appui des anneaux avec les capteurs de forces sont positionnés de façon à ce qu'ils soient situés à une distance de 150 mm sur le bras de torsion. Il est nécessaire également de parfaire l'angle droit entre axes dynamométriques et bras de torsion, comme indiqué sur la figure 5.5.

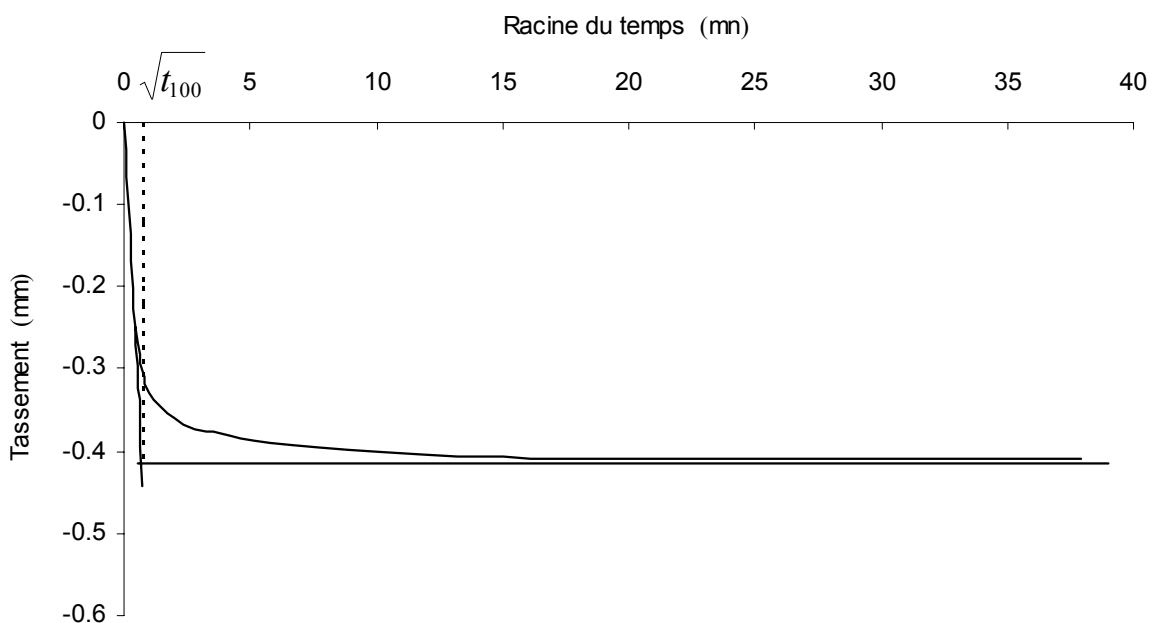
Les poids appropriés sont placés sur le support (2) et le balancier (3) est mis en position horizontale. Le capteur de déplacement est alors placé sur le haut du contre-écrou de blocage (12) du bras de mise en charge. Pour garder l'échantillon saturé la chambre en plexiglas est remplie d'eau distillée. La consolidation peut être alors initiée.



**Figure 5.6** Position des anneaux dynamométriques par rapport au bras de torsion

D'une manière classique, l'essai de consolidation consiste à appliquer une contrainte normale à un échantillon de sol, tout en mesurant les déformations axiales de celui-ci. L'échantillon est placé dans un dispositif métallique (moule œdométrique, boîte de cisaillement,...) de telle manière que les déformations radiales soient empêchées. Dans la présente étude, l'essai de consolidation est réalisé sur des échantillons toriques placés dans le conteneur d'échantillon, et ce en appliquant la charge progressivement pour des contraintes normales importantes pour prévenir une fuite intempestive de l'échantillon à hauteur du bord supérieur de la cavité annulaire. Pour chaque charge appliquée il est nécessaire d'attendre une stabilisation de l'échantillon. A partir des courbes tassement-temps obtenues pour l'ensemble des sols étudiés, on a noté qu'une durée de chargement inférieure à 24 h était adéquate pour une dissipation complète de la pression interstitielle.

Le coefficient de consolidation est mesuré à partir du tassement vertical, à partir duquel la vitesse maximum permettant la dissipation complète de la pression interstitielle est déduite. La consolidation de l'échantillon sous la contrainte normale appliquée permet d'obtenir une courbe racine du temps/tassement, ayant la forme de celle de la figure 5.6, qui représente la courbe obtenue dans le cas du limon de Xeuilley. La figure 5.6 montre aussi la manière de déterminer  $\sqrt{t_{100}}$  (mn). A partir de cette courbe la valeur de  $\sqrt{t_{100}}$  (mn) est déterminée. D'après Gibson & Henkel (1954) la rupture (contrainte de cisaillement au pic) se produit après un temps  $t_f$  donné par la relation  $t_f=12,7t_{100}$ . Si  $\Delta_{hp}$  (mm) est le déplacement prévu pour atteindre le pic, la vitesse de cisaillement ne devrait pas dépasser  $\Delta_{hp} /12,7t_{100}$  mm/mn.



**Figure 5.7** Courbe de tassement typique pour le limon de Xeuilley

Bromhead (1979) a signalé que parce que l'échantillon est si fin et si bien drainé (double face de disques poreux) des vitesses de cisaillement extrêmement rapides sont possibles autant que le permet le drainage. Cependant il ajouta que des vitesses de cisaillement importantes sont susceptibles de faire intervenir des facteurs de rhéologie et de viscosité. D'autres chercheurs ont démontré que pour des vitesses de cisaillement relativement faibles, ce facteur n'a pratiquement pas d'effet sur la résistance résiduelle (voir section 2.4.3). Ces résultats sont importants car ils permettent théoriquement de réduire le temps nécessaire à la conduite de l'essai. Cependant ils ne doivent pas être généralisés abusivement car ceci pourrait avoir un effet sur la qualité de l'essai (Blondeau & Josseume, 1976). Pour assurer la dissipation de la pression interstitielle une vitesse de cisaillement assez

faible de 0,0356mm/mn est utilisée pour atteindre les conditions résiduelles, dans les étapes de cisaillement lent. D'après Bromhead (1986), cette vitesse est adéquate pour permettre un drainage complet lors des essais de cisaillement annulaire, pour la plupart des sols argileux. Elle est également utilisée dans les essais d'interface dans lesquelles les échantillons sont drainés uniquement par la partie inférieure.

Pour choisir une vitesse donnée il est nécessaire de sélectionner les pignons et la position du levier correspondants. L'appareil permet d'effectuer des essais à des vitesses de cisaillement comprises entre une vitesse maximale de 60°/mn, soit pour un diamètre moyen de l'échantillon de 85 mm, 44,52 mm/mn, et une vitesse minimale de 0,024°/mn, soit 0,0178 mm/mn. Par ce que l'échantillon varie radialement à travers l'échantillon, le déplacement horizontal pris en compte correspond à celui du rayon moyen de l'échantillon annulaire, soit 85 mm. Lors d'un tour complet (360°) l'échantillon subit un déplacement horizontal de 266,20 mm, le long du diamètre moyen. Il faut moins d'un tour pour atteindre les conditions résiduelles lors d'un cisaillement lent. En cisaillement rapide, on effectue en général plus de deux à trois tours.

#### **5.4 Procédure expérimentale**

La procédure expérimentale est importante car elle est susceptible d'avoir une influence sur les résultats obtenus. Après l'achèvement de l'étape de consolidation, le cisaillement est alors initié. Lors de cette phase la résistance au cisaillement au pic et la résistance au cisaillement résiduelle sont mesurées. Le cisaillement est conduit jusqu'à ce que la résistance au cisaillement atteigne une valeur constante, c'est à dire la résistance résiduelle.

Plusieurs types d'essais de cisaillement annulaires peuvent être conduits. Des essais peuvent impliquer des changements de contraintes normales effectives aussi bien sur le même échantillon que sur différents échantillons. Dans les essais à une seule phase, chaque échantillon subit une seule étape de cisaillement sous une contrainte normale effective donnée. Les essais conduits dans le but d'examiner l'effet du changement de la vitesse de cisaillement ainsi que l'effet du pré-cisaillement sur la résistance résiduelle obtenue à la suite d'essais sol-sol et sol- acier sont exécutés selon la procédure suivante, qui s'inspire de la procédure adoptée par Lemos et al. (1985) :

- 1- L'état résiduel lent est établi par cisaillement à une vitesse de 0,0356 mm/mn.(1<sup>ère</sup> Phase)
- 2- La contrainte de cisaillement est réduite à zéro. La vitesse est ensuite augmentée à une vitesse de 44,52 mm/mn (vitesse maximale de l'appareil). L'échantillon est cisailé à nouveau, sur la surface de cisaillement déjà formée, jusqu'à stabilisation (2<sup>ème</sup> Phase).

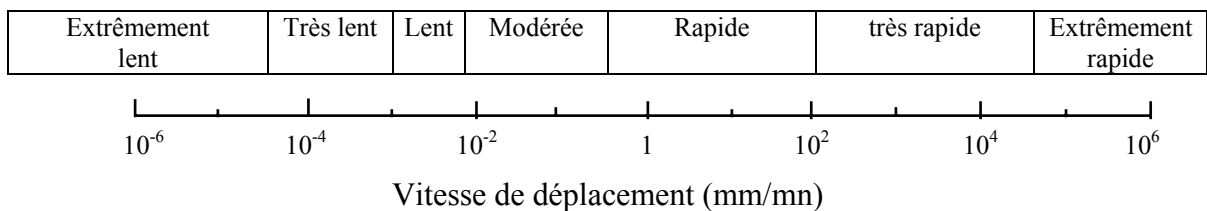
3- Après une pause pour permettre la consolidation et la dissipation de toute pression interstitielle ayant pu être développée, la vitesse lente est réimposée (3<sup>ème</sup> Phase).

Cette technique est utilisée pour conduire des essais de cisaillement sur une surface de cisaillement pré-existante.

A la fin de chaque essai, les masses sont déposées du support et l'eau est vidée par siphonnage. Le conteneur d'échantillon est desséré puis retiré.

La procédure sur laquelle s'est basée le programme expérimental, avec les différents cycles de cisaillement, dure environ une semaine. Après la consolidation qui dure 24 heures, la première phase de cisaillement lent est effectuée généralement en trois à quatre jours. Le cisaillement rapide prend moins d'une demi-heure. L'échantillon pré-cisaillé est de nouveau cisaillé pendant environ deux jours. Entre ces deux dernières phases, l'échantillon est reconsolidé pendant plusieurs heures.

Les essais d'interface sol-béton, dont le but est d'étudier l'effet du matériau d'interface, ont été conduits selon la 1<sup>ère</sup> phase de cisaillement.



**Figure 5.8** Echelle du domaine de mouvements (d'après Varnes, 1978)

Les vitesses de déplacement sur terrain peuvent varier par plusieurs ordres de grandeurs, de mouvements extrêmement lents à extrêmement rapides. La figure 5.7 montre une échelle de vitesse de mouvement proposée par Varnes (1978). D'après cette échelle une vitesse de 0,0356 mm/mn correspond à une vitesse lente alors qu'une vitesse de 44,52 mm/mn correspond à une vitesse rapide.

Dans cette étude une contrainte normale effective, relativement modérée, de 70 kN/m<sup>2</sup> a été utilisée. Cette contrainte est jugée nécessaire pour s'assurer qu'une épaisseur raisonnable de l'échantillon est maintenue dans le conteneur après l'achèvement des cycles de cisaillement.

## 5.5 Acquisition de données

Un système d'acquisition de données, dénommé SA10, commercialisé par AOIP Instrumentation, permettant de mesurer et surveiller les grandeurs électriques a été utilisé pour mener l'expérimentation. Ce système s'interface avec un logiciel (LW1) permettant l'acquisition et l'exploitation des résultats de mesures à l'aide d'un micro-ordinateur, pour un temps fixé par l'utilisateur, en fonction de la vitesse de cisaillement. La figure 5.9 représente le dispositif expérimental.



**Figure 5.9** Dispositif expérimental

Trois variables sont mesurées lors d'un essai de cisaillement annulaire réalisé sur un échantillon donné, sous une contrainte normale et une vitesse de cisaillement préalablement fixés:

- le déplacement horizontal (ou déplacement relatif tangentiel),  $\Delta_H$ ,
- le déplacement vertical (ou déplacement relatif normal),  $\Delta_V$ ,
- la contrainte de cisaillement,  $\tau$ .

Le déplacement horizontal à tout instant est donné par le logiciel par suite de la multiplication de la vitesse de cisaillement par le temps à partir du début de l'essai. Les mesures du déplacement vertical sont effectuées à l'aide d'un capteur de déplacement de type LVDT. Ce dernier, fixé sur un support, est en contact d'un contre-écrou de blocage. La contrainte de cisaillement est déterminée à partir des forces  $F_A$  et  $F_B$  qui sont mesurées par deux capteurs de forces fixés aux anneaux dynamométriques. Le capteur de déplacement, ainsi que les deux capteurs de forces ont été préalablement étalonnés.

## 5.6 Matériaux étudiés

La caractérisation des matériaux support de l'étude est une étape indispensable pour l'interprétation des résultats d'essais mécaniques et la compréhension des phénomènes en jeu. Pour avoir une idée globale sur le comportement des sols cohérents à l'état résiduel il est nécessaire d'étudier des sols dont la fraction argileuse est respectivement supérieure à 50%, inférieure à 25% et comprise entre 25 et 50%. La rupture résiduelle obéirait alors aux trois modes de cisaillement postulés par Lupini et al (1981), c'est à dire les modes glissant, turbulent et transitoire, respectivement (voir Section 2.3). De ce fait le choix des matériaux à mettre à l'essai s'est porté sur deux types d'argiles artificiels: le kaolin (K) et la bentonite (B), le limon de Xeuilley (X) et un mélange constitué de 75% de limon de Xeuilley et 25% de kaolin (XK).

Le kaolin ou l'argile de chine est une argile industrielle très pure utilisée dans la fabrication de la porcelaine. C'est une argile plastique constituée essentiellement de kaolinite associée à d'autres minéraux tels que feldspath, mica et quartz, et elle est de couleur blanche. D'autre part, la bentonite est une argile non réfractaire composées essentiellement de minéraux de montmorillonite. Elle est dérivée de certaines formations de schiste. Quand le principal ion adsorbé sur les colloïdes d'argile est le sodium, la bentonite est susceptible d'absorber une grande quantité d'eau et elle est sujette à d'importants changements de volumes en présence d'eau; on l'appelle alors bentonite gonflante. Quand le principal ion adsorbé est le calcium ou l'hydrogène, le gonflement de la bentonite est alors limitée, elle est connue alors par bentonite non gonflante. Le type de bentonite utilisée dans cette étude contient 80% de montmorillonite calcique, d'appellation commerciale "Bentonite F.V.O". Elle présente des propriétés gonflantes limitées. D'après l'abaque de plasticité de Casagrande, le kaolin et la bentonite sont des argiles très plastiques. Ces deux types d'argile ont été utilisés pour étudier l'effet de la minéralogie. Cette dernière est le facteur le plus important régissant le mécanisme de cisaillement résiduel (Lupini et al, 1981 ; Skempton, 1985). Elle est également susceptible d'avoir un effet non négligeable dans le comportement de cisaillement à l'interface sol – matériau solide.

**Tableau 5.2** Dimensions des particules de kaolinite et de montmorillonite

Minéral	$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$t$
Kaolinite	0,3 – 3	$(1/5-1/10)d$
Montmorillonite	0.1 - 1	$(1/100-1/400)d$

Les facteurs les plus importants qui caractérisent la minéralogie des argiles sont la taille et la forme. Les minéraux d'argile les plus communs (illite, chlorite, kaolinite, montmorillonite) ont une forme plate mais leurs tailles et leurs épaisseurs qui sont les caractéristiques les plus importantes, varient dans de larges limites. Les particules argileuses sont très petites, elles sont souvent moins de 1  $\mu\text{m}$ . Les particules de montmorillonite sont très petites et très minces alors que les particules de kaolinite sont beaucoup plus grosses et plus épaisses. Les diamètres des particules  $d$  ainsi que les valeurs des épaisseurs  $t$  par rapport à  $d$  sont donnés dans le tableau 5.2. La montmorillonite calcique est plus grande que la montmorillonite sodique, elle a généralement une épaisseur de 20 à 30 nm.

Le limon de Xeuilley est un limon argileux très plastique prélevé à Xeuilley (20 km au sud-ouest de Nancy). Ce matériau de couleur beige-ocre est globalement assez homogène, même s'il contient des débris végétaux et quelques cailloux. Pour assurer son uniformité au sein d'un échantillon et entre échantillons, et pour faciliter sa préparation, les éléments grossiers ont été éliminés. Les dimensions maximales des particules devraient être également petites par rapport aux dimensions de l'échantillon. De ce fait, il a été tamisé à travers un tamis de 400 $\mu\text{m}$ , après avoir été passé à l'étuve et pulvérisé à l'aide d'une broyeuse.

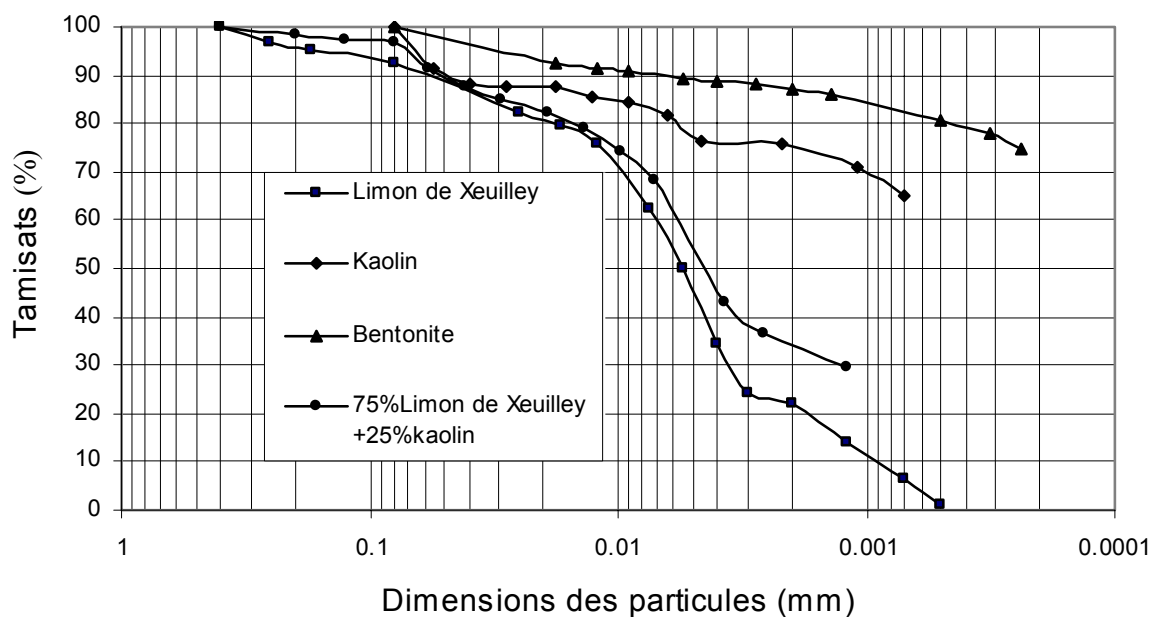
Les sols naturels contiennent généralement un mélange de minéraux d'argile. Des minéraux primaires tel que le quartz ou le feldspath peuvent être également présents. Le comportement de tels sols est influencé par les propriétés des différents minéraux.. L'analyse minéralogique par diffractométrie X effectué a révélé que le limon de Xeuilley est constitué en grande partie de quartz (60%), de montmorillonite (20%), de feldspath (11%), de kaolinite (4 à 5%) et de mica (4 à 5%).

**Tableau 5.3** Caractéristiques physiques des sols utilisés

Propriétés	K	B	X	XK
Limite de liquidité, $w_l$ (%)	64,5	299,1	53,4	45,6
Limite de plasticité, $w_p$ (%)	32,2	71,3	39,9	34,0
Indice de plasticité, $I_p$ (%)	32,3	227,8	13,5	11,6
Fraction argileuse (% < 2 $\mu\text{m}$ )	76	87	22	34
Diamètre moyen, $D_{moy}$ ( $\mu\text{m}$ )	8,59	4,08	28,71	17,31
Densité des particules solides	2,64	2,59	2,68	2,67

Le mélange limon de Xeuilley-kaolin a été obtenu en mélangeant 75% de limon de Xeuilley et 25% de kaolin. Le mélange des deux sols a été effectué par malaxage manuel à l'état sec tout d'abord, puis à une teneur en eau correspondant à la limite de liquidité pour assurer l'uniformité. Le mélange obtenu est une argile limoneuse. L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X montre que ce mélange est constitué par du quartz (47%), de montmorillonite (15%), de feldspath (10%), de kaolinite (24%) et de mica (4 %).

Les propriétés physiques des sols utilisés sont indiquées au Tableau 5.3. Les courbes granulométriques sont représentées sur la Figure 5.10.



**Figure 5.10** Courbes granulométriques des sols étudiés

Les matériaux utilisés ont été également classés par l'intermédiaire de l'essai au bleu de méthylène. Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins du sol à adsorber le bleu de méthylène et rend compte globalement de l'activité de surface des argiles (surface spécifique), ainsi que celle des matières organiques et des hydroxydes de fer. Un sol adsorbe proportionnellement d'autant plus de bleu de méthylène :

- qu'il contient davantage d'argiles ;
- que ces argiles sont actives.

La valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) constitue un paramètre d'identification, elle est exprimée en grammes de bleu pour 100g de sol sec. La détermination des valeurs de bleu des sols étudiés est conforme à la norme NF P 94-068. Ces valeurs sont résumées dans le tableau 5.4.

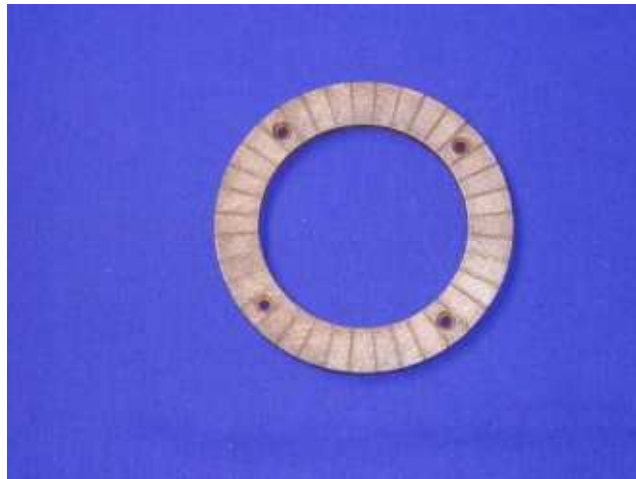
**Tableau 5.4** Valeurs de bleu de méthylène des sols étudiés

Sol étudié	VBS (g de bleu /100g de sol sec)
Kaolin	6,4
Bentonite	24,0
Limon de Xeuilley	4,4
Limon de Xeuilley + kaolin	5,3

### 5.7 Essais sol-sol et d'interface

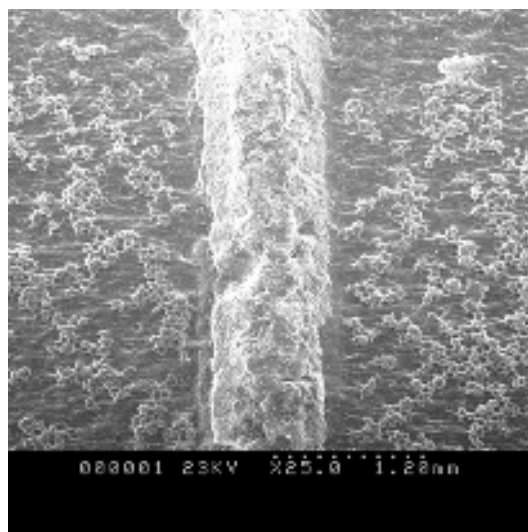
Bien que les études concernant le comportement d'interface des pieux aient été conduites en grande partie par des essais de chargement in-situ sur des pieux à grande échelle, leurs résultats ne peuvent pas être généralisés pour prédire le comportement d'autres pieux. Par contre, les essais d'interface réalisés au laboratoire avec des conditions aux limites évidentes peuvent fournir des informations fondamentales, telles que des corrélations entre la résistance à l'interface et le déplacement tangentiel sous différentes conditions, et des facteurs d'influence sur la résistance à l'interface

Les essais de cisaillement annulaire d'interface ont été conduits dans le but d'étudier l'effet de l'interface sol-matériau solide sur la résistance au cisaillement résiduelle. Pour cela l'anneau d'origine poreux en bronze (Figure 5.11) situé sur le plateau de chargement a été remplacé successivement par des anneaux en acier inoxydable et de béton de différentes rugosités ayant les mêmes dimensions que l'anneau d'origine avec une épaisseur suffisante pour distribuer la charge verticale uniformément. Contrairement aux anneaux d'origine, on a considéré qu'il était inapproprié de fixer les anneaux en acier à l'aide de vis à partir de la face inférieure. Ceci aurait pour effet l'altération des propriétés réelles d'interface. Alternativement, la connexion s'est faite par la face supérieure non sollicitée de l'anneau avec de petites barres s'enfonçant dans les trous de la plaque de chargement et le fixant solidement à ce dernier. Les interfaces de béton, pour leur part, ont été collé à la plaque de chargement en utilisant une mince couche de silicon et laissé sécher pendant 12 h environ sous une charge de 5 kg. Ils sont ensuite laissés pour 12 h encore pour permettre la polymérisation, avant d'être utilisé. Ceci renforça le collage et empêcha tout déplacement vertical durant l'expérimentation. Pour s'assurer que le béton ne glisse pas au cours du cisaillement, l'interface et la plaque de chargement ont été marquées.



**Figure 5.11** Anneau d'origine en bronze

L'anneau d'origine permet un cisaillement sol – sol à cause des rainures réparties le long de la circonférence, dans lesquelles s'enfonce le sol. La figure 5.12 montre une portion d'échantillon de kaolin à la fin d'un essai standard, prise au microscope électronique à balayage. Des études comparatives entre l'appareil de Bromhead et l'appareil IC/NGI (voir Section 2.2) ont permis de montrer que les deux appareils donnaient des résultats similaires. Les résultats obtenus avec l'appareil d'origine réfèrent à un cisaillement sol-sol et sont de ce fait considérés comme point de référence. La figure 5.13 représente un anneau en acier fixé au plateau de chargement. Les anneaux en acier inoxydable ont été utilisés pour éviter le changement de la rugosité due à l'effet de la corrosion durant les essais. Concernant le temps de consolidation on n'a pas observé une augmentation lors de l'utilisation des anneaux d'acier ou de béton.



**Figure 5.12** Portion d'échantillon de kaolin, à la fin d'un essai d'un essai standard (grossissement 25X)



**Figure 5.13** Anneau en acier fixé au plateau de chargement

## 5.8 Programme expérimental

Un résumé des essais de cisaillement annulaire conduits est montré dans les tableaux 5.5 à 5.8, ci-dessous. Chaque essai est décrit à l'aide des grandeurs suivantes : le déplacement relatif tangentiel ou horizontal ( $\Delta_h$ ), la contrainte tangentielle ( $\tau$ ) et le déplacement relatif normal ou vertical ( $\Delta_v$ ).

L'objectif de ces essais est d'étudier particulièrement l'effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement à l'interface entre un sol cohérent et un matériau solide (acier ou béton) ainsi que l'effet de la variation de la vitesse de cisaillement et du pré-cisaillement. Des facteurs tels que le type du sol, du point de vue teneur en fraction argileuse, type de minéral constituant le sol sont également considérés. Une attention particulière est donnée au comportement dans le domaine des grands déplacements sans négliger pour autant le comportement pour de faibles déformations.

Dans cette étude, les sols sont désignés par X (limon de Xeuilley), XK (mélange 75% de limon de Xeuilley + 25% de kaolin), K (kaolin) et B (Bentonite). IO désigne l'interface d'origine qui permet un cisaillement sol- sol. Concernant les essais d'interface, IA1, IA2, IA3, IA4 représentent respectivement les interfaces d'acier, et IB1 et IB2 les interfaces de béton, définies précédemment (voir Section 4.7). CR et CL indiquent si l'essai a été effectué en cisaillement rapide (44,52 mm/mn) ou en cisaillement lent (0,0356 mm/mn) lors de la troisième phase de cisaillement. L'ensemble des courbes obtenues pour chaque phase de cisaillement est donné en annexe.

**Tableau 5.5** Résumé des essais conduits sur le limon de Xeuilley

Essai	Type d'anneau	Vitesse de Cisaillement (mm/mn)	Figure
XIO	Bronze/Origine	0,0356	A.1.a
XIOCR	Bronze/Origine	44,52	A.1.b
XIOCL	Bronze/Origine	0,0356	A.1.c
XIA4	Acier/IA4	0,0356	A.2.a
XIA4CR	Acier/ IA4	44,52	A.2.b
XIA4CL	Acier/ IA4	0,0356	A.2.c
XIA3	Acier/IA3	0,0356	A.3.a
XIA3CR	Acier/ IA3	44,52	A.3.b
XIA3CL	Acier/ IA3	0,0356	A.3.c
XIA2	Acier/IA2	0,0356	A.4.a
XIA2CR	Acier/ IA2	44,52	A.4.b
XIA2CL	Acier/ IA2	0,0356	A.4.c
XIA1	Acier/IA1	0,0356	A.5.a
XIA1CR	Acier/ IA1	44,52	A.5.b
XIA1CL	Acier/ IA1	0,0356	A.5.c
XIB2	Béton/IB2	0,0356	A.6
XIB1	Béton/IB1	0,0356	A.7

**Tableau 5.6** Résumé des essais conduits sur le mélange limon de Xeuilley – kaolin

Essai	Type d'anneau	Vitesse de cisaillement (mm/mn)	Figure
XKIO	Bronze/Origine	0,0356	A.8.a
XKIOCR	Bronze/Origine	44,52	A.8.b
XKIOCL	Bronze/Origine	0,0356	A.8.c
XKIA4	Acier/IA4	0,0356	A.9.a
XKIA4CR	Acier/ IA4	44,52	A.9.b
XKIA4CL	Acier/ IA4	0,0356	A.9.c
XKIA3	Acier/ IA3	0,0356	A.10.a
XKIA3CR	Acier/ IA3	44,52	A.10.b
XKIA3CL	Acier/ IA3	0,0356	A.10.c
XKIA2	Acier/ IA2	0,0356	A.11.a
XKIA2CR	Acier/ IA2	44,52	A.11.b
XKIA2CL	Acier/ IA2	0,0356	A.11.c
XKIA1	Acier/ IA1	0,0356	A.12.a
XKIA1CR	Acier/ IA1	44,52	A.12.b
XKIA1CL	Acier/ IA1	0,0356	A.12.c
XKIB2	Béton/IB2	0,0356	A.13
XKIB1	Béton/IB1	0,0356	A.14

**Tableau 5.7** Résumé des essais conduits sur le kaolin

Essai	Type d'anneau	Vitesse de Cisaillement (mm/mn)	Figure
KIO	Bronze/Origine	0,0356	A.15.a
KIOCR	Bronze/Origine	44,52	A.15.b
KIOCL	Bronze/Origine	0,0356	A.15.c
KIA4	Acier/IA4	0,0356	A.16.a
KIA4CR	Acier/IA4	44,52	A.16.b
KIA4CL	Acier/IA4	0,0356	A.16..c
KIA3	Acier/IA3	0,0356	A.17.a
KIA3CR	Acier/IA3	44,52	A.17.b
KIA3CL	Acier/IA3	0,0356	A.17.c
KIA2	Acier/IA2	0,0356	A.18.a
KIA2CR	Acier/IA2	44,52	A.18.b
KIA2CL	Acier/IA2	0,0356	A.18.c
KIA1	Acier/IA1	0,0356	A.19.a
KIA1CR	Acier/IA1	44,52	A.19.b
KIA1CL	Acier/IA1	0,0356	A.19.c
KIB2	Béton/IB2	0,0356	A.20
KIB1	Béton/IB1	0,0356	A.21

**Tableau 5.8** Résumé des essais conduits sur la bentonite

Essai	Type d'anneau	Vitesse de cisaillement (mm/mn)	Figure
BIO	Bronze/Origine	0,0356	A.22.a
BIOCR	Bronze/Origine	44,52	A.22.b
BIOCL	Bronze/Origine	0,0356	A.22.c
BIA4	Acier/IA4	0,0356	A.23.a
BIA4CR	Acier/IA4	44,52	A.23.b
BIA4CL	Acier/IA4	0,0356	A.23..c
BIA3	Acier/IA3	0,0356	A.24.a
BIA3CR	Acier/IA3	44,52	A.24.b
BIA3CL	Acier/IA3	0,0356	A.24.c
BIA2	Acier/IA2	0,0356	A.25.a
BIA2CR	Acier/IA2	44,52	A.25.b
BIA2CL	Acier/IA2	0,0356	A.25.c
BIA1	Acier/IA1	0,0356	A.26.a
BIA1CR	Acier/IA1	44,52	A.26.b
BIA1CL	Acier/IA1	0,0356	A.26.c
BIB2	Béton/IB2	0,0356	A.27
BIB1	Béton/IB1	0,0356	A.28

## **5.9 Conclusions**

Dans cette partie, les caractéristiques des sols de référence ont été présentées. Les dispositifs expérimentaux permettant la caractérisation du comportement au cisaillement sol-sol et à l'interface sol-matériau solide y ont été décrits. Le programme expérimental est également présenté avec la nomenclature utilisée pour référencer les essais qui seront introduits tout au long des chapitres suivants.

Pour ce qui concerne l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead, cet appareil n'a pratiquement pas nécessité de modification, pour permettre d'effectuer des essais d'interface. Alors que le dispositif expérimental a subi des améliorations notables, par rapport à l'appareil d'origine, tant au niveau des dispositifs de mesure qu'au niveau de l'acquisition des variables mesurées (sorties).

## 6 RÉSULTATS EXPERIMENTAUX

---

### 6.1 Introduction

L'objectif primordial de ce travail a trait à l'étude de la résistance au cisaillement sol-sol et la résistance à l'interface sol-matériau solide au moyen de l'appareil de cisaillement annulaire, avec une attention particulière au domaine des grands déplacements, dans une tentative de simuler le comportement du sol situé autour des pieux, à la rupture. Comme indiqué précédemment, la rupture a plutôt tendance à se produire au niveau de l'interface pieu-sol ou à proximité de celle-ci. Pour cette raison, des essais d'interface impliquant le cisaillement de quatre types de sols cohérents contre des interfaces d'acier inoxydable et de béton de différentes rugosités, ont été conduits. Des essais de cisaillement annulaire standard ont été effectués sur les mêmes sols pour déterminer la résistance au cisaillement sol-sol. Les essais, impliquant un cisaillement lent (1<sup>ère</sup> et 3<sup>ème</sup> phases), sont conduits pour des déplacements de cisaillement de manière à ce qu'il n'y ait pas de changement supplémentaire significatif dans la résistance au cisaillement. Ces deux phases de cisaillement permettent d'étudier l'effet du pré-cisaillement, en comparant les résistances obtenues lors de chacune des deux phases. Un total de 68 essais de cisaillement ont été conduits représentant les différents types d'interface et les différents états de cisaillement pour chaque type de sol.

Dans la présente étude l'interface est horizontale. Le déplacement tangentiel est dans la direction horizontale et le déplacement normal correspond à la direction verticale. Par contre une interface sol – pieu est généralement verticale. Dans un tel cas, le déplacement tangentiel est dans la direction verticale et le déplacement normale coïncide avec la direction horizontale. De ce fait on utilisera dans ce qui suit les termes déplacement tangentiel et normal, ou déplacement horizontal et vertical.

Le frottement en mécanique des sols est modélisé en utilisant le coefficient de frottement  $\tau/\sigma_n$ , où  $\tau$  et  $\sigma_n$  sont les contraintes de cisaillement et normale existant à l'interface sol-acier ou béton. Deux types de coefficient de frottement sont utilisés : le coefficient de frottement au pic ou coefficient maximum et le coefficient de frottement résiduel. Ils sont obtenus en divisant la contrainte de cisaillement au pic ( $\tau_p$ ) et résiduel ( $\tau_r$ ), respectivement, par la contrainte normale appliquée. Les coefficients de frottement obtenus à partir des essais sols-sols équivalents sont donnés pour comparaison. La diminution de la résistance est quantifiée par l'indice de fragilité  $I_f$  défini par :

$$I_f = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \quad (6.1)$$

Deux modes de présentation des données sont utilisées dans les essais de cisaillement dans le domaine des grands déplacements :

- la représentation conventionnelle en coordonnées arithmétiques. Elle permet de visualiser les courbes de cisaillement de manière simple et directe.
- La représentation en coordonnées semi-logarithmique des courbes proposées par La Gatta (1970). Elle accentue la pente de la courbe pour des déformations importantes, permettant de définir la partie horizontale de la courbe plus facilement.

Les résultats sont représentés, en annexe, selon le premier mode de présentation. Des courbes donnant le coefficient de frottement en fonction du déplacement tangentiel sont utilisées ainsi que ceux représentant la variation de la déformation verticale au cours de l'essai. Au chapitre 8, nous utiliserons le deuxième mode de présentation pour regrouper les courbes obtenues lors des différents essais ensemble.

Dans ce chapitre une revue de tous les résultats obtenus est présentée et les tendances mises en exergue. Les résultats présentés dans ce chapitre seront interprétés plus en détail au Chapitre 8.

## 6.2 Résultats des essais

Les échantillons ont été préparés et les essais conduits selon les procédures décrites au chapitre 5. Les interfaces ont été caractérisées au Chapitre 4. Les figures présentées en annexe, montrent les courbes coefficient de frottement – déplacement horizontal obtenues pour chaque phase de cisaillement. La résistance résiduelle d'un sol est généralement définie comme étant une résistance au cisaillement minimum et constante obtenue lors d'un essai de cisaillement drainé. Cependant, dans un certain nombre d'essais, il est difficile de juger si la relation entre la contrainte de cisaillement (ou le coefficient de frottement) et le déplacement de cisaillement obtenue lors d'un essai de cisaillement atteint une valeur constante après de larges déplacements (Suzuki et al. (1997). Par conséquent, pour la comportement post-pic, la résistance résiduelle a été prise égale à la moyenne arithmétique des valeurs obtenues, au delà de la longueur du radoucissement, lorsque ces valeurs tendent à se stabiliser. La courbe de chacune des trois phases a été représentée séparément. Les essais d'interfaces de béton comprennent une seule phase de cisaillement lent. Pour permettre une meilleure comparaison, les résultats des essais sols-sol et d'interface pour chaque type de sol et pour chaque phase de cisaillement ont été regroupés dans un seul tableau. L'ensemble des résultats obtenus sont résumés aux tableaux 6.1 à 6.12. Les références des essais ont été définies dans la section 5.9.

On notera que pour la géométrie des échantillons de cisaillement annulaire de l'appareil de Bromhead, le déplacement de cisaillement des éléments adjacents à la circonférence interne serait de 70% des déplacements des éléments adjacents à la circonférence extérieure de l'échantillon annulaire. Ceci pourrait avoir une influence sur les valeurs de frottement au pic. Cependant l'évaluation des déformations importantes ou des paramètres résiduels, ne serait pas affectée par l'existence de tels gradients de déformation, qui caractérisent l'ensemble des appareils de cisaillement annulaire. Les résultats obtenus sont résumés dans des tableaux, dans lesquels  $\varphi_p'$  et  $\varphi_r'$  sont les angles de frottement interne au pic et résiduel obtenus pour un cisaillement sol-sol. Concernant le cisaillement d'interface,  $\delta_p'$  et  $\delta_r'$  réfèrent aux angles d'interface au pic et résiduel, respectivement.  $\Delta_p$  et  $\Delta_r$  sont les déplacements nécessaires pour atteindre le pic et le plateau des contraintes.

### 6.2.1 Essais sur le limon de Xeulley

Dix sept essais sur le limon de Xeulley, énumérés au tableau 5.5, ont été conduits pour contribuer à établir un modèle de comportement du matériau. Les résultats, concernant la première phase de cisaillement lent à une vitesse de 0,0356 mm/mn sont résumés au Tableau 6.1. Les courbes donnant le coefficient de frottement et le déplacement normal en fonction du déplacement tangentiel pour les essais sol-sol et d'interface avec différentes rugosités de surfaces sont données dans les Figures A.1.a, A.2.a, A.3.a, A.4.a, A.5.a, A.6 et A7. Concernant le cisaillement sol-sol, le pic de résistance (exprimé par  $\tau/\sigma_n'$ ) a une valeur de 0,508 approximativement. Ce qui correspond à une valeur de  $\varphi_p'$  de 26,9°. Cette valeur maximale est atteinte après 4 mm de cisaillement. Un déplacement de l'ordre de 106 mm est nécessaire pour établir les conditions résiduelles. Le coefficient de frottement résiduel est alors égal à 0,39. La diminution de la résistance, qui est déterminée à partir de l'indice de fragilité  $I_f$ , est de 24%. De ce fait indiquant que le limon de Xeulley présente un comportement fragile. D'autre part, les essais d'interface présentent un pic pour des déplacements compris entre 0,32 mm et 3,4 mm. Cette distance tend à augmenter avec la rugosité. Les courbes obtenues indiquent que les valeurs de  $\delta_p'$  varient entre 14° et 29,1° en fonction de la rugosité et le matériau constituant l'interface. On remarque alors que pour l'essai XIA4, la valeur de  $\delta_p'$  est légèrement supérieure à la valeur de  $\varphi_p'$ . Les valeurs de  $\delta_r'$  obtenues à l'état résiduel augmentent avec la rugosité et sont comprises entre 9,8° et 22,9°. Pour XIA3 et XIA4, les valeurs obtenues sont supérieures à ceux obtenues dans le cas d'un cisaillement sol-sol. A l'exception de l'essai XIA3, un comportement fragile s'est produit également, avec des indices de fragilité compris entre 20,1% et 35,4%. Les plus grandes valeurs correspondent aux interfaces de béton (IB1 et IB2). Il est à noter que les déformations

nécessaires à l'obtention de la résistance résiduelle sont comprises entre 80 et 150 mm pour l'ensemble des essais d'interface sauf pour l'essai XIA3, pour lequel le déplacement tangentiel a été évalué à 30 mm approximativement.

**Tableau 6.1** Résumé des résultats des essais réalisés sur le limon de Xeuilley lors du cisaillement lent initial

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$ ou $\delta_p'$	$\Delta_p$	$\delta_p'/\varphi_p'$	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$	$\Delta_r$	$\delta_r'/\varphi_r'$	$I_f$
		(degré)	(mm)			(degré)	(mm)		(%)
XIO	0,508	26,9	4,02	-	0,386	21,1	106	-	24,0
XIA4	0,557	29,1	3,4	1,08	0,422	22,9	80	1,08	24,2
XIA3	0,441	23,8	1,4	0,88	0,417	22,6	30	1,07	5,4
XIA2	0,397	21,6	0,97	0,80	0,317	17,6	150	0,83	20,1
XIA1	0,250	14,0	0,32	0,52	0,172	9,8	120	0,46	31,2
XIB2	0,504	26,7	3,4	0,99	0,340	18,8	125	0,88	30,4
XIB1	0,444	23,9	1,5	0,87	0,287	16,0	100	0,74	35,4

Lors du premier cycle de cisaillement, l'arrangement des particules durant les instants initiaux du cisaillement est illustré par un changement d'épaisseur brusque, qui est illustré dans les courbes déplacement vertical – déplacement horizontal. Un changement dans la tendance de variation du volume coïncide avec la résistance au pic. La déformation verticale qui est alors d'environ 0,2 mm pour les essais XIO, XIA4 et XIB2 a tendance à diminuer avec la rugosité de surface de l'acier pour correspondre à 0,023 mm pour l'essai XIA1. Une déformation horizontale supplémentaire au delà du pic entraîne une perte de sol, certes faible mais continue, pour l'ensemble des essais qui est alors la cause majeure de la diminution de l'épaisseur. En grand déplacement également le déplacement normal est plus importante pour les essais XIO et XIA4, avec par exemple des valeurs de 0,4 mm et 0,35 mm, respectivement, pour un déplacement de 100 mm, et diminue avec la rugosité. On remarque également que pour l'essai XIA1, la déformation verticale est moins importante (0,07 mm au maximum) et semble se stabiliser après un déplacement d'environ 45 mm. Pour les essais d'interface de béton, la déformation verticale, en grand déplacement, est plus importante dans le cas de l'essai XIB2 et irrégulière dans le cas de l'essai XIB1

Le but des essais en cisaillement rapide est de vérifier si la résistance au cisaillement sol-sol et à l'interface sol-acier est affectée par une augmentation de la vitesse de cisaillement. Cette augmentation a lieu après arrêt du déplacement produit lors du cisaillement lent précédent. Ce qui conduit à un retour des contraintes de cisaillement à zéro. La reprise du cisaillement avec une augmentation de la vitesse à 44,52 mm/mn (cisaillement rapide), comme le montre les courbes obtenues (Figures A.1.b, A.2.b, A.3.b, A.4.b, A.5.b,) et le tableau 6.2, indique que le coefficient de frottement atteint tout d'abord un seuil puis tend à chuter brusquement. Toutefois, les courbes correspondant aux différents essais ont des allures différentes. Lorsque les surfaces d'interface ont des rugosités importantes (IA4 et IA3), le coefficient de frottement a tendance à se stabiliser à environ 150 mm puis une nette diminution a lieu pour ensuite se stabiliser autour d'une valeur plus ou moins constante, égale approximativement à 0,50 et 0,47 pour les essais XIA4CR et XIA3CR respectivement. Dans le cas de l'interface lisse (IA1), le coefficient de frottement est de 0,200 et pour IA2, il a une valeur moyenne de 0,45. Dans le cas d'un cisaillement sol-sol, une valeur moyenne de  $\tau_r/\sigma_n = 0,41$  est enregistrée. Cette dernière valeur est toutefois inférieure à celles obtenues dans le cas des interfaces rugueuses.

La diminution de l'épaisseur de l'échantillon, qui est produite par la déformation verticale, est due en grande partie à la perte d'échantillon. Elle est alors plus importante dans le cas des surfaces rugueuses, avec respectivement des déformations de 0,30 mm, 0,31 mm et 0,15 mm pour les essais XIA4CR, XIA3CR et XIA2CR, après, un déplacement horizontal de 600 mm. La valeur correspondante dans le cas d'un essai sol-sol est plus importante (0,5 mm), et beaucoup moins importante dans le cas de l'essai XIA1CR (0,025 mm).

**Tableau 6.2** Résumé des résultats des essais réalisés sur le limon de Xeuilley lors du cisaillement rapide

Essai	$\tau_p/\sigma_n$	$\phi_p$ ou $\delta_p$	$\Delta_p$	$\tau_r/\sigma_n$	$\phi_r$ ou $\delta_r$	$(\tau_r/\sigma_n)_{\text{moy}}$	$(\phi_r \text{ ou } \delta_r)_{\text{moy}}$	$\Delta_r$	$I_f$
		(degré)	(mm)		(degré)		(degré)		
XIOCR	0,453	24,4	3	0,406-0,417	22,1-22,6	0,412	22,4	21	9,0
XIA4CR	0,600	31,0	3	0,464-0,540	24,9-28,4	0,500	26,6	170	27,8
XIA3CR	0,635	32,2	3	0,457-0,472	24,6-25,6	0,467	25,03	650	26,4
XIA2CR	0,538	28,3	3	0,440-0,462	23,7-24,8	0,454	24,4	63	15,6
XIA1CR	0,232	13,1	14	0,195-0,205	11,0-11,6	0,200	11,3	250	13,8

D'après l'hypothèse discutée dans la section 2.4.1, la résistance résiduelle des sols cohérents devrait être indépendante de la structure initiale du sol. Cette hypothèse a été examinée en performant les essais correspondant à la deuxième phase de cisaillement lent dans le but d'étudier l'effet du pré-cisaillement. Concernant les essais sol-sol et sol-interface d'acier, après rétablissement de la vitesse initial (0,0356 mm/mn), les résultats de l'ensemble des essais sont résumés au Tableau 6.3 et les courbes présentées dans les Figures A.1.c, A.2.c, A.3.c, A.4.c et A.5.c. On remarque que des courbes moins prononcées avec des pics peu évidents pour l'essai sol-sol et les essais d'interfaces rugueuses, correspondant à des angles de frottement à l'interface compris entre 23,6° et 28°, ont été obtenues. Alors que l'essai XIA1CL n'a pas présenté de maximum et a un angle de frottement moyen, en grand déplacement, égale à 8,9°. On remarque toujours une tendance à l'augmentation avec la rugosité des valeurs de  $\delta_r'$  avec des valeurs comprises entre 19,2° et 26,7° et une valeur de  $\phi_r'=23,2^\circ$ . Une comparaison des résultats obtenus avec les valeurs du Tableau 6.1 montre que le pré-cisaillement a un effet sur les résistances au cisaillement mesurées.

Pour les échantillons pré-cisaillés, comme on peut le voir sur les courbes déplacement vertical – déplacement horizontal, du moment que les particules d'argile ont déjà subis un arrangement durant le cisaillement lent initial et seulement un remaniement mineur a lieu durant le cisaillement rapide, il y'a seulement un petit déplacement vertical, produit par l'arrangement des particules, qui est compris entre 20  $\mu\text{m}$  pour XIA1CL et 40  $\mu\text{m}$  XIA4CL, lorsque le déplacement horizontal correspond à 50 mm. Pour, XIOCL, la déformation verticale correspondante est de 50 $\mu\text{m}$ .

**Tableau 6.3** Résumé des résultats des essais réalisés sur le limon de Xeuilley lors du deuxième cisaillement lent

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\phi_p'$ ou $\delta_p'$	$\Delta_p$ (mm)	$\tau_r/\sigma_n'$	$\phi_r'$ ou $\delta_r'$	$(\tau_r/\sigma_n')_{\text{moy}}$	$(\phi_r'$ ou $\delta_r')$ <sub>moy</sub>	$\Delta_r$ (mm)	$I_f$ (%)
		(degré)			(degré)		(degré)		
XIOCL	0,484	25,8	0.49	0,428	23,2	-	-	30	11,6
XIA4CL	0,533	28,0	0,55	0,489-0,518	26,1-27,4	0,504	26,7	0,9	5,4
XIA3CL	0,524	27,6	0,42	0,455-0,481	24,5-25,7	0,464	24,9	1,5	11,4
XIA2CL	0,437	23,6	0,40	0,348	19,2	-	-	78	20,4
XIA1CL	-	-	-	0,146-0,162	8,3-9,2	0,156	8,9	0,18	-

Un fois les essais correspondant à la 2<sup>ème</sup> phase de cisaillement lent achevés, l'équipement est démantelé et les échantillons inspectés visuellement. On a pu mettre en évidence des surfaces de cisaillement striées à une certaine distance de la surface supérieure des échantillons pour les essais d'interfaces (XIA2CL, XIA3CL et XIA4CL) et l'essai XIOCL. La Figure 6.1 montre un exemple type de formation d'un plan de cisaillement. Il est clair que cette figure indique que le cisaillement a lieu au sein du sol plutôt qu'au contact entre le sol et la plaque de chargement. Alors que pour l'interface lisse (Essai XIA1CL), l'observation visuelle a mis en évidence l'existence d'une surface très polie située à l'interface indiquant qu'un glissement a lieu à l'interface sol-acier. La nature des surfaces observées a été étudiée au microscope électronique à balayage pour mettre en évidence l'effet de la rugosité de surface sur la microstructure des sols soumis à des déplacements importants, dans le cas d'un cisaillement d'interface. Cette étude sera présentée au chapitre 7.



**Figure 6.1** Structure formée après le cisaillement

### **6.2.2 Essais sur le mélange limon de Xeuilley-kaolin**

Les résultats des dix sept essais conduits sur le mélange limon de Xeuilley-kaolin (XK) ont été résumés aux Tableaux 6.4, 6.5 et 6.6. Ces essais ont également pour objectif supplémentaire l'étude de l'effet de la variation du pourcentage d'argile ainsi que l'effet du changement de la composition minéralogique des particules fines sur la résistance au cisaillement sol-sol et à l'interface sol-matériau solide (acier et béton). Les courbes obtenues qui sont données en annexe, dans les figures A.8.a, A.9.a, A.10.a, A.11.a, A.12.a, A13 et A14, confirment en général les tendances observées dans le cas du limon de Xeuilley. La figure A.8.a représente le résultat d'un essai de cisaillement annulaire standard réalisé sur un échantillon saturé du mélange XK, concernant le premier cycle de cisaillement lent. La contrainte de cisaillement augmente régulièrement pour atteindre un maximum pour un déplacement de l'ordre de 3,9 mm, puis décroît pour des déplacements de plus en plus

importants pour atteindre ensuite un palier horizontal. Ce palier montre généralement que la résistance résiduelle est atteinte et ce au delà d'un déplacement approximatif de 78 mm. On peut remarquer que pour l'essai XKIO,  $\varphi_r'$  a une valeur de 23,1°. En outre, il ressort des résultats des essais d'interface sol-acier et sol-béton que les valeurs de  $\delta_r'$  se situent entre 10,1° et 21,5° et l'établissement des conditions résiduelles a lieu pour des déplacements horizontaux compris entre 50 mm et 150 mm. On a aussi pu remarquer que les différences entre les coefficients de frottement maximum et minimum varient entre 10,4% et 35,1%.

Les courbes déplacement normal – déplacement tangentiel sont similaires à ceux obtenues pour le limon de Xeuilley et confirment le modèle de comportement noté pour les essais de cisaillement annulaire conduits dans les mêmes conditions. Les déformations normales lorsque le pic de résistance est atteint sont du même ordre pour XKIO et XKIA4, soit 0,18 mm et 0,19 mm respectivement. Elles diminuent avec la rugosité de surface de l'acier pour atteindre 0,03 mm pour XKIA1. A un déplacement de 100 mm, la déformation verticale pour l'essai sol-sol est de 0,42 mm. Pour les essais d'interface, elle varie de 0,33 mm pour XKIA4 à 0,09 mm pour XKIA1. Pour les essais d'interface de béton les variations d'épaisseur sont plus importantes, particulièrement pour IB2, où elle est susceptible d'atteindre 1,2 mm pour un déplacement horizontal de 100mm.

**Tableau 6.4** Résumé des résultats des essais réalisés sur le mélange limon de Xeuilley-kaolin lors du cisaillement lent initial

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$ ou $\delta_p'$	$\Delta_p$	$\delta_p'/\varphi_p'$	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$	$\Delta_r$	$\delta_r'/\varphi_r'$	$I_f$
		(degré)	(mm)			(degré)	(mm)		(%)
XKIO	0,505	26,8	3,9	-	0,427	23,1	78	-	15,4
XKIA4	0,510	27,0	3,6	1,01	0,394	21,5	56	0,93	22,7
XKIA3	0,422	22,9	1,3	0,85	0,378	20,7	150	0,90	10,4
XKIA2	0,374	20,5	1,1	0,76	0,279	15,6	120	0,67	25,4
XKIA1	0,266	15,0	0,34	0,56	0,178	10,1	80	0,44	33,1
XKIB2	0,474	25,4	4,0	0,94	0,334	18,5	87	0,78	29,5
XKIB1	0,407	22,1	1,9	0,81	0,264	14,8	50	0,62	35,1

Les figures A.8.b, A.9.b, A.10.b, A.11.b et A.12.b représentent les résultats d'essais rapides sur les mêmes échantillons que ceux ayant subi auparavant un cisaillement lent. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus pour le limon de Xeuilley et confirment l'existence

d'un seuil de résistance au début de l'essai, qui est suivi d'une chute dans la courbe coefficient de frottement – déplacement tangentiel. Le coefficient de frottement pour l'essai XKIOCR atteint une valeur maximale de 0,505 après un déplacement inférieur à 1 mm puis diminue régulièrement pour se stabiliser à partir de 80 mm à environ 0,458. Pour les essais d'interface, les déplacements tangentiels nécessaires à l'obtention des résistances maximales semblent augmenter avec la rugosité de l'acier et sont comprises entre 2,2 mm et 3,7 mm. Dans l'essai XKIA4CR, la valeur de  $\tau_p/\sigma_n'$  est égale à 0,604 et de ce fait dépasse la valeur obtenue pour l'essai XKIOCR. Les valeurs de la résistance maximale diminuent avec la rugosité et atteignent 0,220 pour l'essai conduit avec l'interface la plus lisse (XKIA1CR). En grand déplacement les coefficients de frottement sont compris entre 0,193 et 0,428, avec une augmentation en fonction de la rugosité de surface sauf pour l'essai XKIA3CR, qui a donné une valeur légèrement supérieure à XKIA4CR. On remarque également que la différence entre le seuil de résistance et la résistance minimale augmente avec la rugosité.

Concernant les courbes déplacement vertical – déplacement horizontal, il est important de noter que, à l'instar des essais en cisaillement rapide conduits avec le limon de Xeuilley, une variation continue de l'épaisseur se produit au cours des essais. A un déplacement horizontal de 600 mm, cette variation est de 0,36 mm dans le cas d'un cisaillement sol-sol. Elle est comprise entre 0,23 mm et 0,04 mm et diminue avec la rugosité pour les essais d'interface.

**Tableau 6.5** Résumé des résultats des essais réalisés sur le mélange limon de Xeuilley-kaolin lors du cisaillement rapide

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$ ou $\delta_p'$	$\Delta_p$	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$	$(\tau_r/\sigma_n')_{moy}$	$(\varphi_r'$ ou $\delta_r')$ <sub>moy</sub>	$\Delta_r$	$I_f$
		(degré)	(mm)		(degré)		(degré)		
XKIOCR	0,573	29,8	0,7	0,449-0,473	24,2-25,3	0,458	24,6	350	20,1
XKIA4CR	0,604	31,1	2,2	0,384-0,442	21,0-23,8	0,415	22,5	280	31,3
XKIA3CR	0,566	29,5	3,0	0,416-0,452	22,6-24,3	0,428	23,2	600	24,4
XKIA2CR	0,451	24,3	3,0	0,359-0,373	19,7-20,4	0,365	20,0	175	19,1
XKIA1CR	0,220	12,4	3,7	0,191-0,196	10,8-11,1	0,193	10,9	180	12,3

L'effet du pré-cisaillement est également clairement évident pour le mélange limon de Xeuilley – kaolin. On constate en effet que le rétablissement de la vitesse lente de 0,0356 mm/mm induit, à l'exception de l'essai XKIA1CL, un nouveau petit pic de cisaillement qui est suivi lui aussi par un radoucissement irrégulier actif sur des déplacements de l'ordre de 50

mm, comme indiqué sur les figures A.8.c, A.9.c, A.10.c et A.11.c. Pour les essais d'interface, la résistance au cisaillement correspondant au pic est mobilisée pour de petits déplacements situés entre 0,3 mm et 0,5 mm. Après mobilisation de la résistance maximum, un radoucissement se produit et l'état résiduel est atteint ensuite de manière plus ou moins différente d'un essai à un autre avec des déplacements variant dans de larges limites (entre 0,5 mm et 63 mm). Les valeurs des angles de frottement au pic et résiduel sont résumés au Tableau 6.6.

**Tableau 6.6** Résumé des résultats des essais réalisés sur le mélange limon de Xeuilley-kaolin lors du deuxième cisaillement lent

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$ ou $\delta_p'$	$\Delta_p$	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$	$(\tau_r/\sigma_n')_{moy}$	$(\varphi_r'$ ou $\delta_r')$ <sub>moy</sub>	$\Delta_r$	$I_f$
		(degré)	(mm)		(degré)		(degré)		
XKIOCL	0,504	26,7	0,47	0,464-0,506	24,9-26,8	0,480	25,6	10	4,8
XKIA4CL	0,496	26,4	0,47	0,463-0,486	24,8-25,9	0,476	25,4	0,5	4,0
XKIA3CL	0,478	25,5	0,50	0,445-0,469	24,0-25,1	0,456	24,5	0,68	4,6
XKIA2CL	0,375	20,5	0,32	0,327	18,2	-	-	63	12,8
XKIA1CL	-	-	-	0,178	10,1	-	-	25	-

L'évaluation de la variation de l'épaisseur indique que pour les échantillons pré-cisaillés, il y'a eu une diminution négligeable du volume au cours de l'essai, en particulier pour les interfaces les plus lisses (XKIA1CL et XKIA2CL). Pour lesquelles la déformation verticale est égale à 5  $\mu\text{m}$  et 6  $\mu\text{m}$  respectivement, à un déplacement horizontal de 50 mm. On note encore une fois que la diminution du volume a tendance à augmenter avec la rugosité de surface et atteint environ 35  $\mu\text{m}$  pour les deux autres interfaces et pour l'essai sol-sol, elle est de 28  $\mu\text{m}$ .

Après le démantèlement de l'équipement de l'essai, les échantillons se sont séparés des interfaces rugueuses (en particulier IA4, IA3, IB2) sur des surfaces de cisaillement proches d'elles. Alors que pour IA1, elles se sont séparées au niveau de l'interface. L'inspection visuelle des échantillons a révélé des surfaces de cisaillement ayant des structures semblables aux échantillons de limon de Xeuilley comme le confirmeront les micrographes obtenus après microanalyse au MEB, et qui seront présentés et discutés au Chapitre 7.

### 6.2.3 Essais sur le kaolin

L'objectif de la série d'essais sur le kaolin est d'observer le comportement d'une argile pure, constituée essentiellement de kaolinite, contre des interfaces d'acier et de béton de différentes rugosités. Les résultats sont donnés aux tableaux 6.7, 6.8 et 6.9. Pour la première phase de cisaillement lent, les résultats de l'essai KIO, qui sont présentés sous forme d'une courbe donnant  $\tau/\sigma_n'$  en fonction du déplacement horizontal (Figure A.15a), montrent que le comportement exhibé est fragile. L'essai en question produit tout d'abord un coefficient de frottement au pic égale à 0,351, soit un angle de frottement interne de  $19,3^\circ$ . Lupini (1981) a obtenu une valeur de 0,34 dans un essai de cisaillement annulaire réalisé sur le même type de sol au moyen de l'appareil IC/NGI. Le déplacement nécessaire pour atteindre l'état résiduel est de 100 mm et conduit alors à une valeur de  $\phi_r'$  de  $14^\circ$ . La différence entre les coefficients de frottement au pic et résiduel est alors évalué à 28,8%. Les essais d'interface dans le domaine des petits déplacements ont montré que les valeurs de  $\delta_p'$  varient entre  $18,3^\circ$  et  $20,2^\circ$ , pour l'ensemble des interfaces d'acier ou de béton, à l'exception de IA1 pour lequel  $\delta_p'$  est égale à  $12,9^\circ$ . Les déplacements nécessaires pour atteindre le pic sont compris entre 2 et 2,8 mm. Quand l'interface est extrêmement lisse, c'est à dire IA1, ce déplacement est inférieur à 1 mm. En cas de cisaillement du kaolin contre les interfaces d'acier ou de béton, les valeurs de  $\delta_r'$  obtenues sont comprises entre  $12,2^\circ$  et  $13,2^\circ$ . Pour KIA1, la valeur de l'angle de frottement résiduel à l'interface est égale à  $9^\circ$ . A l'instar de l'essai KIO, l'état résiduel est atteint après un déplacement horizontal de 100 mm, pour KIA4 et KIA3 et pour les autres essais  $\Delta_r$  est compris entre 50 mm et 95 mm. L'indice de fragilité moyen, pour l'ensemble des essais d'interface, est de 32,1%.

Pour cette première phase de cisaillement lent, on note également que pour les essais d'interface, les déformations verticales qui se produisent au cours de l'essai augmentent avec la rugosité. Ceci est particulièrement claire pour les quatre interfaces d'acier, pour lesquels les déformations correspondant au pic de résistance varient de 0,03 mm à 0,10 mm. Dans le domaine des grands déplacements, les déformations verticales correspondant à un déplacement horizontal de 100 mm varient entre 0,15 mm et 0,40 mm. Pour l'essai sol-sol (KIO), les déformations verticales sont plus grandes et sont égales à 0,13 mm et 0,48, en petits et grands déplacements, respectivement. Ces derniers sont cependant inférieurs aux déformations obtenues dans le cas des interfaces de béton (IB1 et IB2), en particulier en grand déplacement.

**Tableau 6.7** Résumé des résultats des essais réalisés sur le kaolin lors du cisaillement lent initial

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$ ou $\delta_p'$	$\Delta_p$	$\delta_p'/\varphi_p'$	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$	$\Delta_r$	$\delta_r'/\varphi_r'$	$I_f$
		(degré)	(mm)			(degré)	(mm)		
KIO	0,351	19,3	2,0	-	0,250	14,0	100	-	28,8
KIA4	0,368	20,2	2,0	1,05	0,228	12,8	100	0,91	38,0
KIA3	0,341	18,8	2,8	0,97	0,227	12,8	100	0,91	33,4
KIA2	0,330	18,3	2,0	0,94	0,216	12,2	95	0,87	34,5
KIA1	0,230	12,9	0,70	0,62	0,15	8,5	50	0,61	28,6
KIB2	0,336	18,6	2,4	0,96	0,235	13,2	60	0,94	30,1
KIB1	0,334	18,5	2,3	0,95	0,221	12,4	50	0,88	33,8

**Tableau 6.8** Résumé des résultats des essais réalisés sur le kaolin lors du cisaillement rapide

Essai	$\tau_p/\sigma_n$	$\varphi_p$ ou $\delta_p$	$\Delta_p$	$\tau_r/\sigma_n$	$\varphi_r$ ou $\delta_r$	$(\tau_r/\sigma_n)_{moy}$	$(\varphi_r$ ou $\delta_r)_{moy}$	$\Delta_r$	$I_f$
		(degré)	(mm)		(degré)		(degré)		
KIOCR	-	-	-	0,319-0,414	17,7-22,5	0,364	20,0	2,2	-
KIA4CR	0,414	22,5	3,7	0,304-0,358	16,9-19,7	0,336	18,6	150	18,8
KIA3CR	0,383	21,0	6,7	0,301-0,332	16,7-18,4	0,318	17,6	140	17,0
KIA2CR	0,309	17,2	20,8	0,259-0,292	14,5-16,3	0,278	15,5	80	10,0
KIA1CR	0,22	12,4	6,7	0,17-0,21	9,6-11,8	0,195	11,0	40	11,4

Concernant le cisaillement à une vitesse de 44,52 mm/mn, les résultats sont regroupés au tableau 6.8. Lors de l'essai sol-sol (essai KIOCR), les résultats obtenus pour l'échantillon pré-cisailé de kaolin sont présentés sur la figure A.15.b. Cette dernière montre qu'il n'y a pas eu de chute de résistance. Il se produit initialement une augmentation rapide de la résistance pour atteindre un seuil d'environ 0,35, puis la courbe coefficient de frottement –déplacement horizontal prend une forme plus ou moins onduleuse, avec une valeur moyenne du coefficient de frottement de 0,364. D'autre part, les essais d'interface ont présenté un comportement

fragile avec une résistance maximum suivie d'une diminution allant de 18,8 % à 10 %, et des courbes coefficient de frottement – déplacement présentant des allures différentes, comme le montrent les figures A.16.b, A.17.b, A.18.b et A.19.b. Les valeurs maximums moyennes de  $\tau/\sigma_n$  augmentent avec la rugosité de surface et sont comprises entre 0,195 pour SIA1 et 0,336 pour SIA4. On remarque également que sur les courbes donnant la déformation vertical en fonction du déplacement horizontal concernant les essais conduits avec les interfaces les plus rugueuses (KIA4CR et KIA3CR), une légère dilatation se produit au début de l'essai. Les déformations verticales enregistrées semblent plus ou moins les mêmes jusqu'à un déplacement de l'ordre de 580 mm. Au delà de cette distance, l'essai KIA3CR semble donner des déformations légèrement plus importantes, soit 0,35 mm contre 0,33 mm pour KIA4CR, à 600 mm de déplacement tangentiel. Pour un tel déplacement les valeurs des déplacements normaux diminuent avec la rugosité de surface et sont alors 0,21 mm et 54  $\mu\text{m}$  pour KIA2CR et KIA1CR respectivement. L'essai sol-sol donne toutefois une valeur supérieure aux essais d'interface, soit 0,41 mm.

Dans les courbes contrainte-déformation des échantillons pré-cisaillés (Figures A.15.c, A.16.c, A.17.c, A.18.c et A.19.c) ayant subis deux cycles de cisaillement lent et rapide, soumis encore une fois à une vitesse de 0,0356 mm/mn, un léger pic a été observé. La diminution de la résistance au pic à la résistance résiduelle, représenté par l'indice de fragilité,  $I_f$ , est égale à 13,1% pour l'essai sol-sol (KIOCL). En effet la valeur de  $\tau_p/\sigma_n'$  atteint une valeur d'environ 0,39 après un petit déplacement tangentiel de l'ordre de 0,9 mm et ensuite diminue progressivement et à partir d'un déplacement correspondant à 55 mm, la valeur de  $\tau_r/\sigma_n'$  conserve alors une valeur égale à environ 0,34. Pour les essais d'interface (KIA4CL, KIA3CL, KIA2CL, KIA1CL), les valeurs de  $\tau_r/\sigma_n'$  sont comprises entre 0,15 et 0,31 et augmentent avec la rugosité de surface de l'acier. D'autre part,  $I_f$  est compris entre 3,7 % et 13,7 % mais diminue avec la rugosité de surface. Ces résultats comparés à ceux obtenus lors de la première phase de cisaillement indiquent clairement que la résistance au cisaillement résiduelle est affectée par le pré-cisaillement ainsi que par la rugosité de surface.

Il est clair pour les échantillons pré-cisaillés de kaolin également que les essais ont lieu avec un changement négligeable d'épaisseur, particulièrement lors des premiers dix millimètres. Ensuite, les déformations verticales tendent à augmenter avec la rugosité et varient entre 11  $\mu\text{m}$  et 68  $\mu\text{m}$ , après 50 mm de cisaillement, pour les essais d'interface. Pour l'essai KIOCL, le déplacement vertical correspondant à 50 mm est de 60  $\mu\text{m}$ .

Le conteneur d'échantillon a été démonté à la fin de la dernière étape de cisaillement et la plaque de chargement enlevée difficilement à cause du sol qui y adhère dans le cas de l'essai sol-sol et les essais d'interfaces rugueuses. Le kaolin qui a été exposé à la fin n'a pas

montré de traits particuliers. Pour l'interface lisse, le sol n'a pas adhéré à l'interface et une surface très polie a pu être observée au sommet de l'échantillon. Ce qui prouve également que la rupture a lieu au niveau de l'interface. Des échantillons ont été toutefois analysés au microscope électronique à balayage dans le but d'étudier leur microstructure.

**Tableau 6.9** Résumé des résultats des essais réalisés sur le kaolin lors du deuxième cisaillement lent

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$ ou $\delta_p'$	$\Delta_p$	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$	$(\tau_r/\sigma_n')_{\text{moy}}$	$(\varphi_r'$ ou $\delta_r')$ <sub>moy</sub>	$\Delta_r$	$I_f$
		(degré)	(mm)		(degré)		(degré)		
KIOCL	0,388	21,2	0,9	0,337	18,6	-	-	55	13,1
KIA4CL	0,320	17,7	0,5	0,296-0,319	16,5-17,7	0,308	17,2	15	3,7
KIA3CL	0,320	17,7	0,6	0,293-0,305	16,3-17,0	0,297	16,5	10	7,2
KIA2CL	0,256	14,3	0,4	0,221-0,238	12,5-13,4	0,234	13,2	11	8,6
KIA1CL	0,174	11,3	0,5	0,15	8,5	-	-	20	13,7

#### 6.2.4 Essais sur la bentonite

Les essais sol-sol et d'interface sur la bentonite, qui sont également au nombre de dix sept, ont été conduits pour étudier le comportement d'échantillons de bentonite soumis à des déformations importantes. Un objectif supplémentaire est de voir l'effet du type de composant minéral majeur, la bentonite étant constituée de montmorillonite calcique, un minéral de très petites dimensions. Les données obtenues à partir des essais sont présentés dans les tableaux 6.10, 6. 11 et 6. 12. On peut observer concernant l'essai sol-sol (BIO) dont la courbe coefficient de frottement – déplacement tangentiel est illustrée sur la figure A.22.a, pour les conditions expérimentales retenues, un important phénomène de radoucissement après le pic de contrainte correspondant après une déformation relativement faible de l'échantillon d'environ 0,6 mm, le coefficient de frottement au pic est alors égale à 0,322, soit un angle de frottement interne au pic  $\varphi_p'$  de 17,8°. Puis une forte décroissance de la résistance se produit, atteignant une valeur résiduelle de l'angle de frottement interne  $\varphi_r'$  égale à 4,3°, dans le domaine des grands déplacements (supérieur à environ 47 mm). L'indice de fragilité correspondant est alors assez important, soit environ 77%. Dans le cas d'un cisaillement d'interface, il y'a également une importante réduction de la résistance au delà de la résistance maximum, comme on peut le voir sur les figures A.23.a, A.24.a, A.25.a, A.26.a, A.27 et A.28. La diminution de la résistance du pic à l'état résiduel est comprise entre 63% et 70%. Les

valeurs des angles de frottement maximum à l'interface  $\delta_p'$  sont comprises entre 8,5° et 19,2°. D'autre part, en grand déplacement les valeurs résiduelles  $\delta_r'$  sont situés entre 2,9° et 6,6°, en fonction de la rugosité et du type de matériau. Le point saisissant au sujet de cette série d'essais est le fait que la résistance d'interface est susceptible d'être sensiblement supérieure à la résistance sol-sol. Ainsi en petit déplacement pour l'essai BIA4, le rapport  $\delta_p'/\varphi_p'$  au pic est égale à 1,08 et à l'état résiduel, les valeurs du rapport  $\delta_r'/\varphi_r'$  sont comprises entre 1,3 et 1,5 approximativement pour l'ensemble des interfaces d'acier et de béton, à l'exception de l'interface d'acier lisse (IA1).

Concernant les courbes représentant le déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal, on notera que la variation de l'épaisseur est plus importante dans le cas de l'essai sol-sol (BIO) comparé aux essais d'interface sol-acier, pour lesquelles elle est moins importante et tend à diminuer avec la rugosité pour les essais BIA4 et BIA3. Pour les essais BIA2 et BIA1, il n'y a pratiquement pas eu de variation de volume au cours des essais. Cependant, les essais bentonite-béton ont montré un déplacement vertical relativement important dû en grande partie à la perte d'échantillon à partir des limites périphériques de l'échantillon.

**Tableau 6.10** Résumé des résultats des essais réalisés sur la bentonite lors du cisaillement lent initial

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$ ou $\delta_p'$	$\Delta_p$	$\delta_p'/\varphi_p'$	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$	$\Delta_r$	$\delta_r'/\varphi_r'$	$I_f$
		(degré)	(mm)			(degré)	(mm)		(%)
BIO	0,322	17,8	0,6	-	0,075	4,3	47	-	76,7
BIA4	0,349	19,2	0,5	1,08	0,106	6,1	60	1,42	69,6
BIA3	0,295	16,4	0,8	0,92	0,106	6,1	50	1,42	64,1
BIA2	0,283	15,8	0,4	0,89	0,104	5,9	92	1,37	63,2
BIA1	0,150	8,5	0,5	0,48	0,051	2,9	11	0,67	66,0
BIB2	0,345	19,0	0,5	1,07	0,110	6,6	55	1,47	68,1
BIB1	0,311	17,3	0,4	0,97	0,095	5,4	90	1,27	69,4

Contrairement aux autres sols, lorsque les échantillons de bentonite sont sujets à des vitesses de 44,52 mm/mn, après la première phase de cisaillement lent, ils n'ont pas présenté de seuil de résistance et de ce fait le comportement résultant n'est pas fragile, comme illustré dans les figures A.22.b, A.23.b, A.24.b, A.25.b et A.26.b. Les résultats qui sont résumés au

tableau 6.11, montrent que la valeur de  $\varphi_r$ , correspondant à des déplacements importants, est égale à  $6,7^\circ$ . Cette dernière est susceptible d'être dépassée lors des essais d'interface BIA4CR et à un degré moindre BIA3CR et BIA2CR, dont les valeurs de  $\delta_r$  sont égales respectivement à  $9,1^\circ$ ,  $7,0^\circ$  et  $6,9^\circ$ , pour atteindre une valeur minimale de  $3,5^\circ$  pour l'interface IA1.

Les courbes représentant la variation de l'épaisseur par rapport au déplacement horizontal indiquent que la plus importante variation correspond à l'essai sol-sol. Cette dernière qui est d'environ  $400 \mu\text{m}$ , est largement plus grande. Pour les essais d'interface, la déformation verticale est moins importante pour les essais BIA4CR et BIA3CR, avec, à titre indicatif, des déformations verticales de  $63 \mu\text{m}$  et  $21 \mu\text{m}$  respectivement, lorsque le déplacement horizontal est de  $400 \text{ mm}$ . Les essais BIA2CR et BIA1CR ont lieu pratiquement à volume constant.

**Tableau 6.11** Résumé des résultats des essais réalisés sur la bentonite lors du cisaillement rapide

Essai	$\tau_p/\sigma_n$	$\varphi_p$ ou $\delta_p$	$\Delta_p$	$\tau_r/\sigma_n$	$\varphi_r$ ou $\delta_r$	$\Delta_r$
		(degré)	(mm)		(degré)	(mm)
BIOCR	-	-	-	0,118	6,7	320
BIA4CR	-	-	-	0,161	9,1	65
BIA3CR	-	-	-	0,130	7	27
BIA2CR	-	-	-	0,122	6,9	3
BIA1CR	-	-	-	0,062	3,5	53

Les résultats obtenus pour la troisième phase qui correspond au deuxième cycle de cisaillement lent sont représentés sur les figures A.22.c, A.23.c, A.24.c, A.25.c et A.26.c, et résumés au tableau 6.12. Il ressort de ces résultats que les indices de fragilité sont relativement importants comparés aux autres sols lorsqu'ils soumis au cisaillement dans les mêmes conditions. C'est le cas en particulier pour l'essai sol-sol où  $I_f = 51,3 \%$  et les essais d'interface BIA4CL, BIA3CL et BIA2CL, pour lesquels  $I_f$  est égale à  $56 \%$ ,  $52,4 \%$  et  $50,0 \%$ , respectivement. Les résultats d'essais d'interface montrent que le pré-cisaillement a un effet négatif sur le comportement de la bentonite particulièrement quand il s'agit d'un cisaillement à l'interface. Les résultats obtenus montrent que lors de la deuxième phase de cisaillement lent les valeurs de  $\delta_r'$  sont inférieures à ceux obtenus lors de la première phase de cisaillement. Les courbes représentant la variation de l'épaisseur de l'échantillon en fonction

du déplacement montrent que lors de cette phase, le cisaillement a lieu pratiquement à volume constant, avec un léger gonflement en fin d'essai. L'inspection visuelle à la fin des essais pour les échantillons de bentonite, n'a pas permis de mettre en évidence une structure particulière pour les échantillons issus des essais sol-sol et des essais d'interfaces avec des surface rugueuses. Par contre pour l'interface lisse, encore une fois, il y'a confirmation du fait que le cisaillement est localisé au niveau de l'interface.

**Tableau 6.12** Résumé des résultats des essais réalisés sur la bentonite lors du second cisaillement lent

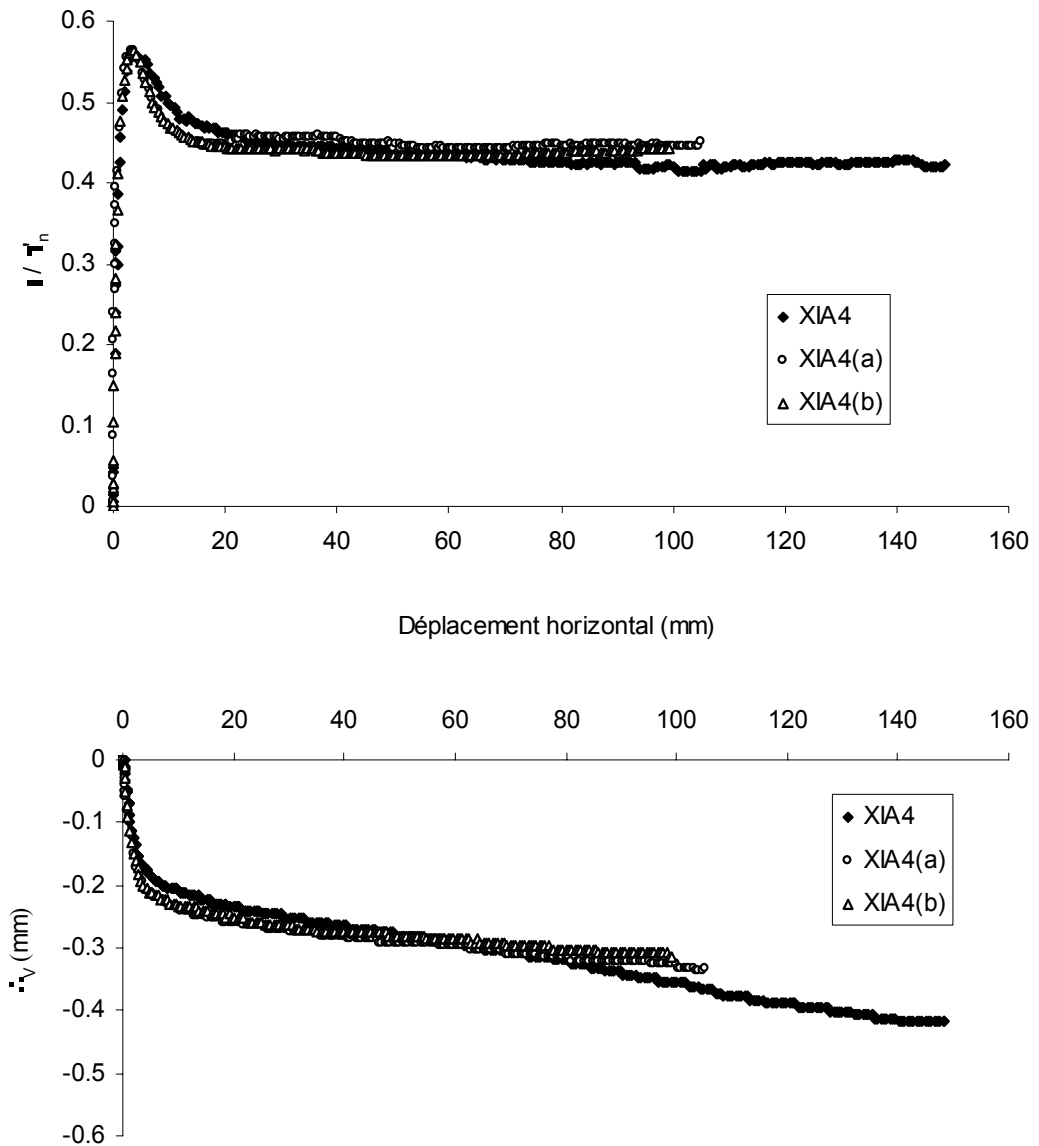
Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\phi_p'$ ou $\delta_p'$	$\Delta_p$	$\tau_r/\sigma_n'$	$\phi_r'$ ou $\delta_r'$	$\Delta_r$	$I_f$
		(degré)	(mm)		(degré)	(mm)	(%)
BIOCL	0,156	8,9	0,33	0,076	4,3	23	51,3
BIA4CL	0,166	9,4	0,25	0,073	4,2	97	56,0
BIA3CL	0,147	8,4	0,19	0,070	4,0	97	52,4
BIA2CL	0,138	7,9	0,19	0,069	3,9	100	50,0
BIA1CL	0,047	2,8	0,44	0,035	2,3	25	25,5

### 6.3 Répétitivité des essais

Pour cerner la répétitivité des essais réalisés, nous avons conduit quelques essais afin de vérifier la capacité de l'équipement d'essai à reproduire les résultats dans des conditions d'essais similaires et à mettre en évidence l'influence du facteur essai. Tout résultat de mesure comporte impérativement une indication d'erreurs. Les sources d'erreur et de variabilité dans les expérimentations en mécanique des sols étant relativement nombreuses et difficilement maîtrisables. On peut citer les facteurs suivants : préparation des échantillons, état initial, procédure d'essai, variabilité naturelle des sols naturelles, etc. Les échantillons n'étant pas le plus souvent identiques, ces différences sont susceptibles d'engendrer des erreurs supérieures aux erreurs de mesures. La dispersion même réduite des courbes expérimentales met en évidence une variabilité résiduelle des résultats que l'on ne peut comprimer ; une fois les paramètres de l'essai fixés. Cette dispersion peut être due à des facteurs d'influence cachés non maîtrisés lors de chaque essai.

Nous présentons sur la figure 6.2, à titre d'exemple, l'évolution du coefficient de frottement et de la déformation verticale en fonction de la déformation horizontale pour trois essais réalisés sur le limon de Xeuilley avec l'anneau d'acier le plus rugueux (XIA4, XIA4(a)

et XIA4(b)), durant la première phase de cisaillement lent. Les résultats obtenus concernant les valeurs du coefficient de frottement sont regroupés au Tableau 6. 13.



**Figure 6.2** Comparaison des courbes obtenues pour trois essais en cisaillement lent

Quand nous superposons les courbes des trois essais, nous constatons qu'elles ont toutes plus ou moins la même allure. Les valeurs de  $\tau_p / \sigma_n$  ont pratiquement la même valeur au début de l'essai, mais dans le domaine des grands déplacements, il y'a un petit décalage entre les trois courbes qui se traduit par une petite différence concernant les valeurs de  $\tau_p / \sigma_n$ . Il en est de même pour les courbes de  $\Delta_V$  qui semblent également coïncider entre elles, surtout pour des déplacements inférieurs à 60 mm. Au delà, l'essai XIA4 tend à donner des valeurs légèrement plus grandes. A titre d'exemple pour un déplacement horizontal de 100 mm, les valeurs de  $\Delta_V$  obtenues lors des essais XIA4, XIA4(a) et XIA4(b) sont égales respectivement

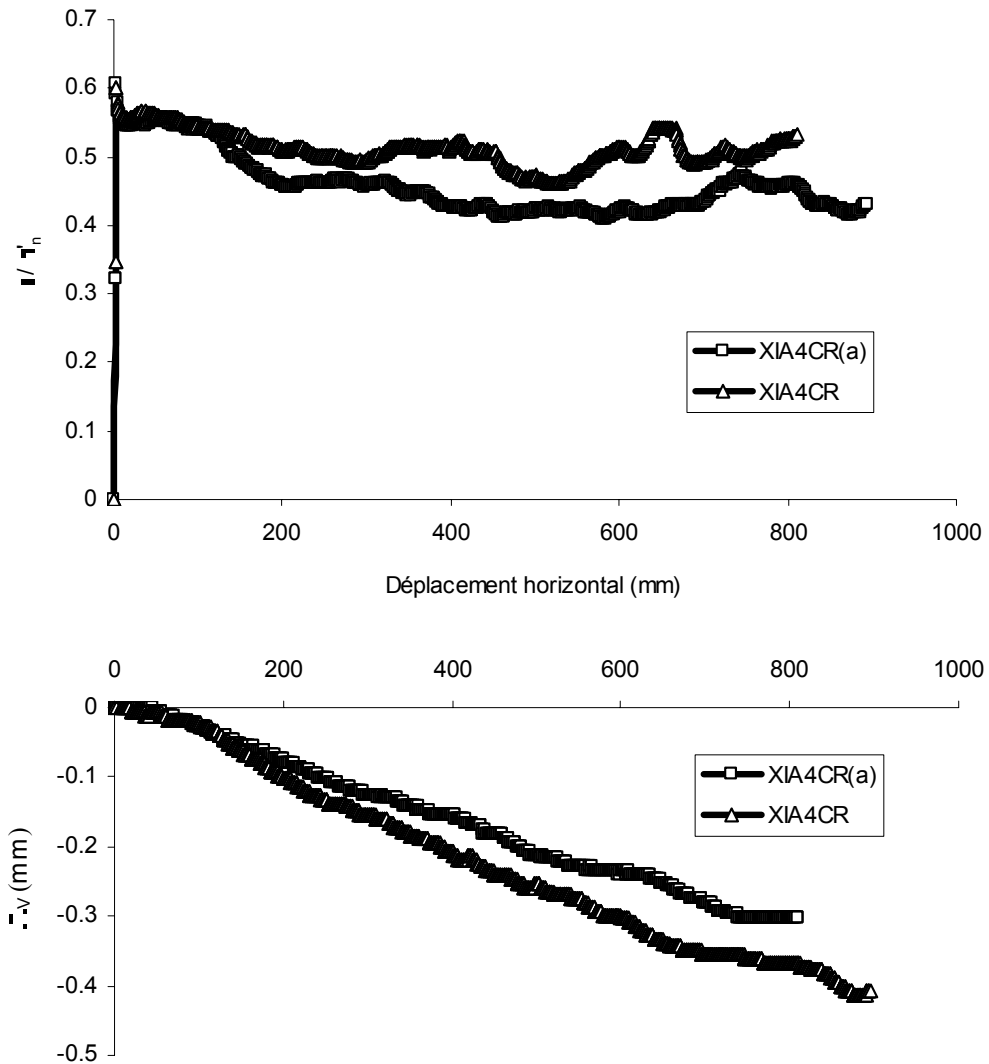
à 0,35 mm, 0,33 mm et 0,32 mm. Ceci traduit l'influence du facteur "essai" sur le résultat obtenu. Par conséquent on peut déduire que le comportement au cisaillement à l'interface sol cohérent-matériau solide est reproductible dans les mêmes conditions en utilisant l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead.

La figure 6.3 représente les courbes coefficient de frottement– déplacement horizontal et les courbes déformation verticale – déplacement horizontal obtenues lors de deux essais en phase de cisaillement rapide. Elle montre tout d'abord que le seuil de résistance est pratiquement identique (0,60 et 0,61) et que les deux courbes coïncident entre elles jusqu'à une distance de 150 mm. Au delà, il y'a un décalage entre les deux courbes et les allures des deux courbes sont alors quelques peu différentes. Pour des déformations supérieures à 200 mm, des valeurs moyennes de  $\tau/\sigma_n'$  de 0,44 et 0,50 ont été enregistrées. Il en est de même pour la variation du déplacement vertical ou des divergences apparaissent après 200 mm, bien que le modèle de variation est le même, avec une variation continue de l'épaisseur, due en grande partie à la perte d'échantillon. Ceci peut être attribué au fait que le comportement du sol est susceptible de varier d'un essai à un autre, bien que les conditions d'essai sont plus ou moins les mêmes, en raison des modifications de structures qui se produiraient au sein du sol suite au cisaillement rapide appliqué au sol. C'est le cas particulièrement des essais d'interface impliquant des interfaces rugueuses. Ces modifications représentent un facteur pour lequel on ne peut pas intervenir. De ce fait on peut juger que la répétitivité des essais en cisaillement rapide est considérée comme acceptable, mais à un degré moindre par rapport aux essais de cisaillement lents.

En conclusion, on peut dire que les calculs d'erreurs demandent, pour pouvoir évaluer la dispersion des mesures expérimentales, de reproduire un grand nombre de fois le même essai sur des échantillons identiques.

**Tableau 6. 13** Résumé des résultats obtenus pour trois essais

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\delta_p'$	$\tau_r/\sigma_n'$	$\delta_r'$	$I_f$
		(degré)		(degré)	
XIA4	0,557	29,1	0,422	22,9	24,2
XIA4(a)	0,562	29,3	0,445	24,0	20,8
XIA4(b)	0,562	29,3	0,435	23,5	22,6



**Figure 6. 3** Comparaison des résultats obtenus pour deux courbes en cisaillement rapide

#### 6.4 Conclusions

L'utilisation de l'appareil de cisaillement annulaire décrit dans le chapitre précédent a permis la caractérisation du comportement d'interface de sols cohérents, dans une gamme de valeurs de la rugosité arithmétique comprises entre 1,6  $\mu\text{m}$  et 40,2  $\mu\text{m}$ , pour deux matériaux solides : l'acier inoxydable et le béton. Les résultats présentés dans ce chapitre permettent donc de compléter la connaissance du comportement d'interface des sols cohérents, pour différentes conditions de cisaillement. La répétitivité des résultats d'essais effectués a été vérifiée et a été jugée satisfaisante, pour les essais à vitesse lente et l'est un peu moins dans le cas du cisaillement rapide principalement à cause de la difficulté d'avoir la même structure. Les résultats présentés dans ce chapitre seront interprétés plus en détail au chapitre 8.

## 7 ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE

---

### 7.1 Introduction

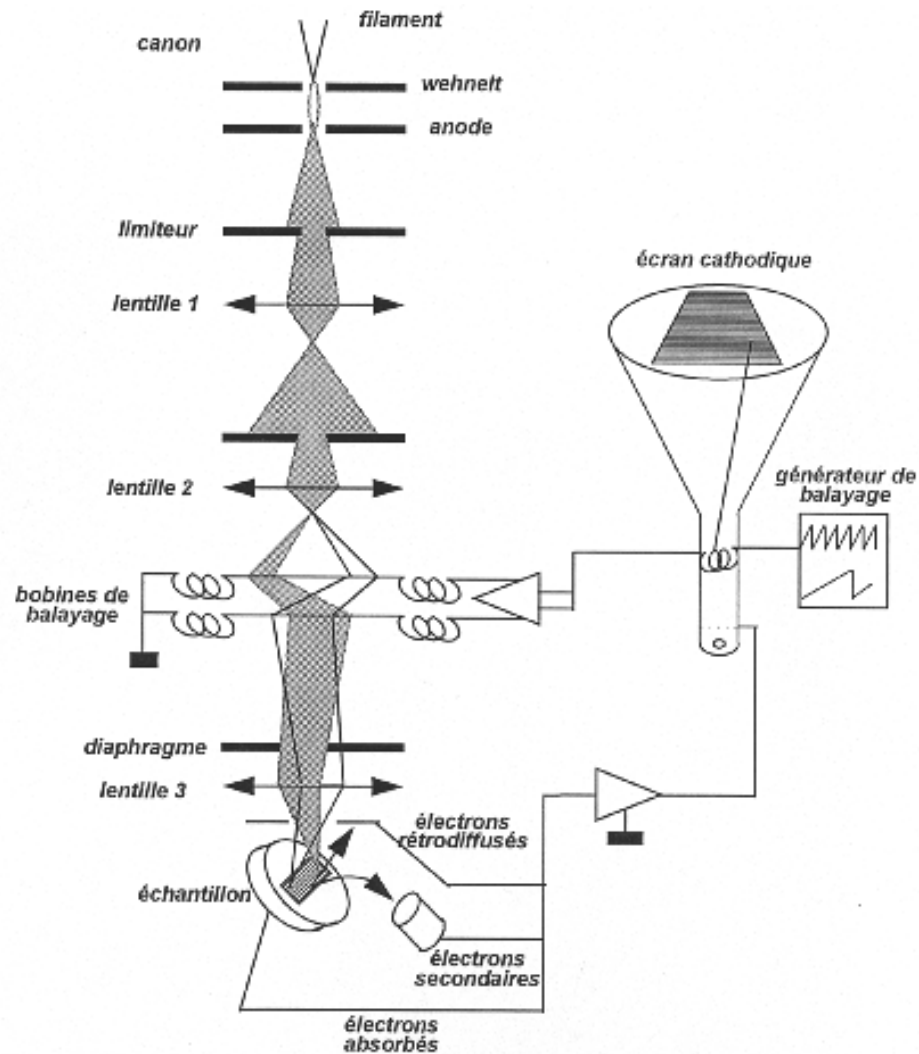
La microstructure d'un sol argileux représente l'arrangement géométrique des particules minérales, ceci inclus les espaces poreux qui peuvent être observés à l'échelle microscopique. Il est généralement admis que la microstructure des sols fins est l'un des plus importants facteurs régissant leurs comportements mécaniques. Pour être en mesure de comprendre la nature de la résistance et la réponse aux déformations, les particularités des éléments structuraux, leur distribution de volume et l'interaction entre eux doivent être élucidés. De ce fait, l'étude des changements micro-structuraux dans les sols permet d'acquérir un meilleur aperçu sur la nature des paramètres de résistance et de déformation et de cette manière expliquer un certain nombre d'irrégularités importantes de leur comportement dans les applications géotechniques.

Bien que les techniques développées en pédologie et en géologie de l'ingénieur pour l'étude de la microstructure des sols fins aient fait d'énormes progrès ces dernières années, il ne semble pas que leurs exploitation en géotechnique pour une meilleure compréhension du comportement mécanique des sols ait été suffisamment développée. Ceci vaut en particulier pour les sols ayant subis des déformations importantes lors de cisaillement. L'étude de la microstructure implique, cependant, des difficultés techniques. Elle nécessite des dispositions particulières à cause de la grande sensibilité des sols fins aux conditions externes c'est à dire les variations des conditions de contraintes d'un échantillon, de la température, humidité, etc (Gilot, 1976; Smart & Tovey, 1982).

Plusieurs méthodes sont utilisées actuellement pour l'étude de la microstructure des sols fins. Les plus connues sont la microscopie électronique à balayage (MEB), la microscopie électronique à transmission (MET), les rayons X et les méthodes magnétiques (Osipov, 1983). Les méthodes de microscopie électronique visent à réunir sur la matière solide des informations résultant de l'interaction d'un faisceau d'électrons monocinétique avec un volume microscopique d'un échantillon du matériau étudié. La méthode la plus prometteuse est sans conteste la méthode MEB qui est actuellement largement utilisé dans l'étude de la microstructure des sols fins.

L'analyse microscopique effectuée a pour objectif l'étude de l'effet de la variation de la rugosité de surface du matériau solide sur la résistance à l'interface sol – acier et la texture induite par le cisaillement, concernant les échantillons pré-cisailés.

## 7.2 Microscope électronique à balayage



**Figure 7.1** Principe de fonctionnement du microscope électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage est une enceinte sous vide secondaire, où un canon à électrons produit un faisceau électronique mis en forme par des lentilles électroniques pour exciter l'objet à étudier. Par un dispositif approprié, ce faisceau peut balayer selon deux directions la surface de l'échantillon. Le signal en chaque point de l'objet est détecté par un système approprié, puis est transmis à un écran vidéo dont le balayage est synchrone avec celui du faisceau. Les caractéristiques principales du microscope électronique à balayage sont : la capacité de réaliser des images à fort grossissement (de 20 à 100000X), une grande

résolution (jusqu'à 3nm) et une forte profondeur de champ qui permet de voir de grandes et de petites particules en même temps. De plus il est possible de coupler la microanalyse avec l'imagerie et la préparation des échantillons est relativement facile. Le principe du fonctionnement du microscope électronique est donné sur la figure 7.1. Le modèle utilisé dans cette étude est de marque Hitachi S-2500.

### **7.3 Définition de la texture d'un sol**

On s'est intéressé au développement du phénomène d'interaction sol-matériau solide au niveau microscopique. Cette interaction, dont on constate les effets macroscopiques, se développe en fait à l'échelle microscopique, et consiste en une réorganisation du squelette solide et du réseau poreux constituant la texture du sol. Pour analyser la microstructure du sol à la suite d'un cisaillement d'interface, on s'est attaché tout d'abord à définir la notion de texture d'un sol..

En géologie, la texture désigne la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein du matériau (Le Roux, 1976). L'étude systématique de matériaux argileux au M.E.B. a permis de cerner l'organisation des particules d'argile et de dégager certaines textures.

Le Roux (1976) distingue trois classes principales de textures, à partir d'observations sur les marnes ;

- la texture homogène où tous les minéraux sont intimement mélangés et où aucune direction n'est privilégiée,
- la texture orientée où une direction privilégiée apparaît dans l'arrangement des grains,
- la texture floconneuse ou en microagrégats où la phase argileuse se présente sous forme grossièrement sphérique, soit seule, soit associée aux carbonates.

### **7.4 Préparation des échantillons**

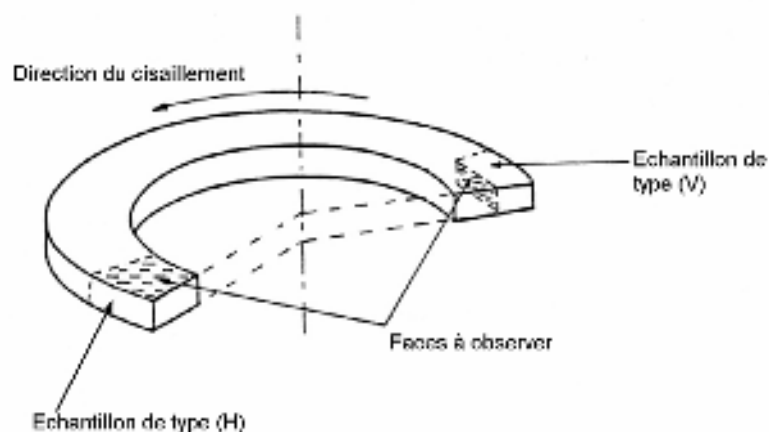
Pour l'examen au MEB, les formes des structures à étudier doivent être soit préservées soit au contraire mise en évidence par fracture. Les échantillons doivent être aussi représentatifs que possible et la préparation doit introduire le minimum de changement possible dans la structure pour que les informations recueillies aient un sens dans l'interprétation du comportement mécanique. Les échantillons destinés à l'observation ont été préparés suivant la procédure recommandée par Barden & Sides (1971) à l'exception de la technique du pelage, qui d'après Wolle (1974) est en mesure d'exposer la texture du sol au remaniement.

L'obtention d'échantillons représentatifs a été facilitée par le fait que l'appareil de Bromhead permet d'offrir une facilité à prélever des échantillons pour la microanalyse dans le microscope électronique à balayage.

Les échantillons ayant subis un cisaillement sol-sol ou un cisaillement sol-acier ont subis un cycle trois phases de cisaillement, c'est à dire un cisaillement initiale lent à 0,0356 mm/mn, puis un cisaillement rapide à 44,52 mm/mn et enfin un cisaillement lent à 0,0356 mm/mn. Donc à la fin de la troisième phase, le conteneur d'échantillon avec le sol pré-cisailé ayant atteint l'état résiduel est retiré de la machine. L'échantillon est observé visuellement pour éventuellement déceler la présence d'une surface de cisaillement. Cette dernière est quelque fois mise en évidence par décapage à l'eau c'est à dire au moyen de légers jets d'eau parallèles à la surface de l'échantillon, pour ne pas perturber ce dernier. On a adopté ici une procédure de déshydratation par séchage qui consiste à faire sécher l'échantillon à l'atmosphère ambiante. Contrairement aux autres sols, les échantillons de bentonite ont présenté une forte rétraction (environ 40%) et n'ont de ce fait pas été étudié. Quand l'échantillon est déshydraté, il est alors enlevé du conteneur. Des exemples d'échantillons obtenus dans le cas du limon de Xeuilley sont montrés dans la figure 7.2.



**Figure 7.2** Exemples d'échantillons de limon de Xeuilley obtenus



**Figure 7.3** Types d'échantillons à observer au microscope électronique à balayage

Deux types d'échantillons sont alors obtenus pour observation au MEB : des échantillons verticaux et horizontaux, identifiés par échantillons (V) et (H). Ils sont illustrés plus clairement dans la Figure 7.3. Les échantillons de type (V) représentent des sections verticales obtenues par fracture manuelle des échantillons dans un plan normal à la direction radiale, le long du rayon moyen. Les échantillons de type (H) sont utilisés pour observer les surfaces horizontales et sont obtenus sans fracture.

Les échantillons obtenus qui étaient inférieures à  $1 \text{ cm}^3$  de volume, ont été montés sur des supports portes-échantillons et solidement fixés grâce des plaques adhésives double face graphité, et une colle conductrice à l'argent pour assurer l'écoulement des charges. L'ensemble (sol, porte-échantillon) est ensuite mis sous vide pour désaérer pendant 24 heures. La surface doit être rendue conductrice par le dépôt d'une couche mince et régulière d'un matériau conducteur, d'épaisseur environ 20 nm (métallisation). Pour obtenir des images électroniques de hautes qualités on a procédé en deux temps. On a recouvert d'abord l'échantillon d'une couche de carbone qui mouille parfaitement le relief et établit une bonne conduction, puis d'une couche d'or-palladium. Ce dernier contrairement au carbone a un pouvoir mouillant faible et épouse difficilement les aspérités du relief.

Kanji & Wolle (1977) et Lupini (1980) ont utilisé une méthode similaire pour l'étude de la microstructure des sols soumis à des déformations de cisaillement importantes. Lupini trouve qu'elle est entièrement satisfaisante et simple.

Les échantillons métallisés sont par la suite placés dans la chambre du microscope et sont portés par une platine goniométrique de type eucentrique permettant les différents mouvements de translation, d'inclinaison et de rotation. Ils sont alors prêts pour être examinés. Des observations visuelles sont tout d'abord faites à de faibles grossissements, en général 20X à 40X, pour que la tendance générale de la texture puisse être identifiée. Les éléments présents que l'on désire analyser sont alors sélectionnés et observés avec des grossissements de plus en plus importants jusqu'à ce que la résolution se détériore (généralement pour des grossissements supérieurs à 2500X à 5000X). Quand il est jugé nécessaire des photos sont prises. Des photos pour différents grossissements sont souvent nécessaires. Cependant le rapport des grossissements entre deux photos successives ne devrait pas dépasser 4, dans le cas contraire l'identification de la partie couverte par le plus grand grossissement est alors assez délicate. Les photos prises sont également numérisées et stockées sur un micro-ordinateur relié au microscope.

## **7.5 Observations en microscope électronique à balayage**

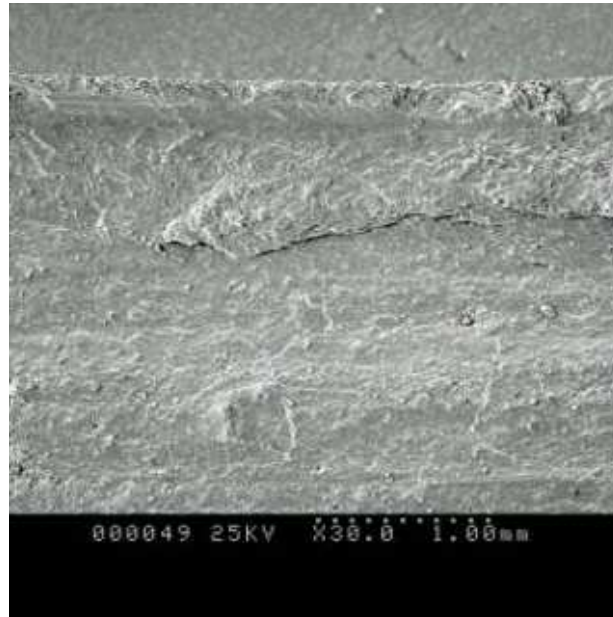
Les travaux réalisés sur la résistance au cisaillement résiduelle des sols ont entraîné un intérêt considérable sur la structure des plans de rupture qu'il est peut être plus approprié d'appeler zones de rupture. Lorsque la déformation est importante dans les sols cohérents avec une importante teneur en plaquettes argileuses, des surfaces de glissement planes se forment et divisent le sol en deux ou plusieurs parties qui peuvent glisser l'un par rapport à l'autre avec des contraintes de cisaillement relativement faibles. Un tel comportement ne se produit pas dans le cas des argiles avec une grande proportion de particules rondes, où le cisaillement s'effectue par translation et rotation des particules. L'objectif principal de notre étude est d'élucider comment les changements dans la rugosité de surface du matériau solide affectent la résistance à l'interface sol-matériau solide ainsi que la texture induite par le cisaillement. La principale difficulté expérimentale rencontrée dans l'étude de la microstructure concerne la collecte d'informations suffisantes pour s'assurer que le travail est approuvé du point de vue statistique. Ceci est en partie due au fait qu'il est difficile, même dans des études de laboratoire, d'obtenir des séries d'échantillons uniformes à analyser.

### **7.5.1 Observations effectuées sur le limon de Xeuilley**

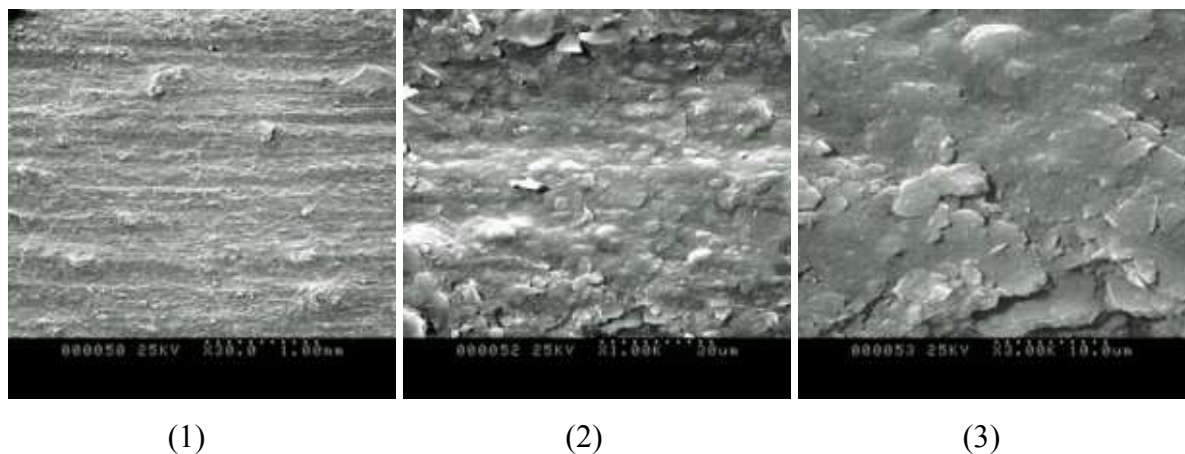
L'observation en microscopie électronique à balayage sur des échantillons déshydratés avec soin pour éviter les effets dus à la rétraction lors du séchage permet d'identifier les différences de microstructure entre les échantillons obtenus à partir des différents essais.

#### **7.5.1.1 Essai de cisaillement annulaire standard (XIOCL)**

Les observations visuelles des échantillons de limon de Xeuilley soumis au cisaillement dans l'appareil de cisaillement annulaire à la fin de la troisième phase de l'essai ont montré qu'une pellicule très fine de sol (quelques dizaines de microns) qui était en contact direct avec l'interface d'origine, s'est détachée facilement avec la plaque supérieure laissant apparaître une surface striée. La photo de la figure 7.4 montre une partie d'un échantillon de type (H) qui représente, dans la partie supérieure de la photo, la mince pellicule qui adhère toujours au reste de l'échantillon et au niveau de la partie inférieure la zone striée qui a pu être mise en évidence. Une surface striée est représentée plus clairement sur la photo 1 de la figure 7.5. Les photos 2 & 3 de la même figure montrent le détail d'une zone striée. On observe alors une surface ondulée avec un arrangement de plaquettes argileuses de kaolinite avec une association face-face, avec des orientations parallèles. Les particules de kaolinite ne sont visibles qu'en certains endroits et sont recouvertes d'une mince couche lisse de montmorillonite, probablement, dont les particules individuelles ne peuvent être distinguées.



**Figure 7.4** Aspect général d'une surface de cisaillement (Essai XIOCL ; Echantillon de type H – 30X)



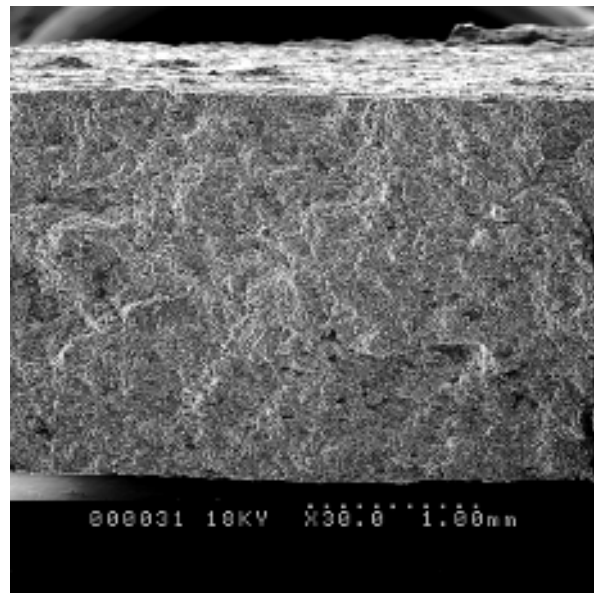
(1)

(2)

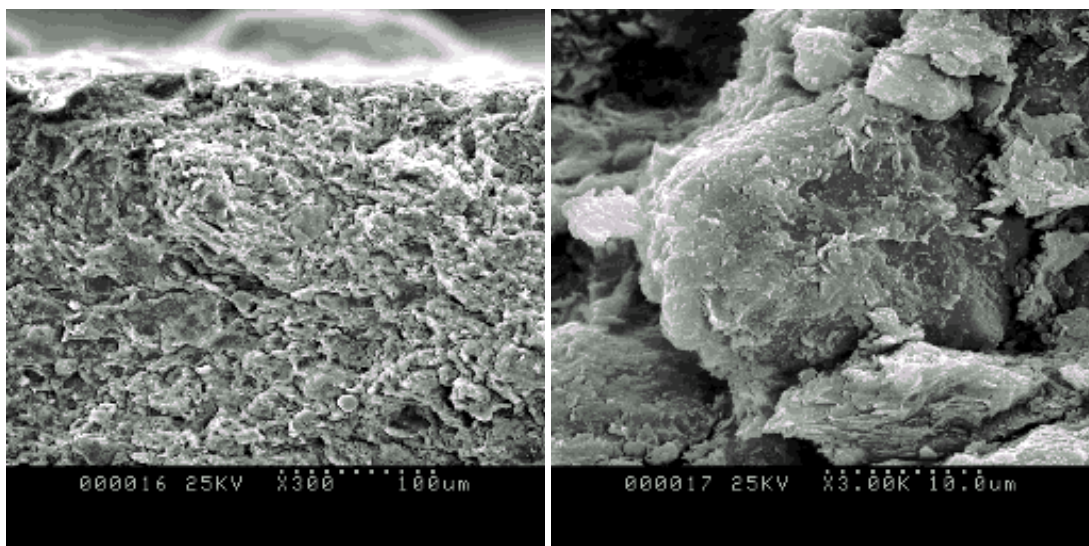
(3)

**Figure 7.5** Détails de la surface de cisaillement (Essai XIOCL ; Echantillon H – (1) 30X, (2) 1000X, (3) 3000X)

La figure 7.6 montre une vue d'un échantillon de type (V) représentant toute l'épaisseur de l'échantillon obtenu à la fin de l'essai et montre l'aspect générale. Deux échantillons de type (V) observés à des grossissements de 300X et 3000X, respectivement en haut (Figure 7.7) et au milieu (Figure 7.8) ne semblent indiquer aucune orientation préférentielle et la texture est homogène et quelque peu aléatoire. Ce qui semble indiquer que le cisaillement est localisé au niveau d'une surface et qu'il n'y a pratiquement pas de zone de cisaillement.



**Figure 7.6** Section à travers X représentant l'aspect général de toute l'épaisseur de l'échantillon (Essai XIOCL ; Echantillon V – 30X)

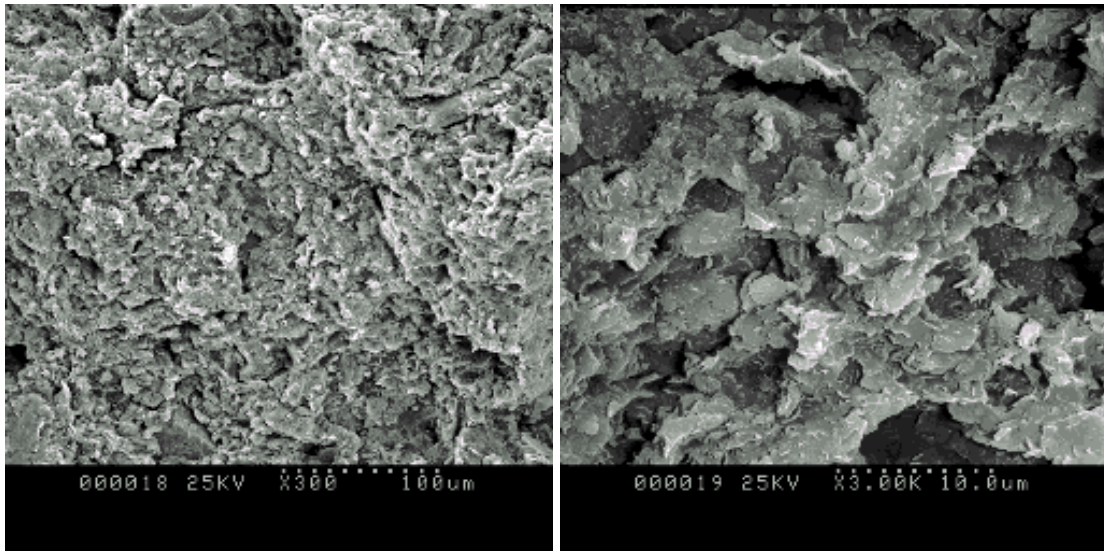


(1)

(2)

**Figure 7.7** Détails au sommet de l'échantillon (Essai XIOCL ; Echantillons V – (1) 300X, (2) 3000X)

On notera que le limon de Xeulley étudié possède un faible pourcentage d'argile (22%) et en tant que tel les particules de sable fin et de limon sont considérées comme former le squelette granulaire dont les pores sont remplis de particules d'argile. Concernant l'interaction des grains de sable et de limon, l'étude a montré que les plus gros grains sont régulièrement distribués dans la matrice argileuse et en général n'ont pu être observé en contact entre eux. Quand ils ont été observés, ils étaient enrobés dans des particules d'argile, comme on peut le constater dans la figure 7.7(2).



(1)

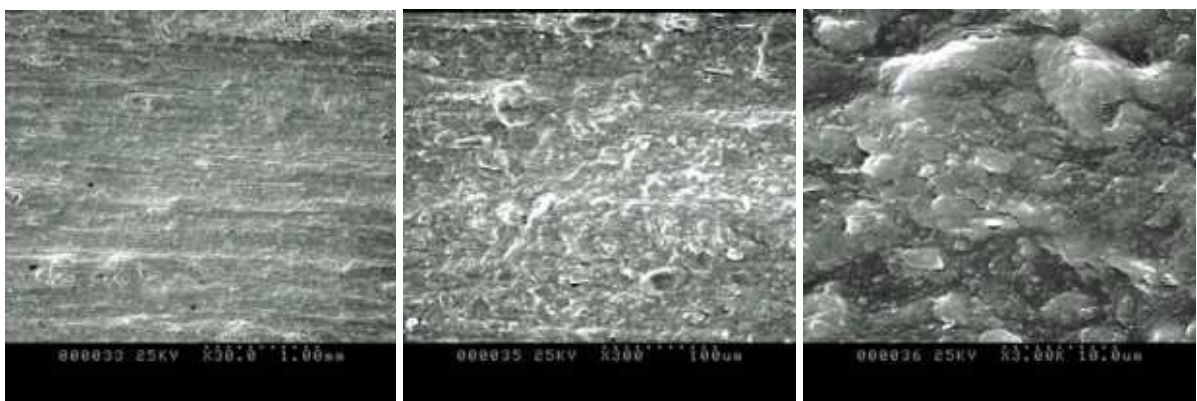
(2)

**Figure 7.8** Détails à la base de l'échantillon (Essai XIOCL ; Echantillons V – (1) 300X, (2) 3000X)

#### 7.5.1.2 Essais de cisaillement d'interface

##### - Interface d'acier IA4 (Essai XIA4CL)

La figure 7.9 représente l'aspect général d'une surface de cisaillement à un grandissement de 30X (Photo 1) ainsi que des détails à 300X et 3000X. Il est clair que cette surface est similaire à celle observée précédemment dans le cas de l'essai de cisaillement annulaire standard (XIOCL).

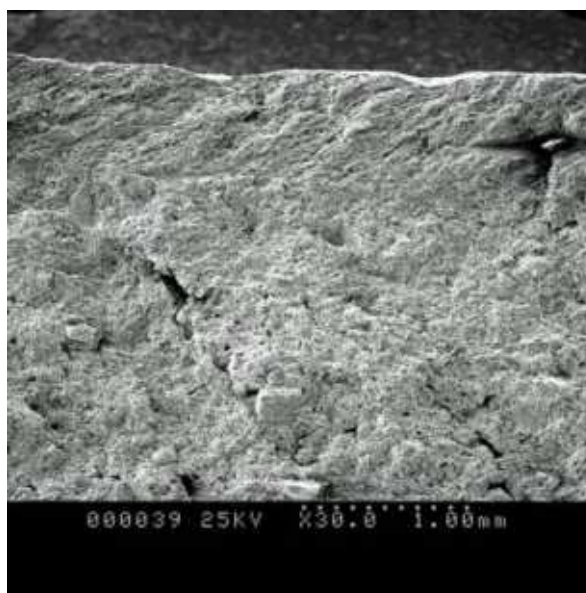


(1)

(2)

(3)

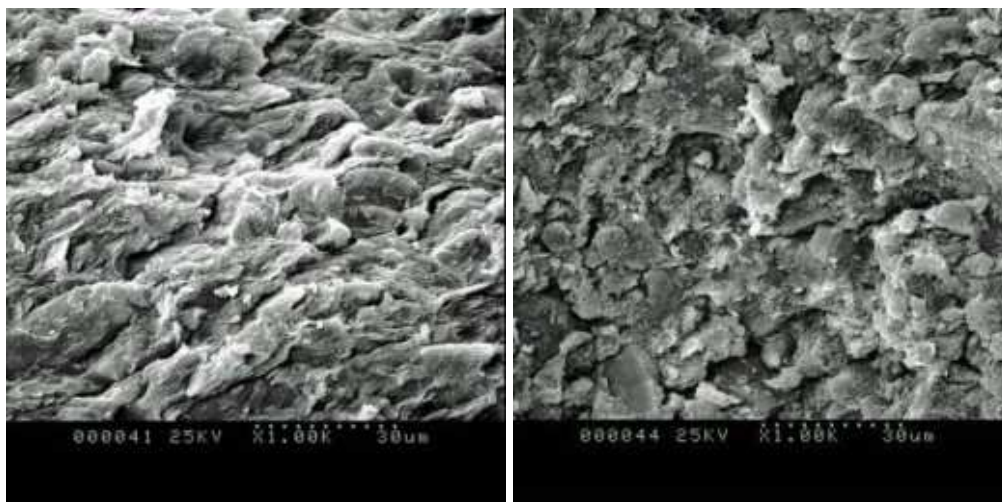
**Figure 7.9** Surface de cisaillement (Essai XIA4CL ; Echantillon H – (1) 30X, (2) 1000X, (3) 3000X)



**Figure 7.10** Section à travers X représentant l’aspect général de toute l’épaisseur de l’échantillon (Essai XIA4CL ; Echantillon V – 30X)

La photo de la figure 7.10, à faible grandissement (30X), montre une section obtenue à partir d’un échantillon sur lequel a été conduit un essai de cisaillement annulaire sur un plan normal à la direction radiale, au niveau du rayon moyen (échantillon de type (V)). Elle représente l’aspect général de toute l’épaisseur de l’échantillon pré-cisailé (environ 2,7 mm). Le cisaillement a lieu au niveau de la partie supérieure. On distingue une nette différence entre l’aspect du sol adjacent au plan de mouvement relatif sur une hauteur de 0,7 mm, soit environ 26% de l’épaisseur totale, et le reste de l’échantillon qui s’étend sur 2 mm (74%). Dans la première zone, il semble qu’il y’a distorsion de la zone de cisaillement où la texture est alignée de façon homogène selon une orientation synthétique au sens du cisaillement, inclinée de  $28^\circ$  par rapport à l’horizontal. Dans cette zone davantage de particules dans l’échantillon (non limitées aux particules proches de la surface de l’interface) ont tendance à être impliquées dans le processus de cisaillement. Ceci est confirmé par les figures 7.11 et 7.12 qui montrent des détails en haut et au milieu de l’échantillon, à deux grandissements différents (1000X et 3000X). Ils transmettent une appréciation qualitative de la distribution du degré d’orientation des particules à travers la hauteur de l’échantillon. Les photos 7.11(1) et 7.12(1) montrent une zone de cisaillement orientée alors qu’au niveau de la base de l’échantillon, les photos 7.11(2) et 7.12(2) montrent une zone quelque peu homogène sans direction privilégiée. Cette variation indique clairement que l’orientation des particules a lieu exceptionnellement dans des endroits limités. En effet, seule la structure argileuse près de l’interface sol-acier semble affectée par le cisaillement et révèle par conséquent une distorsion systématique de la matrice argileuse plutôt que l’arrangement aléatoire qui découle du terme “

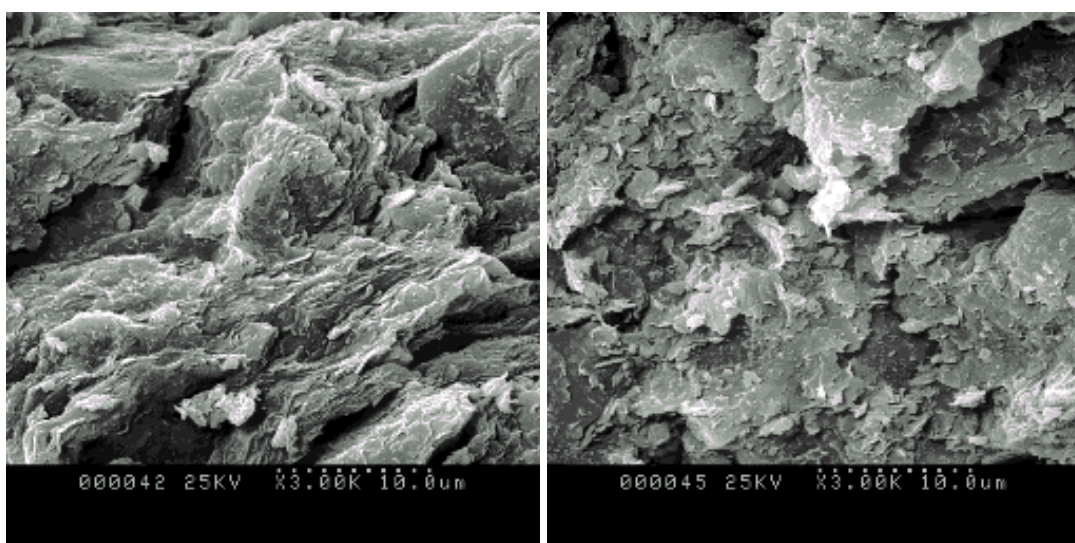
remaniement ”. Ce qui confirme le fait que la zone de cisaillement a une épaisseur limitée pour les essais de cisaillement d’interface en laboratoire (Yoshimi & Kishida, 1982). D’autre part, le degré d’alignement dans la surface et la zone de cisaillement dépend du mode de cisaillement résiduel, qui est lui même fonction de la proportion relative des plaquettes argileuses par rapport aux particules massives rondes (Lupini et al, 1981). On remarque aussi que les grains de limon ne sont pas apparent, on les devine derrière un voileage de plaquettes argileuses. Bien que la fraction argileuse représente une proportion de 22% en masse seulement, elle est extrêmement présente en terme de volume, puisqu’elle est en quantité suffisante pour constituer une matrice qui enrobe complètement les grains de limon.



(1)

(2)

**Figure 7.11** Détails au sommet de l’échantillon (1) et à la base (2) (Essai XIA4CL ; Echantillons V – (1) 1000X, (2) 1000X)

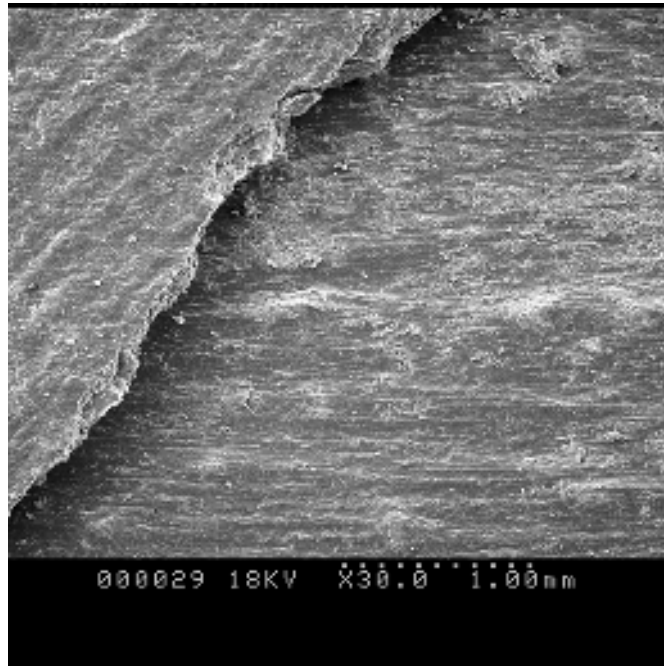


(1)

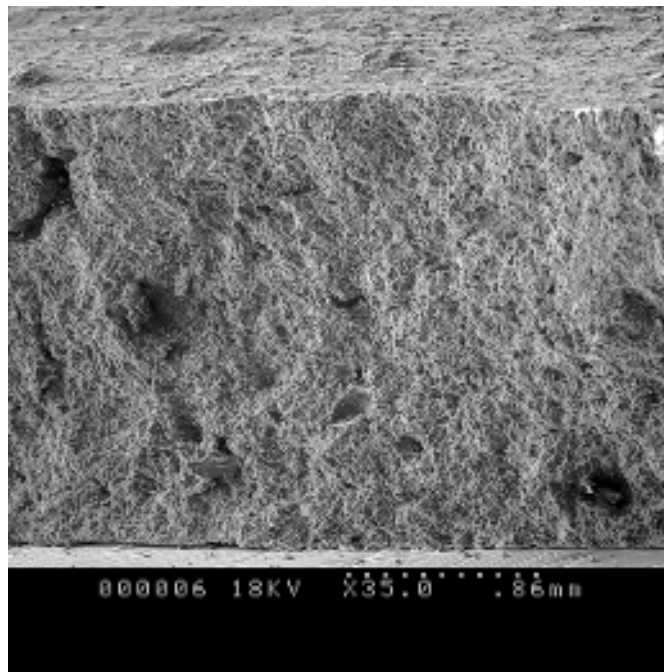
(2)

**Figure 7.12** Détails au sommet de l’échantillon (1) et à la base (2) (Essai XIA4CL ; Echantillons V – (1) 3000X, (2) 3000X)

**- Interface d'acier IA3 (Essai XIA3CL)**



**Figure 7.13** Surface de cisaillement au sein du sol (Essai XIA3CL ; Echantillon H – 30X)

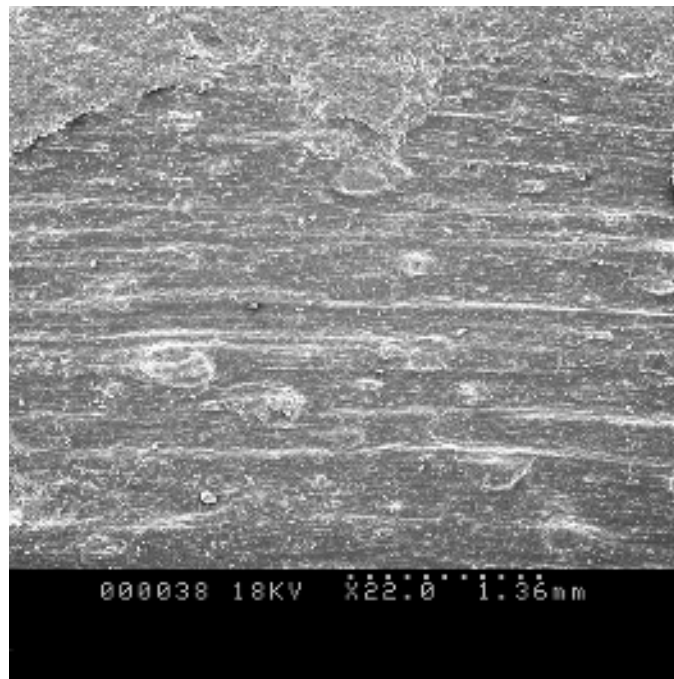


**Figure 7.14** Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai XIA3CL ; Echantillon V – 35X)

Les échantillons observés dans le cas d'un cisaillement à l'interface sol-acier de type IA3 ont montré des caractéristiques semblables à ceux observées dans le cas de l'essai XIA4CL. On présente dans la figure 7.13, une intéressante photo montrant que le cisaillement

a provoqué le développement d'une mince surface de glissement au sein du sol. Cette surface de rupture semble diviser le sol en deux parties qui peuvent glisser l'une par rapport à l'autre. Comme on peut le voir, le côté gauche montre le sommet de l'échantillon, qui était en contact direct avec l'anneau d'acier, avec les empreintes dues au modèle de texture de l'interface (moletage). Sur le côté droit de la figure, on voit une surface striée dans la direction de cisaillement. Au dessous de cette surface, on a pu obtenir une section transversale complète de l'épaisseur de l'échantillon (Figure 7.14). La structure dans la zone supérieure qui s'étend sur environ 0,7 mm (environ le tiers de l'épaisseur) semble montrer, cependant, un faible degré d'orientation des particules dans la direction du mouvement avec un angle correspondant de 60° par rapport à la direction de cisaillement.

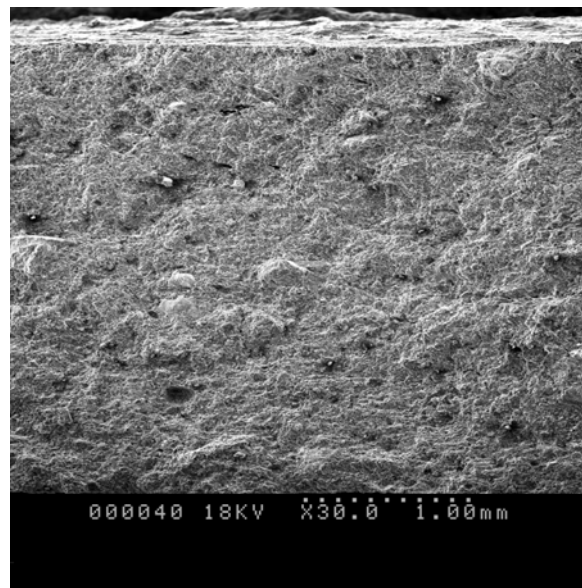
#### - Interface d'acier IA2 (Essai XIA2CL)



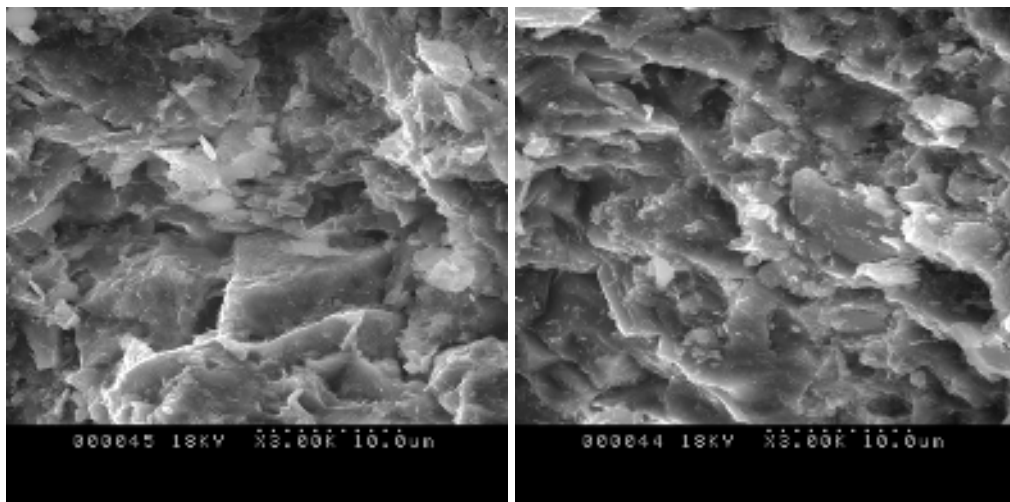
**Figure 7.15** Surface de cisaillement à l'interface sol-acier (Essai XIA2CL ; Echantillon H – 22X)

L'inspection visuelle effectuée à la fin de l'essai a montré que deux types de cisaillement ont probablement eu lieu simultanément au niveau de l'interface, soit un cisaillement sol-sol dans certains endroits et un cisaillement sol-acier dans d'autres. Contrairement aux essais d'interface conduits avec les interfaces d'aciers rugueuses (IA4 et IA3), une zone de cisaillement n'a pu être mise en évidence et la déformation semble localisée au niveau d'un plan de cisaillement à l'interface sol-acier, comme le montre les figures 7.15 et 7.16. La première photo prise à un grandissement de 22X montre une mince

surface de cisaillement horizontale superficielle et fortement striée située pratiquement au niveau de l'interface. On peut également identifier des minéraux massifs débordant à travers une mince surface de cisaillement. Ainsi, la formation d'une surface de glissement à l'interface est interrompue par les minéraux massifs d'une manière semblable à celle qui se produirait dans le cas d'un cisaillement sol-sol. La deuxième photo à un grossissement de 30X montre un aspect général dans lequel on n'identifie pas une zone de cisaillement, avec une texture plus ou moins homogène à travers l'épaisseur de l'échantillon, comme illustré sur la figure 7.17 qui illustrent les textures correspondant au sommet et le milieu de l'échantillon.



**Figure 7.16** Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai XIA2CL ; Echantillon V – 30X)



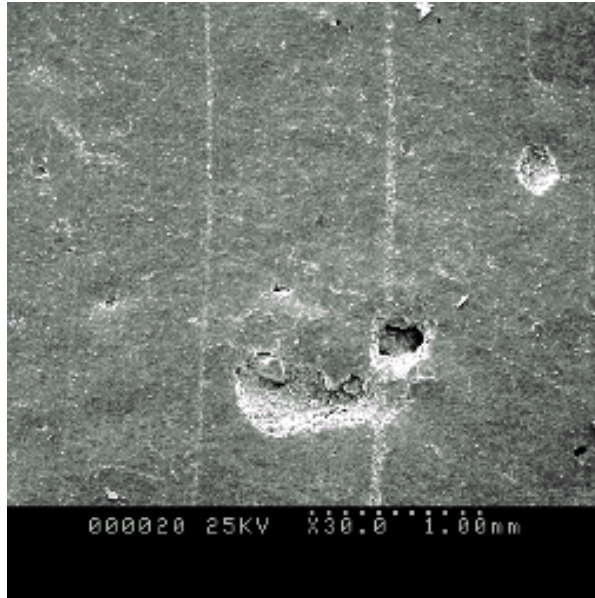
(1)

(2)

**Figure 7.17** Texture au sommet de l'échantillon (1) et au milieu (2) (Essai XIA2CL ; Echantillons V – (1) 3000X, (2) 3000X)

### - Interface d'acier IA1 (Essai XIA1CL)

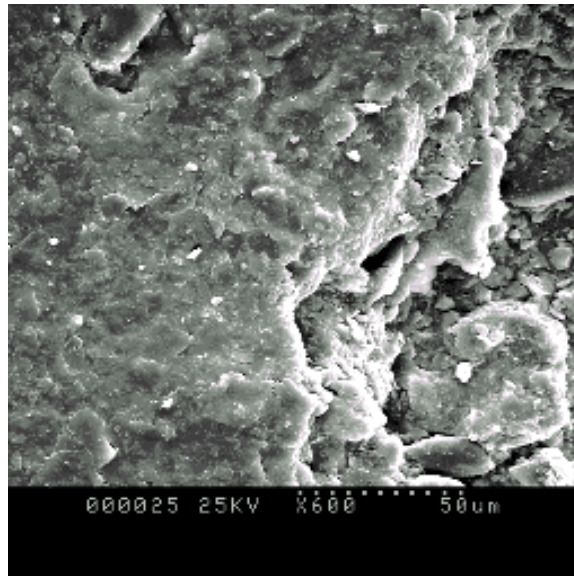
L'inspection visuelle de l'échantillon, obtenue à la suite de l'essai de cisaillement d'interface en utilisant une interface d'acier parfaitement lisse, montre une surface très polie et lisse, indiquant que le cisaillement a lieu à l'interface entre le sol et l'acier.



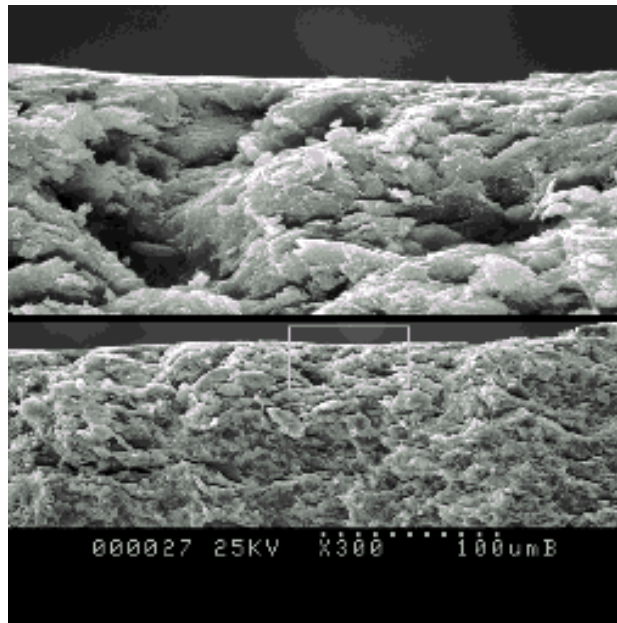
**Figure 7.18** Surface de glissement (Essai XIA1CL ; Echantillon H – 30X)

La photo de la figure 7.18 montre une surface de glissement. On remarque qu'on est en présence d'une surface plane, sans relief, avec des cavités dues à des particules limoneuses qui se sont détachées lors du démantèlement de la plaque de chargement. Ces cavités ont été exploitées afin d'explorer l'échantillon en profondeur pour examiner la différence de texture entre la surface de glissement et celle adjacente à celle-ci. La figure 7.19 représente une photo englobant les deux surfaces citées précédemment. Dans la partie gauche les plaquettes argileuses ont une orientation préférentielle parallèle et à droite l'arrangement des particules est aléatoire.

Les photos de la figure 7.20 montrent le sommet de l'échantillon. La photo inférieure (à un grandissement de 300X) montre tout d'abord une zone d'environ 40 $\mu$ m dans laquelle les particules argileuses ont une orientation plus ou moins onduleuse. Au dessous il ne semble pas y avoir une orientation particulière. On ne distingue pas les particules limoneuses et l'ensemble présente un aspect général voilé par un tapissage omniprésent de plaquettes argileuses.



**Figure 7.19** Surface de glissement et cavité (Essai XIA1CL ; Echantillon H 600X)



**Figure 7.20** Section à travers une surface de glissement (XIA1CL ; Echantillon V - Photo inférieure 300X ; Photo supérieure 1800X)

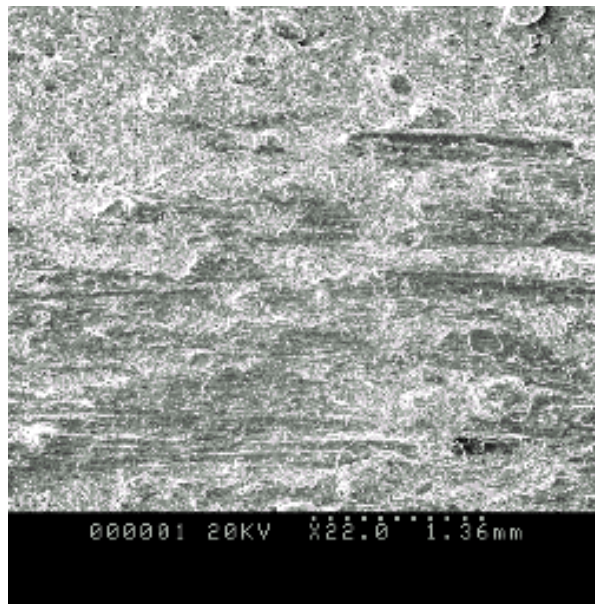
### 7.5.2 Observations effectuées sur le mélange limon de Xeuilley-kaolin

Comme on va le voir dans ce qui suit, en général, les caractéristiques mises en évidence pour le limon de Xeuilley sont également observées dans le cas du mélange limon de Xeuilley-kaolin, que se soit pour un cisaillement sol-sol ou un cisaillement d'interface.

#### 7.5.2.1 Essai de cisaillement annulaire standard (XKIOCL)

Sur la photo à faible grossissement (22X) de la figure 7.21, qui représente un échantillon de type (H) à partir du mélange 75% de limon de Xeuilley et 25% de kaolin

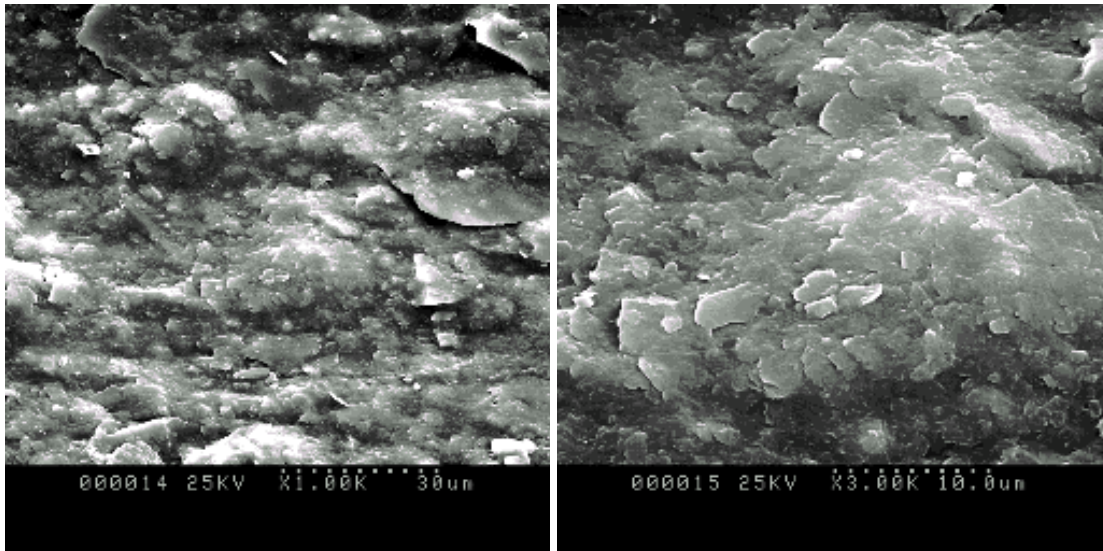
(échantillon XK), on observe un aspect général d'une surface striée. On remarque que dans certains endroits les striations ont été empêchées de se former en raison de la présence de poches de minéraux massifs. La figure 7.22 montre un détail d'une telle zone qui illustre le phénomène de rotation des grains. Les photos (1) et (2) de la figure 7.23 montrent encore une fois à l'instar du limon de Xeuilley qu'on est en présence d'une surface onduleuse avec une intense orientation de plaquettes argileuses.



**Figure 7.21** Aspect général d'une surface striée (Essai XKIO ; Echantillon H – 22X)



**Figure 7.22** Photo montrant le phénomène de rotation des grains (Essai XKIO ; Echantillon H – 1500X)

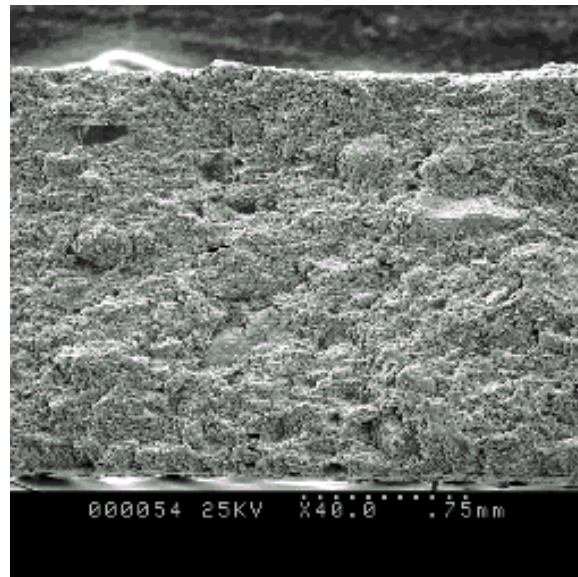


(1)

(2)

**Figure 7.23** (1) Détail d'une zone striée ; (2) Arrangement des plaquettes d'argile (Essai XKIO ; Echantillon H – (1) 1000X, (2) 3000X)

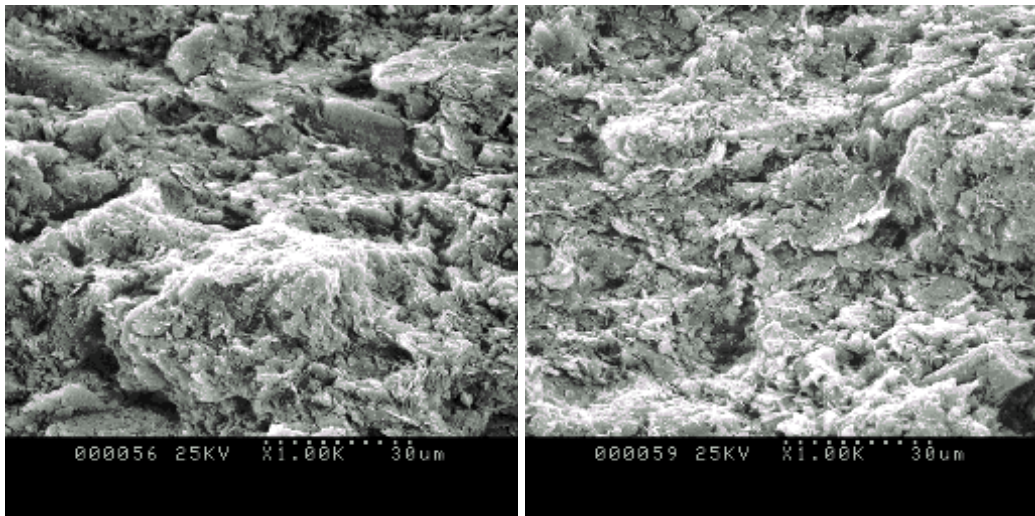
L'échantillon de type (V) observé à un grossissement de 40X (Figure 7.24) montre l'épaisseur complète de l'échantillon qui a une hauteur de 2,5 mm approximativement. Il a révélé deux zones d'aspect différent. La texture finale de la première zone qui est adjacente au plan de cisaillement et qui s'étend sur environ un tiers de l'épaisseur, semble plus serrée que la deuxième, qui est plus ou moins lâche.



**Figure 7.24** Aspect général d'une section verticale à travers XK (Essai XKIOCL ; Echantillon V – 40X)

Des détails obtenus à partir de ces deux zones, à partir d'une observation plus fine (Photos 1 & 2 de la Figure 7.25) montre cependant que la texture est plus ou moins semblable. On n'identifie plus clairement les particules silteuses de quelques dizaines de

microns de diamètre et l'ensemble présente un aspect général voilé par un tapissage omniprésent de plaquettes argileuses.



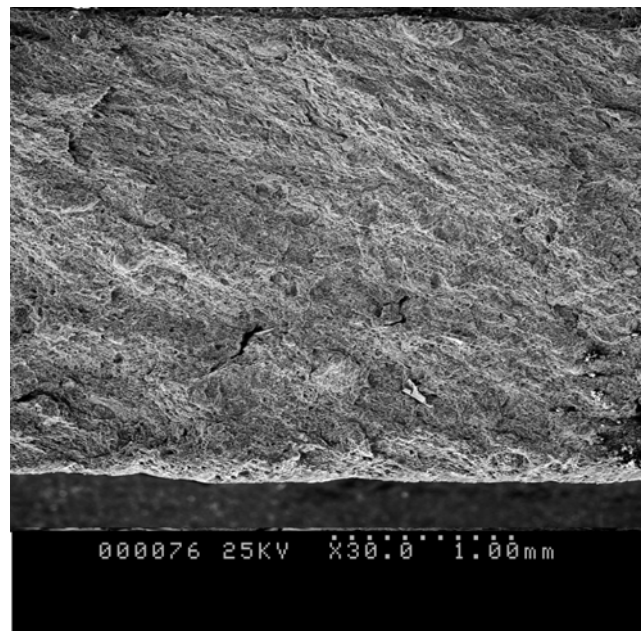
(1)

(2)

**Figure 7.25** (1) Texture du sol adjacent à la surface de rupture ; (2) Texture du sol situé dans la partie inférieure de l'échantillon (Essai XKIOCL ; Echantillon V – (1) 1000X, (2) 1000X)

#### 7.5.2.2 Essais de cisaillement d'interface

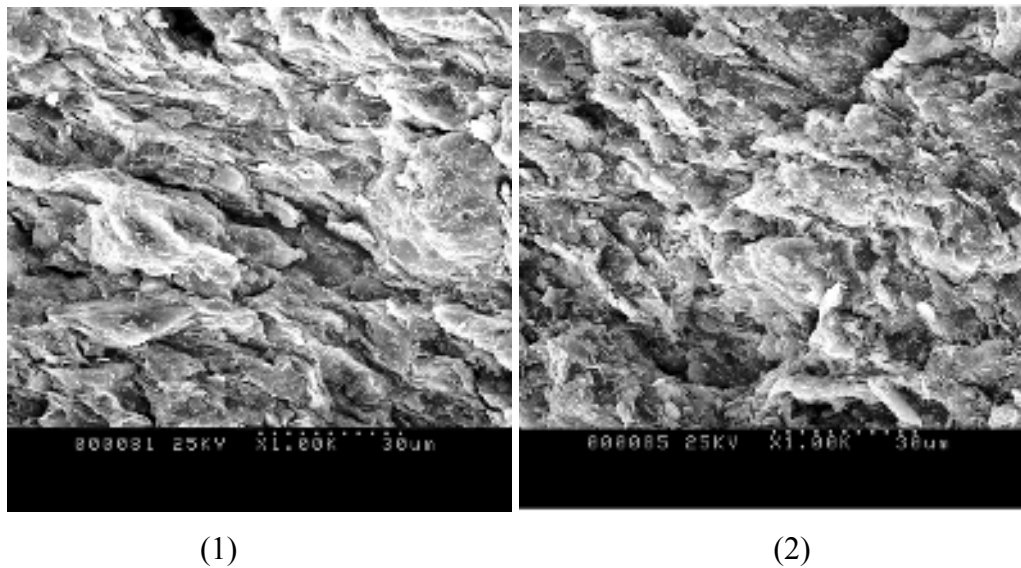
##### - Interface d'acier IA4 (XKIA4CL)



**Figure 7.26** Aspect général d'une section verticale à travers XK (Essai XKIA4CL ; Echantillon V – 30X)

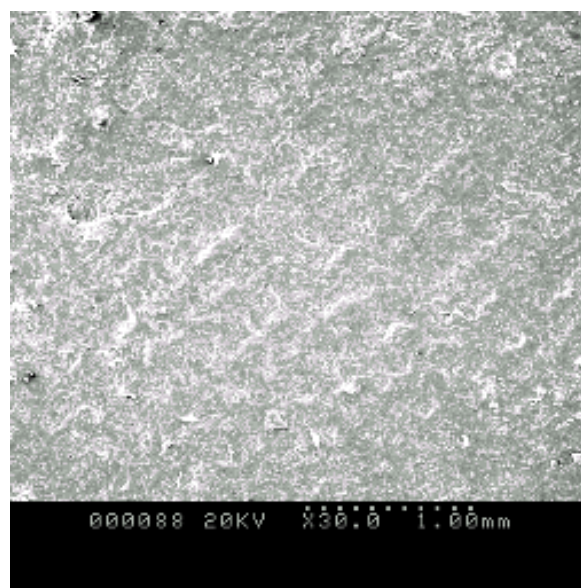
La photo de la Figure 7.26 représente l'aspect général d'un échantillon de type (V) sur toute son épaisseur (environ 2,6 mm). On peut identifier deux zones distinctes :

- une zone de cisaillement intense affectée par le cisaillement, d'environ 0,9 mm de hauteur (soit une hauteur équivalente à environ le tiers de l'épaisseur), dans laquelle on distingue un alignement homogène de la matrice argileuse suivant une orientation synthétique au sens du cisaillement, faisant un angle d'environ 30° dont la photo 1 de la figure 7.27 représente un détail, à un grossissement de 1000X ;
- une zone d'orientation plus ou moins aléatoire, d'environ 1,7 mm (environ deux tiers de l'épaisseur), qui ne semble pas être affectée par le cisaillement. Le détail d'une telle zone est montré dans la photo 2 de la figure 7.27.

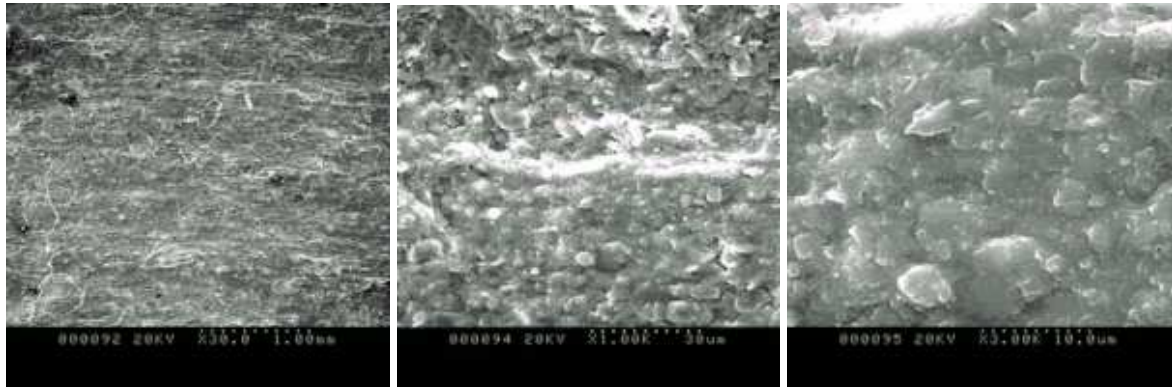


**Figure 7.27** Détails au sommet de l'échantillon (1) et à la base (2) (Essai XKIA4CL ; Echantillons V – (1) 1000X, (2) 1000X)

**- Interface d'acier IA3 (XKIA3CL)**



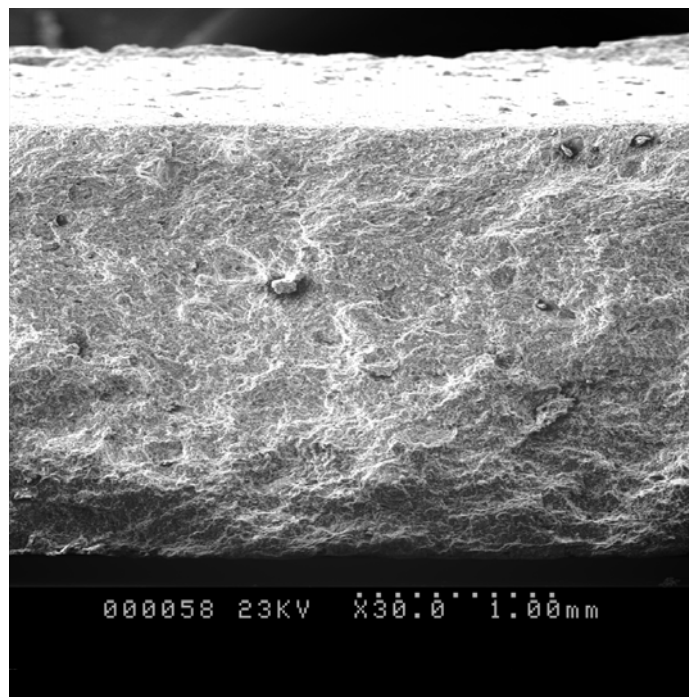
**Figure 7.28** Empreintes dues aux aspérités de l'anneau d'acier



(1) (2) (3)

**Figure 7.29** Surface de cisaillement (Essai XKI3CL ; Echantillon H – (1) 30X, (2) 1000X, (3) 3000X)

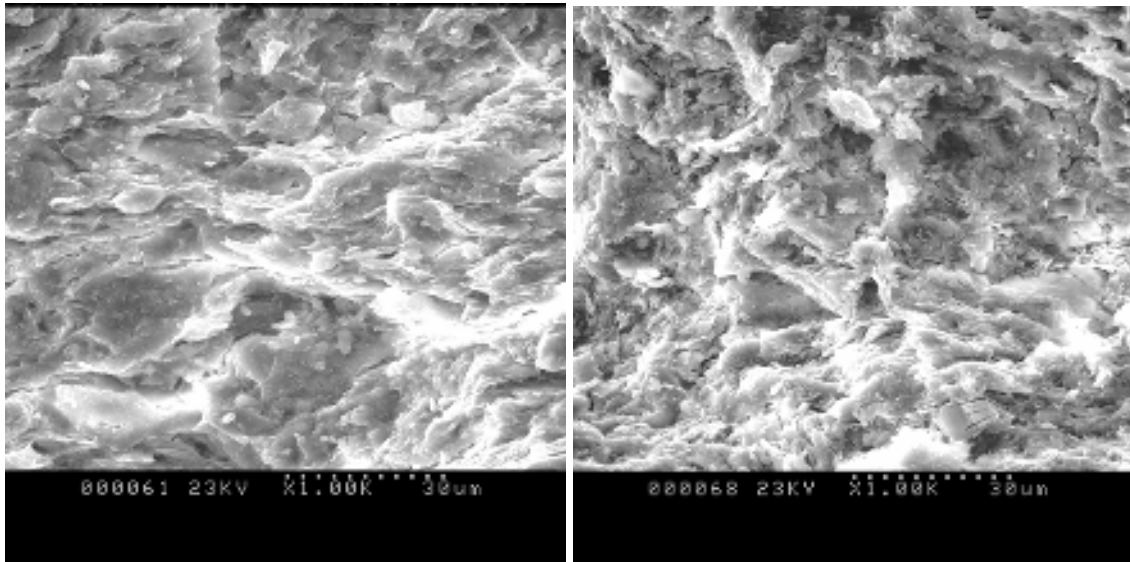
La figure 7.28 représente un échantillon de type (H) avec les empreintes des aspérités de l'interface. Au dessous de cette surface on a pu confirmer encore une fois l'existence d'une surface striée avec des ondulations (Figure 7.29), avec les photos 1 et 2 montrant l'aspect général à deux différents grossissements et la photo 3 montrant le détail de l'arrangement des particules.



**Figure 7.30** Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai XKIA2CL ; Echantillon V – 30X)

La figure 7.30 montre la section transversale de l'échantillon avec une orientation partielle de la texture suivant un angle d'environ 30° par rapport à l'horizontal, sur une

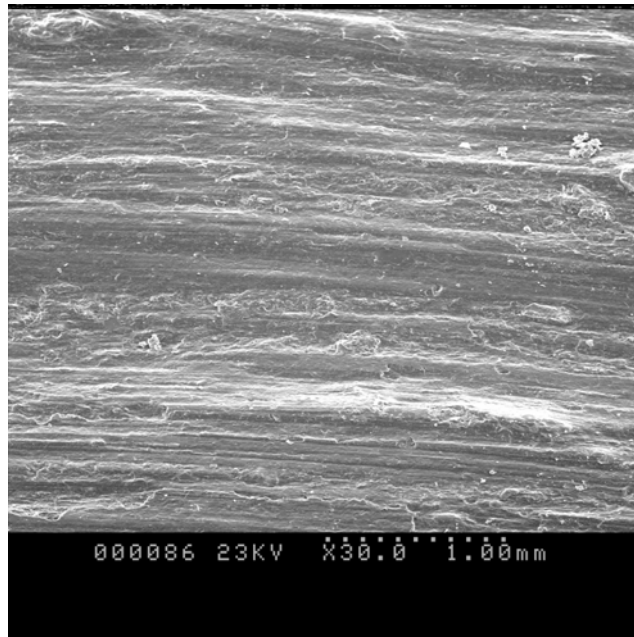
hauteur dépassant le quart de l'épaisseur de l'échantillon approximativement (soit environ 0,6 mm). En dehors de cette zone qui est plus dense et qui correspond en fait à la zone de cisaillement, la texture ne semble pas avoir une orientation préférentielle, particulièrement à la base où elle ne semble nullement avoir été affectée. Les photos de la figure 7.31 montrent la différence entre les textures dans les zones citées ci-dessus, au même grandissement (1000X).



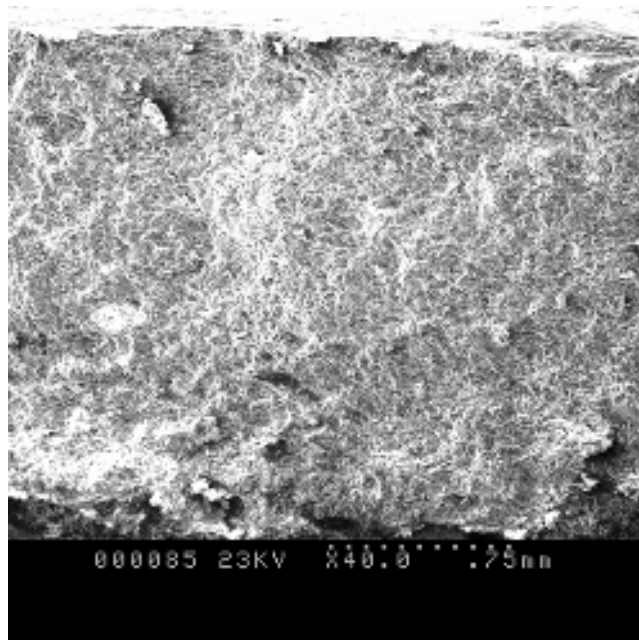
**Figure 7.31** Détails au sommet de l'échantillon (1) et à la base (2) (Essai XKIA3CL ; Echantillons V – (1) 1000X, (2) 1000X)

#### **- Interface d'acier IA2 (XKIA2CL)**

On a obtenu à la fin de cet essai une surface de cisaillement avec de fortes striations dues aux aspérités de la surface d'acier, comparées aux striations légères et lisses observées dans les essais sol-sol et sol-interfaces rugueuses (IA3 et IA4), comme le montre la figure 7.32. Cependant cette surface a un aspect différent de celle issue de l'essai XIA2CL et ne semble pas présenter des minéraux massifs débordant. D'autre part la section transversale à travers une telle surface (Figure 7.33) indique l'inexistence d'une zone de cisaillement et le cisaillement semble confiné à une mince surface.



**Figure 7.32** Aspect d'une surface intensivement striée (Essai XKIA2CL ; Echantillons H – 30X)

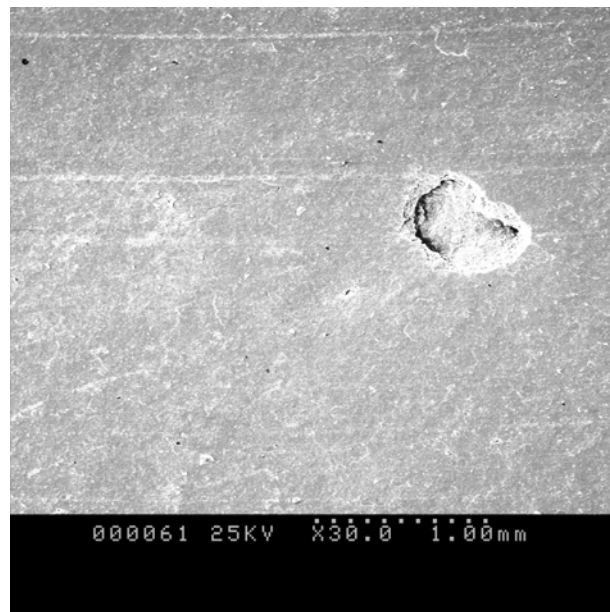


**Figure 7.33** Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai XKIA2CL ; Echantillon V – 40X)

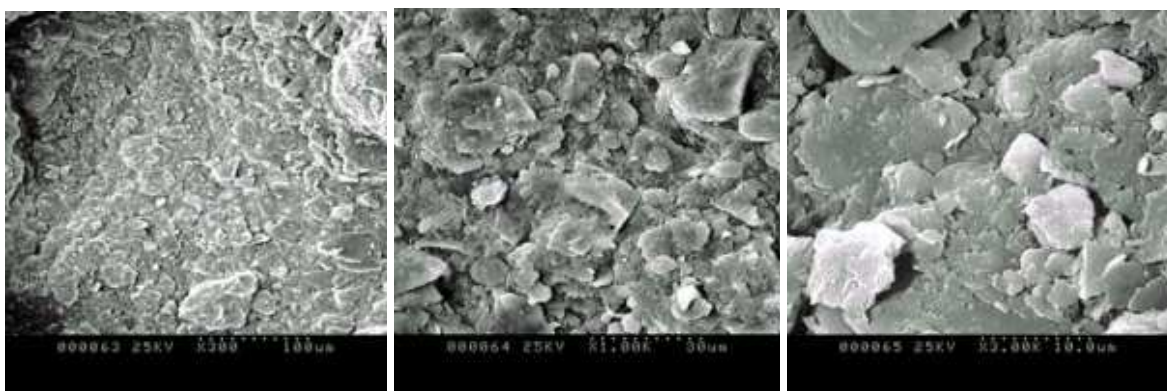
**- Interface d'acier IA1 (XKIA1CL)**

La photo de faible grossissement (30X) de la figure 7.34 correspond à un échantillon issu de l'essai XKIA1CL. Elle montre une surface très polie et sans relief, semblable à celle observée dans le cas du limon de Xeuilley lors du cisaillement sol-acier lisse (IA1), indiquant que dans ce cas particulier le cisaillement tend à promouvoir moins de réarrangement de particules, en dessous de la surface de cisaillement. Dans ces conditions, le glissement au

niveau de l'interface domine la résistance au cisaillement. La cavité observée correspond à une particule de limon arrachée. Elle a permis d'analyser la texture de l'échantillon en profondeur. Les photos 1, 2 & 3 de la figure 7.35, à des grossissements de 300X, 1000X & 3000X montrent la texture à une profondeur de quelques dizaines de microns de la surface. Les photos 1, 2 & 3 de la figure 7.36, à des grossissements de 300X, 1000X & 4000X montrent, pour leur part, la texture de la surface de glissement. La photo 3 montre une surface voilée avec de plaquettes argileuses aplaties de moins 1  $\mu\text{m}$  ; les plus petites correspondent probablement à de la montmorillonite.



**Figure 7.34** Surface de glissement (Essai XKIA1CL ; Echantillon H – 30X)



(1)

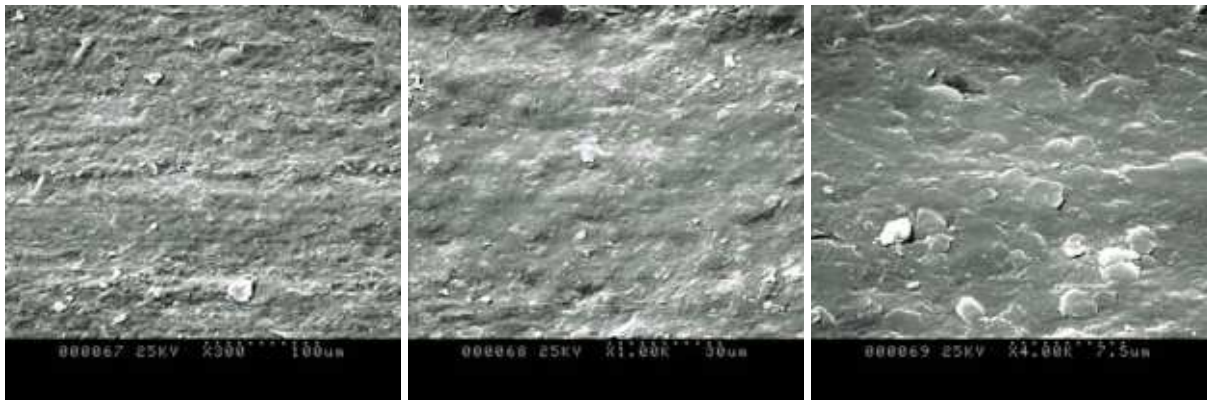
(2)

(3)

**Figure 7.35** Texture au dessous de la surface de glissement (Essai XKIA1CL ; Echantillon H – (1) 300X, (2) 1000X, (3) 3000X)

Les photos de la figure 7.37 montrent les photos d'une section obtenue à partir d'un échantillon, sur lequel a été conduit un essai de cisaillement d'interface sur un plan normal à

la direction radiale, à peu près au niveau du rayon moyen. Les trois photos ont été prises au même grossissement tout à fait en haut (photo 1), au milieu (photo 2) et en bas (photo 3). Ils montrent toutes les trois une structure quelque peu aléatoire plus ou moins semblable indiquant qu'il n'y a pas eu d'orientation préférentielle due au cisaillement.

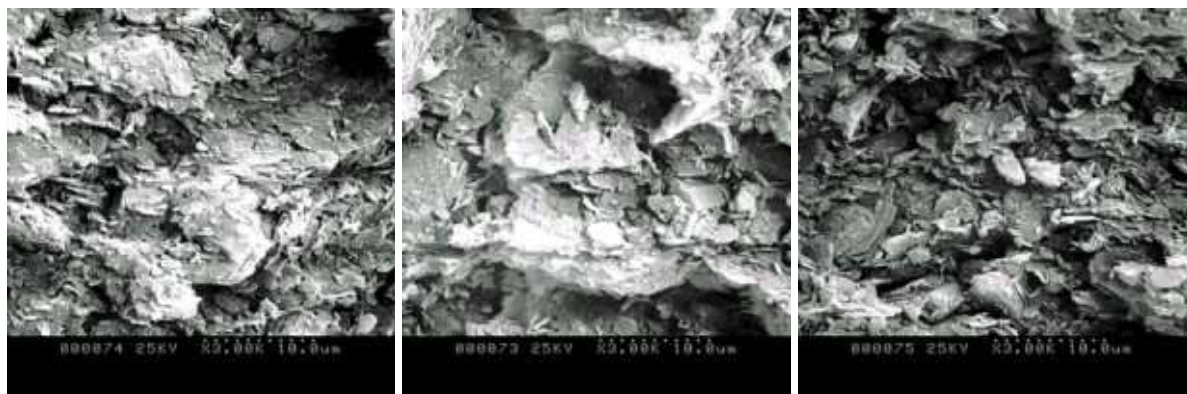


(1)

(2)

(3)

**Figure 7.36** Surface de glissement (Essai XKIA1CL ; Echantillon H – (1) 300X, (2) 1000X, (3) 4000X)



(1)

(2)

(3)

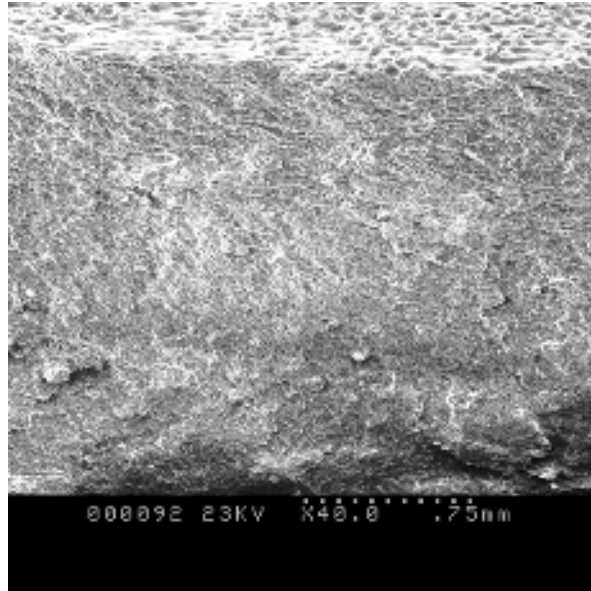
**Figure 7.37** Texture au sommet (1), au milieu (2) et à la base (3) de l'échantillon (Essai XKIA1CL ; Echantillon V – (1) 3000X, (2) 3000X, (3) 3000X)

### 7.5.3 Observations effectuées sur le kaolin

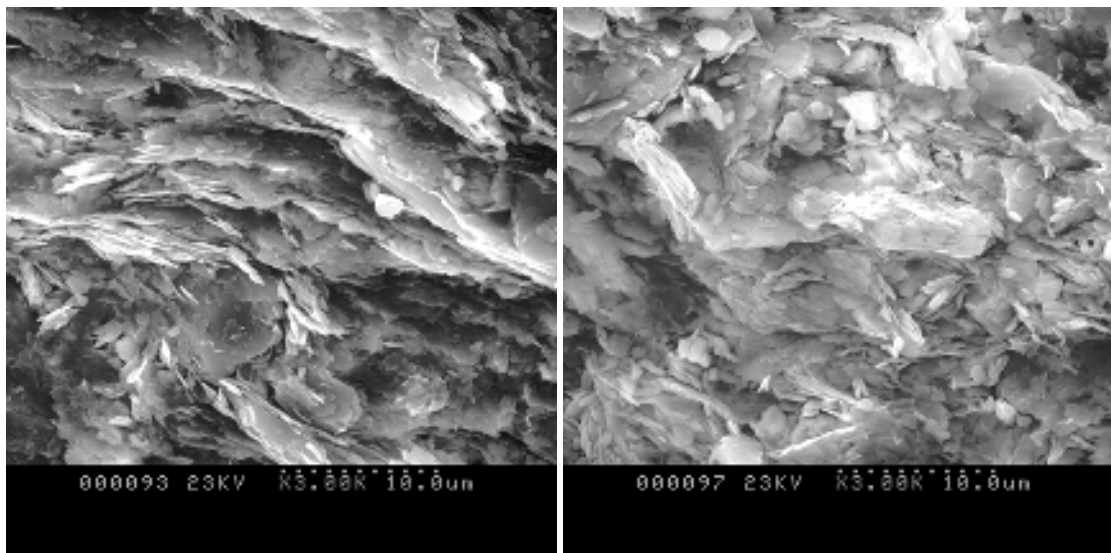
A la suite des essais conduits sur le kaolin, les échantillons se sont séparés des interfaces le long d'une surface proche de la surface de cisaillement. En conséquence, il n'a pas été possible de mettre en évidence et examiner une surface de cisaillement horizontale (à l'exception de l'essai conduit avec l'interface lisse) comparable à celle obtenue dans le cas du limon de Xeuilley et du mélange limon de Xeuilley-kaolin. Par conséquent, on a examiné des échantillons obtenus à partir de sections verticales sur un plan normal à la direction radiale, au niveau du rayon moyen (échantillon de type V). Les échantillons de kaolin se désagrégeaient

facilement à l'état sec et étaient donc difficile à manier. Ils ont été traités avec une grande attention pour s'assurer que des échantillons représentatifs avec le minimum de perturbation possible soient obtenus.

### 7.5.3.1 Essai de cisaillement annulaire standard (KIOCL)



**Figure 7.38** Aspect général d'une section à travers le kaolin (Essai KIOCL ; Echantillon V – 40X)



(1)

(2)

**Figure 7.39** (1) Texture du sol au niveau de la partie supérieure ; (2) Texture du sol situé dans la partie inférieure de l'échantillon (Essai KIOCL ; Echantillon V – (1) 3000X, (2) 3000X)

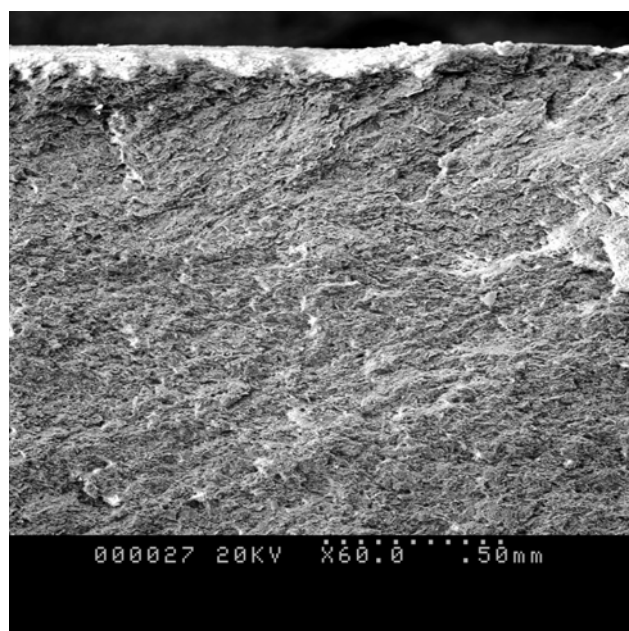
La photo de la figure 7.38, à faible grossissement (40X), montre l'aspect global de la section de l'échantillon observé, avec à la surface les empreintes dues à l'anneau poreux

supérieure. On est en mesure d'identifier deux zones distinctes. Une première zone d'environ 0,5 mm, soit le tiers de l'épaisseur de l'échantillon, dans laquelle les plaquettes d'argile sont orientées dans le sens du mouvement, avec un angle d'environ 30° par rapport à l'horizontal. Dans la deuxième zone qui correspond au reste de l'épaisseur, il n'y a pas d'orientation particulière. La photo de la figure 7.39(1) est un agrandissement de la première zone et montre clairement une matrice argileuse orientée, par rapport à la texture de la figure 7.39(2), qui correspond à la deuxième zone.

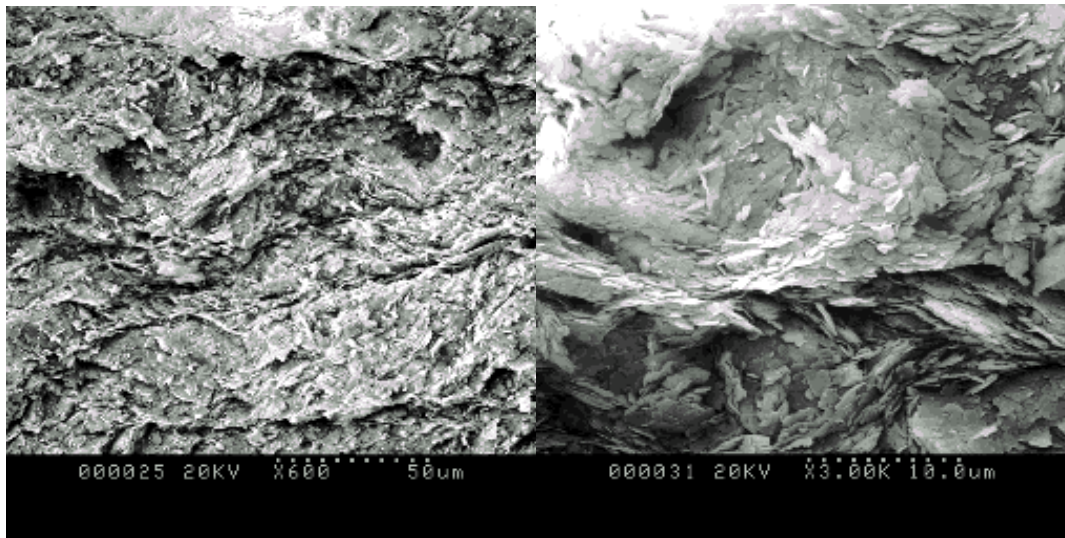
### 7.5.3.2 Essais de cisaillement d'interface

#### - Interface d'acier IA4 (KIA4CL)

La photo de la figure 7.40 montre l'aspect global d'une section verticale à un grandissement de 60X. Deux textures semblent également caractériser cet échantillon. Dans la première zone située dans la partie supérieure jusqu'à une profondeur d'environ 0,5 mm, la texture qui est hétérogène, semble plus ou moins orientée suivant un angle d'environ 35° dans le sens du cisaillement. Toutefois, l'agrandissement de cette zone (Figure 7.41) montre une structure argileuse sous forme de zigzag. Au delà de cette zone, on distingue un aspect quelque peu différent avec des zigzags quelque peu différents, plus ou moins aplatis (Figure 7.42). Il est à noter que Wong & Tovey (1975) ont présenté une zone de cisaillement de kaolin montrant des bifurcations des plans de rupture entre lesquels la texture présente des zigzags.



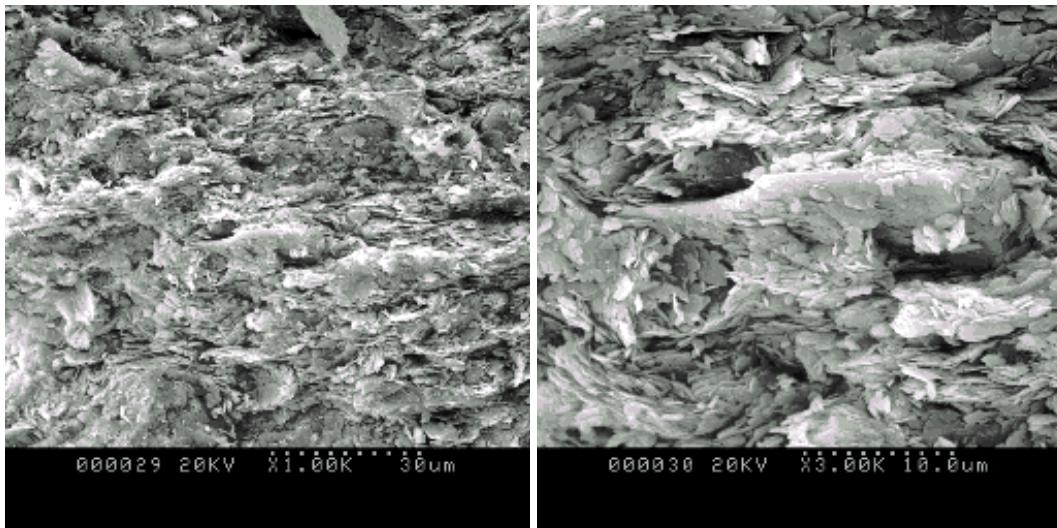
**Figure 7.40** Aspect général d'une section verticale à travers le kaolin (Essai KIA4CL ; Echantillon V – 60X)



(1)

(2)

**Figure 7.41** (1) Structure orientée sous forme de zigzag ; (2) Détail d'une telle structure (Essai KIA4CL ; Echantillon V – (1) 600X, (2) 3000X)



(1)

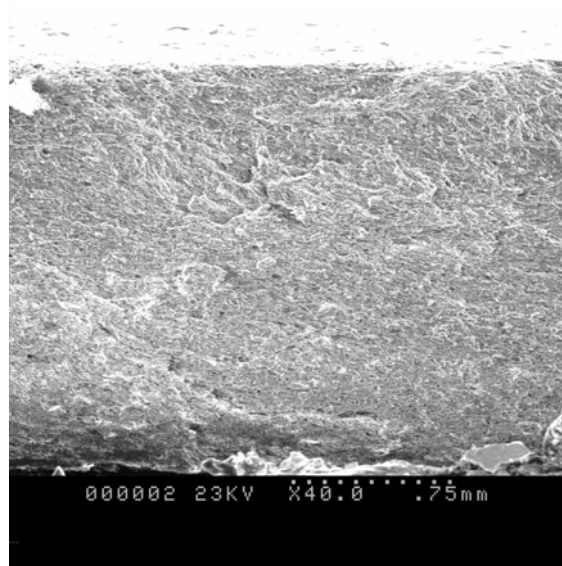
(2)

**Figure 7.42** (1) Structure au delà de la zone de cisaillement ; (2) Détail d'une telle structure (Essai KIA4CL ; Echantillon V – (1) 1000X, (2) 3000X)

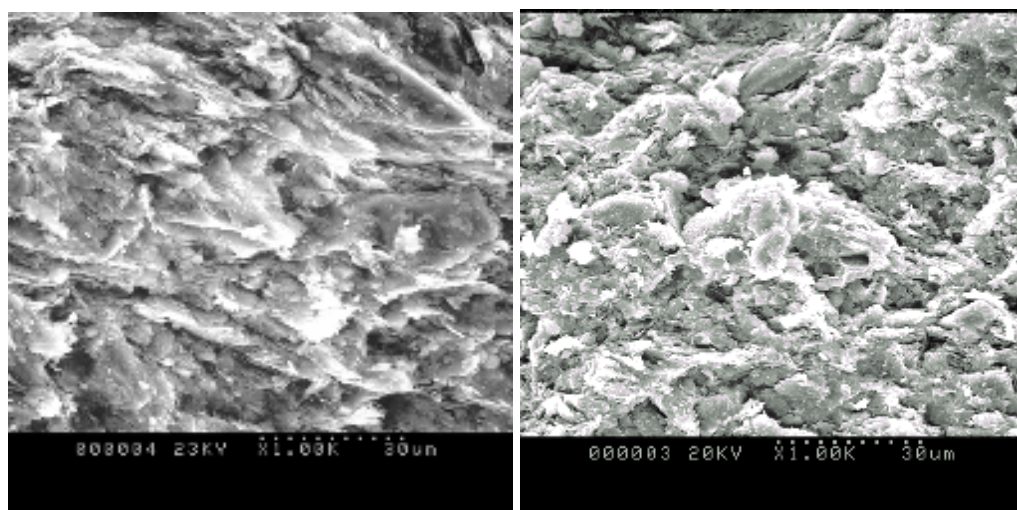
### **-Interface d'acier IA3 (KIA3CL)**

La photo de la figure 7.43 illustre une vue d'ensemble de la section de l'échantillon, à travers toute l'épaisseur (environ 2,5 mm). On est en mesure de distinguer tout d'abord dans la partie supérieure sur une hauteur d'environ 0,7 mm, une zone d'orientation hétérogène constituée de matrices argileuses inclinées dans le sens du cisaillement, d'angles compris entre 35° et 55° par rapport à l'horizontale. Le reste de l'échantillon est d'aspect différent et ne semble pas affecté. Les agrandissements de ces deux zones qui sont représentées à deux grossissements différents sur les figures 7.44 & 7.45, montrent cependant des textures

différentes de ceux observés pour l'interface IA4. Les photos ont été pris au même grandissement et transmettent toutefois une appréciation qualitative du degré d'orientation des particules à travers la hauteur de l'échantillon. La photo 1 de la figure 7.44 montre une zone de cisaillement plus ou moins orientée. L'orientation est moins évidente lorsqu'on s'éloigne du sommet de l'échantillon, comme illustré sur la photo 2, qui montre la texture du sol au milieu de l'échantillon. Cette variation indique clairement que l'orientation des particules est partielle et seule la zone proche de l'interface semble avoir été affectée par le cisaillement.



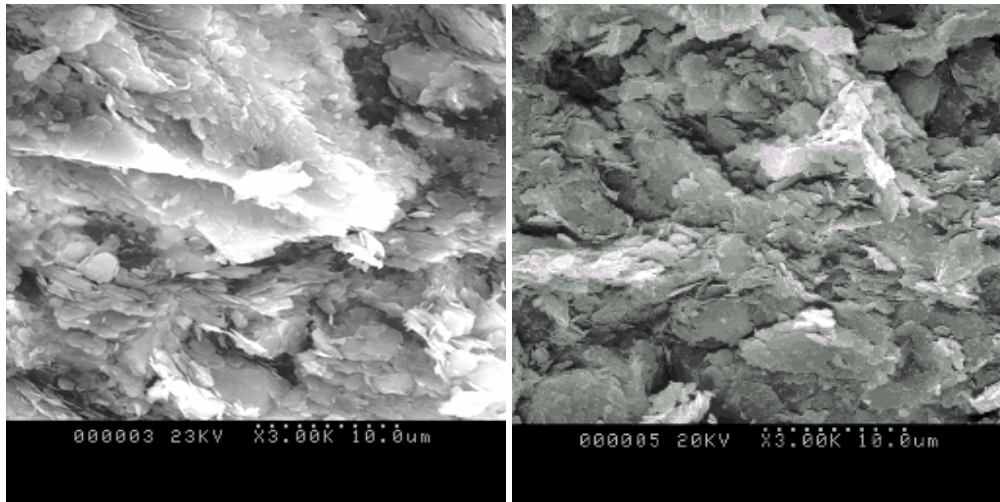
**Figure 7.43** Aspect général d'une section verticale à travers le kaolin (Essai KIA3CL ; Echantillon V – 40X)



(1)

(2)

**Figure 7.44** Détails au sommet de l'échantillon (1) et à la base (2) (Essai KIA3CL ; Echantillons V – (1) 1000X, (2) 1000X)



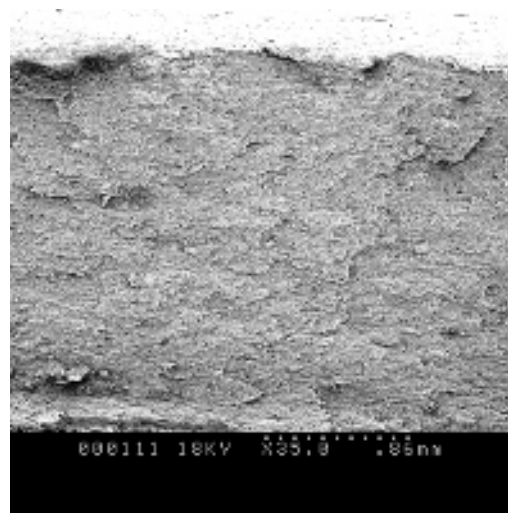
(1)

(2)

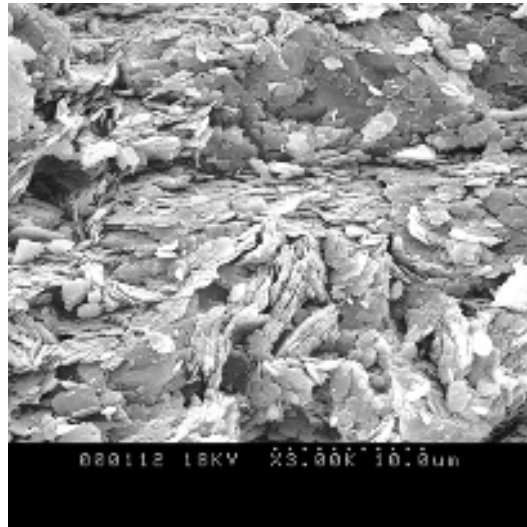
**Figure 7.45** Détails au sommet de l'échantillon (1) et à la base (2) (Essai KIA3CL ; Echantillons V – (1) 3000X, (2) 3000X)

#### - Interface d'acier IA2 (Essai KIA2CL)

Les micrographes présentés sur les figures 7.46 et 7.47 montrent respectivement l'aspect général de la section verticale de l'échantillon à un faible grossissement et la texture correspondante de l'argile à un grossissement de 3000X. La structure dans cette zone ne semble pas montrer un degré d'orientation particulière de particules dans la direction du mouvement et la texture est tant soit peu aléatoire. La photo de la figure 7.47 permet également une individualisation élémentaire des particules éparpillées dans certains endroits, soit sous forme de plaquettes bien apparentes, de très petites dimensions ( $< 2 \mu\text{m}$ ) et qui correspondent à la kaolinite, soit sous forme de tapissage de particules qui semble également constituer un lien entre les grains.



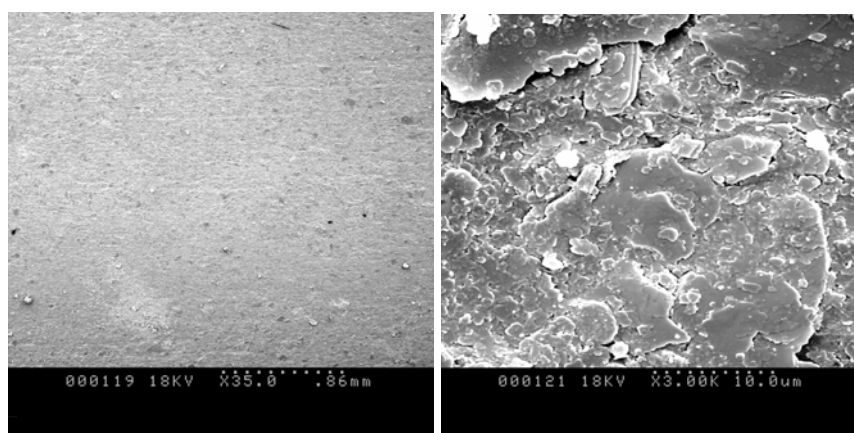
**Figure 7.46** Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai KIA2CL ; Echantillon V – 35X)



**Figure 7.47** Texture au sommet de l'échantillon (Essai KIA2CL ; Echantillon V – 3000X)

#### **-Interface d'acier IA1 (Essai KIA1CL)**

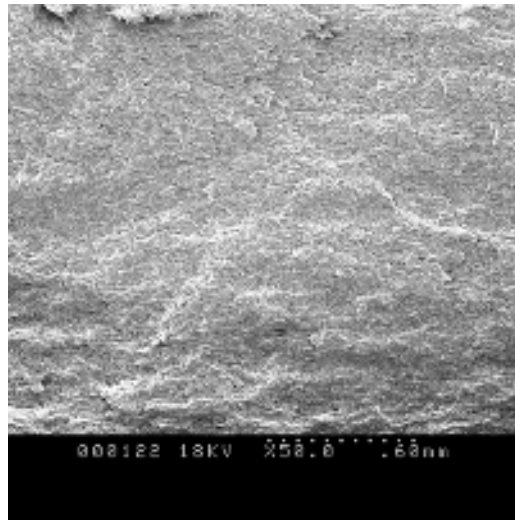
L'inspection visuelle de l'échantillon, à la fin de l'essai a permis de mettre en évidence encore une fois une surface très polie et lisse, indiquant que le cisaillement a lieu à l'interface entre le kaolin et la surface d'acier lisse. La photo de la figure 7.48(1), qui correspond à un échantillon de type (H), montre une surface de glissement plane et sans relief, dont l'agrandissement (7.48(2)) montre quelques particules argileuses individuelles et un tapisserie de particules (kaolinites), avec une orientation horizontale. L'analyse d'un échantillon de type (V) à faible grossissement (Figure 7.49) montre un aspect semblable à celui observé dans le cas de l'essai KIA2CL, sans orientation particulière des particules et une texture similaire, à un important grossissement (Figure 7.50).



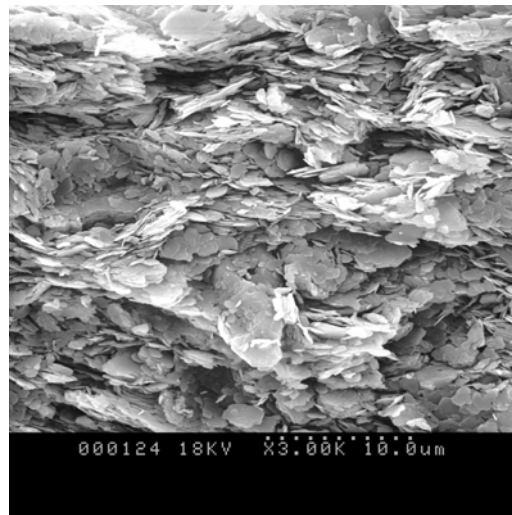
(1)

(2)

**Figure 7.48** (1) Aspect d'une surface de glissement ; (2) Détail d'une telle surface (Essai KIA1CL ; Echantillons H – (1) 35X, (2) 3000X)



**Figure 7.49** Aspect général à travers toute l'épaisseur (Essai KIA1CL ; Echantillon V – 50X)



**7.50** Texture au sommet de l'échantillon (Essai KIA1CL ; Echantillon V – 3000X)

## 7.6 Conclusions

L'analyse microstructurale d'échantillons correspondant au troisième cycle de cisaillement lent, ayant subis un déplacement tangentiel important a permis d'identifier les caractéristiques suivantes :

- 1- Dans le cas d'un cisaillement sol-sol, pour le limon de Xeuilley et le mélange limon de Xeuilley-kaolin, la rupture est localisée le long d'une surface striée avec une orientation des particules argileuses selon une disposition face-face. Toutefois le kaolin a montré en plus une zone de cisaillement de 0,5 mm d'épaisseur avec une texture orientée d'un angle de 30° dans le sens du cisaillement.
- 2- Dans le cas d'un cisaillement d'interface rugueuse IA4 et IA3), la rupture ne semble pas localisée le long d'une surface de rupture uniquement mais affecte également une portion de l'épaisseur de l'échantillon. Ce qui est mis en évidence par l'existence

physique de zones ou bandes de cisaillement, avec des déformations de la matrice argileuse, dont l'épaisseur est inférieure au millimètre (entre 0,5 mm et 0,9 mm). Cette déformation est substantielle et se présente sous forme d'une orientation intense des particules, synthétique au sens du cisaillement, avec un angle compris entre 28° et 38° par rapport à l'horizontale, dans le cas de l'interface IA4. Elle est toutefois moins importante, quand il s'agit d'essais réalisés avec l'interface IA3, avec des orientations moins importantes est parfois partielles avec des angles compris entre 35 ° et 60° et ce en fonction du type de sol. Ces résultats semblent plus ou moins conformes à ceux obtenus par Parry & Swain (1977) concernant les pieux avec toutefois des orientations des surfaces de cisaillement secondaires (texture) comprises entre 10° et 38° (voir Figure 3.1) ainsi que par Chandler & Martins (1983) dont l'inclinaison partielle de la texture est d'environ 20° (Figure 3.2). On notera, cependant, que ces auteurs ne donnent aucune indication sur la rugosité de surface des modèles de pieux utilisés.

- 3- Quand l'interface est lisse (IA1) ou de faible rugosité (IA2), les observations indiquent que la bande de cisaillement est pratiquement inexistante, avec des déformations se produisant essentiellement au niveau d'un plan de cisaillement, de l'ordre de quelques microns d'épaisseur. La morphologie de ce plan est sans relief et polie dans le premier cas et présentant des striations dans le deuxième. Au dessous de ce plan, la texture induite par le cisaillement ne semble pas avoir été affectée.

## 8 INTERPRÉTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

---

### 8.1 Introduction

Dans ce chapitre les résultats présentés dans le chapitre 6 sont discutés plus en détail. Les facteurs susceptibles d'avoir une influence sur la résistance résiduelle à l'interface sol cohérent – acier ou béton sont considérés et particulièrement l'effet de la rugosité et l'effet du pré-cisaillement. La nature de la microtexture au niveau de la zone de cisaillement formée à la fin du cisaillement lent a été analysée au microscope électronique à balayage. Les micrographes présentés au chapitre 7 sont discutés. Comme il a été évoqué auparavant, on trouve en géotechnique de nombreuses situations où il est nécessaire disposer d'informations sur le comportement d'interface dans domaine des grands déplacements : pieux battus, clous forcés, avancement d'un tunnelier, etc. Les résultats obtenus permettent ainsi une meilleure compréhension des problèmes des structures sujettes à des déplacements relatifs importants. Enfin il est important de mettre l'accent sur le fait que la présente étude concerne essentiellement la résistance au cisaillement résiduel, sans pour autant totalement négliger la résistance dans le domaine des petits déplacements.

### 8.2 Cisaillement sol-sol

#### 8.2.1 Effet du type de sol

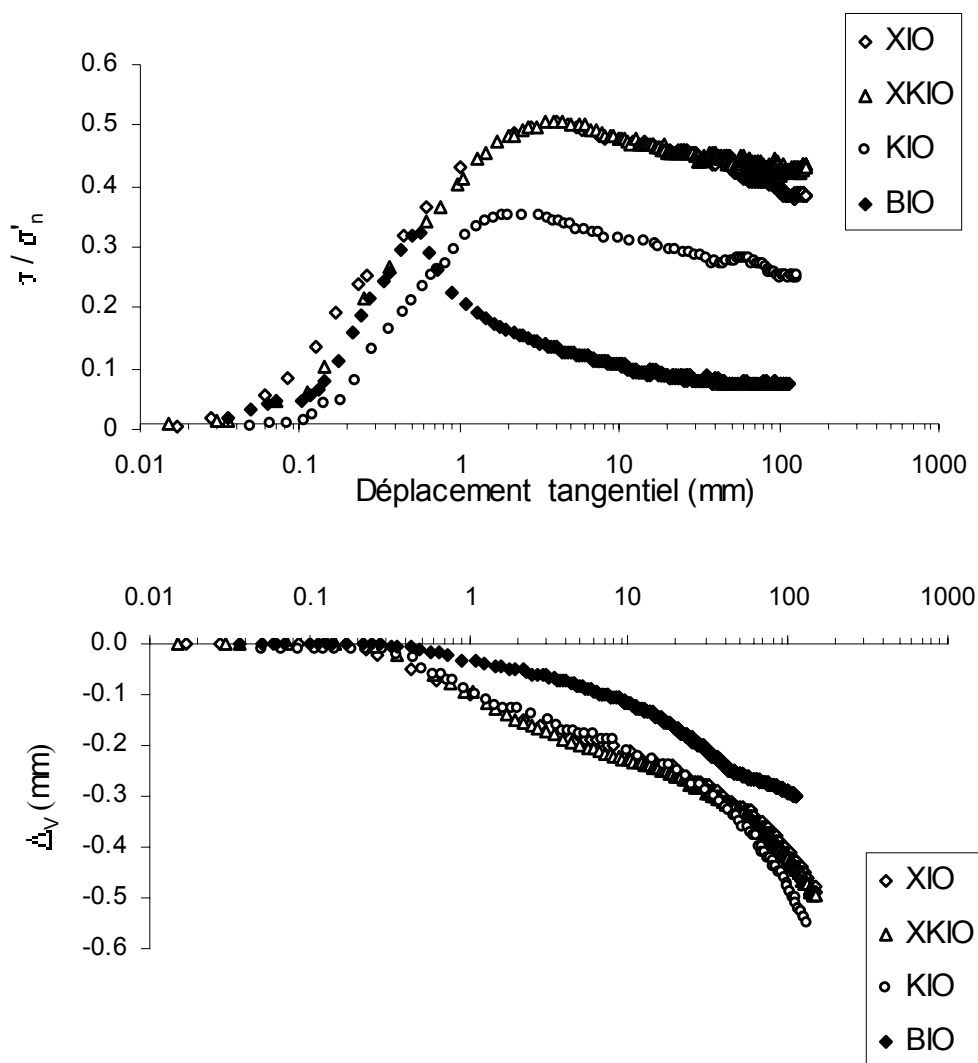
Les résultats obtenus lors d'essais de cisaillement sol – sol pour les quatre sols étudiés dans le cas de la première phase de cisaillement lent sont regroupés au tableau 8.1 et les courbes coefficient de frottement – déplacement tangentiel ainsi que les courbes déplacement vertical – déplacement tangentiel sont représentées ensemble sur la figure 8.1.

Lors d'essais de cisaillement annulaire standard dans lesquels un cisaillement sol - sol a lieu, la contrainte de cisaillement est mobilisée progressivement en fonction du déplacement relatif. La courbe correspondant à la bentonite a montré une allure différente par rapport aux trois autres sols. Toutefois Chaque essai a montré tout d'abord une résistance au pic caractérisée par une valeur bien définie dans les courbes coefficient de frottement – déplacement horizontal. Les angles de frottement interne au pic  $\varphi_p'$  et résiduel  $\varphi_r'$  reportés dans le tableau 8.1. Les valeurs de  $\varphi_p'$  obtenues varient entre  $26,9^\circ$  et  $17,8^\circ$ . Le développement de la résistance au pic est une manifestation de la destruction des liens de la structure du sol, ce qui développe des résistances élevées après de faibles déplacements. La

résistance est d'autant plus importante que le sol contient des particules massives. C'est le cas dans cette étude, du limon de Xeuilley et du mélange limon de Xeuilley-kaolin, qui ont pratiquement la même valeur (26,9° et 26,8° respectivement). Ainsi l'addition de 25% de kaolin ne semble pas avoir d'effet sur la résistance au pic. Les sols fins présentent des valeurs inférieures, soient 17,8° pour la bentonite et 19,3° pour le kaolin, soit un coefficient de frottement de 0,351, pour ce dernier. Lemos & Vaughan (2000) et Lupini (1981) ont obtenu des valeurs de 0,350 et 0,340 dans des essais de cisaillement alterné et annulaire, respectivement, réalisé sur le kaolin. D'après Smith et Reitsma (2002), pour les argiles kaolinitiques, les angles de frottement interne typiques sont situés dans le domaine 20° - 25°, alors que pour les argiles constituées essentiellement de montmorillonite, telle que la bentonite, ils ont initialement une valeur de 20° approximativement, quand les particules sont orientées aléatoirement. La résistance au pic obtenue à partir de ces essais est une résistance remaniée car l'échantillon utilisé est dans un état remanié. Même si un échantillon intact est utilisé, il sera considéré comme remanié du moment qu'il sera arasé de niveau avec le niveau supérieur du conteneur et sera donc remanié. Par conséquent la valeur de  $\varphi_p'$  mesuré dans l'appareil de cisaillement annulaire devrait être inférieure à celle obtenue au moyen de l'appareil triaxial. Les contraintes au pic sont obtenues pour de faibles déplacements tangentiels : environ 4 mm pour X et XK, 2 mm pour K et 0,6 mm pour B. De ce fait indiquant que le déplacement nécessaire pour atteindre le pic diminue avec le pourcentage de fraction argileuse.

**Tableau 8.1** Résumé des résultats des essais de cisaillement sol-sol

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$	$\Delta_p$	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_r'$	$\Delta_r$	$I_f$
		(degré)	(mm)		(degré)	(mm)	(%)
XIO	0,508	26,9	4,0	0,386	21,1	106	24,0
XKIO	0,505	26,8	3,9	0,427	23,1	78	15,4
KIO	0,351	19,3	2,0	0,250	14,0	100	28,8
BIO	0,322	17,8	0,6	0,075	4,3	47	76,7



**Figure 8.1** Courbes coefficient de frottement- déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential pour les essais sol-sol

L'analyse des résultats obtenus dans le domaine des grands déplacements indique des valeurs de  $\phi_r'$  égales à  $4,3^\circ$  et  $14,0^\circ$  pour la bentonite et le kaolin, respectivement. Ces derniers contiennent une importante teneur en particules argileuses (87 % et 76 % respectivement). Il a été établi depuis longtemps que la chute de la résistance au cisaillement post-pic à la valeur résiduelle, observée pour les sols cohérents normalement consolidés avec une forte proportion de fraction argileuse en grands déplacements de cisaillement, est essentiellement associée à l'orientation des minéraux argileux en forme de feuillets, parallèle à la direction de cisaillement sans manifestation de dilatance (Skempton, 1964). Le cisaillement lent drainé de ce type de sol à l'état résiduel a lieu d'une manière prédominante par glissement des plaquettes argileuses sur une surface de cisaillement polie, mince et continue, qui une fois formée est une caractéristique permanente du sol et n'est pas affectée par des changements ultérieurs de contrainte normale. L'énergie ou la force nécessaire pour

accomplir l'arrangement parallèle complet est alors la composante majeure de la résistance au cisaillement. Ainsi le mode de cisaillement résiduel qui régit le comportement en grand déplacement est le mode glissant, comme défini par Lupini et al (1981). Dans ce mode les plaquettes argileuses adoptent une structure parallèle face à face hautement orientée avec peu d'enchevêtrement, orientée dans la direction de cisaillement. Il en résulte moins de résistance offerte au glissement. Lupini suggéra que les sols exhibant un tel mode de comportement auront des valeurs de  $\varphi_r'$  s'étalant entre  $5^\circ$  et  $20^\circ$ . De plus Skempton (1985) montra que lorsque le pourcentage de minéraux d'argile d'un sol dépasse 50%, il se comporte selon le mode glissant. La résistance résiduelle est alors pratiquement régie par le frottement glissant des minéraux argileux, les angles de frottement interne résiduel étant approximativement  $15^\circ$  pour la kaolinite et  $5^\circ$  pour la montmorillonite. Pour Smith et Reitsma (2002), la valeur de  $\varphi_r'$  pour les sols constitués principalement de montmorillonite varie entre  $2^\circ$  et  $10^\circ$  en fonction de la composition exacte du sol argileux et les ions présents dans l'eau interstitielle.

Le limon de Xeuilley est un sol avec une prédominante fraction de particules massives arrondies (78%). Le comportement résiduel est essentiellement dominé par les particules grossières présentes dans la matrice de sol. L'interférence des particules arrondies empêche l'orientation complète des plaquettes argileuses ce qui provoque des résistances résiduelles relativement élevées, avec des angles de frottement interne résiduels typiquement supérieures à  $20^\circ$  (Skempton, 1985). La valeur de  $\varphi_r'$  obtenue pour la présente étude est égale à  $21,1^\circ$ . Le mode de comportement résiduel est soit le mode transitoire, soit le mode turbulent. Cependant la fragilité observée est atypique des sols exhibant ce dernier mode de comportement. Pour lesquels il n'y a généralement pas de pic. De ce fait on serait tenté d'opter plutôt pour le mode transitoire. Le mélange limon de Xeuilley-kaolin a une valeur légèrement supérieure ( $23,1^\circ$ ). Comme la teneur en particules argileuses est comprise entre 25% et 50%, on peut admettre que la résistance au cisaillement résiduelle est régie par le mode transitoire. Elle dépend alors aussi bien du pourcentage de particules argileuses que de leur nature. Cette augmentation est attribuée à l'influence des minéraux dont la résistance au cisaillement est différente. Ainsi, le changement de la composition minérale, est susceptible de modifier les propriétés mécaniques d'un sol. La kaolinite, qui est le composant minéral principal du kaolin, possède un angle de frottement interne résiduel de l'ordre de  $15^\circ$ . Le limon de Xeuilley par contre est constitué d'environ 20% de montmorillonite et de 4 à 5% de Kaolinite. Par conséquent, l'addition de 25% de kaolin a pour effet, du point de vue composition minérale, d'augmenter le pourcentage de kaolinite (24%) au détriment de la montmorillonite (15%). Une comparaison entre les valeurs des coefficients de frottement au pic et résiduel montre que les valeurs des indices de fragilité varient sont de 15,4% et 76,7%. Cette dernière valeur correspond à la

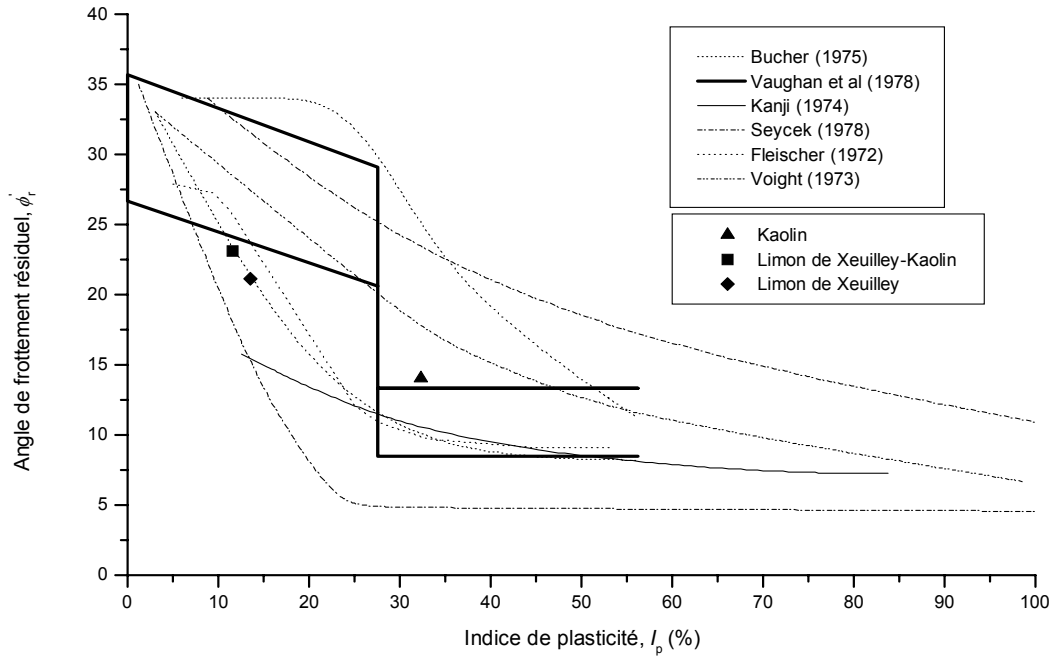
bentonite et indique que cette dernière a un comportement plus fragile par rapport aux autres sols. Ce qui est en accord avec les observations faites par Blondeau & Josseume (1976) qui ont indiqué que la présence de montmorillonite en tant que constituant prépondérant implique d'importants indices de fragilité. On peut également noter que pour l'ensemble des sols étudiés, la perte de résistance se produit en grande partie pour des déplacements généralement inférieurs à 40-50 mm.

On note sur la figure 8.1, à partir des courbes déplacement vertical – déplacement tangentiel, que l'arrangement des particules argileuses qui se produit au début des essais se manifeste par une réduction de l'épaisseur. Un changement dans le mode de variation du volume coïncide avec la mobilisation de la résistance au pic. Un déplacement supplémentaire après une certaine distance au delà du pic entraîne une perte du sol dont on peut s'en rendre compte par une augmentation de la pente de la courbe, qui se produit aux environs de 20 mm. Il est maintenant possible d'identifier la diminution de l'épaisseur due à l'arrangement des particules et celle due à la perte d'échantillon. On remarque également que parce que le réarrangement des particules de bentonite est moins important, elle présente une déformation verticale plus petite, par rapport aux trois autres types de sol dont les courbes semblent plus ou moins coïncider.

## **8.2.2 Relation entre les angles de frottement, les limites d'Atterberg et la fraction argileuse**

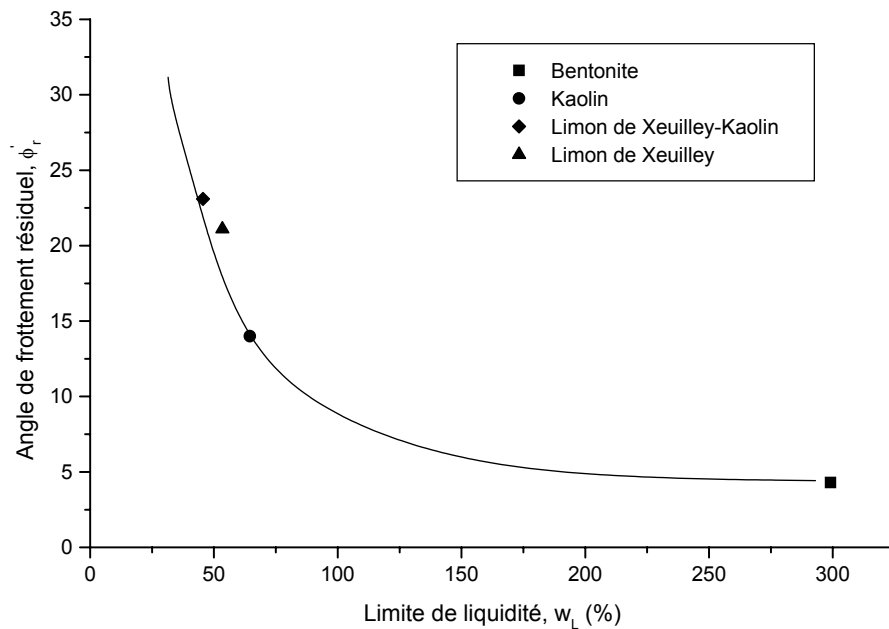
### **8.2.2.1 Relation entre $\varphi_r'$ et $I_p$**

Sur la figure 8.2, l'angle de frottement résiduel est représenté en fonction de l'indice de plasticité. Les relations entre  $\varphi_r'$  et  $I_p$  ont été établies par Fleisher (1972), Voight (1973), Kanji (1974), Bucher (1975), Seycek (1978) et Vaughan et al (1978) et montrent une dispersion considérable. Cependant, on remarque que plus  $I_p$  croît plus l'angle de frottement interne résiduel décroît. Pour les quatre sols étudiés les valeurs de  $\varphi_r'$  sont situées dans le domaine établi par Seycek (1978). Les limites établies par Busher (1975) semblent plus ou moins convenir également (sauf pour la bentonite). Les autres courbes ne semblent pas convenir. Il est aussi intéressant de noter que la relation  $\varphi_r'$ -  $I_p$  présentée par Vaughan et al. (1978) montre des discontinuités dans cette corrélation, peuvent être attribuées aux différents mécanismes régissant la résistance résiduelle.



**Figure 8.2** Corrélation entre l'indice de plasticité et l'angle de frottement Résiduel

### 8.2.2.2 Relation entre $\phi_r$ et $w_L$

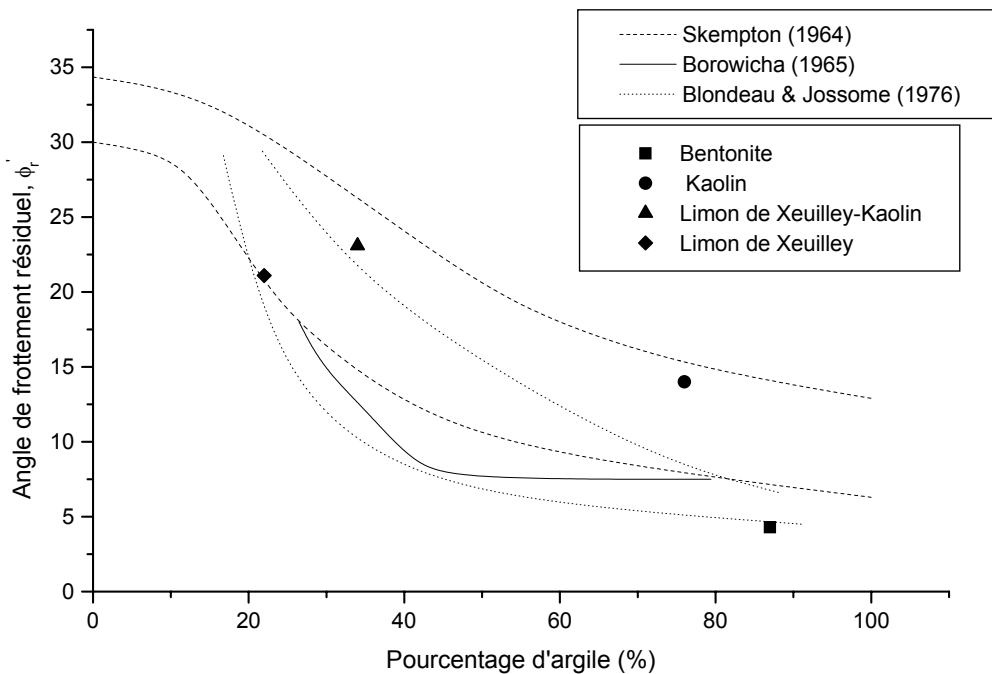


**Figure 8.3** Corrélation entre la limite de liquidité et l'angle de frottement résiduel

Dans la figure 8.3, une courbe de tendance produite à partir de résultats donnés par

Kenny (1967) et Mesri et al. (1985), montre que l'angle de frottement résiduel tend à diminuer lorsque la limite de liquidité augmente. La limite de liquidité est en fait une mesure de la capacité de la composition de sol à retenir l'eau. A mesure que la taille des particules diminue et la surface spécifique par unité de masse diminue, la limite de liquidité tend à augmenter. Donc une corrélation entre la limite de liquidité et l'angle de frottement résiduel est prévue, dans laquelle il y'a une chute de l'angle de frottement résiduel avec une augmentation de la limite de liquidité. Les résultats obtenus dans le cadre de notre travail concorde bien avec cette courbe.

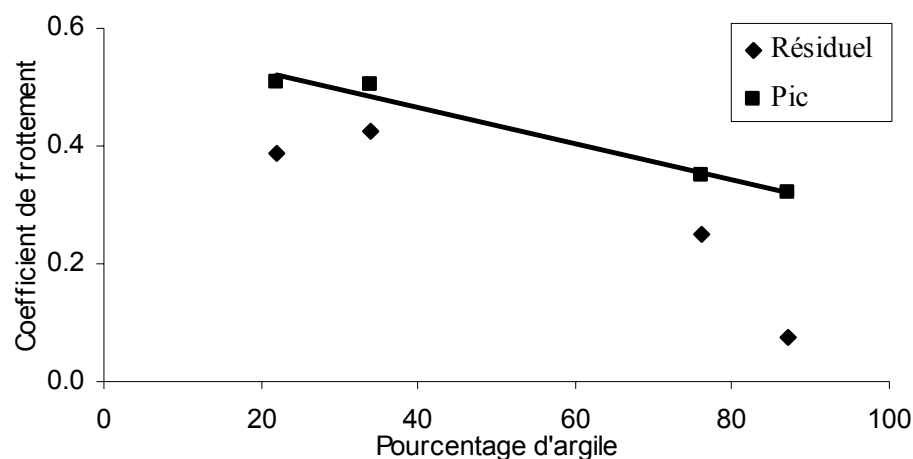
### 8.2.2.3 Relation entre $\phi_r'$ et la fraction argileuse



**Figure 8.4** Corrélation entre le pourcentage d'argile et l'angle de frottement résiduel

La figure 8.4 compare les valeurs de  $\phi_r'$ , obtenues dans le cadre de ce travail, en fonction du pourcentage en argile et les résultats obtenus par différents auteurs. D'après ces auteurs, il y'a une diminution de  $\tau_r/\sigma_n'$  (ou  $\phi_r'$ ) lorsque la fraction argileuse (particules  $< 2\mu\text{m}$ ) augmente (surtout pour les fractions comprises entre 15% et 75%) car cette augmentation facilite l'orientation des particules d'argile vers la zone de cisaillement. Il ressort de cette figure qu'à l'exception de la bentonite, les points correspondant aux trois autres sols sont situés dans la zone produite par Skempton (1964). Alors que les limites données par Blondeau & Josseume (1976) ne conviennent pas pour le kaolin dont le point correspondant est situé au dessus de la limite supérieure. D'autre part, la ligne de corrélation

de Borowicka (1965) ne semble plus ou moins convenir qu'au limon de Xeuilley. Le fait que le mélange limon de Xeuilley - kaolin, avec une teneur en fraction argileuse supérieure à celle du limon de Xeuilley donne une résistance au cisaillement résiduelle supérieure est due à l'influence des minéraux présents au sein de la fraction argileuse. Ceci est également illustré par les valeurs de  $\varphi_r'$  obtenues pour le kaolin et la bentonite dont les composants minéraux majeures sont respectivement la kaolinite et la montmorillonite. Il est également intéressant de noter que l'effet de la fraction argileuse, et donc la minéralogie, est moins important lors de la mobilisation de la résistance maximum, comme le montre la figure 8.5. D'autre part, contrairement à la résistance résiduelle, la résistance au pic semble diminuer linéairement avec l'augmentation de la fraction argileuse.



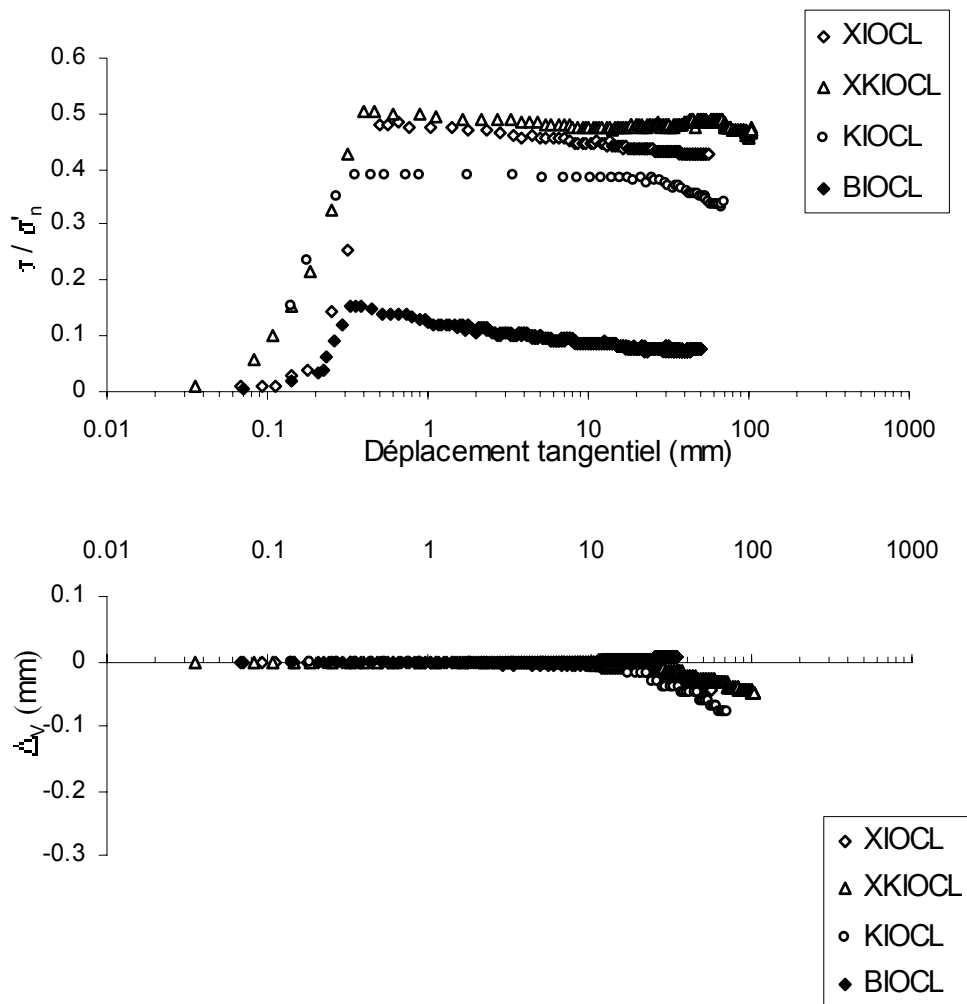
**Figure 8.5** Effet du pourcentage d'argile sur les conditions au pic et résiduel

### 8.2.3 Effet du pré-cisaillement

Les résultats des essais obtenus lors de la deuxième phase de cisaillement sont regroupés au tableau 8.2. Comme indiqué sur les courbes contraintes-déformation regroupées sur la figure 8.6, les courbes des deuxièmes phases lentes se distinguent de ceux obtenues lors des premières phases (voir Figure 8.1), par leurs formes quelque peu différentes particulièrement les parties des courbes représentant les étapes initiales des essais. Pour les premiers, il y'a une diminution abrupte au delà du pic et la résistance résiduelle est mobilisée à une distance relativement importante. Alors que pour la deuxième phase de cisaillement lent, qui suit le cisaillement rapide, il y a un comportement fragile peu important caractérisé par un petit pic, particulièrement pour X et XK et à un degré moindre le kaolin. Alors que la bentonite a présenté un comportement relativement plus fragile. La résistance au pic "pré-cisaillé" observé est vraisemblablement causée par le changement de la structure du sol produit par le cisaillement rapide de la phase précédente. En effet l'application d'une vitesse

de cisaillement rapide a pour effet d'entraîner un réarrangement global des particules causé par le développement de la résistance résiduelle de la première phase de cisaillement. De ce fait plus d'énergie est nécessaire pour réorienter les particules de nouveau vers la direction de cisaillement.

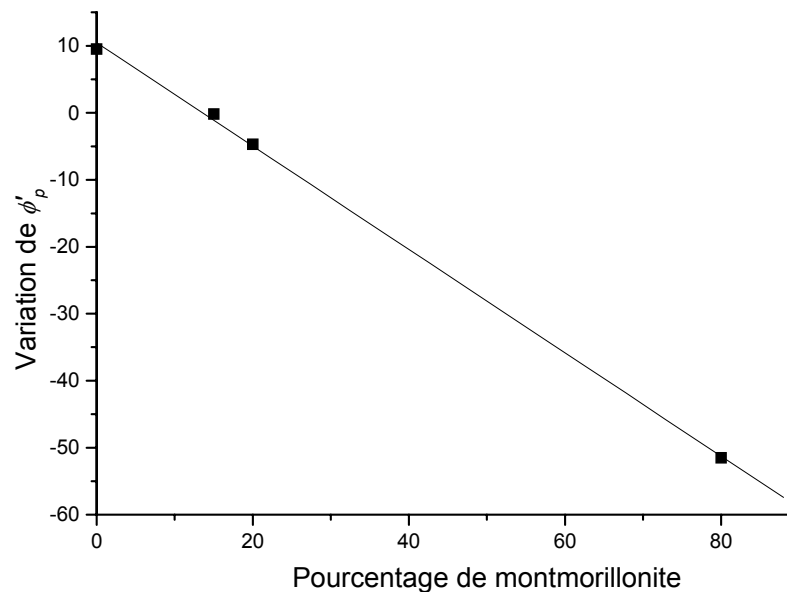
Pour les échantillons pré – cisailés, comme on peut le voir sur la figure 8.6, le modèle de comportement, du point de vue variation de l'épaisseur au cours de l'essai, est différent de celui observé pour la première phase de cisaillement. Du moment que les particules argileuses ont été déjà réarrangées durant la première phase de cisaillement lent et uniquement un remaniement mineur a lieu au cours de la phase de cisaillement rapide, il y'a eu uniquement un très petit déplacement vertical causé par l'arrangement des particules, au début de l'essai. Cette déformation est suivie ensuite par un changement dans l'épaisseur dû au sol qui est forcé de s'échapper du conteneur au cours de l'essai.



**Figure 8.6** Courbes coefficient de frottement – déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential pour les essais sol-sol correspondant à des échantillons pré-cisailés

**Tableau 8.2** Résumé des résultats des essais de cisaillement sol-sol pour des échantillons pré-cisaillés

Essai	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$	$\Delta_p$	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$	$\Delta_r$	$I_f$
		(degré)	(mm)		(degré)	(mm)	(%)
XIOCL	0,484	25,8	0,49	0,428	23,2	30	11,6
XKIOCL	0,504	26,7	0,47	0,480	25,2	10	4,8
KIOCL	0,388	21,2	0,9	0,337	18,6	55	13,1
BIOCL	0,156	8,9	0,33	0,076	4,3	23	51,3



**Figure 8.6** Variation de  $\varphi_p'$  en fonction du pourcentage de montmorillonite

Concernant l'effet du pré-cisaillement, il est plus approprié de le discuter par rapport à la première phase de cisaillement lent. Dans ce cadre, les résultats obtenus montrent que le pré-cisaillement est susceptible d'avoir un effet sur la résistance au cisaillement dans le domaine des petits et grands déplacements. Une comparaison des résistances au cisaillement pré-cisaillés et non pré-cisaillés des échantillons, correspondant à la première et la troisième phase de cisaillement, qui sont reportés au Tableau 8.3, montre qu'on a enregistré une légère diminution de la résistance au pic (effet négatif) pour X de 4,7%. La bentonite pour sa part, a exhibé également une diminution, mais conséquente de 51,5 %. Cependant, le kaolin a présenté un comportement positif avec une augmentation de la résistance au pic de 9,5 % et le mélange XK a montré pratiquement un effet neutre, avec la même valeur avant et après cisaillement. Cette variation semble en relation avec le pourcentage de montmorillonite présent dans le sol, comme le montre la figure 8.7. La courbe de corrélation représentée

indique une relation linéaire entre la variation de  $\varphi_p'$  et le pourcentage de montmorillonite.

**Tableau 8.3** Comparaison des valeurs de  $\varphi_p'$  obtenues avant et après pré-cisaillement

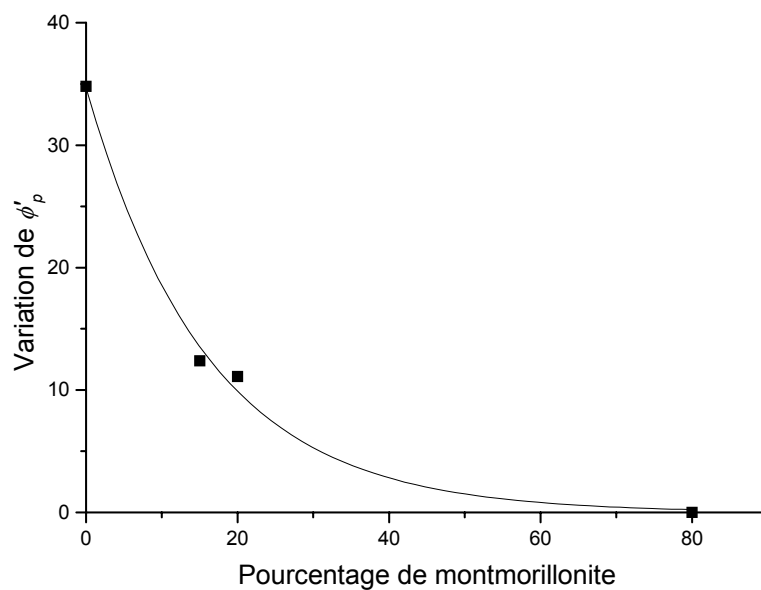
ESSAIS	Echantillon non pré-cisaillé		Echantillon pré-cisaillé		% variation
	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$ (deg)	$\tau_p/\sigma_n'$	$\varphi_p'$ (deg)	
XIO & XIOCL	0,508	26,9	0,484	25,8	-4,7
XKIO & XKIOCL	0,505	26,8	0,504	26,7	-0,2
KIO & KIOCL	0,351	19,3	0,388	21,2	+9,5
BIO & BIOCL	0,322	17,8	0,156	8,9	-51,5

**Tableau 8.4** Comparaison des valeurs de  $\varphi_r'$  obtenues avant et après pré-cisaillement

ESSAIS	Echantillon non pré-cisaillé		Echantillon pré-cisaillé		% augmentation
	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ (deg)	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ (deg)	
XIO & XIOCL	0,386	21,1	0,428	23,2	11,1
XKIO & XKIOCL	0,427	23,1	0,480	25,6	12,4
KIO & KIOCL	0,250	14,0	0,337	18,6	34,8
BIO & BIOCL	0,075	4,3	0,075	4,3	0,0

Concernant la résistance résiduelle, comme indiqué sur le tableau 8.4, le kaolin, le mélange limon de Xeuilley-kaolin et le limon de Xeuilley sont sujets à une augmentation de la résistance résiduelle d'environ 35 %, 12 % et 11% respectivement. Ce qui indique un effet positif. D'autre part, la bentonite ne semble pas affecté et a un effet neutre. Cette influence semble être également le résultat de la composition minéralogique et en particulier la proportion relative de montmorillonite et de kaolinite. En effet, il apparaît que lorsque le pourcentage de montmorillonite est important, l'effet est neutre, et plus la proportion de montmorillonite diminue et celle du kaolinite augmente et plus l'effet positif augmente. Comme le montre la courbe de corrélation, de type exponentiel en décroissance, de la figure 8.7. Ces deux types d'effet mis en évidence (positif et neutre) concordent avec les résultats obtenus par Lemos et al. (1985) qui ont montré que si une zone de cisaillement se forme par cisaillement lent jusqu'à l'état résiduel dans l'appareil de cisaillement annulaire et subit ensuite un cisaillement rapide, dans la phase de cisaillement lent suivante la résistance au

cisaillement résiduelle lente peut être supérieure ou égale à celle de la première phase. Cependant ce résultat n'est pas conforme aux conclusions tirées par certains auteurs (La Gatta, 1970 ; Bishop et al, 1971 ; Ramiah & Purushothamaraj, 1971 ; Townsend & Gilbert, 1976) qui suggèrent que la résistance résiduelle est indépendante de la structure initiale du sol. Cependant, la méthodologie suivie pour l'étude de l'effet du pré-cisaillement réalisée dans le cadre de cette thèse est différente. La procédure utilisée dans les autres travaux consistait à mettre à l'essai des échantillons prédécoupés au niveau du plan de cisaillement, avant l'initiation du cisaillement, et ensuite comparer les résultats avec ceux obtenus pour des essais sur des échantillons non prédécoupés.



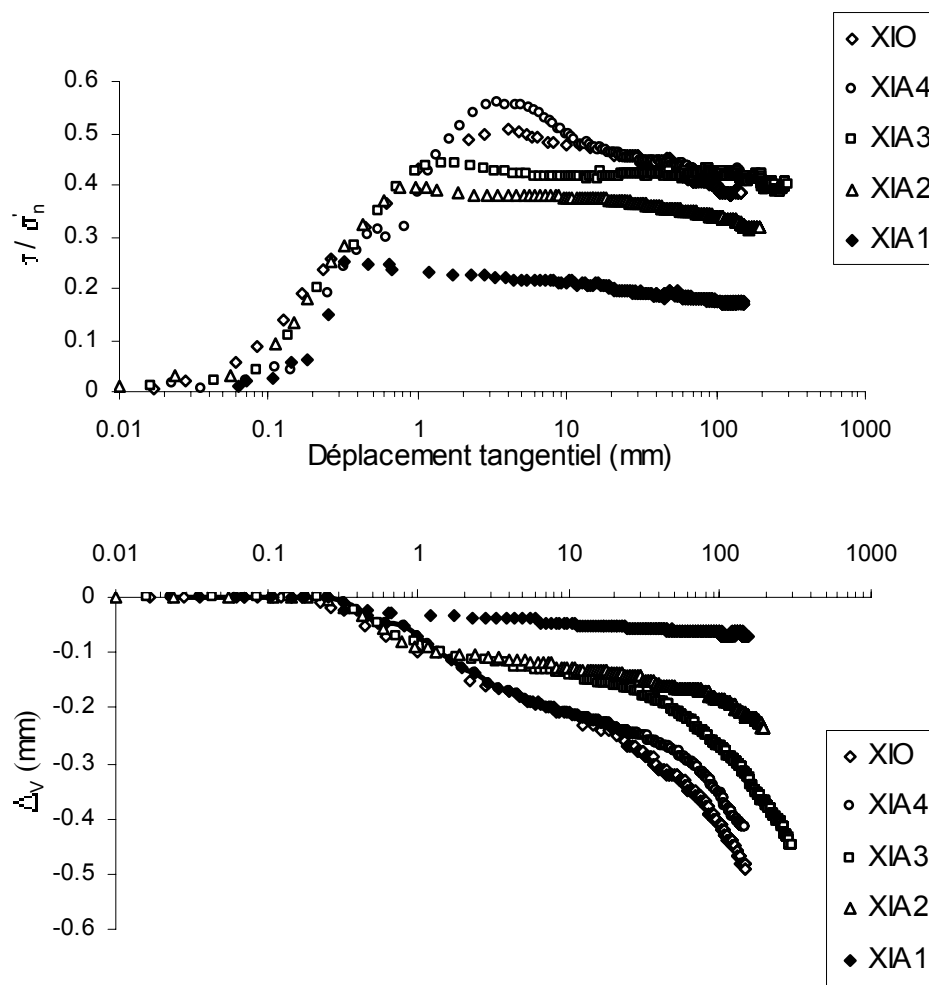
**Figure 8.7** Variation de  $\phi'_p$  en fonction du pourcentage de montmorillonite

### 8.3 Cisaillement à l'interface sol-matériau solide

L'interface sol-matériau solide est présente dans pratiquement tous les ouvrages géotechniques. C'est l'un des mécanismes primaires à partir desquels le chargement est transféré. En conséquence, il est nécessaire de connaître les paramètres de frottement entre le sol et les matériaux de construction pour évaluer la stabilité d'ouvrages tels que les pieux, les murs de soutènement et les systèmes de renforcement des sols, etc. Dans les applications pour lesquelles les déformations à l'interface sont petites, comme c'est le cas des murs de soutènement, la valeur du pic de résistance au frottement est appropriée. Alors que, dans le cas des pieux, l'évaluation du frottement latéral implique la détermination de la résistance au cisaillement dans le domaine des grands déplacements, en condition drainée. Le but de cette

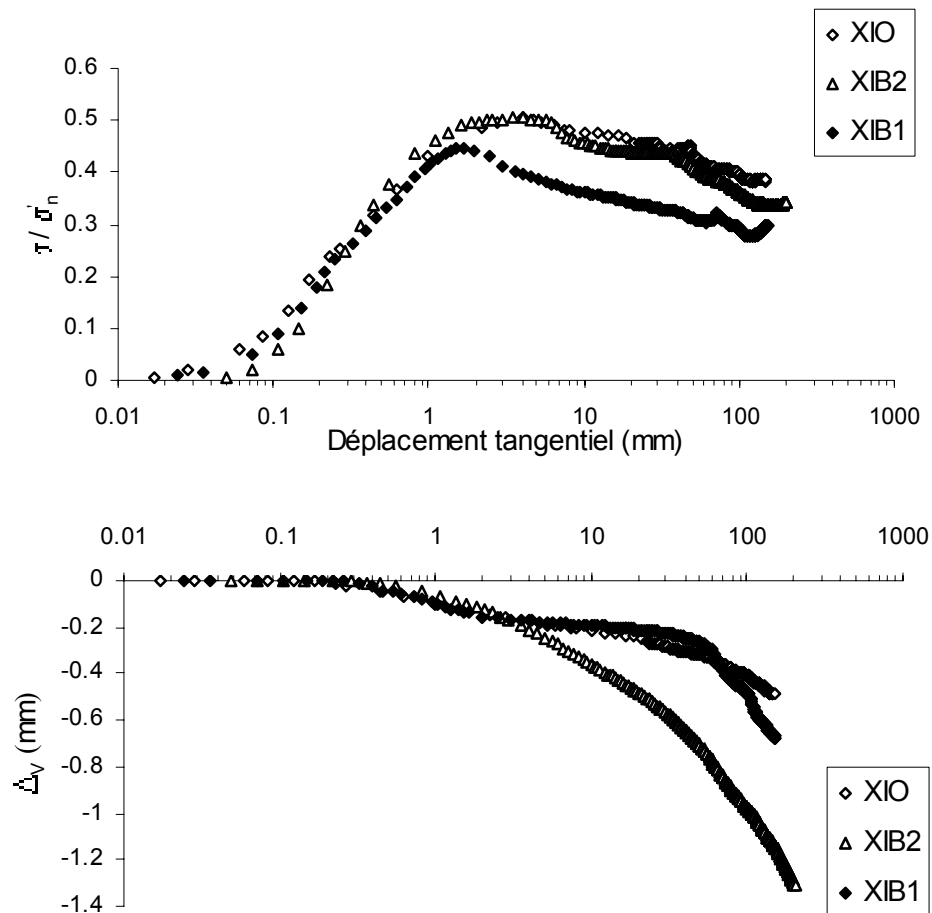
section est d'indiquer une vue réaliste du mécanisme de cisaillement à l'interface sols cohérents-surface solide dans un large domaine de déformation allant du pré-pic au post -pic jusqu'à ce que le plateau des contraintes (état résiduel) soit établi. En plus l'angle de frottement à l'interface approprié opérant, sera clarifié sur la base de résultats obtenus à partir d'essais de cisaillement d'interface dans lesquels le cisaillement de sols contre des interfaces d'acier et béton en grand déplacement a été opéré, tout en mettant l'accent sur l'effet de la rugosité.

### 8.3.1 Echantillons non pré-cisaillés

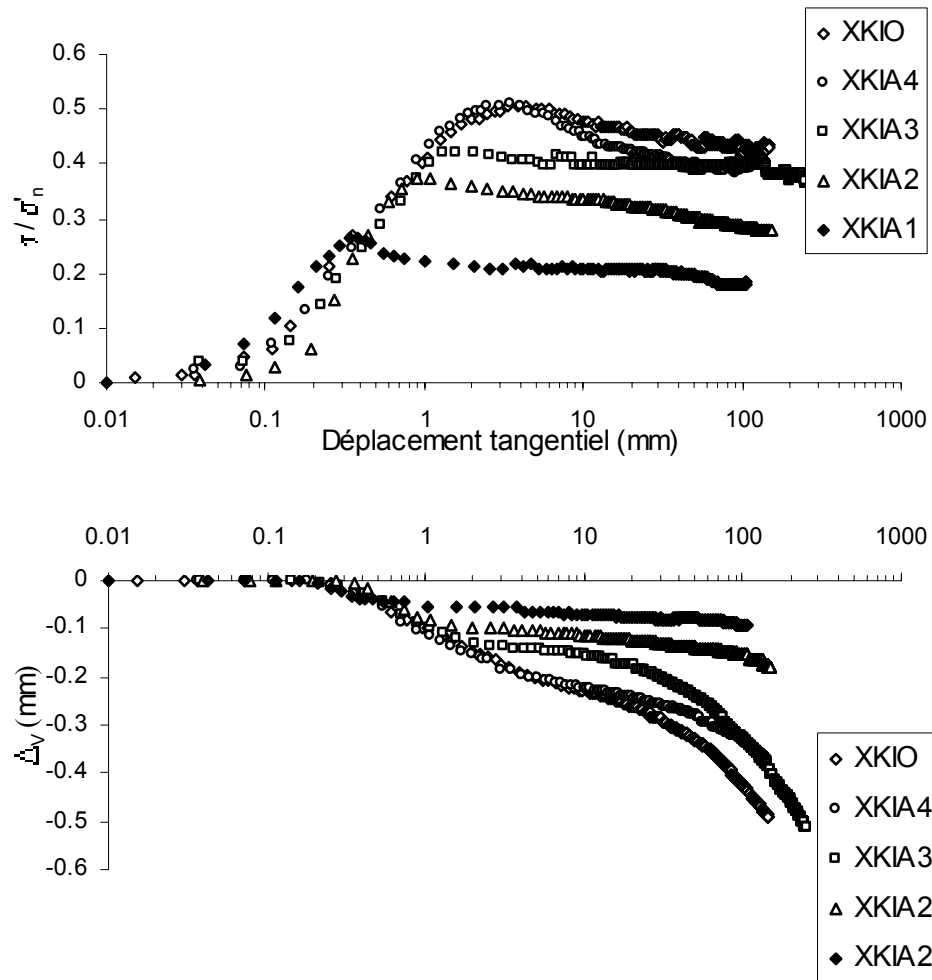


**Figure 8.9(a)** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues dans le cas du limon de Xeuilley dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-acier

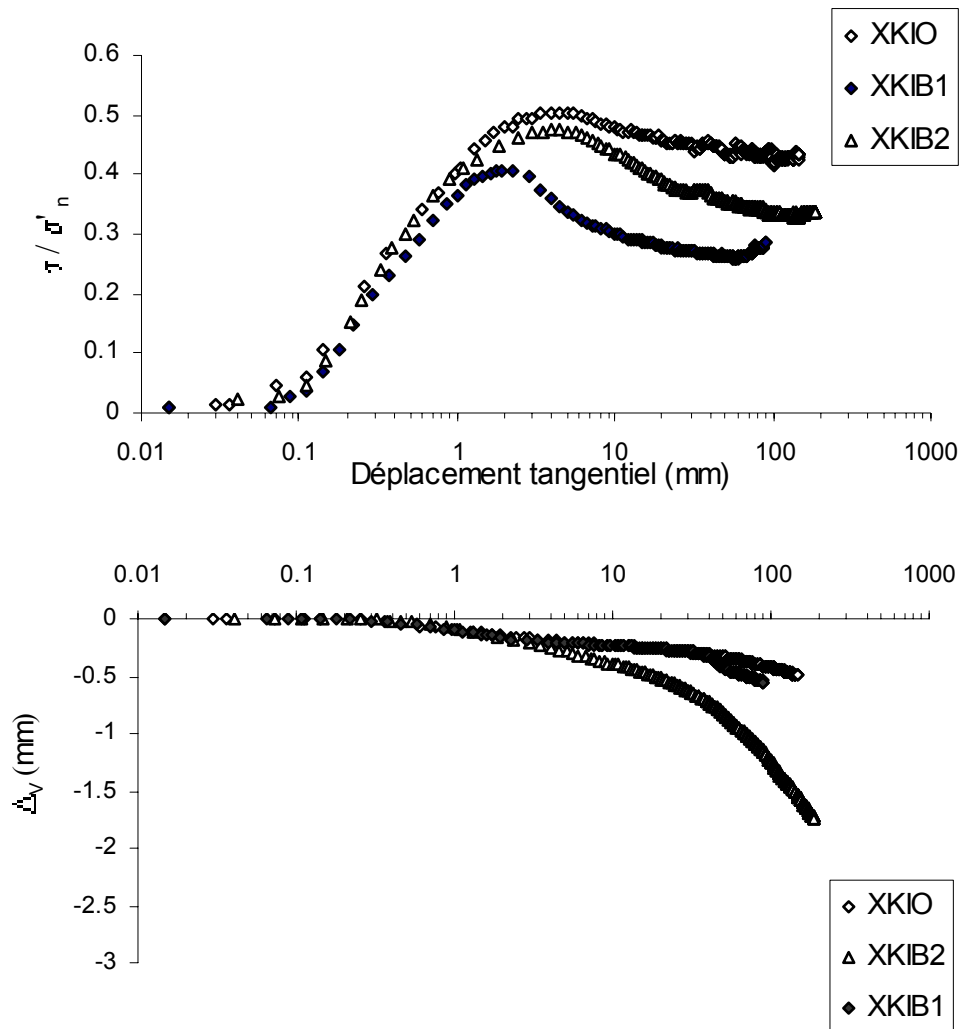
Pour dégager une synthèse générale des essais de cisaillement sol-sol et d'interface concernant la première phase de cisaillement lent, pour un sol donné, les courbes donnant le coefficient de frottement, en fonction du déplacement tangentiel pour chaque type d'interface étudié ont été regroupées ensemble sur le même graphe. Les figures 8.9 à 8.12 montrent les courbes coefficient de frottement - déplacement tangentiel, ainsi que les courbes déplacement normal – déplacements tangentiels obtenus pour des échantillons de sol cisailés contre des interfaces d'acier et de béton.



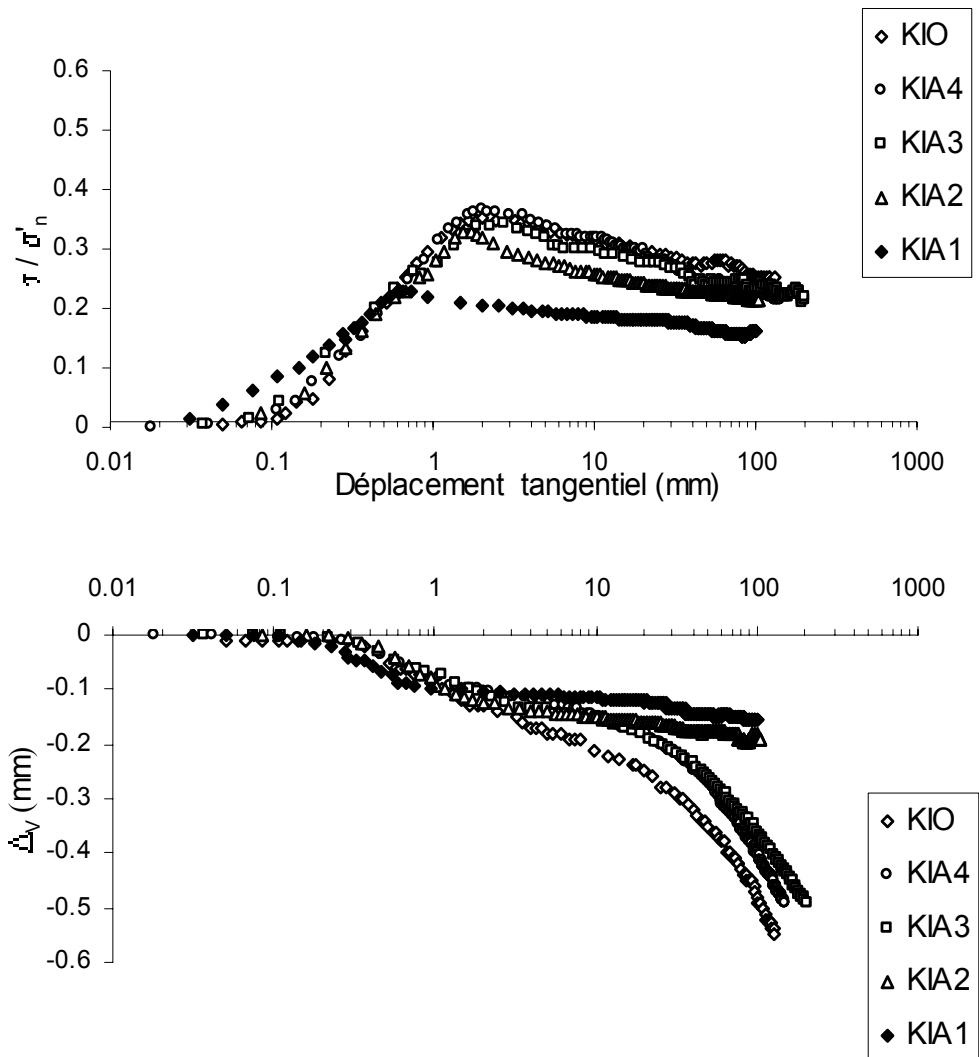
**Figure 8.9(b)** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas du limon de Xeuilley dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-béton



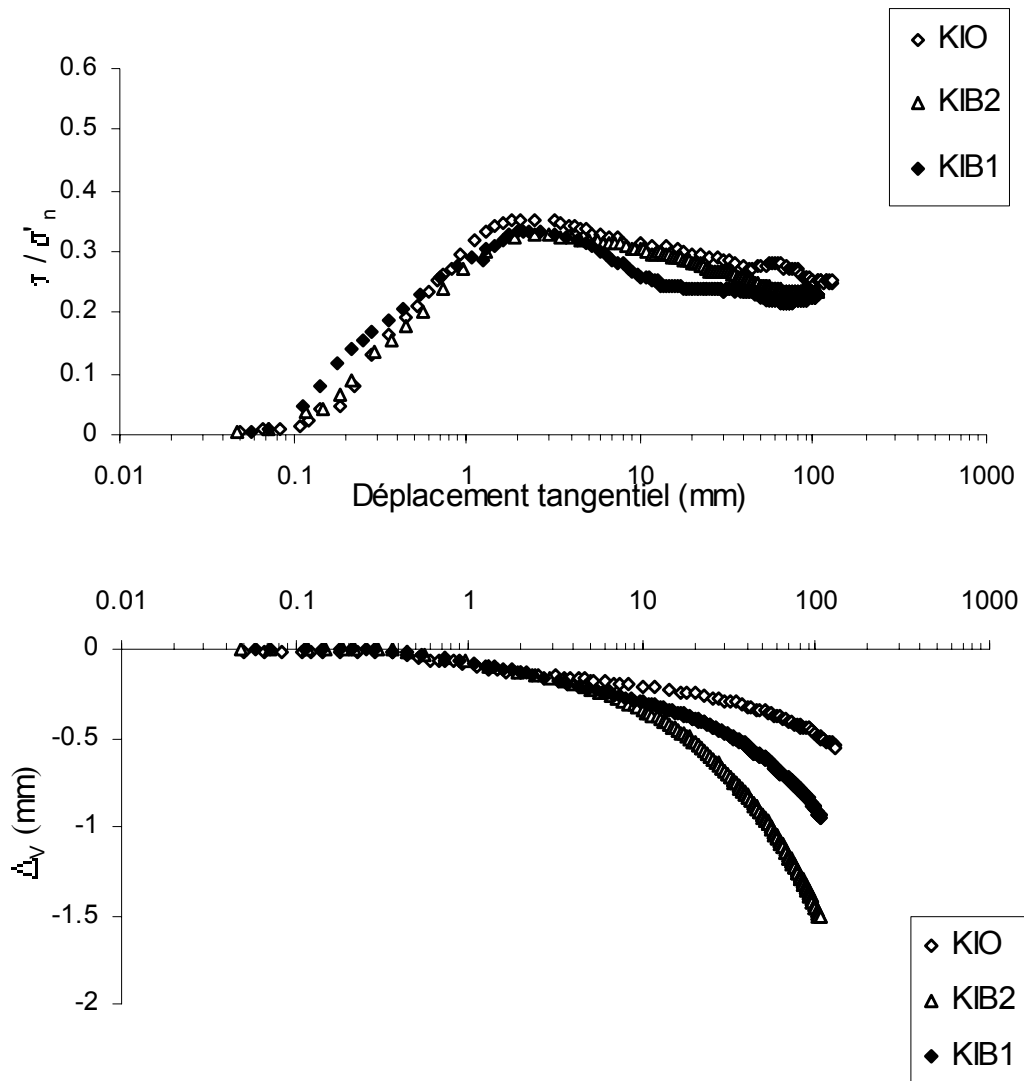
**Figure 8.10(a)** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas du mélange limon de Xeuilley-kaolin dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-acier



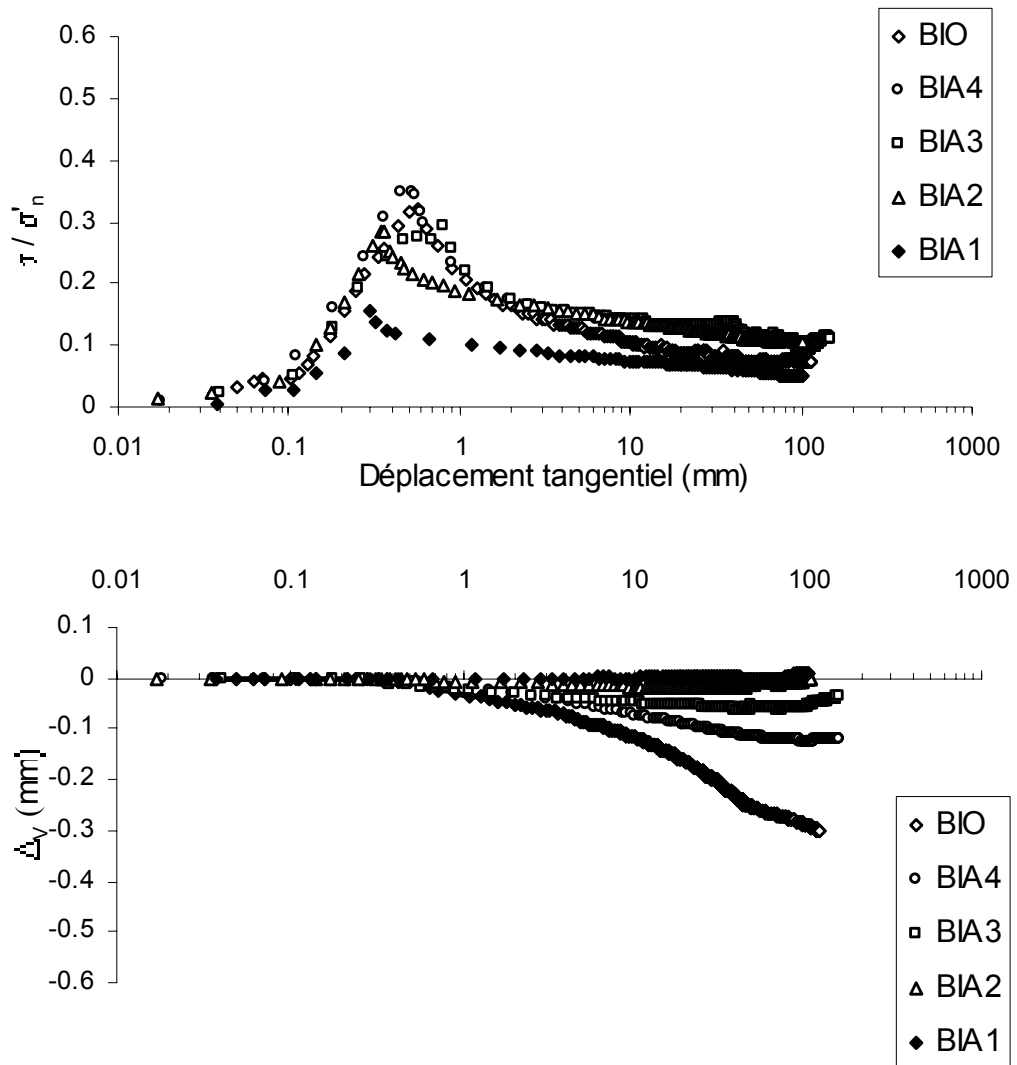
**Figure 8.10(b)** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas du mélange limon de Xeuilley-kaolin dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-béton



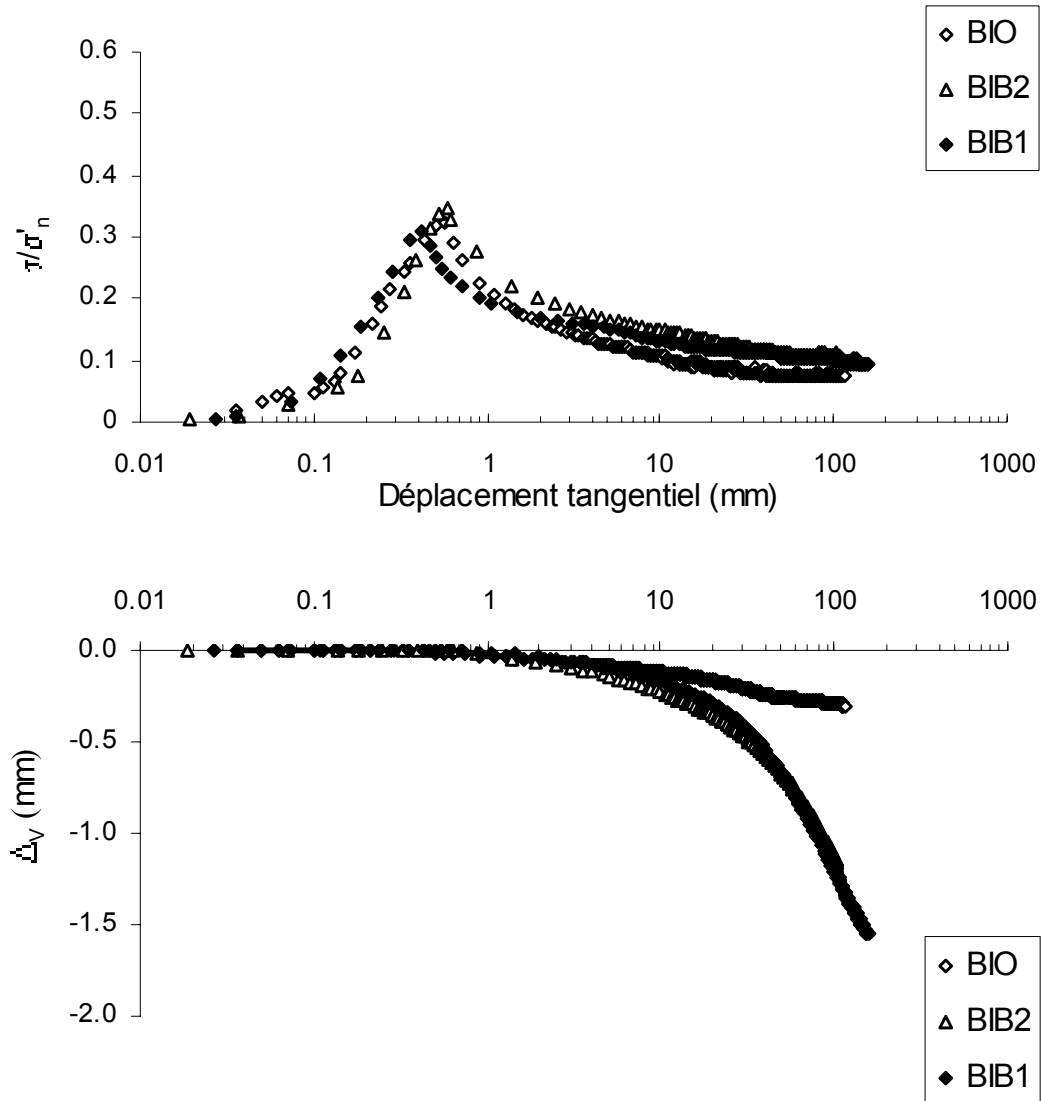
**Figure 8.11(a)** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues dans le cas du kaolin dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-acier



**Figure 8.11(b)** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas du kaolin dans le cas cisaillement sol-sol et sol-béton



**Figure 8.12(a)** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues dans le cas de la bentonite dans le cas cisaillement sol-sol et sol-acier



**Figure 8.12(b)** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues dans le cas de la bentonite dans le cas d'un cisaillement sol-sol et sol-béton

Les courbes contrainte-déformation obtenues à partir des essais d'interface sont similaires à ceux obtenues dans le cas d'essais sol-sol et exhibent également un pic plus ou moins évident, particulièrement pour les essais d'interface à rugosité importante. Ceci indique qu'il y'a eu un comportement post-pic déplacement - ramollissement comparable à celui observé dans le cas d'un cisaillement sol-sol. De ce fait indiquant que le concept de résistance résiduel est applicable au comportement à l'interface sol-matériau solide dans le domaine des grands déplacements. Ce phénomène est attribué à l'importance du réarrangement des particules qui s'est produit. Durant les phases initiales des essais le coefficient de frottement n'est pas significativement affecté par la rugosité de la surface d'acier ou de béton. Au delà de cette phase initiale, cependant, les courbes commencent à diverger, avec les surfaces les plus

rugueuses atteignant des résistances plus élevées. La résistance au cisaillement maximale est pratiquement égale ou légèrement supérieure à celle obtenue dans le cas d'un cisaillement sol-sol pour l'interface la plus rugueuse (IA4) pour laquelle  $R_a$  est égale à  $40,2\mu\text{m}$ . Des valeurs de  $\delta_p'/\phi_p'$  comprises entre 1,01 et 1,10 ont été obtenues. D'après Suba et al (2000) la valeur maximum limite de  $\delta_p'/\phi_p'$  est l'unité pour les surfaces très rugueuses. Cependant cette conclusion a été tirée à la suite d'essais d'interface sols fins-acier avec une rugosité maximum correspondant à  $R_a$  égale à  $13,98\mu\text{m}$ . Cette tendance a été également observé pour les sables par Brumund & Leonrards (1973), dans le cas de surfaces très rugueuses. Pour les autres interfaces, ces valeurs sont inférieures à l'unité et diminuaient avec la rugosité. Pour l'ensemble des sols, la tendance observée est que la résistance au pic augmente avec la rugosité. Ce résultat confirme les observations précédentes d'autres chercheurs. Le déplacement nécessaire pour atteindre la valeur maximale tend aussi à augmenter avec la rugosité. Ceci pourrait être dû au fait que lorsque les interfaces sont plus rugueuses la zone affectée par le cisaillement est plus épaisse et de ce fait plus de travail est nécessaire pour réarranger les particules. Une fois que la résistance au pic est atteinte, les particules commencent soit à glisser le long de l'interface soit à prendre place à l'intérieur des aspérités et ce en fonction de la topographie de la surface.

Dans le domaine des grands déplacements la valeur résiduelle de  $\tau/\sigma_n'$  dépend également de la rugosité de surface du matériau solide. Avec l'augmentation de la rugosité, le coefficient de frottement à l'interface s'approche du coefficient de frottement du sol et est susceptible dans certains cas de le dépasser. Ce qui signifie que lorsque la rugosité augmente, la rupture se produit au sein de la masse de sol au lieu de l'interface. Contrairement à la résistance au pic on n'a pas noté une tendance générale concernant la déformation nécessaire pour l'établissement des conditions résiduelles.

Pour les essais de cisaillement à l'interface entre le kaolin et l'acier ou le béton, les valeurs de  $\tau_r/\sigma_n'$  varient entre 0,216 et 0,235, avec un rapport de  $\delta_r'/\phi_r'$  égale approximativement à 0,9, pour les interfaces rugueuses (c'est à dire IA2, IA3, IA4, IB1 et IB2). Ce qui est inférieure à la valeur sol-sol qui est de 0,250. Il est en de même pour le mélange limon de Xeuilley - kaolin qui semble avoir comme limite supérieure du coefficient de frottement la valeur du mélange. Comme prévu, l'interface d'acier lisse (IA1) donne une valeur nettement inférieure, de 0,158 pour K et 0,178 pour XK. Ainsi pour ces deux sols, la présence d'une interface de rugosité quelconque tend à faciliter le cisaillement glissant en permettant une plus grande orientation des particules argileuses, le long de la surface de glissement.

Les valeurs des coefficients de frottement obtenues pour X et B ont montré que  $\delta_r'/\varphi_r'$  est susceptible d'être supérieur à l'unité, particulièrement dans le cas de la bentonite. Pour cette dernière des valeurs entre 1,3 et 1,4 approximativement ont été obtenues pour les interfaces rugueuses d'acier et de béton. D'autre part pour le limon de Xeuilley des rapports d'environ 1,1 pour les interfaces IA3 et IA4 ont été obtenus. Il est à noter que des résultats semblables ont été obtenus par Tsubakihara & Kishida (1993) concernant des essais de cisaillement réalisés au moyen de la boîte de cisaillement direct sur une argile marine reconstituée, pour des déplacements de l'ordre de 10 mm, particulièrement pour des interfaces dont la valeur de  $R_{max}$  dépasse  $10\mu\text{m}$  ( $L_a = 0,2 \text{ mm}$ ). D'autre part, d'après Rouaiguia (1990), les résistances sol-sol correspondant à des sols fins obtenues au moyen de l'appareil de Bromhead étaient comprises entre les résistances à l'interface argiles - verre et les résistances à l'interface argiles - roche, avec les plus petites valeurs obtenues correspondant au cisaillement contre le verre. Les essais d'interface ont été effectués à l'aide de l'essai de cisaillement direct alterné. On notera que, les résultats reportés dans la littérature ont été obtenus pour des interfaces moins rugueuses comme c'est le cas par exemple des travaux de Lemos & Vaughan (2000) pour lesquels la valeur maximale de  $R_a$  est de  $7 \mu\text{m}$ . Il est intéressant de noter que le limon de Xeuilley et la bentonite ont la particularité d'avoir comme composant minéral majoritaire la montmorillonite, particulièrement pour la bentonite, avec un pourcentage d'environ 80%. Le limon de Xeuilley pour sa part y contient environ 20% alors que le pourcentage de kaolinite est d'environ 4 à 5% seulement. Ainsi ce résultat pourrait être attribué à la minéralogie, au degré de rugosité de l'interface, ainsi qu'au modèle de texture adopté. Les aspérités des anneaux d'acier et de béton s'enfoncent dans les échantillons entraînant la formation de plans de rupture juste à l'extérieur de la face pénétrée du matériau solide. Par conséquent un cisaillement sol-sol résulte. Il est possible d'admettre que dû au fait que les particules de montmorillonite sont très petites, la matrice argileuse adjacente à l'interface à travers une zone plus ou moins épaisse est susceptible d'être entraînée quand des déplacements importants ont lieu, produisant ainsi des coefficients de frottement d'interface supérieurs aux valeurs internes sol-sol. Pour le limon de Xeuilley, parce que le pourcentage de montmorillonite est moins important, il y a seulement une légère augmentation.

D'autre part, dans les essais réalisés avec l'interface IA3, la résistance résiduelle n'est pas stable. Elle augmente lentement, donnant de petits pics secondaires, puis diminue subitement. La même tendance a été observée périodiquement avec l'augmentation du déplacement. Les paliers tendent à s'aplatir progressivement pour des déplacements de plus en plus importants. En conséquence des déplacements plus importants (>250mm) sont nécessaires pour atteindre des conditions stables. Les valeurs moyennes de  $\tau_r'/\sigma_n'$  obtenues

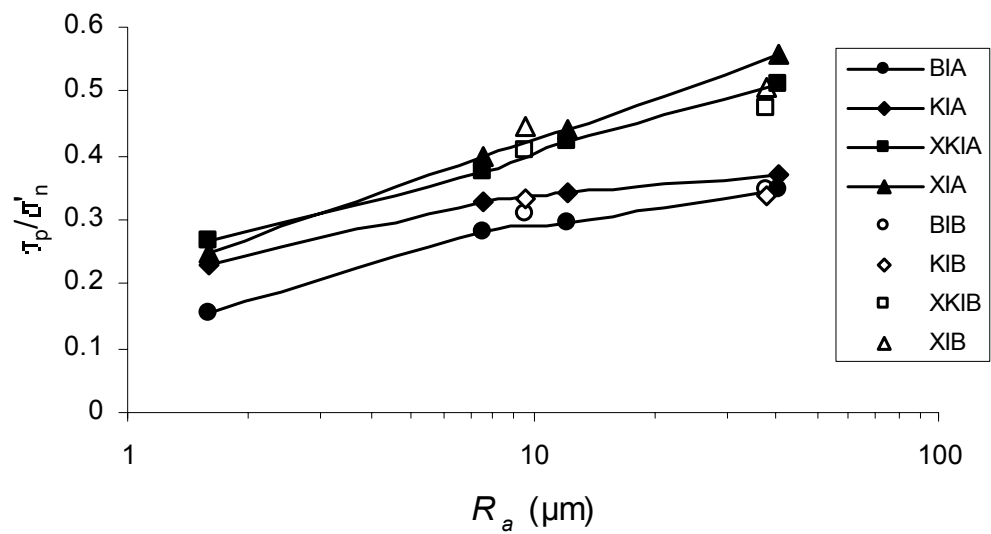
sont cependant plus ou moins équivalentes à ceux mesurées dans le cas de l'interface IA4. Bien que ce comportement s'est produit avec tous les sols étudiés, il est surtout apparent pour le kaolin ou les variations sont plus claires. Ce comportement peut être attribué à un phénomène de glissement saccadé (stick-slip) comparable à celui observé par Yoshimi & Kishida (1981) pour le sables.

Du moment que dans le domaine des grands déplacements, le développement du cisaillement résiduel concernant le sols cohérents est accompagné d'une orientation des particules argileuses, la diminution de la résistance pour des interfaces de plus en plus lisses peut être attribuée au fait que les surfaces les plus lisses permettent aux particules argileuses d'être plus fortement orientées dans la direction de mouvement, que les interfaces plus rugueuses.

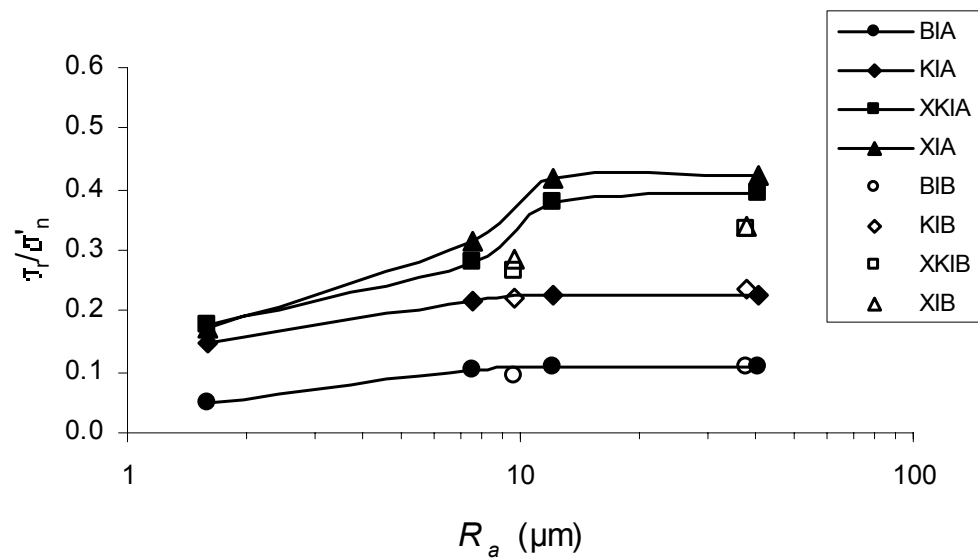
Comme le montrent les courbes déformation vertical – déformation tangentielle, la perte d'échantillon, à partir des anneaux de confinement, durant l'essai n'a pas permis de mesurer avec précision la déformation verticale de l'échantillon. Les mesures effectuées reflètent en même temps la déformation verticale et la perte de sol. Toutefois, on remarque que la déformation verticale, correspondant à la déformation tangentielle au pic ou résiduelle, pour l'ensemble des sols étudiés semble augmenter avec la rugosité de surface, pour un matériau solide donné. Ce qui indiquerait que plus la rugosité de surface est importante, plus le sol est affecté, entraînant ainsi une déformation verticale plus importante.

Le paramètre  $R_a$  indique que la hauteur de l'aspérité contrôle directement la résistance à l'interface. Les variations de  $\tau_p/\sigma_n'$  et  $\tau_r/\sigma_n'$  en fonction de  $R_a$ , qui sont représentées sur la figure 8.13, montrent que le coefficient de frottement augmente avec la rugosité arithmétique moyenne pour l'ensemble des sols étudiés. La tendance à l'augmentation est différente selon le domaine des déplacements considéré. En grands déplacements, on a plus ou moins la même tendance pour K et B. Cependant pour X et XK, dont les courbes ont la même allure, elle est différente. La représentation graphique montre également que la corrélation entre le coefficient d'interface en grand déplacement et  $R_a$  est pratiquement unique pour les argiles étudiées, quelque soit le genre de matériau constituant l'interface (acier ou béton). Néanmoins, ceci n'est pas le cas concernant X et XK, pour lesquels les valeurs obtenues dans le cas des interfaces de béton sont situées en dessous de la courbe de corrélation. D'après Lemos & Vaughan (2000), le matériau d'interface a une influence sur la résistance d'interface en grand déplacement, en particulier s'agissant de l'acier et du verre. Dans le domaine des petits déplacements, il semble également que le type de matériau utilisé n'a pas une influence majeure sur la résistance au cisaillement mobilisé ; ce qui corrobore les résultats obtenus par Esashi et al (1966), concernant trois matériaux de construction (acier, béton et bois) d'une

part et le sable d'autre part ainsi que les résultats présentés par Frost & Han (1999) pour l'acier et un composite de polymère renforcé de fibre. Il est également évident que X et XK donnent des résistances au cisaillement plus importantes dans les deux cas, vraisemblablement en raison de la taille des particules. Ceci est illustré dans la figure 8.14 qui montre une influence sensible du diamètre moyen des particules constituant chaque sol sur la valeur du coefficient de frottement obtenu, dans les conditions correspondant au pic ou l'état résiduel. Les résultats obtenus indiquent clairement qu'il y'a une influence manifeste du diamètre moyen des particules sur le coefficient de frottement lors d'un cisaillement impliquant une interface.

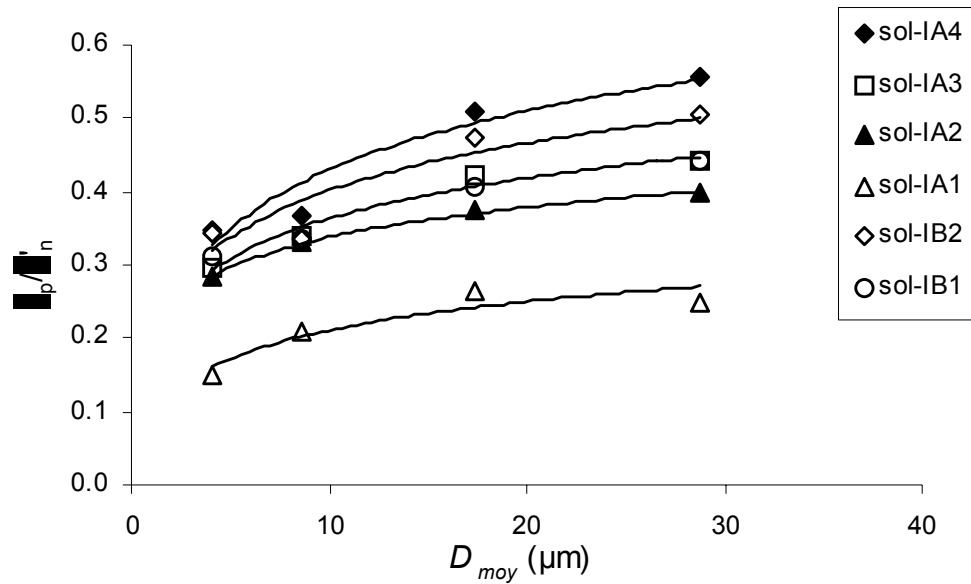


(a)

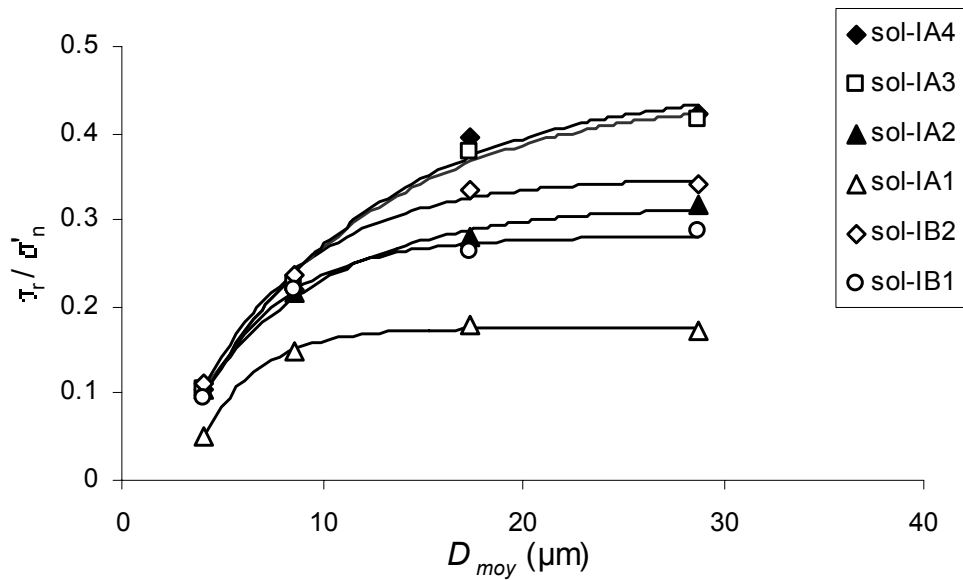


(b)

**Figure 8.13** Relations entre  $\tau/\sigma'_n$  et  $R_a$  ; (a) au pic ; (b) résiduel



(a)

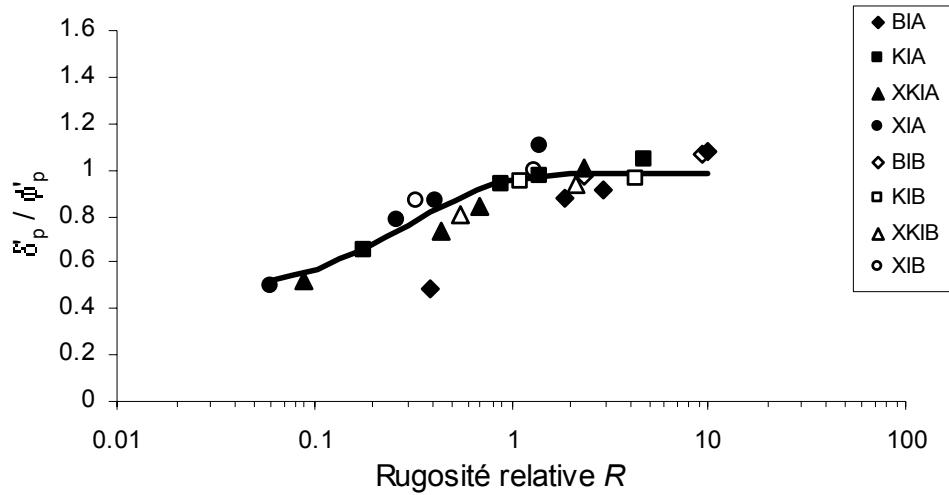


(b)

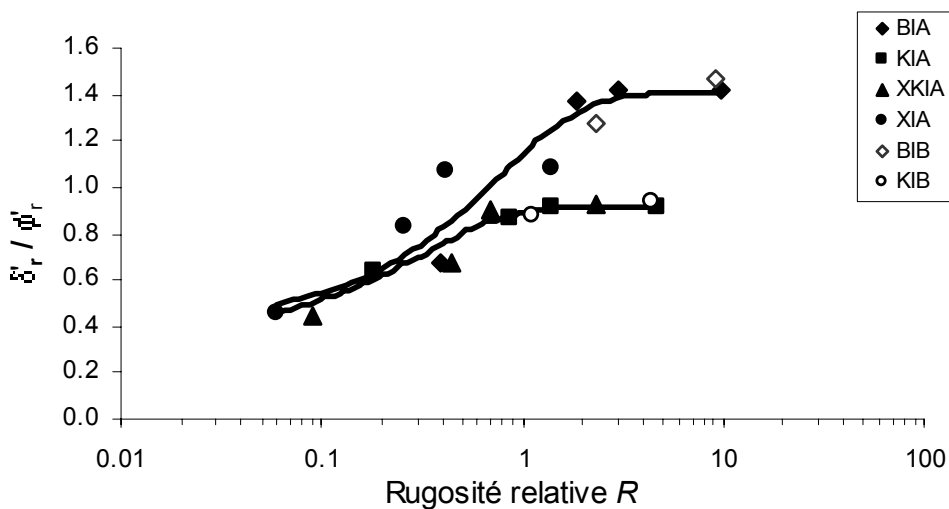
**Figure 8.14** Relations entre  $\tau/\sigma'_n$  et  $D_{moy}$ ; (a) au pic ; (b) résiduel

La figure 8.14 montre que les coefficients de frottement au pic et résiduel entre les sols fins étudiés et l'acier augmente avec  $D_{moy}$ . D'après les courbes de tendance de type logarithmique présentées, il est clair que le coefficient de frottement augmente avec la rugosité. On note également que le domaine de variation du coefficient de frottement diminue avec le diamètre moyen, et ce en petit ou en grand déplacements. L'écart est cependant beaucoup moins important lorsqu'il s'agit de l'état résiduel pour de petits diamètres moyens et les courbes tendent à converger vers un même point. De ce fait indiquant que pour de très petits diamètres moyens la rugosité a une influence minimale et plus le diamètre augmente plus

l'influence est de plus en plus importante. Il y'a lieu de noter aussi que la bentonite formée essentiellement de très petites particules de montmorillonite, dont le diamètre moyen est égale à  $4,08\mu\text{m}$ , a le plus petit coefficient de frottement de pic ou résiduel par rapport au kaolin formé de particules de kaolinite beaucoup plus grande, avec  $D_{\text{moy}} = 8,59 \mu\text{m}$ .



(a)



(b)

**Figure 8.15** Relations entre  $\delta'/\phi'$  et  $R$  ; (a) au pic ; (b) résiduel

Quantifiant la rugosité de surface au moyen de la rugosité relative et normalisant l'angle de frottement d'interface avec l'angle de frottement interne, les résultats sont également explorés dans la figure 8.15 dans laquelle les valeurs de  $\delta'_p / \phi'_p$  et  $\delta'_r / \phi'_r$  sont représentées graphiquement par rapport à  $R$ , qui combine l'influence de  $R_a$  et  $D_{\text{moy}}$  en même temps. Comme illustré, les coefficient de frottement au pic et résiduel augmentent avec la

rugosité relative. Dans le cas de déplacements correspondant à la résistance au pic une seule relation semble convenir. Le rapport  $\delta_p'/\phi_p'$  semble avoir comme limite supérieure l'unité. On note également que la rugosité de surface cesse d'avoir une influence sur l'angle de frottement d'interface, pour des valeurs de  $R$  supérieures à l'unité, autrement dit quand la rugosité  $R_a$  est équivalente au diamètre moyen du sol. Quand il est question de déformations importantes mobilisant la résistance résiduel, par contre, il y'a deux relations distinctes pour des valeurs de  $R$  supérieures à environ 0,3, l'une correspondant à X et B et qui est susceptible de dépasser l'unité, et la seconde correspondant à XK et K dont la limite supérieure est l'unité. On notera que chacune des relations correspond à un type de composant minéral majoritaire : la montmorillonite pour la première et la kaolinite pour la deuxième. Cette distinction est plus claire pour des valeurs de  $R$  supérieures à l'unité. Pour la courbe correspondant à K et XK,  $\delta_r'$  n'est plus influencé par la rugosité quand  $D_{moy}$  est équivalente à  $R_a$  (c'est à dire pour  $R = 1$ ) alors que pour la deuxième courbe, correspondant à B et X, la limite d'influence correspond à  $R = 3$ , approximativement, autrement dit lorsque  $D_{moy} \approx 3 D_{moy}$ .

### 8.3.2 Mécanismes de cisaillement d'interface pour les sols non pré-cisailés

D'après les données expérimentales, trois modes de cisaillement peuvent être recensés dans le domaine des petits et grands déplacements, pour l'ensemble des sols cohérents étudiés, en fonction de la rugosité de surface et du diamètre moyen des particules : un mode dans lequel la rupture par cisaillement a lieu par glissement total à l'interface, un mode dans lequel la rupture a lieu par cisaillement au sein du sol et un mode intermédiaire entre les deux. Ceci est en conformité avec les conclusions tirées par Tsubakihara et al (1993) concernant le frottement à l'interface sols cohérents-acier pour des déplacements atteignant 15 mm.

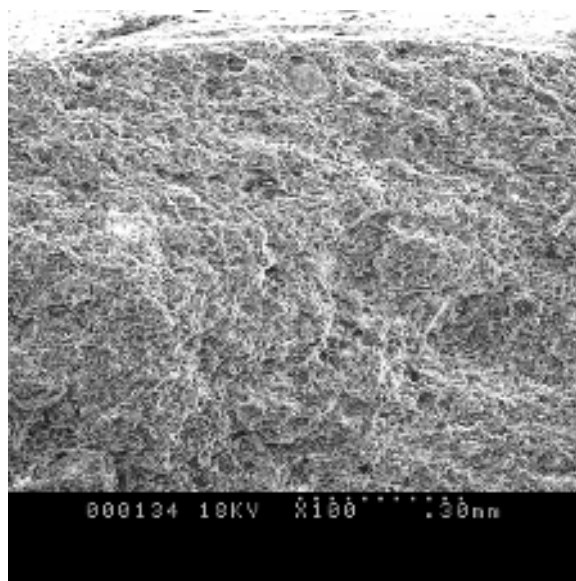
Pour les interfaces lisses la rupture se produit par glissement des particules sur l'interface (mode interfacial). Le coefficient de frottement est alors nettement inférieure à celui obtenu dans le cas d'un cisaillement sol-sol. Pour glisser le long d'une interface, un minimum de travail est nécessaire car le glissement est susceptible de se produire au niveau d'une mince surface sans (presque) aucun re-arrangement des particules au dessous de cette surface. Ce type de comportement a lieu lorsque les déformations au niveau de l'interface sont importantes par rapport à la topographie de surface. Dans le cas de sols comprenant des particules rondes tels que le limon de Xeulley et le mélange limon de Xeulley-kaolin, quelques grains peuvent rester en contact direct avec l'interface et dans la zone d'interface d'autres peuvent éventuellement subir des rotations mais ceci n'est pas considéré comme significatif comparé à la résistance offerte par le glissement au niveau de l'interface. Autrement dit l'interface lisse empêche les particules arrondies d'interférer avec la surface de

cisaillement des particules d'argile qui se forme au niveau de l'interface. Le glissement se produit le long de la surface de contact acier-sol tant que la rugosité est inférieure à une certaine rugosité relative critique égale à environ 0,3. Dans cet intervalle une augmentation de la rugosité augmente légèrement l'angle de frottement à l'interface, qui peut atteindre au maximum des valeurs de  $\delta' = (0,6 - 0,7) \varphi'$ , dans les deux cas de déformations. A partir de la figure 8.15, on peut déduire que les valeurs de  $\delta_p'/\varphi_p'$  et  $\delta_r'/\varphi_r'$  ne tendent pas vers zéro lorsque  $R$  tend vers zéro, et peuvent atteindre des valeurs minimales de 0,3 à 0,4 approximativement. Les interfaces très polies et lisses peuvent promouvoir un cisaillement glissant complet même pour des sols ne contenant pas une forte proportion de particules plates. Les surfaces rencontrées en pratique sont rarement plus lisses que  $R_a = 2\mu\text{m}$  et avec de telles surfaces le cisaillement glissant a lieu pour donner une nette différence entre les valeurs obtenues dans le cas d'un cisaillement sol-sol et un cisaillement à l'interface. On notera également que ce mode se produit pour des interfaces assez dures qui empêcheraient les particules d'y pénétrer. Bien que l'amplitude du frottement d'interface soit moins influencée par des changements dans la dureté, les mécanismes de cisaillement d'interface sont hautement dépendants de la dureté du matériau solide constituant le matériau. Dans les sols cohérents de faible teneur en fraction argileuse pour lesquels le mode de cisaillement résiduel sol-sol est soit le mode turbulent soit le mode transitoire, tel que X et XK, la présence d'une interface lisse est susceptible de promouvoir un cisaillement glissant, comme postulé par Lupini et al (1981).

Une augmentation de la rugosité de surface entraîne directement une augmentation de la résistance au cisaillement car plus d'énergie est nécessaire pour causer une déformation plastique du sol, étant donné que le volume de sol pénétrant les aspérités est plus important et de ce fait résulte en une augmentation dans la surface de contact. Le cisaillement s'opère au sein du sol (mode interne). L'analyse au microscope électronique à balayage conduite sur l'essai XIA4(a), qui est un essai arrêté à la fin du premier cycle de cisaillement, a mis en évidence l'existence d'une bande de cisaillement d'environ 0,3 mm d'épaisseur adjacente à la surface de cisaillement, comme le montre la figure 8.16. Au niveau de cette bande la texture est orientée d'un angle variant entre  $35^\circ$  et  $45^\circ$  approximativement, par rapport à l'horizontale. Enfin, si la rugosité relative est supérieure à une valeur approximative de 1 (pour K et XK) ou 3 (pour B et X), la rugosité n'a alors pratiquement pas d'effet sur le frottement mobilisé. Comme précisé auparavant, les résistances à l'interface dépassant la résistance sol-sol peuvent être dues d'une part à la minéralogie et d'autre part aux effets du degré et de la texture de rugosité (moletage pour l'acier). En effet peu d'attention a été accordé à l'effet du modèle de texture dans les travaux précédents relatifs aux sols cohérents.

Cette dernière est susceptible d'avoir un effet d'entraînement au cours du cisaillement d'une partie de la matrice argileuse adjacente à la surface de cisaillement provoquant ainsi un alignement plus intense.

Le mode intermédiaire correspondrait à des rugosités relative  $R$  dans les plages 0,3 à 1 (en petit déplacement) ou 0,3 à 1 ou 3 (en grand déplacement). Dans ce mode a lieu une nette augmentation du frottement d'interface avec la rugosité. Il est suggéré qu'une mince couche de sol serait susceptible de s'accrocher au matériau solide dans certains endroits provoquant un cisaillement sol-sol et un cisaillement sol-matériau solide dans d'autres. Dans ce dernier cas le glissement à l'interface et la déformation dans le sol se produiraient simultanément.

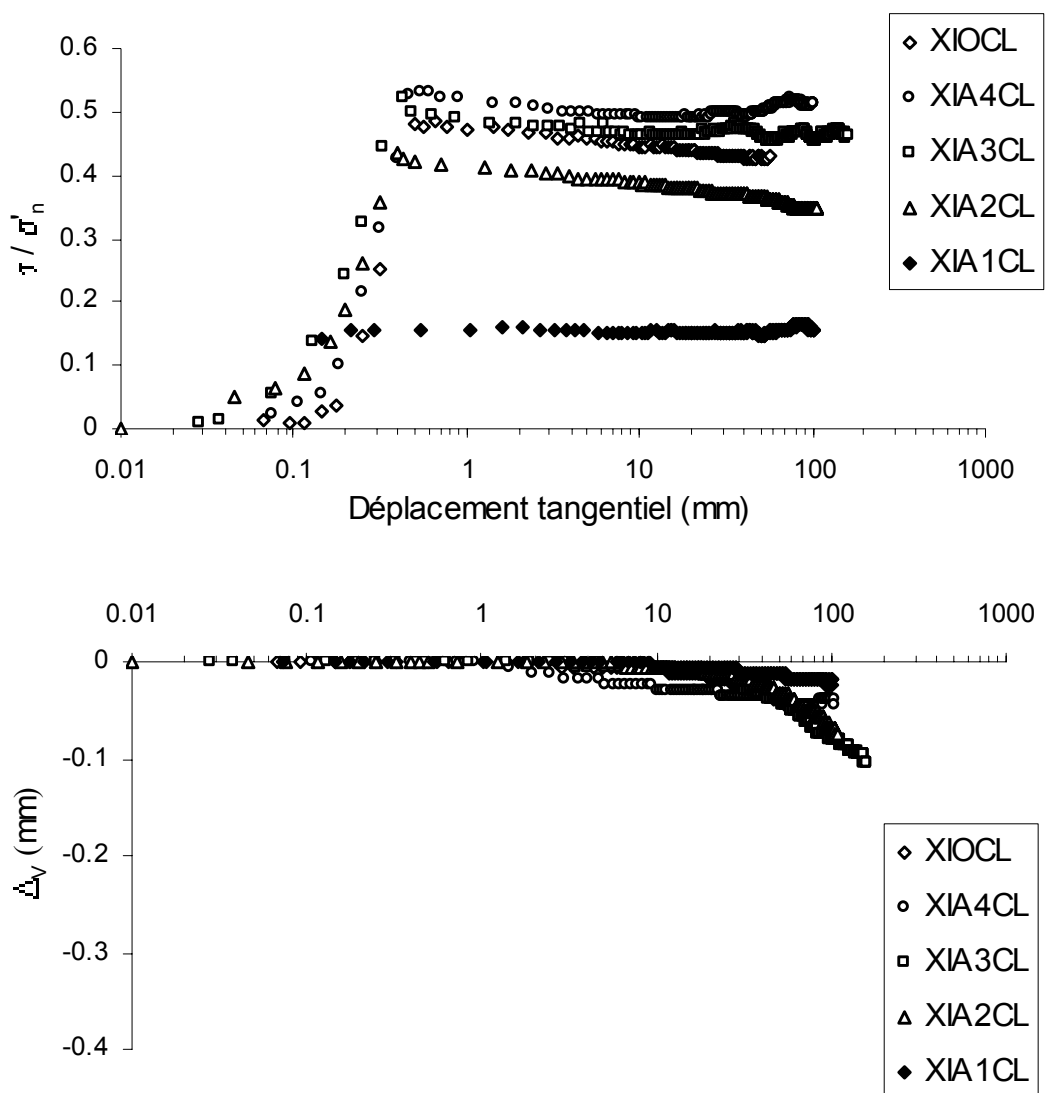


**Figure 8.16** Section à travers X représentant l'aspect général de la partie supérieure de l'échantillon ( Essai XIA4(a) ; Echantillon V – 100X)

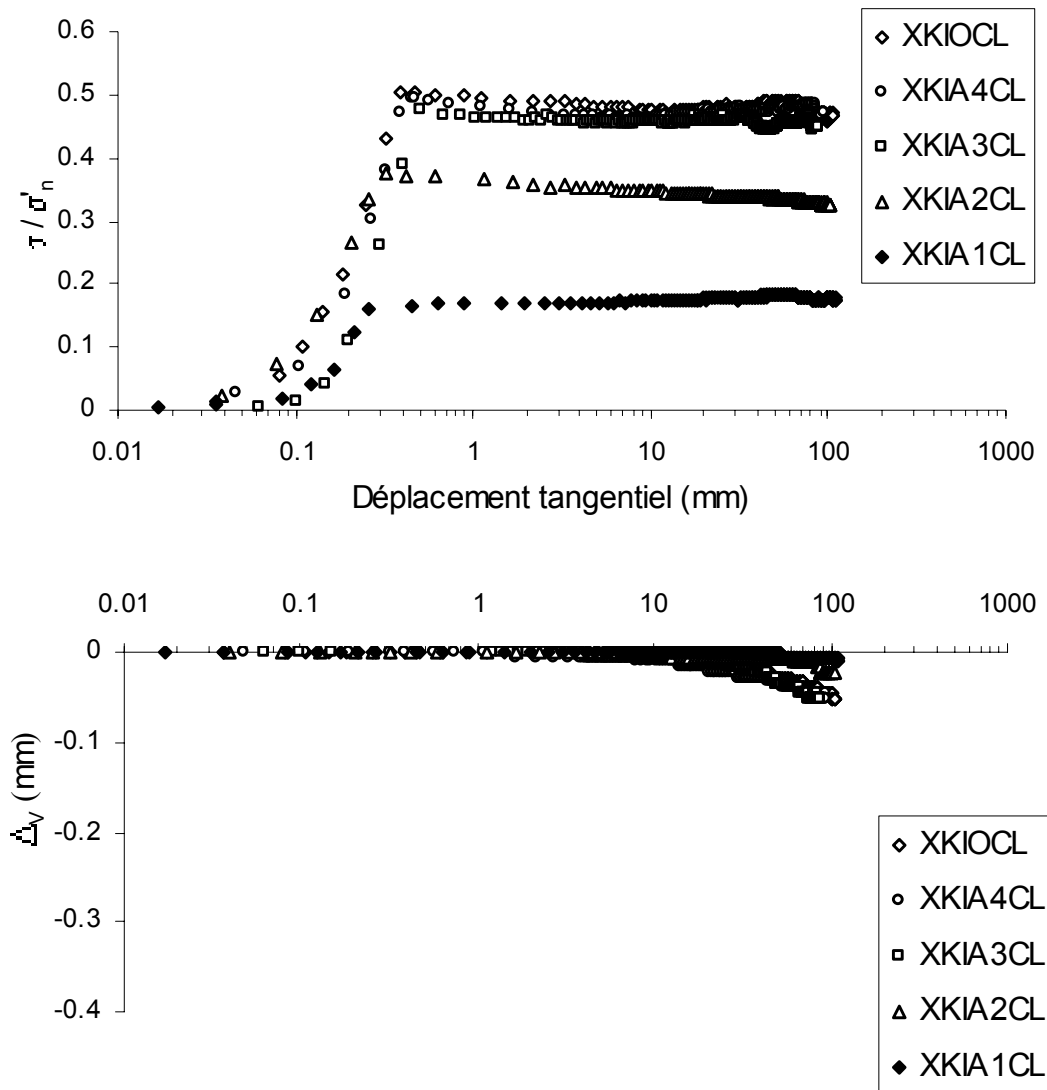
### 8.3.3 Effet du pré-cisaillement

Faire subir à un échantillon, qui a été cisailé auparavant, un cisaillement rapide supplémentaire équivaut aux conditions existant autour d'un pieu où le sol a subis une déformation par suite de l'opération d'installation. Dans le cas des pieux battus, il est établi dans la littérature que les conditions résiduelles sont alors atteintes. En effet en raison de l'opération de battage, un remaniement important se produit (Randolph & Wroth, 1981). A la suite de l'installation, des plans de cisaillement sont susceptibles d'être créés dans le sol adjacent à l'interface pieu-sol. Par conséquent il paraît plus approprié de prendre en considération la valeur " pré-cisailé" de l'angle de frottement interne résiduel. De plus, un petit déplacement supplémentaire peut être suffisant pour établir le nouvel état résiduel sur un échantillon pré-cisailé (Chandler, 1977).

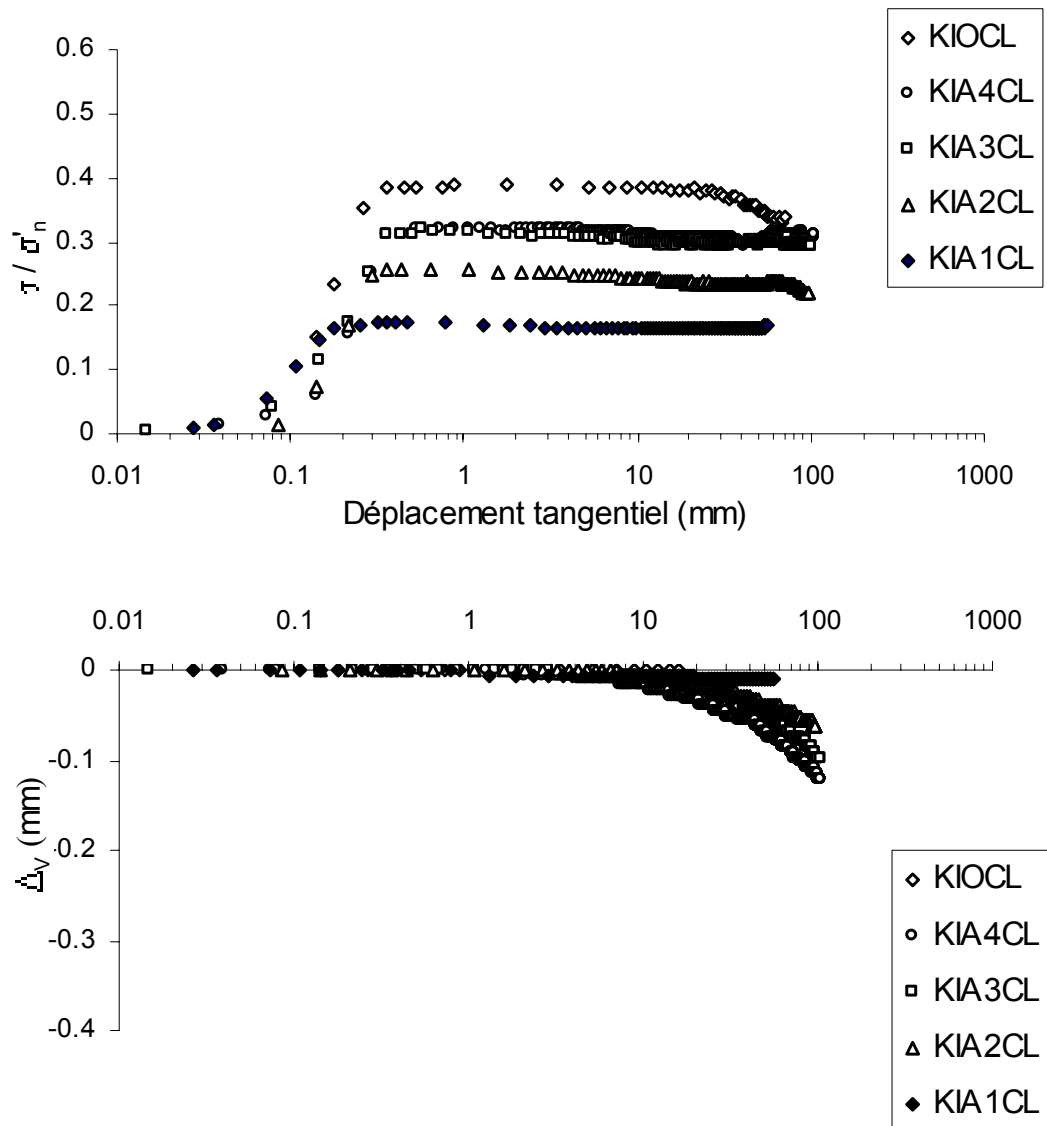
Les courbes obtenues lors de la deuxième phase de cisaillement lent, précédée par une phase de cisaillement rapide, sont présentées dans les figures 8.17 à 8.20. Ces courbes ont des allures différentes et ont montré une fragilité moins importante que celle obtenue précédemment lors de la première phase de cisaillement lent. La chute de résistance après un déplacement relativement faible est alors probablement due à la disparition du faible désordre induit dans la phase de cisaillement rapide précédente, et l'alignement de la zone de cisaillement devient bien défini. En conséquence on n'a pas observé de fragilité signifiante, à l'exception de la bentonite dont les indices de fragilité varient de 25,5 à 56,0 %. Ce qui prouve que pour cette dernière le désordre résultant est plus important.



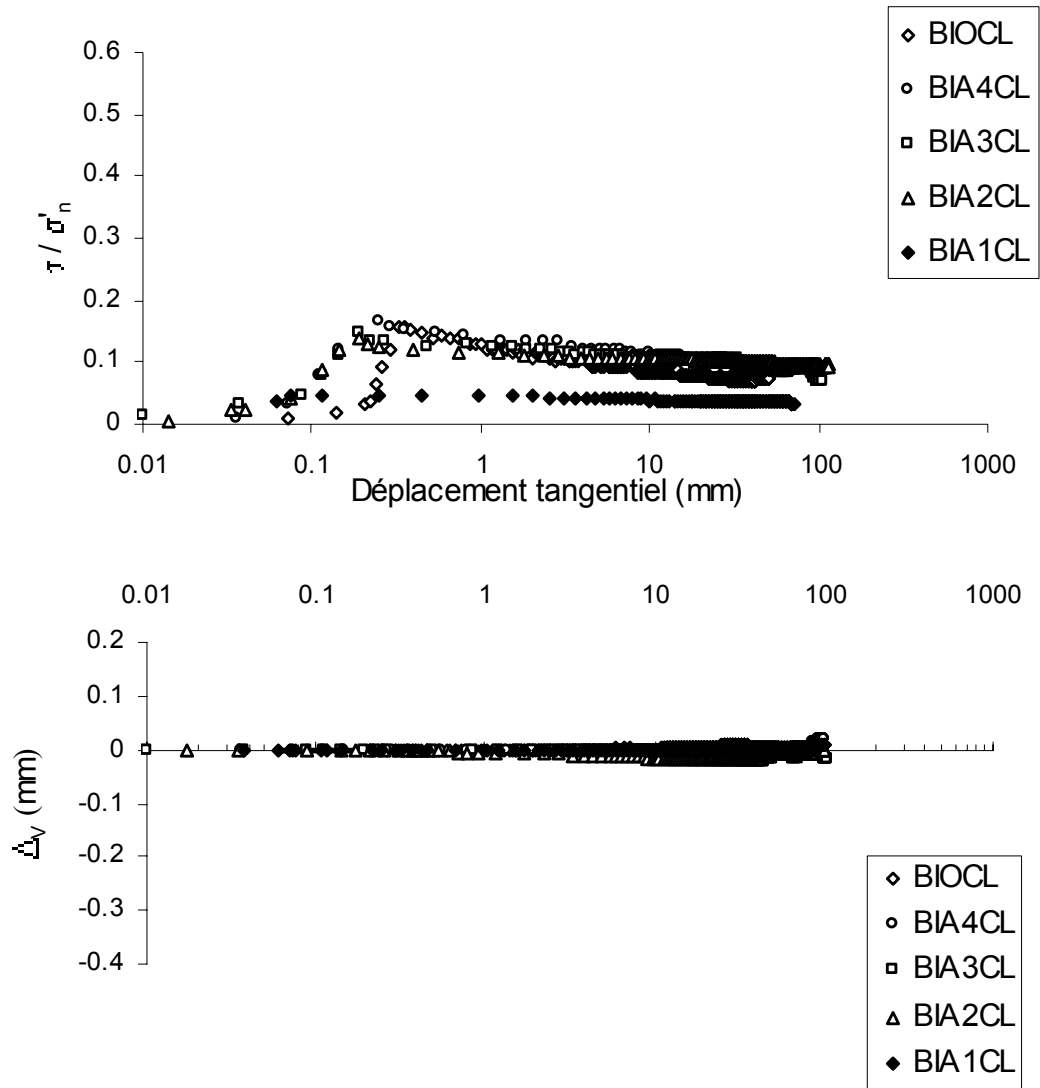
**Figure 8.17** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues dans le cas d'échantillons de limon de Xeuilley pré-cisaillés (cisaillement sol-sol et sol-acier )



**Figure 8.18** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues dans le cas d'échantillons de limon de Xeuilley-kaolin pré-cisaillés (cisaillement sol-sol et sol-acier )



**Figure 8.19** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues dans le cas d'échantillons de kaolin pré-cisaillés (cisaillement sol-sol et sol-acier)



**Figure 8.20** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues dans le cas d'échantillons de bentonite pré-cisaillés (cisaillement sol-sol et sol-acier)

**Tableau 8.5** Comparaison des résultats avant et après pré-cisaillement pour X

Essais	Echantillon non pré-cisailé		Echantillon pré-cisailé		% augmentation ou diminution
	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$ (deg)	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$ (deg)	
XIO & XIOCL	0,386	21,1	0,428	23,2	10,9
XIA4 & XIA4CL	0,422	22,9	0,504	26,7	19,4
XIA3 & XIA3CL	0,417	22,6	0,464	24,9	11,3
XIA2 & XIA2CL	0,317	17,6	0,348	19,2	9,8
XIA1 & XIA1CL	0,172	9,8	0,156	8,9	- 10,2

**Tableau 8.6** Comparaison des résultats avant et après pré-cisaillement pour XK

Essais	Echantillon non pré-cisailé		Echantillon pré-cisailé		% augmentation
	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$ (deg)	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$ (deg)	
XKIO & XKIOCL	0.427	23.1	0.480	25.6	12.4
XKIA4 & XKIA4CL	0.394	21.5	0.476	25.4	20.8
XKIA3 & XKIA3CL	0.378	20.7	0.456	24.5	20.6
XKIA2 & XKIA2CL	0.279	15.6	0.327	18.2	17.2
XKIA1 & XKIA1CL	0.178	10.1	0.178	10.1	0.0

**Tableau 8.7** Comparaison des résultats avant et après pré-cisaillement pour K

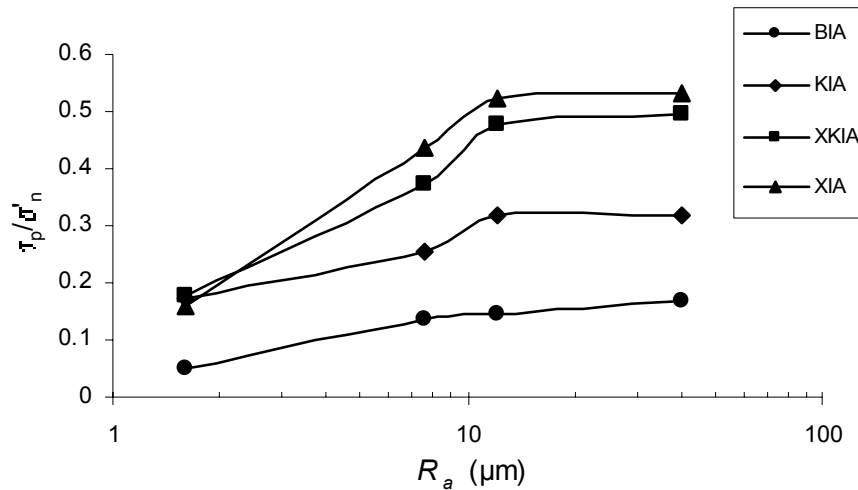
Essais	Echantillon non pré-cisailé		Echantillon pré-cisailé		% augmentation
	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$ (deg)	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$ (deg)	
KIO & KIOCL	0.250	14.0	0.337	18.6	34.8
KIA4 & KIA4CL	0.228	12.4	0.308	17.2	35.1
KIA3 & KIA3CL	0.227	12.8	0.297	16.5	30.8
KIA2 & KIA2CL	0.216	12.2	0.234	13.2	8.33
KIA1 & KIA1CL	0.150	8.5	0.150	8.5	0.0

**Tableau 8.8** Comparaison des résultats avant et après pré-cisaillement pour B

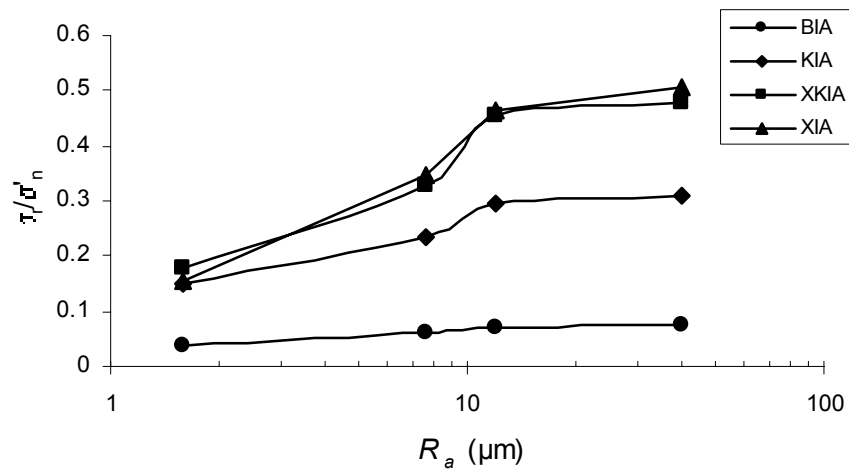
Essais	Echantillon non pré-cisailé		Echantillon pré-cisailé		% diminution
	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$ (deg)	$\tau_r/\sigma_n'$	$\varphi_r'$ ou $\delta_r'$ (deg)	
BIO & BIOCL	0.075	4.3	0.075	4.3	0.0
BIA4 & BIA4CL	0.106	6.1	0.073	4.2	- 31.1
BIA3 & BIA3CL	0.106	6.1	0.070	4.0	-34.0
BIA2 & BIA2CL	0.104	5.9	0.069	3.9	-33.6
BIA1 & BIA1CL	0.051	2.9	0.035	2.0	-31,4

Le mécanisme de rupture résiduelle ne semble pas affecté par la rugosité d'interface et le pré-cisaillement. D'autre part le pré-cisaillement semble avoir un effet sur les valeurs des angles de frottement d'interface résiduel. Dans ce cas les valeurs du rapport de  $\delta_r'/\varphi_r'$  sont inférieures à l'unité sauf pour le limon de Xeuilley pour lequel il est égal à 1,08 et 1,18 pour IA3 et IA4, respectivement. D'autre part, comme indiqué dans les tableaux 8.5 à 8.8 pour les essais d'interface sur K et XK, les angles de frottement d'interface résiduel des échantillons pré-cisailés sont supérieurs à ceux obtenus dans le cas des échantillons qui n'ont pas été cisailés antérieurement (effet positif), avec une tendance à l'augmentation avec la rugosité.

Les essais KIA1CL et XKIA1CL qui ont été performés avec l'interface la plus lisse ont donné une valeur résiduelle égale à celle obtenue pour la première phase de cisaillement lent (effet neutre). L'effet du pré-cisaillement est également évident pour la bentonite. Cependant, cet effet est négatif. En effet les valeurs de  $\tau_r/\sigma'_n$  sont de 31 % à 34 % plus petites que les valeurs obtenues pour des échantillons pré-cisailés. D'autre part, le limon de Xeuilley a montré un autre modèle de comportement avec un effet positif pour les interfaces rugueuses (IA4, IA3, IA2) et un effet négatif pour l'interface lisse (IA1).



(a)



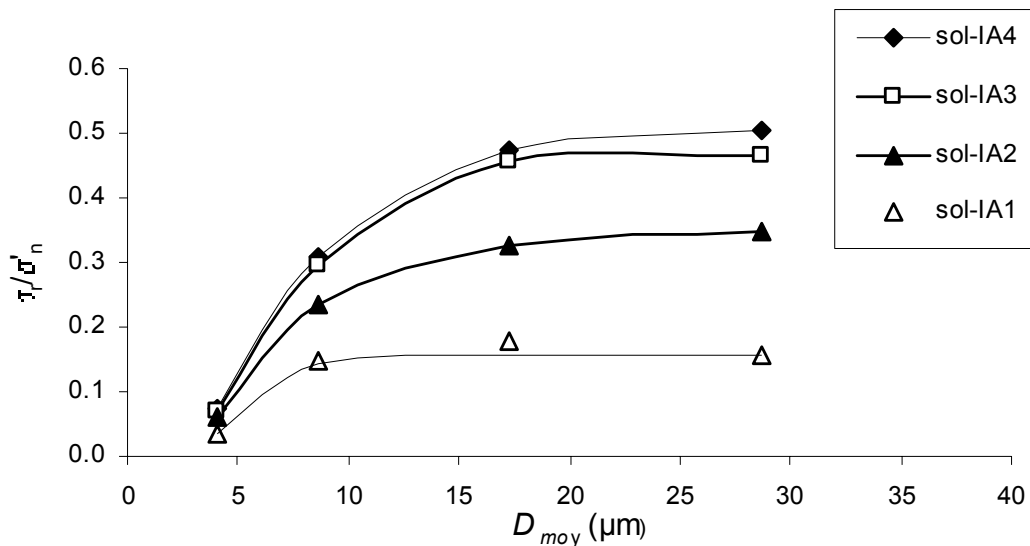
(b)

**Figure 8.21** Relations entre  $\tau/\sigma'_n$  et  $R_a$  pour la deuxième phase de cisaillement ; (a) au pic ; (b) résiduel

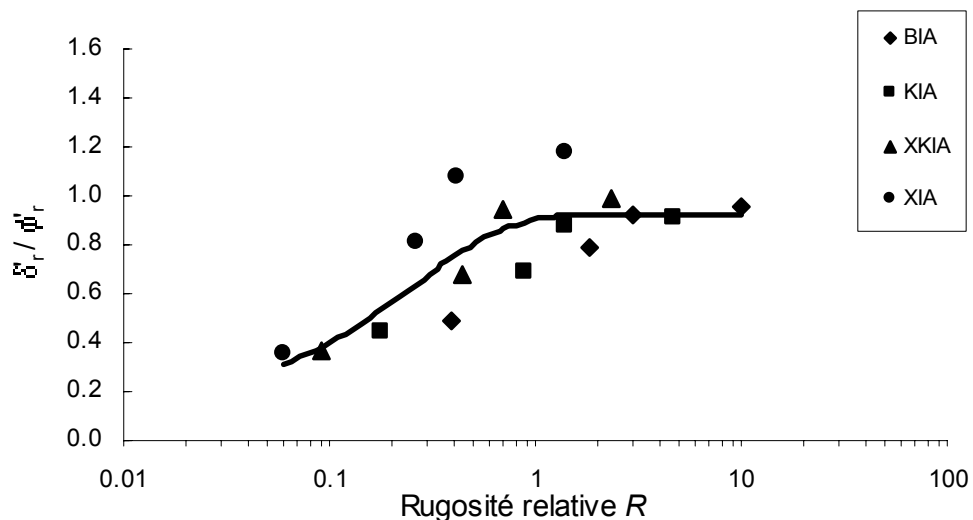
Les résultats obtenus à partir des essais conduits permettent de contribuer à la formulation d'un modèle de sol liant la résistance mobilisée au niveau d'une zone de cisaillement préexistante avec le type de sol et la rugosité de surface du matériau solide. Ce modèle peut être utilisé dans l'étude du frottement latéral des fûts et particulièrement dans la

prédiction de l'angle de frottement d'interface résiduel sol - matériau de construction,  $\delta'_r$ , concernant l'approche basée sur les contraintes effectives.

Les variations de  $\tau_p/\sigma'_n$  et  $\tau_r/\sigma'_n$  en fonction de  $R_a$  pour la deuxième phase de cisaillement lent sont données dans la figure 8.21. A l'instar de la première phase de cisaillement,  $\tau/\sigma'_n$  augmente avec la rugosité avec des tendances similaires. La figure 8.22 montre également une sensible influence de  $D_{moy}$  sur  $\tau_r/\sigma'_n$ . Les résultats sont aussi analysés dans la figure 8.23 qui montre la variation de  $\delta_r/\phi'_r$  avec la rugosité relative  $R$  et indique que le coefficient de frottement résiduel augmente avec la rugosité relative et une seule relation empirique semble convenir aux données relatives aux sols étudiés. On remarque également qu'il n'y a pas d'influence de la rugosité pour des valeurs de  $R$  supérieures à l'unité, c'est à dire pour  $R_a > D_{moy}$ .



**Figure 8.22** Relations entre  $\tau_r/\sigma'_n$  et  $D_{moy}$  pour la deuxième phase de cisaillement lent



**Figure 8.23** Variation de  $\delta_r/\phi'_r$  en fonction de  $R$  pour les échantillons pré-cisaillés

### 8.3.4 Mécanismes de cisaillement d'interface pour les sols pré-cisaillés

Les observations effectuées et les résultats obtenus supportent également l'hypothèse que des changements significatifs ont lieu dans le mécanisme de cisaillement à l'interface en grands déplacements. De plus, une interprétation physique faisant appel à des considérations microscopiques a été proposée. Cette interprétation s'appuie essentiellement sur l'évolution de la texture en fonction de la rugosité et conforte le fait qu'il y'a également trois modes de cisaillement à l'interface pour les sols pré-cisaillés, à l'instar des sols n'ayant pas subi de cisaillement antérieur, à savoir :

- un mode interfacial
- un mode interne
- un mode intermédiaire

L'analyse de la microstructure, présentée au chapitre précédent, concernant des échantillons pré-cisaillés de limon de Xeuilley, de mélange limon de Xeuilley-kaolin et de kaolin, a confirmé l'existence de ces trois modes.

Concernant le premier mode pour lequel un glissement intégral a lieu pour des interfaces lisses, le frottement à l'interface est généré exclusivement par le glissement aux contacts particules – matériau solide. Le déplacement horizontal des particules en contact avec l'interface est alors théoriquement proche de 0% du déplacement. Les particules forment dans ce cas des jonctions plus ou moins continues à travers les pics des aspérités des surfaces topographiques. Ceci entraîne une interaction de type Coulomb, des particules avec la surface du matériau solide. Si cette interaction n'est pas significative dans le cas de particules arrondies, elle est susceptible d'être plus importante dans le cas de plaquettes argileuses. Le glissement est confiné à l'interface et seules les particules proches de la surface d'interface sont impliquées dans l'interaction entre le sol et l'interface. Il en résulte qu'une mince surface de cisaillement de particules plates orientées se développe et la contribution due à la structure de l'ensemble de l'échantillon est négligeable. Les observations visuelles ainsi que les microanalyses au MEB (voir Figures 7.18 à 7.20 pour X, Figures 7.34 à 7.37 pour XK et Figures 7.48 à 7.50 pour K) , ont montré que pour les essais conduits en utilisant l'interface IA1, la structure des sols étudiés ne s'est pas déformée notablement, bien que les échantillons ont subi trois cycles de cisaillement et des déplacements horizontaux importants. Dans ces conditions, le glissement à l'interface sol – acier est le seul mécanisme de cisaillement. Ce mode tend à se produire pour des valeurs de  $R$  inférieure à environ 0,3 également. Dans cet intervalle une augmentation de la rugosité entraîne une augmentation de l'angle de frottement résiduel à l'interface, qui peut atteindre des valeurs de  $\delta_r' = (0,4 - 0,5)\varphi_r'$ . On peut également déduire que les valeurs de  $\delta_p'/\varphi_p'$  tendent vers une valeur minimale d'environ 0,2 lorsque  $R$

tend vers zéro.

Quand la rugosité de l'interface augmente et dépasse une valeur de la rugosité relative égale à l'unité approximativement, le déplacement horizontal des particules en contact avec l'interface est théoriquement de 100% du déplacement en cas d'enfoncement des particules dans la surface du matériau solide et de cisaillement sans glissement au sein du sol, comme illustré sur la figure 7.13. Le déplacement tangentiel dû au cisaillement produit alors une déformation permanente d'une zone de cisaillement de la matrice argileuse, ou bande de cisaillement, adjacente à l'interface d'acier. Une augmentation de la rugosité de surface entraîne directement une augmentation de la résistance au cisaillement car plus d'énergie est nécessaire pour causer une déformation plastique du sol, étant donné que le volume de sol pénétrant les aspérités est plus important et de ce fait résulte en une augmentation dans la surface de contact. Pour un sol donné, l'augmentation de la rugosité n'a alors pratiquement pas d'effet sur le frottement mobilisé. Dans ce mode, de plus en plus de particules (non limitées aux particules près de la surface d'interface) dans l'échantillon tendent à être impliqués dans le processus de cisaillement, et l'effet de la structure peut être plus significatif. Toutefois quelque soit l'importance de la rugosité, l'épaisseur de la zone de cisaillement reste limitée à une partie de l'épaisseur de l'échantillon. En plus du degré de rugosité de la surface d'interface, une augmentation de la contrainte normale pourrait avoir pour effet une diminution de l'épaisseur de la bande de cisaillement entraînant une plus grande difficulté dans le cisaillement à l'interface et donc confiné dans une zone plus localisée.

Les observations visuelles effectuées à la fin de la troisième phase de cisaillement lent, ont permis de constater que les échantillons obtenus, particulièrement X et XK, ont tendance à se séparer à travers une surface de cisaillement bien définie, formée au sein du sol, loin du contact acier-sol (quelques microns approximativement). D'autre part, l'étude microstructurale a montré que les échantillons obtenus à partir d'essais d'interface conduits particulièrement avec l'interface IA4 présentaient sur une certaine distance (entre 0,5 mm et 0,9 mm, soit environ le tiers de l'épaisseur de l'échantillon) par rapport à l'interface, un alignement de la matrice argileuse suivant une orientation synthétique au sens du cisaillement avec un angle moyen d'environ  $30^\circ$  par rapport à l'horizontale (voir Figures 7.10, 7.26 et 7.40). Pour l'interface IA3 (Figure 7.14), le limon de Xeuilley a montré un faible degré d'alignement (environ  $60^\circ$  par rapport à l'horizontale) sur une hauteur égale au tiers de l'épaisseur totale. Concernant XK, on a noté une orientation sur une zone plus petite correspondant au quart de l'épaisseur de l'échantillon (Figure 7.30). Le kaolin a présenté une zone de cisaillement hétérogène (Figure 7.43), du point de vue angle d'orientation de la matrice argileuse (compris entre  $35^\circ$  et  $55^\circ$ ). Au dessous de la zone de cisaillement, la texture

a une orientation plus ou moins aléatoire et ne semble pas avoir été affecté par le processus de cisaillement.

Dans le mode intermédiaire qui se produit pour des valeurs de  $R$  dans le domaine 0,3 à 1, il y'a une nette augmentation du frottement d'interface avec la rugosité. Il est suggéré qu'une partie du sol adhère au matériau solide et de ce fait un glissement partiel à l'interface et un cisaillement au sein du sol ont lieu simultanément. Dans ce mode le cisaillement semble confiné au niveau de l'interface et il n'y a pas évidence de formation d'une zone de cisaillement dans laquelle l'orientation de la matrice argileuse se produit, comme on peut le voir sur les figures 7.16 pour X, 7.30 pour XK et 7.46 pour K.

#### 8.4 Discussion sur l'indice de fragilité

L'indice de fragilité a été défini initialement par Bishop (1967) comme suit :

$$I_f = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \quad (8.1)$$

Où

$\tau_p$  : Résistance au cisaillement à la rupture (pic)

$\tau_r$  : Résistance au cisaillement résiduelle

Si un sol fin est fragile, la chute de résistance post-pic sera prononcée, le rapport entre la résistance de pic et la résistance résiduelle indiquant le degré de fragilité du sol. L'indice de fragilité dépend essentiellement de trois facteurs :

- a) la dilatance accompagnant la rupture
- b) la réorientation des particules d'argile adjacentes à la surface de glissement
- c) les liaisons de cimentation entre particules et groupes de particules.

Tous les essais ont été conduits sur des échantillons normalement consolidés, les liaisons de cimentation seront largement détruites par le remaniement et la dilatance sera absente. En conséquence la fragilité des sols fins remaniés est attribuée entièrement à la réorientation des particules d'argile plates.

Les indices de fragilité du programme principal d'essais sont reportés aux tableaux 8.9 et 8.10. Pour les sols dont les teneurs en particules argileuses sont relativement faibles (c'est à dire X et XK), les plus grandes valeurs des indices de fragilité ont été obtenues lors du cisaillement contre les interfaces les plus lisses d'acier et de béton (IA1 et IB1). Cependant pour le kaolin, la plus grande valeur de  $I_f$  correspond au cisaillement contre l'interface d'acier la plus rugueuse (IA4) et les valeurs, pour l'ensemble des essais, varient entre 28,6% et 38%. Alors que pour la bentonite la plus grande valeur correspond au cisaillement sol-sol et les

valeurs de  $I_f$  sont dans le domaine 63,2 – 76,7%. Pour les deux derniers sols cités, la rugosité de surface ne semble pas avoir d'effet sur la fragilité.

Une raison possible pour justifier que l'indice de fragilité dépend essentiellement de la réorientation des particules d'argile plates est que des valeurs faible ont été obtenues pour le limon de Xeuilley et le mélange limon de Xeuilley-Kaolin qui sont caractérisés par une teneur en particules argileuses assez faible (22% et 34% respectivement). Pour ces derniers, le degré d'orientation semble augmenter dans le cas d'un cisaillement contre une interface lisse. Ceci peut s'expliquer par le fait que les particules d'argile qui sont associées sous forme d'aggloméré, ont tendance à se dissocier au cours d'un essai de cisaillement. Ceci aurait pour conséquence une augmentation de l'orientation des particules argileuses.

**Tableau 8.9** Indices de fragilité pour la première phase de cisaillement lent

Essai	$I_f$ (%)	Essai	$I_f$ (%)	Essai	$I_f$ (%)	Essai	$I_f$ (%)
XIO	24,0	XKIO	15,4	KIO	28,8	BIO	76,7
XIA4	24,2	XKIA4	22,7	KIA4	38,0	BIA4	69,6
XIA3	5,4	XKIA3	10,4	KIA3	33,4	BIA3	64,1
XIA2	20,1	XKIA2	25,4	KIA2	34,5	BIA2	63,2
XIA1	31,2	XKIA1	33,1	KIA1	28,6	BIA1	66,0
XIB2	30,4	XKIB2	29,5	KIB2	30,1	BCI2	68,1
XIB1	35,4	XKIB1	35,1	KIB1	33,8	BCI1	69,4

**Tableau 8.10** Indices de fragilité pour la deuxième phase de cisaillement lent

Essai	$I_f$ (%)	Essai	$I_f$ (%)	Essai	$I_f$ (%)	Essai	$I_f$ (%)
XIOCL	11,6	XKIOCL	4,8	KIOCL	13,1	BIOCL	51,3
XIA4CL	5,4	XKIA4CL	4,0	KIA4CL	3,7	BIA4CL	56,0
XIA3CL	11,4	XKIA3CL	4,6	KIA3CL	7,2	BIA3CL	52,4
XIA2CL	20,4	XKIA2CL	12,8	KIA2CL	8,6	BIA2CL	31,9
XIA1CL	0,0	XKIA1CL	0,0	KIA1CL	13,7	BIA1CL	25,5

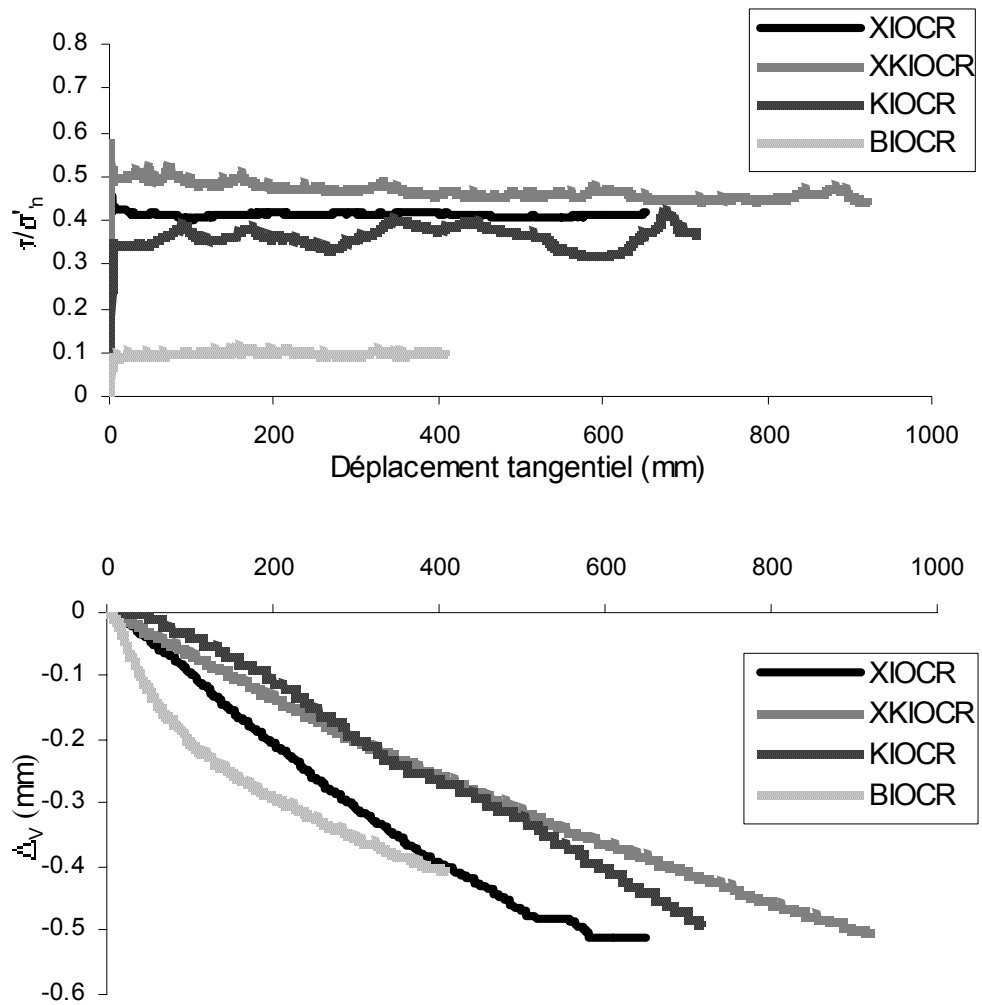
## 8.5 Comportement de cisaillement de zones pré-existantes sous chargement rapide

Pour les essais de cisaillement sur les sols cohérents à grandes vitesses, la complexité des essais, la diversité des résultats selon les auteurs, montrent la difficulté du sujet. L'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead permet d'étudier une plage de vitesses de déplacement entre 0,0178 mm/mn et 44,52 mm/mn. Pour mettre en évidence l'influence de la vitesse, on s'est limité à l'étude de son effet sur le comportement des sols en utilisant un cisaillement non drainé rapide à une vitesse de 44,52 mm/mn, qui succède à la première phase de cisaillement lent (0,0356 mm/mn). On rappelle que cette dernière vitesse correspond à une vitesse lente alors qu'une vitesse de 44,52 mm/mn correspond à une vitesse rapide sur l'échelle des vitesses de mouvement de Varnes (1978). L'application de cycles de vitesse à un même échantillon permet de s'affranchir des différences de préparation d'un échantillon à l'autre. L'objectif de ces essais en cisaillement rapide est de définir l'effet de l'augmentation de la vitesse sur la résistance résiduelle des sols de la première phase de cisaillement.

### - Cisaillement rapide sol-sol

Les zones de cisaillement pré-existantes ayant atteint ou étant proches de la résistance résiduelle sont fréquemment présentes dans les sols à cause de mouvements antérieurs causés par les glissements de terrains ou les forces tectoniques. La connaissance de la résistance de telles surfaces sous chargement rapide est nécessaire si la stabilité durant et après un séisme doit être examinée.

Les résultats obtenus sont regroupés sur la figure 8.24. Les quatre types de sol mis à l'essai ont montré un effet positif. C'est à dire que les valeurs du coefficient de frottement résiduel sont supérieures à ceux obtenues dans le cas de la première phase de cisaillement. Les sols X et XK ont montré tout d'abord une augmentation immédiate de la résistance qui équivaut au pic de résistance, mais qui est toutefois inférieure au pic de la première phase de cisaillement. Puis on a enregistré une diminution de la résistance au cisaillement avec le déplacement, qui tend à se stabiliser pour un minimum supérieur à la résistance résiduelle lente. Ce minimum qui représente l'état résiduel rapide est plus ou moins bien défini, particulièrement pour le limon de Xeuilley. D'autre part les sols composés essentiellement de particules d'argile, c'est à dire le kaolin et la bentonite, ont montré un comportement différent des échantillons précédents et n'ont pas présenté des pics de résistance évidents. A l'instar du cisaillement lent du premier et troisième cycle le mélange XK a donné la plus grande résistance et B la plus petite, de ce fait confirmant l'effet de la minéralogie aussi bien pour le cisaillement lent que pour le cisaillement rapide.



**Figure 8.24** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues en cisaillement rapide sol-sol

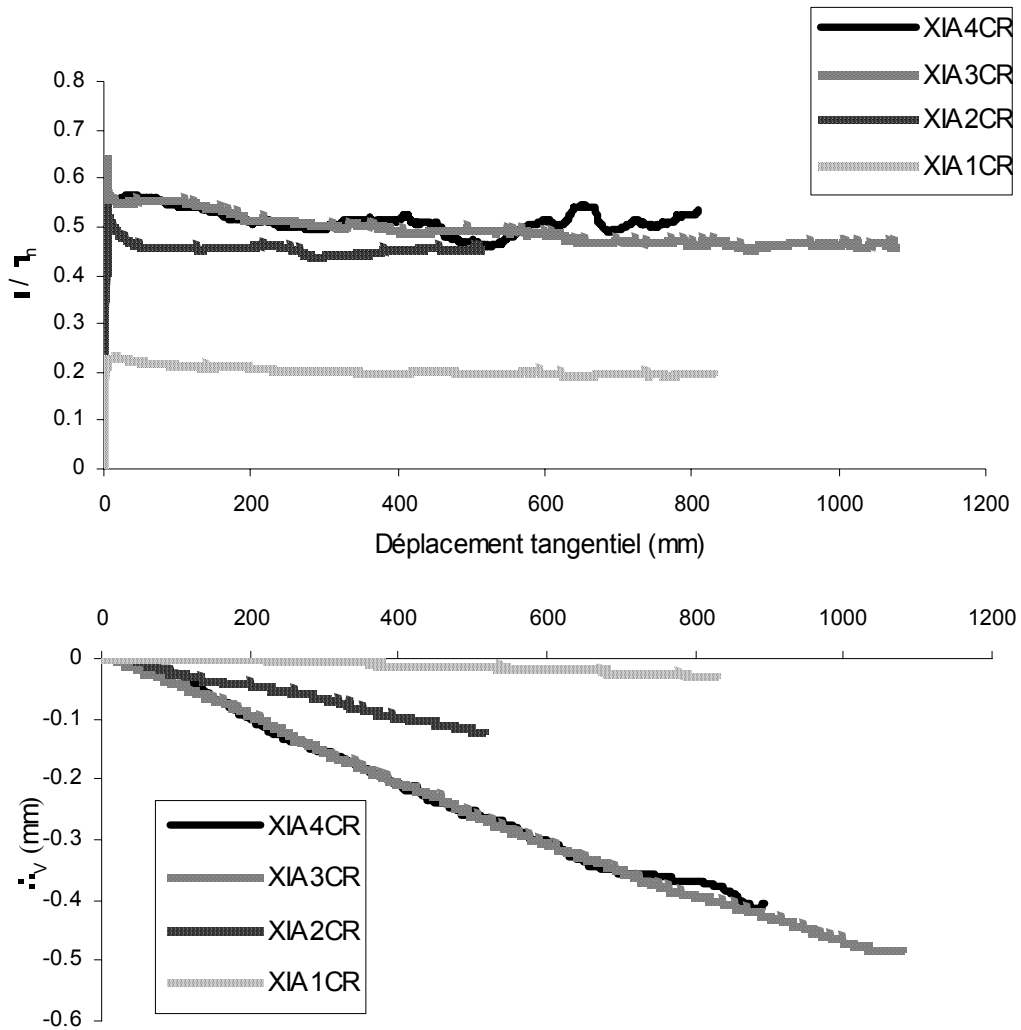
**Tableau 8.11** Comparaison entre les coefficients de frottement résiduel en cisaillement lent et rapide

Essai	$\tau_r/\sigma'_n$	Essai	$(\tau_r/\sigma'_n)_{moy}$	Augmentation (%)
XIO	0,386	XIOCR	0,412	6,7
XKIO	0,427	XKIOCR	0,458	7,3
KIO	0,250	KIOCR	0,310	24,0
BIO	0,075	BIOCR	0,099	32,0

Les valeurs moyennes des coefficients de frottement, en grands déplacements, obtenues sont donnés et comparées avec celles obtenues précédemment en cisaillement lent au tableau 8.11. L'augmentation de résistance résiduelle est de l'ordre de 6,7% pour X et 7.3% pour XK. Pour K et B, elle augmente de 24% et 32% respectivement. La différence de résistance, pour les quatre sols, semble augmenter avec le pourcentage d'argile présent dans le sol.

#### **- Cisaillement rapide à l'interface sol-acier**

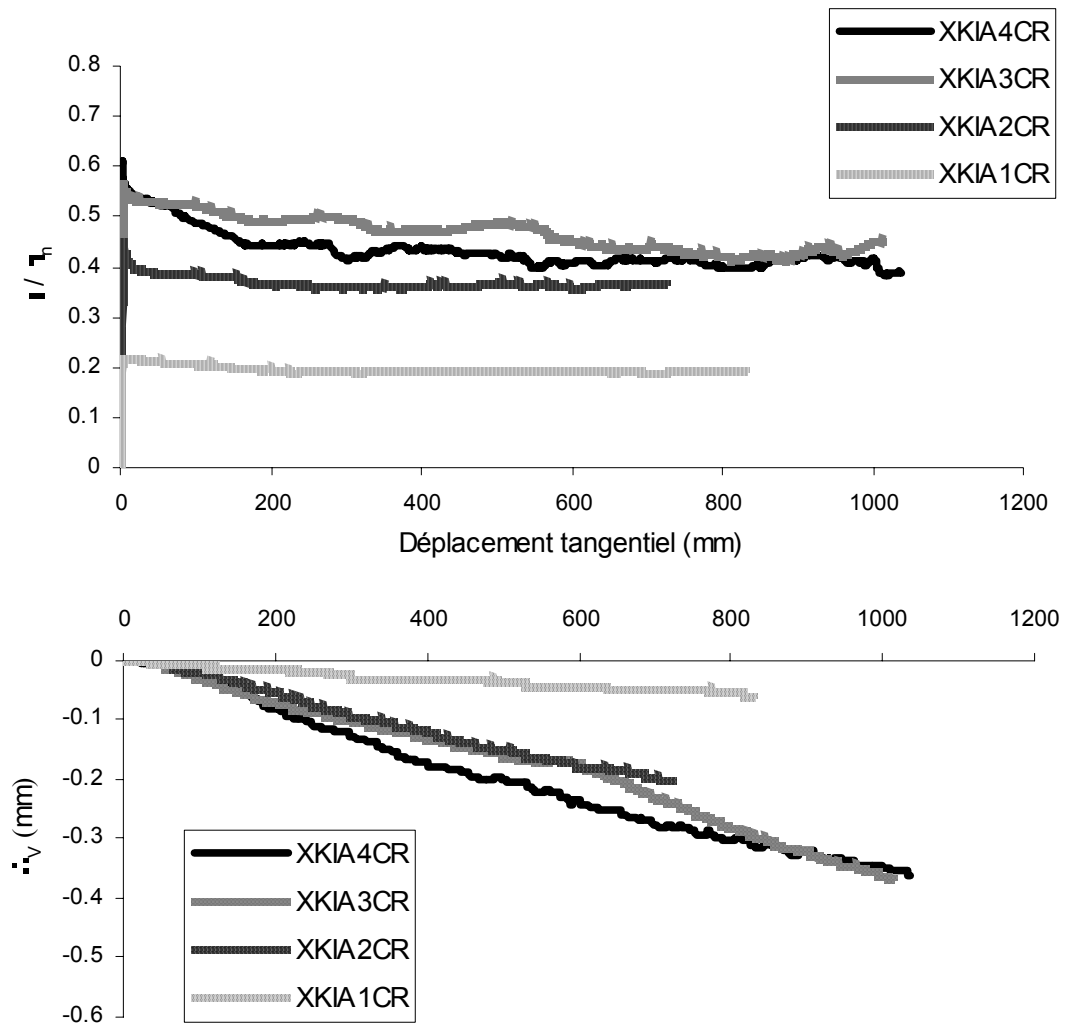
Les courbes obtenues à partir des essais de cisaillement rapide à l'interface sol – acier de différentes rugosités ont été regroupées pour chaque type de sol dans les figures 8.25 à 8.28. Les courbes obtenues montrent qu'il y'a initialement un seuil de résistance sur la surface de cisaillement, mobilisé sans déplacement tangentiel supplémentaire et qui dépasse largement la résistance résiduelle lente, développée précédemment. Ensuite la résistance en grands déplacements tend généralement à décroître pour X, XK et K surtout pour les interfaces rugueuses (IA2, IA3 et IA4) et les courbes correspondantes ont des formes plus ou moins onduleuses dans le cas de IA3 et IA4. Pour IA1, les courbes présentent des paliers plus ou moins plats. Dans le cas de la bentonite, il y'a une tendance à l'augmentation de la résistance après le seuil. Les tableaux 8.12 à 8.15 indiquent également une augmentation du coefficient de frottement résiduel en cisaillement rapide par rapport à celui du cisaillement lent précédent.



**Figure 8.25** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues dans le cas d'échantillons de limon de Xeuilley en cisaillement rapide d'interface sol-acier

**Tableau 8.12** Comparaison entre les coefficients de frottement résiduel en cisaillement d'interface lent et rapide pour le limon de Xeuilley

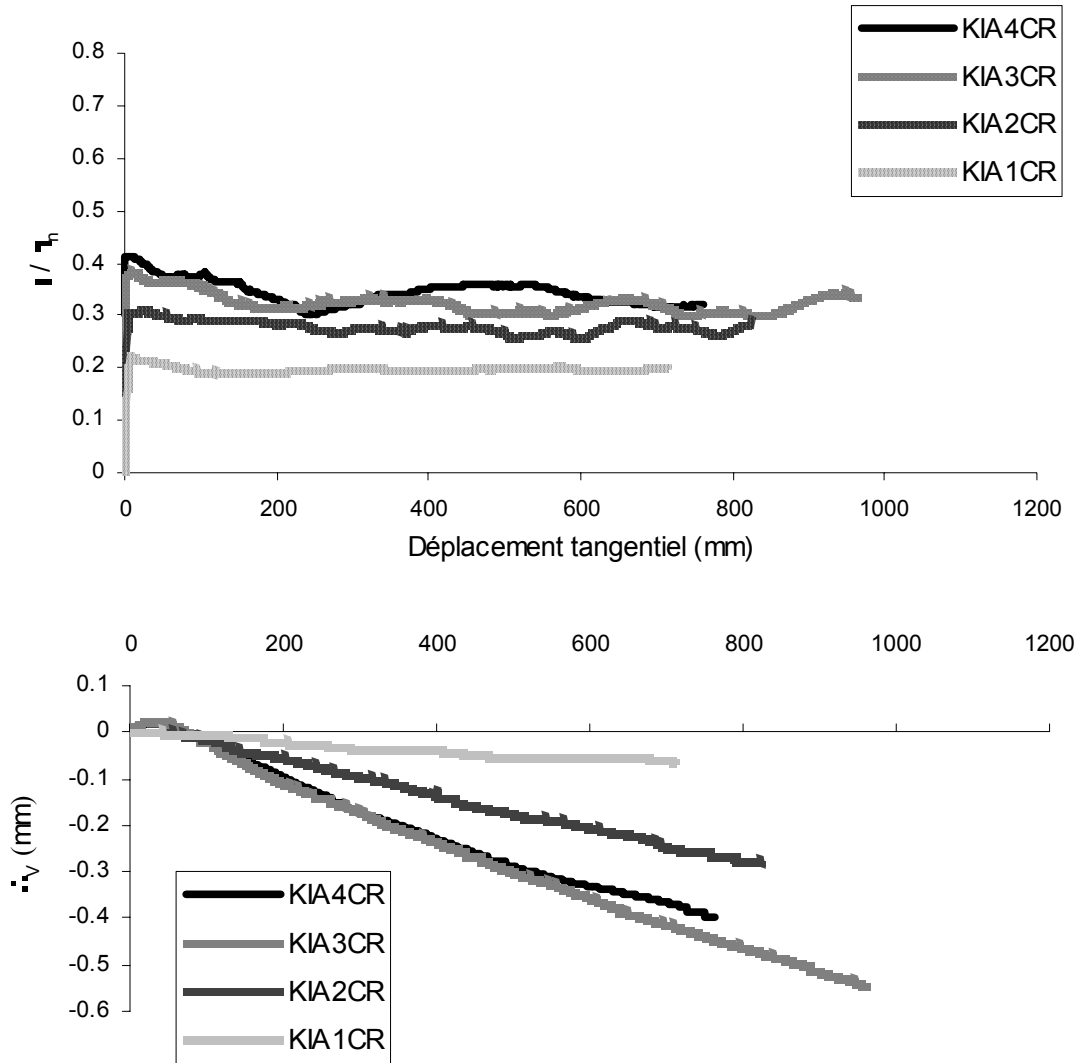
Essai	$\tau_r/\sigma_n'$	Essai	$(\tau_r/\sigma_n)_{moy}$	Augmentation (%)
XIA4	0,422	XIA4CR	0,500	18,5
XIA3	0,417	XIA3CR	0,467	12,0
XIA2	0,317	XIA2CR	0,454	43,2
XIA1	0,172	XIA1CR	0,200	16,2



**Figure 8.26** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas d'échantillons du mélange limon de Xeuilley-kaolin en cisaillement rapide d'interface sol-acier

**Tableau 8.13** Comparaison entre les coefficients de frottement résiduel en cisaillement d'interface lent et rapide pour le mélange limon de Xeuilley-kaolin

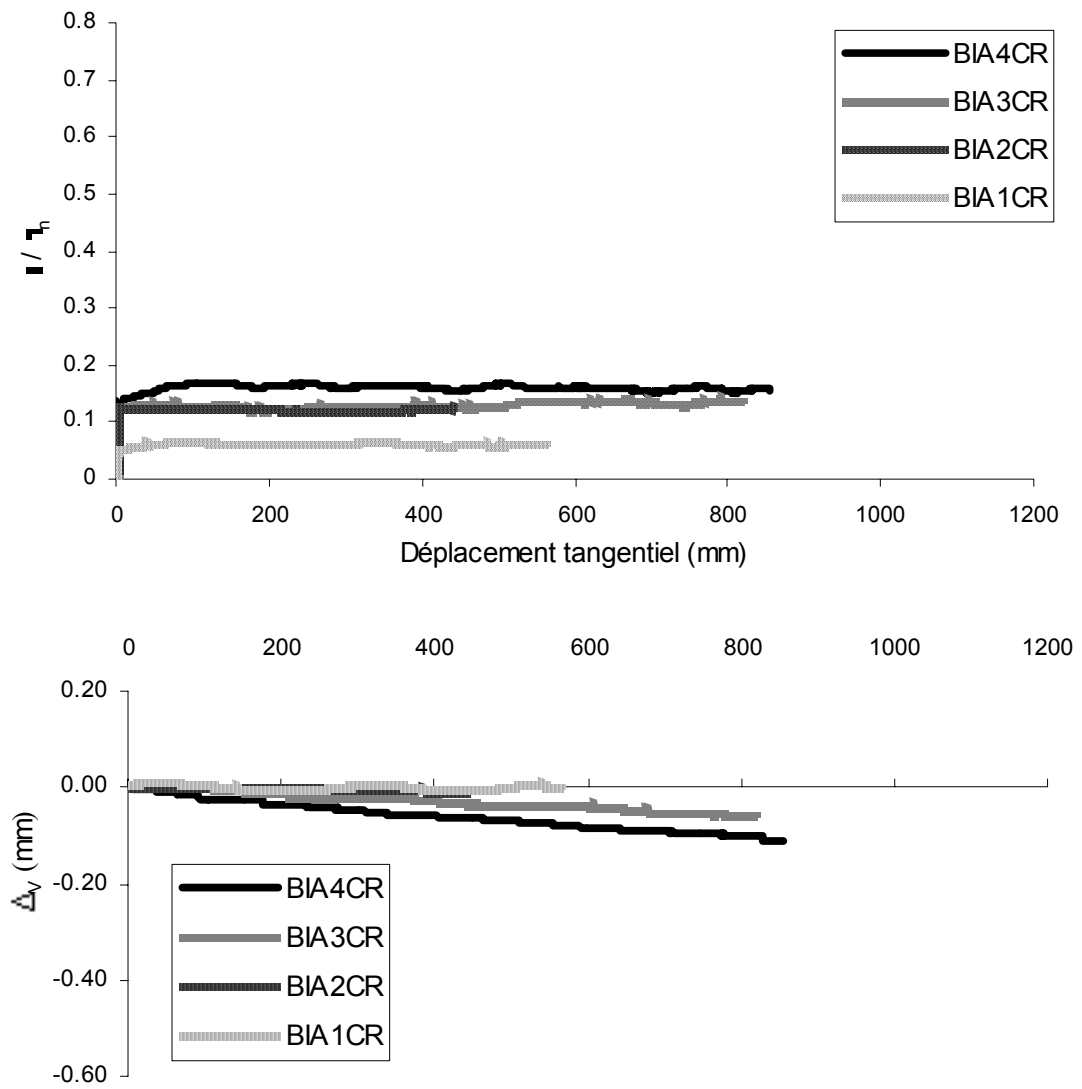
Essai	$\tau_r / \sigma'_n$	Essai	$(\tau_r / \sigma'_n)_{\text{moy}}$	Augmentation (%)
XKIA4	0,394	XKIA4CR	0,415	5,2
XKIA3	0,378	XKIA3CR	0,428	14,5
XKIA2	0,279	XKIA2CR	0,365	30,8
XKIA1	0,178	XKIA1CR	0,193	8,4



**Figure 8.27** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangential et déplacement vertical – déplacement tangential obtenues dans le cas d'échantillons de kaolin en cisaillement rapide d'interface sol-acier

**Tableau 8.14** Comparaison entre les coefficients de frottement résiduel en cisaillement d'interface lent et rapide pour le kaolin

Essai	$\tau_r/\sigma'_n$	Essai	$(\tau_r/\sigma'_n)_{moy}$	Augmentation (%)
KIA4	0,228	KIA4CR	0,336	47,4
KIA3	0,227	KIA3CR	0,318	40,1
KIA2	0,216	KIA2CR	0,278	28,7
KIA1	0,15	KIA1CR	0,195	30



**Figure 8.28** Courbes coefficient de frottement-déplacement tangentiel et déplacement vertical – déplacement tangentiel obtenues dans le cas d'échantillons de bentonite en cisaillement rapide d'interface sol-acier

**Tableau 8.15** Comparaison entre les coefficients de frottement résiduel en cisaillement d'interface lent et rapide pour la bentonite

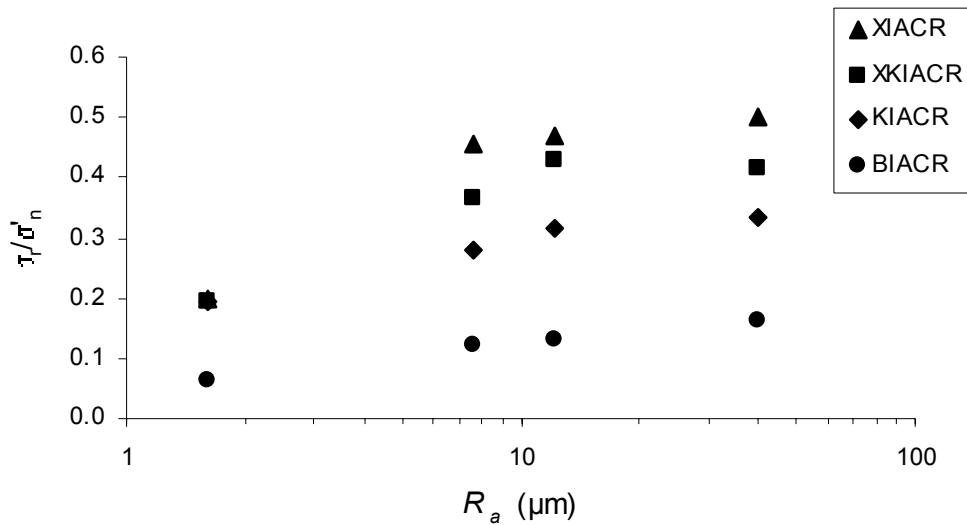
Essai	$\tau_r/\sigma'_n$	Essai	$(\tau_r/\sigma'_n)_{\text{moy}}$	Augmentation (%)
BIA4	0,106	BIA4CR	0,161	51,9
BIA3	0,106	BIA3CR	0,130	22,6
BIA2	0,104	BIA2CR	0,122	17,3
BIA1	0,051	BIA1CR	0,062	21,6

L'augmentation de résistance observée dans l'ensemble des essais sol-sol et d'interface peut être due aux effets visqueux ainsi qu'au changement significatif de structure se produisant au sein de la zone de cisaillement. L'existence d'un composant visqueux dans la résistance lors du cisaillement rapide est mise en évidence par une diminution soudaine de la résistance observée dès que le cisaillement rapide cesse. Les changements structuraux qui ont eu lieu sont mis en évidence par l'augmentation permanente de la résistance suite à un cisaillement rapide au dessus de la résistance résiduelle lente. En effet, les vitesses élevées tendent à produire une dislocation dans l'orientation des particules argileuses plates, qui peut être due à une augmentation de l'angle de frottement entre les particules argileuses. Les particules argileuses plates ne sont alors plus en mesure de rester parfaitement parallèles comme dans le cas de faibles vitesses. L'augmentation de résistance peut être associée alors à un changement du comportement de cisaillement du mode glissant ou transitoire au mode turbulent. Une autre cause possible pour l'augmentation de la résistance au cisaillement est que les changements sont dues aux variations de la pression interstitielle (développement de la pression interstitielle en excès près de la surface de cisaillement).

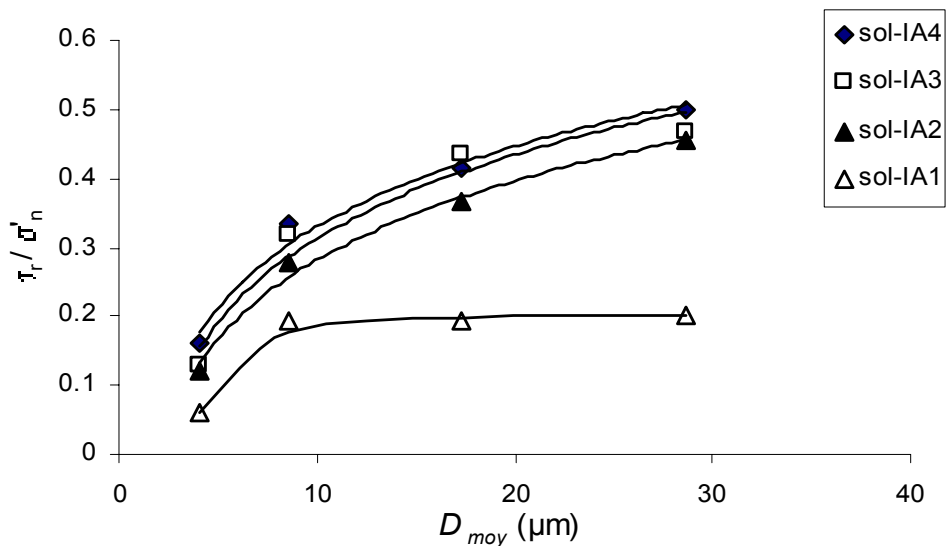
D'autre part comme le montre les courbes donnant le déplacement vertical en fonction du déplacement tangentiel, un autre facteur, qui complique également la situation et qui est difficile à éviter, est la perte de matériau, peu considérable mais continue, à travers la plaque de chargement et le conteneur d'échantillons. Toutefois, il est possible que la perte de matériau n'affecte pas significativement le comportement des sols en cisaillement rapide, comme l'a prouvé Lemos (1986). En effet, ce dernier dans le but de vérifier l'effet de la perte d'échantillon, a conduit des phases de cisaillement rapide avec la même vitesse, mais avec différentes ouvertures. Les résultats obtenus à partir de ces essais n'ont pas montré de changement dans le comportement de cisaillement. D'autre part, il est à noter également que la déformation verticale semble augmenter avec la rugosité de surface. Ce qui indiquerait que le réarrangement des particules est plus important dans le cas de surfaces rugueuses.

Concernant l'influence de la rugosité de surface et du diamètre moyen des particules, les tendances observées en cisaillement lent avec ou sans pré-cisaillement ont été de nouveau mises en évidence. La figure 8.29 qui représente la variation de  $\tau_r/\sigma_n$  obtenu en cisaillement rapide, en fonction de  $R_a$ , montre que le coefficient de frottement augmente avec la rugosité. On note aussi que pour l'interface lisse (IA1) les valeurs de  $\tau_r/\sigma_n$  sont pratiquement identiques, à l'exception de la bentonite. On remarque également que le limon de Xeuilley et la bentonite donnent également, respectivement la plus grande et la plus petite résistance, à cause de l'influence des dimensions des particules, comme représenté sur la figure 8.30 qui montre l'influence du diamètre moyen sur le coefficient de frottement. Les résultats sont aussi

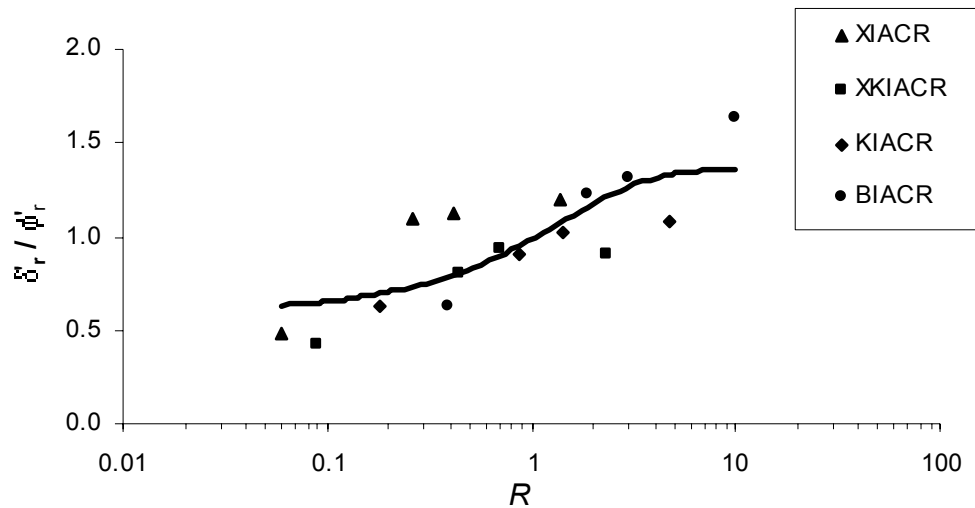
analysés sur la figure 8.31, qui montre la variation de  $\delta_r/\varphi_r$  avec la rugosité relative  $R$ . Elle illustre d'une part l'augmentation du rapport  $\delta_r/\varphi_r$  avec la rugosité relative  $R$ , et d'autre part, le fait que l'angle de frottement à l'interface peut être supérieur à l'angle de frottement du sol, particulièrement pour X et B, qui sont constitués de montmorillonite comme composant minéral majeur. Pour cette phase de cisaillement, la limite pour laquelle la rugosité n'a plus d'influence est difficile à fixer et semble se situer pour des valeurs de  $R$  dépassant approximativement trois.



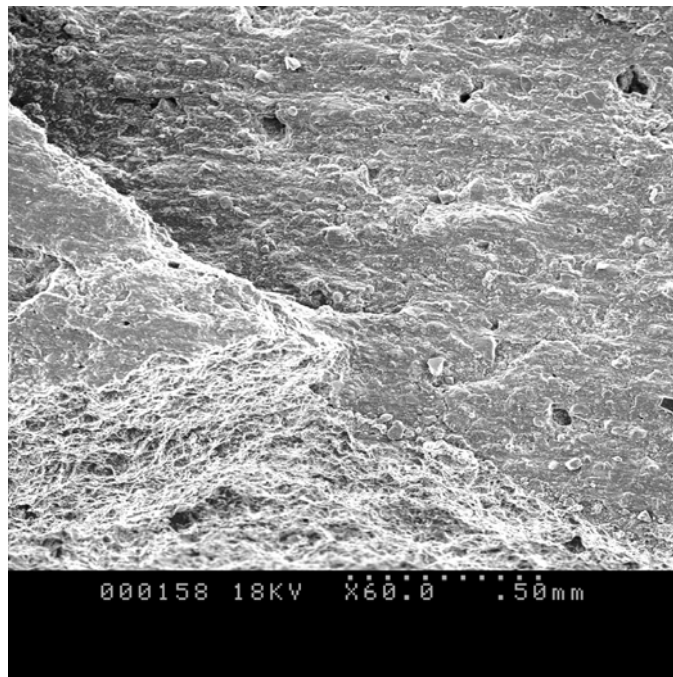
**Figure 8.29** Relation entre  $\tau/\sigma_n$  et  $R_a$  pour la phase de cisaillement rapide



**Figure 8.30** Relations entre  $\tau/\sigma_n'$  et  $D_{moy}$  pour la phase de cisaillement rapide



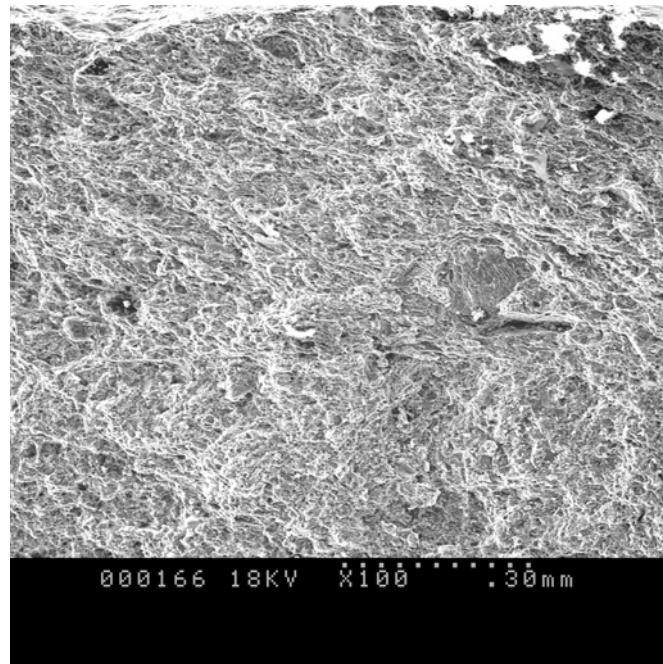
**Figure 8.31** Relation entre  $\delta'_r / \phi'_r$  et  $R$  pour la phase de cisaillement rapide



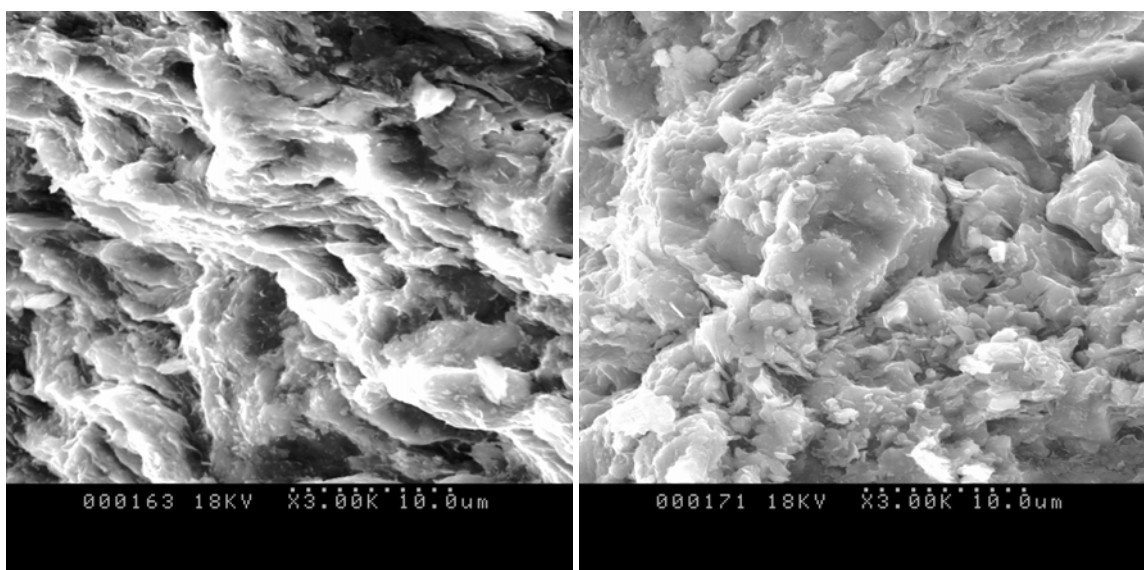
**Figure 8.32** Surface de cisaillement au sein du sol (Essai XIA4CR ; Echantillon H – 60X)

Les modes de cisaillement dans le domaine des grands déplacements, peuvent être similaires à ceux régissant le cisaillement d'interface en cas de cisaillement lent. La résistance au cisaillement à l'interface dépend de la rugosité de surface et du matériau qui la constitue, ainsi que des propriétés et de la minéralogie du sol. Ainsi un mode glissant, impliquant un cisaillement localisé au niveau d'une mince surface, est susceptible de se produire dans le cas de surfaces lisses. Pour des interfaces rugueuses, le mode interne est susceptible de se produire, comme le prouve l'inspection visuelle et la microanalyse effectuée sur l'essai

XIACR(a) qui ont confirmé le fait que le cisaillement a lieu au sein du sol, en cisaillement rapide également. La figure 8.32 montre en bas sur la partie gauche, la surface de contact sol - acier, et en haut sur la partie droite on observe la surface de cisaillement. Au dessous de cette surface se forme une zone qui s'étale sur environ 0,6 mm et dont la texture est partiellement orientée d'un angle approximative de 35° (Figure 8.33). La figure 8.34 montre une texture orientée caractérisant la zone de cisaillement et une autre plus ou moins aléatoire correspondant au milieu de l'échantillon.



**Figure 8.33** Aspect général à travers une partie de l'épaisseur (Essai XIA4CR(a) ; Echantillon V – 100X)



**Figure 8.34** Texture au sommet de l'échantillon (1) et au milieu (2) (Essai XIA4CR(a) ; Echantillons V – (1) 3000X, (2) 3000X)

## 8.6 Limitations de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead

Plusieurs facteurs peuvent avoir des effets sur les résultats d'essais de cisaillement annulaires, bien que certains des effets résultants semblent non quantifiables. Bromhead (1979) a indiqué que les facteurs suivants peuvent entraîner des erreurs :

Les anneaux dynamométriques commercialisés peuvent manquer de précision pour de faibles contraintes normales ou pour des essais sur des sols très faibles. Dans ce travail des anneaux dynamométriques de grandes précisions, équipés de capteurs de forces permettant des mesures avec une bonne précision ont été utilisés. Les différences éventuelles dans les anneaux dynamométriques et le tassement hétérogène de la plaque de chargement peuvent causer un frottement sur l'axe de centrage. Cependant les effets d'un tel frottement sont compensatoires car alors que l'un des composants résultant tend à réduire la charge normale que subit l'échantillon et de ce fait réduit le moment de torsion transmis aux capteurs de forces, l'autre composant d'un autre côté a tendance à l'augmenter. De plus tout effet peut être également réduit en graissant légèrement l'axe de centrage.

Les effets du frottement parasite résultant du contact pouvant avoir lieu entre l'anneau supérieure et les anneaux de confinement, qui est du à l'inclinaison, sont également compensatoires, bien que cet effet est réduit par la présence de l'axe de centrage.

La Gatta (1970) a montré que la plus grande source d'erreur potentielle dans les essais de cisaillement annulaire est la possibilité de distribution non uniforme de la contrainte verticale sur la surface de rupture en raison de la perte d'échantillon qui entraîne une mobilisation non uniforme de la contrainte de cisaillement. A l'instar des autres machines, ce problème existe aussi dans le cas l'appareil de Bromhead.

La perte d'échantillon à partir des limites périphériques de l'échantillon semble être un problème majeur pour l'ensemble des appareils de cisaillement annulaire. Dans le cas de l'appareil de Bromhead, sa conception est telle qu'une faible, mais continue, perte de matériau de la surface de cisaillement a tendance à se produire lors du cisaillement. Cette perte varie en fonction de la plasticité du matériau, plus le matériau est plastique plus elle est importante. Elle est également plus faible pour les anneaux d'acier lisses.

Dans certains essais, on a remarqué qu'alors que le déplacement de cisaillement continuait, après que la résistance de cisaillement semble avoir été atteinte la résistance résiduelle a tendance à augmenter une nouvelle fois. Ce phénomène a été rapporté aussi par Lawrence (1984). Il l'a attribué à l'augmentation des éléments grossiers dans la surface de cisaillement qui est due à la perte de matériau qui contient essentiellement les éléments les plus fins. Comme le comportement résiduel des sols cohérents est régi par la proportion des

particules plates par rapport aux particules rondes, ceci aurait pour effet une augmentation de la valeur de  $\phi'_r$ .

Le matériau exclus au cours de l'essai peut être enlevé de l'extérieur par des jets d'eau. Cependant le matériau qui s'échappe dans le vide central s'accumule. Les résultats d'essais de cisaillement annulaires de longue durée conduits par Lawrence (1984) ont été semble-t-il affectés par l'accumulation considérable à l'intérieure du vide central. Pour résoudre ce problème il proposa de revoir la conception de la plaque de chargement supérieure de telle manière que le matériau accumulé puisse être enlevé alors que l'essai est en cours.

De plus le tassement de la plaque de chargement supérieure est consistant mais imprécis du moment qu'il est affecté par la perte d'échantillon durant la consolidation et le cisaillement. Une situation similaire existe dans le cas des autres appareils de cisaillement annulaire (La Gatta, 1970 ; Bishop et al, 1970 ; Lupini, 1980).

D'après Stark & Vettel (1992) le principal facteur affectant la résistance résiduelle drainée mesurée au moyen de l'appareil de Bromhead est l'importance du frottement développé le long des circonférences interne et externe de l'échantillon confiné. Ce frottement augmente avec la profondeur de l'échantillon, et de ce fait le plan où le frottement est moindre est situé à ou près de l'interface entre le sol et l'anneau utilisé (anneau d'origine en bronze ou anneau d'acier dans notre cas). Comme ce dernier subit un tassement à l'intérieur du conteneur d'échantillon, le frottement affectant le plan de cisaillement augmente, entraînant une augmentation dans la résistance résiduelle mesurée.

Finalement, à cause des petites dimensions de l'échantillon, l'appareil n'est pas adapté pour l'expérimentation des matériaux contenant des particules de sable. Plusieurs chercheurs utilisant différents types de machines ont rencontré des difficultés pour de tels sols. Les effets des particules grossières sont évidents du moment que de minces échantillons (moins de 5mm) sont mis à l'essai dans l'appareil de Bromhead. Par conséquent les dimensions maximales des particules ont été limitées à 400 $\mu$ m concernant le limon de Xeulley.

## **8.7 Conclusions**

Dans ce chapitre, on a présenté une contribution à l'étude du comportement d'interface, avec une référence particulière à l'effet de la rugosité de surface et l'effet du cisaillement dans le domaine des grands déplacements.

L'analyse des résultats montre que trois modes, dont l'existence semble très liée à la rugosité de surface, au comportement différent, peuvent être identifiés, que se soit en cisaillement lent ou rapide. Ces modes sont le mode glissant, le mode interne et le mode transitoire.

Les essais conduits tendent aussi à mettre en évidence une influence manifeste du pré-cisaillement, que se soit pour un cisaillement sol-sol ou un cisaillement sol-acier, pour lesquels trois types d'effets ont été enregistré, soient l'effet positif, négatif ou neutre.

Cette partie a permis aussi de faire ressortir un caractère particulier du comportement d'interface des sols dont le composant minéral majeur est la montmorillonite par rapport aux sols constitués de kaolinite. En effet, les résultats montrent que dans le premier cas, la résistance au cisaillement à l'interface dans le domaine des grands déplacements est susceptible d'être plus grande que la résistance sol-sol, lorsque la rugosité est importante. Ces résultats mettent en avant l'intérêt qu'il y a de disposer d'un maximum d'informations sur les propriétés minérales et structurales du matériau étudié pour rendre possible l'interprétation des données mécaniques.

Ces résultats d'essais permettent de faire ressortir la complexité des phénomènes qui gouvernent le comportement mécanique en grand déplacement d'un matériau cohérent.

## 9 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

### 9.1 Conclusions générales

Cette thèse s'inscrit dans le cadre général de l'étude du comportement d'interface des sols cohérents. Plus particulièrement, l'objet du travail est d'étudier le comportement en fonction de la rugosité de surface et les mécanismes régissant un tel comportement. Ces recherches présentent un intérêt certain pour toutes les applications où il y a présence d'interface, qu'on trouve dans de nombreux contextes en géotechnique, qu'il s'agisse de pieux, de murs de soutènement ou de systèmes de renforcement des sols.

La résistance au cisaillement à l'interface entre quatre types de sols cohérents et deux matériaux solides (acier et béton) ayant différentes rugosités a été étudiée au moyen d'essais de laboratoire en utilisant l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead à des vitesses de cisaillement modérées et importantes. Cette étude a été complétée par une analyse de la microstructure d'échantillons pré-cisaillés ayant subis des déformations importantes. Les principales conclusions qui peuvent être tirées de cette étude sont les suivantes:

1- Il est établi dans la littérature que l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead est en mesure d'effectuer des mesures fiables de la résistance au cisaillement résiduelle sol-sol. De plus cette étude a montré qu'il est possible de le modifier pour permettre d'évaluer la résistance au cisaillement à l'interface entre un sol cohérent et un matériau solide dans le domaine des grands déplacements. Des anneaux d'acier et de béton de différentes rugosités ont été fixés solidement dans le but d'effectuer des essais d'interface. Le principal avantage d'un essai de cisaillement annulaire réside dans le fait que d'importantes déformations de cisaillement peuvent être appliquées dans une direction jusqu'à l'établissement des conditions résiduelles. De plus l'essai de cisaillement annulaire est simple, rapide et économique à réaliser. En conséquence, les résultats obtenus par l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead permettent de simuler d'une manière plus réaliste les conditions in-situ de grands déplacements.

2- La fraction argileuse et la minéralogie jouent un rôle fondamental sur les caractéristiques résiduelles des sols fins. Le kaolin et la bentonite, dont la teneur en fraction argileuse est importante, se sont comportés suivant le mode glissant et possèdent de faibles valeurs de

l'angle de frottement interne résiduelle. La bentonite dont le composant minéral majeur est la montmorillonite a un angle de frottement résiduel plus faible que le kaolin qui est constitué principalement de kaolinite. Du fait que les valeurs de  $\varphi_r'$  pour la montmorillonite et la kaolinite sont respectivement égales à  $5^\circ$  et  $15^\circ$  (Skempton, 1985). D'autre part, le limon de Xeuilley et le mélange limon de Xeuilley – kaolin ont donné des valeurs plus importantes et se sont comportés suivant le mode transitoire. Le fait que ce dernier, avec une teneur en fraction argileuse supérieure à celle du premier nommé donne une résistance au cisaillement résiduelle supérieure est due également à l'influence des minéraux présents au sein de la fraction argileuse, bien qu'il est établi que la résistance résiduelle a tendance à diminuer avec la fraction argileuse.

3- L'ensemble de cette étude démontre la sensibilité des propriétés mécaniques des sols cohérents à toute variation de la rugosité de surface de l'interface dans les domaines des petits et grands déplacements et les mécanismes de cisaillement qui en découlent. Pour les deux cycles de cisaillement lent, les sols étudiés ont montré différent comportement contrainte – déplacement tangentiel en fonction de la rugosité. Le premier cycle indique qu'il y'a eu un comportement post-pic déplacement – ramollissement, après l'établissement d'un pic bien défini, suivi d'un palier de résistance correspondant à l'état résiduel, comparable à celui observé dans le cas d'un cisaillement sol-sol. De ce fait que le concept de résistance résiduelle drainée s'applique également en cas de cisaillement d'interface à vitesse lente. Le deuxième cycle de cisaillement a produit des courbes caractérisées par une fragilité moins importante.

4- La rugosité relative combine entre l'effet de la rugosité et du diamètre moyen et diminue lorsque ce dernier augmente. Ce qui reflète le fait que les plus grosses particules ont tendance à se déplacer plus facilement par rapport aux plus petites, lorsqu'elles glissent le long d'une surface caractérisée par la même rugosité. Différentes corrélations ont été obtenues entre  $R$  et le coefficient de frottement résiduel, pour chaque phase de cisaillement. Des corrélations ont été également obtenues entre  $R_a$  et  $\tau_r/\sigma_n'$  pour chaque phase de cisaillement. Ces derniers montrent différentes tendances d'augmentation de  $\tau_r/\sigma_n'$  avec la rugosité. De ce fait indiquant que la résistance au cisaillement à l'interface est influencée aussi bien par la rugosité de l'interface que par les propriétés des sols.

5- Pour la résistance résiduelle à l'interface entre les sols cohérents et les matériaux de construction, il existerait une rugosité relative critique supérieure et une rugosité relative inférieure, qui sont susceptibles de dépendre de la composition minérale et du type de

cisaillement. Quand la rugosité de la surface du matériau solide dépasse la valeur critique supérieure, un mode de cisaillement au sein du sol se produit. La résistance au cisaillement d'interface maximum est alors limitée par la résistance au cisaillement du sol, pour le kaolin et le mélange limon de Xeuilley-kaolin. Pour la bentonite et le limon de Xeuilley, cependant, la résistance au cisaillement d'interface n'était pas conforme avec cette limite supérieure de la résistance au cisaillement maximum, obtenue quand la rupture par cisaillement se produit au sein du sol. Ceci peut être dû à la présence de la montmorillonite comme composant minérale majeure. D'autre part, lorsque la surface du matériau est plus lisse que la valeur critique inférieure, un mode de cisaillement glissant se produit. Entre les deux valeurs critiques un mode intermédiaire a lieu, qui est plus ou moins une combinaison des deux modes cités précédemment. Ces trois modes sont susceptibles de se produire pour la première et la troisième phase de cisaillement lent ainsi que pour la phase de cisaillement rapide intermédiaire.

6- En petit déplacement, le type de matériau constituant le matériau solide ne semble pas avoir un effet sur la résistance d'interface. Alors qu'en grand déplacement si pour les sols fins étudiés (kaolin et bentonite), on n'a pas enregistré d'effet notable, il n'en est pas le cas pour les deux autres sols étudiés, en l'occurrence, le limon de Xeuilley et le mélange limon de Xeuilley-kaolin pour lesquels la résistance contre les surfaces d'acier sont supérieures à celle correspondant au béton.

7- Cette recherche confirme l'importance de l'utilisation du microscope électronique à balayage dans l'étude de la structure des sols. Elle a été facilitée par le fait que l'appareil de Bromhead offre une facilité à prélever des échantillons pour effectuer des microanalyses. Les micrographes présentés, montrent que les techniques d'analyse au MEB permettent de donner une explication des mécanismes du cisaillement d'interface de divers matériaux argileux. Le rôle essentiel joué par les microtextures lors du cisaillement est bien mis en évidence et il est possible d'obtenir une meilleure interprétation des différents résultats obtenus. L'analyse microstructurale d'échantillons pré-cisaillés en grands déplacements a montré que pour des interfaces rugueuses (IA4 et IA3), la déformation n'est pas localisée mais s'étend à travers la hauteur de l'échantillon dont l'étendue est comprise entre 0,5 mm et 0,9 mm dans une zone de cisaillement générant une texture orientée, d'un angle compris entre 28° et 35°, pour les interfaces de type IA4. Dans le cas de IA3, les structures observées sont quelque peu différentes en fonction du type de sol. Le mode de cisaillement d'interface est alors de type interne. D'autre part, lorsque les interfaces sont lisses, le cisaillement est de type interfaciale

et se produit le long d'une mince surface de cisaillement à l'interface sol-matériaux solides. La résistance au cisaillement résiduelle est significativement plus petite. De ce fait indiquant que si un sol montre un comportement selon le mode transitionnel résiduel, qui implique une combinaison de cisaillement turbulent et glissant, et subit un cisaillement contre une interface lisse (IA1, IA2 et IB1, dans cette étude), les conditions résiduelles peuvent être modifiées et donne un mode de cisaillement résiduel entraînant une faible valeur de la résistance au cisaillement résiduelle par comparaison au cisaillement sol-sol.. Ceci est démontré par les valeurs données par le limon de Xeuilley et le mélange limon de Xeuilley-kaolin.

Ces résultats sont susceptibles de fournir des éclaircissements sur la relation existant entre la microtexture et la rugosité de surface et représente une étape vers une meilleure compréhension des mécanismes fondamentaux qui sont responsables des effets de la rugosité de surface sur la mobilisation du frottement latéral le long des pieux

8- L'existence de surfaces de cisaillement antérieures, suite à un cisaillement rapide, a une influence particulière sur la résistance au cisaillement en petits et grands déplacements, qu'ils s'agissent de cisaillement sol-sol ou d'interface. Ainsi dans le premier cas, pour les valeurs correspondant au pic de résistance, on a enregistré pour les sols étudiés un effet positif, un effet neutre et un effet négatif, et ce en fonction des proportions relatives de montmorillonite et de kaolinite présentes dans chaque sol. En grand déplacement, on a pu mettre en évidence deux types d'effet : neutre et positif, en fonction de la proportion relative de montmorillonite et de kaolinite. Concernant le cisaillement d'interface, trois effets ont été également mis en évidence à savoir : un effet négatif, un effet neutre et un effet positif et ce en fonction de la rugosité de surface d'une part et de la proportion relative de montmorillonite et de kaolinite.

## **9.2 Perspectives de recherche et de développement**

Bien que l'étude conduite par l'auteur a permis d'éclaircir certains points concernant le mécanisme fondamental du cisaillement à l'interface sols cohérents - matériaux solides et son analogie avec les conditions existant autour d'un pieu, cependant, cette étude est loin d'être complète et il reste encore de nombreuses questions en suspens, questions qui n'ont pu qu'être effleurées lors de ce travail. Pour une meilleure compréhension, une recherche supplémentaire est nécessaire. Les conclusions formulées permettent la suggestion de quelques pistes pour la poursuite de ce travail. Les propositions suivantes sont avancées pour le travail futur éventuel :

1- Les résultats concernant le cisaillement lent ont été obtenus après un cisaillement rapide à une vitesse de 44,52 mm/mn, il est suggéré de faire varier cette vitesse pour des vitesses plus importantes pour étudier l'effet de ces vitesses sur les angles de frottement mobilisés au cours de la phase rapide et ultérieurement lors de la phase lente.

2- Dans cette étude une contrainte normale effective, relativement faible, de 70 kN/m<sup>2</sup> a été utilisée. Cette contrainte est nécessaire pour s'assurer qu'une épaisseur raisonnable de l'échantillon est maintenue dans le conteneur après l'achèvement du cycle de cisaillement. Il est suggéré d'utiliser des contraintes plus importantes pour éventuellement voir l'effet de la contrainte verticale sur l'interface sol-matériau solide. Pour cela une modification de l'appareil est nécessaire.

3- L'étude de la microstructure a été effectuée sur des échantillons ayant subis trois phases de cisaillement (cisaillement lent + cisaillement rapide + cisaillement lent). Pour être en mesure d'évaluer la texture à la fin de chaque phase, il est suggéré de préparer une série d'échantillons identiques et de faire subir à chacun d'eux des essais qui seront arrêtés en différents points des trois courbes.

4- Afin de confirmer ou d'infirmer, l'hypothèse de l'effet de la minéralogie liée à la présence de montmorillonite sur le cisaillement d'interface et l'effet du pré-cisaillement, une solution simple serait de mettre à l'essai différents mélanges contenant de la bentonite à différentes proportions et d'étudier le comportement d'interface de chaque mélange pour chaque rugosité de surface.

5- Lors de la préparation des échantillons pour l'étude de la microstructure on a adopté une procédure de déshydratation simple par séchage. Cette dernière s'est révélée inadaptée à la bentonite due au retrait considérable qui se produit subséquent. La déshydratation peut se faire dans ce cas par lyophilisation (Gillot, 1971), à savoir congélation rapide dans de l'azote liquide (ébullition à -196°C) afin de minimiser les variations de volume de l'eau congelée et donc du sol, et sublimation sous vide correct (10<sup>-2</sup> mm Hg) afin d'éliminer l'eau sans avoir affaire aux ménisques capillaires eau-air, responsables des rétractions au séchage.

6- Une nouvelle science dénommée géotribologie a vu le jour récemment. C'est une combinaison de la tribologie et des principes de géomécaniques appliqués aux systèmes géotechniques. La tribologie concerne l'étude des surfaces, du frottement, de la lubrification

et de l'usure des surfaces en contact. Le but de la géotribologie est de comprendre comment les surfaces contrôlent le comportement d'interface et de développer des méthodes pour optimiser les matériaux d'interface pour des applications spécifiques. Le type de rugosité est caractérisé en même temps par la rugosité de surface (hauteur des aspérités) et le modèle de texture (distribution des aspérités). Dans cette étude la rugosité a été obtenue par moletage. Il est suggéré d'étudier l'effet de différents types de modèles de texture avec une même valeur de la rugosité sur la résistance au cisaillement.

7- Parmi les autres perspectives qu'il serait possible de donner à ce travail et parallèlement à des développements expérimentaux, une approche numérique consistant à une simulation numérique de l'interface, apparaît intéressante et permettrait éventuellement d'approfondir la compréhension et l'étude de l'influence des différents paramètres avec une attention particulière aux paramètres d'interface.

Ces quelques propositions ne représentent cependant qu'un nombre restreint de ce qu'il faudrait accomplir pour atteindre une connaissance meilleure du comportement d'interface des sols cohérents.

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Anayi, J. T., Boyce, J. R. & Rogers, C. D. F. (1989).** Modified Bromhead ring shear apparatus. *Geotechnical Testing Journal* 12, N°2, 171-173.
- Barden, L. & Sides, G. (1971).** Sample disturbance in the investigation of clay microstructure. *Géotechnique* 21, N° 3, 211-222.
- Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andersen, A. & Brown, J. D. (1971).** A new ring shear apparatus and its implication to the measurement of residual strength. *Géotechnique* 21, N° 4, 273-328.
- Bjerrum L. (1967).** Progressive failure in slope of overconsolidated clay and clay shale. *Jl Am. Soc. Civ. Engrs.* 65, SM5, Part 1, 1-49.
- Blondeau, F. & Josseume, H. (1976).** Mesure de la résistance au cisaillement résiduelle en laboratoire. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Stabilité des talus 1, Versants naturels, N° spécial II*, 90-106.
- Blondeau, F. & Pilot, G. (1971).** Résistance au cisaillement résiduelle des sols argileux en France, Le comportement des sols avant la rupture. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° spécial*, 58-65.
- Bond, A. J. (1989).** Behaviour of displacement piles in overconsolidated clays. Thèse de PhD, Université de Londres (Imperial College), (Angleterre).
- Borowicka, H. (1965).** The influence of colloidal content on the shear strength of clay. *Compte rendus 6ème Conf. Int. Méc. Sols, Montréal 1*, 175-178.
- Bouazza, A & Ghili, M. T. (1999).** Etude des caractéristiques résiduelles des sols du site in stable de Bouchegouf (Algérie). *Bull. Eng. Geol. Env.* 57, 295-300.
- Bouceck, B. (1977).** Ring shear tests on clay. Publication N°3. Aachen : Institute for foundation engineering , soil mechanics, rock mechanics & waterways construction, 7-41.
- Bowden, E. P. & Tabor, D. (1945).** Friction and lubrication. *Annual reports on the progress of chemistry. The Chemical Society of London*, Vol 42, 20-46.
- Bromhead, E. N. (1979).** A simple ring shear apparatus. *Ground Engineering* 12, N° 5, 40-44.
- Bromhead, E. N. (1986).** *The stability of slopes*, Surrey university Press, London.
- Brumund, W. F. & Leonards, G. A. (1973).** Experimental study of static and dynamic friction between sand and typical construction materials. *ASTM J. Testing Evaluation* 1, N° 2, 162-165.
- Burland, J. B. (1973).** Shaft friction of piles in clay – a simple fundamental approach. *Ground Engineering* 6, N° 3, 30 – 42.
- Butterfield, R. & Andrawes, Z. K. (1972).** On the angles of friction between sand and plane surfaces. *J. Terramechanics* 8, N° 4, 15-23.
- Cancelli, A. (1980).** The determination of residual shearing strength in the laboratory: experience of some Italian soils. *Proc. Int. Symp. on landslides. New Delhi, Vol3*, 113-114.
- Chandler, R. J. (1966).** The measurement of residual strength in triaxial compression. *Géotechnique* 16, N° 3, 181-186.
- Chandler, R. J. (1968).** The shaft friction of piles in cohesive soils in terms of effective stresses. *Civil Engineering and Public Works Review* 63, 48 – 51.

**Chattopadhyay, P. K. (1972).** Residual strength of some clay minerals. Thèse de PhD, Université d'Alberta, Edmonton (USA).

**Clark, J. I. & Meyerhof, G. G. (1972).** The behaviour of piles driven in clay. An investigation of soil stress and pore water pressure as related to soil properties. *Canadian Geotechnical Journal* 9, 351-373.

**Collotta, T., Cantoni, R., Pavesi, U., Ruberl, E. & Moretti, P. C. (1989).** A correlation between residual friction angle, gradation and the index properties of cohesive soils. *Géotechnique* 39, N° 2, 343-346.

**Cottechia, V. & Federico, A. (1980).** On the dependancy of drained residual shear strength on normal effective stress. Proc. 14<sup>th</sup> Ital. Geotech. Conf., Florence, Special session on progress on the knowledge of slope movements in Italy.

**Di Maio, C. & Fenelli, G. B. (1994).** Residual strength of kaolin and bentonite : the influence of their constituent pore fluid. *Géotechnique* 44, N° 4, 217-226.

**Esashi, Y., Kataoka, T. and Yasuda, M. (1966).** Uplift Resistance of Piles: Part I. Cohesionless soil. Rep. 66037, Central Research Institute of Electric Power Industry. Tokyo, 1-60.

**Evans, M. D. & Fennick, T. J. (1995).** Geosynthetic/soil interface friction angles using a rotation shear device. *Geotechnical Testing Journal* 18, N°2, 271-275.

**Focht, J. A. & O'neil, M. W. (1985).** Piles and other deep foundations. Proc. 11ème Conf. int. mécanique des sols. San Francisco, vol. 1, 187-209.

**Frost, J. D. & Han, J. (1999).** Behavior of interfaces between fiber-reinforced polymers and sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, N°8, 633 – 640.

**Garga, V. K. (1970).** Shear strength under large strains and the effect of sample size on the consolidation of fissured clay. Thèse de PhD, Université de Londres (Angleterre).

**Gilot, J. E. (1976).** Importance of specimen preparation in microscopy. STP 599, ASTM, 289-307.

**Gibson, R. E. & Henkel, D. J. (1954).** Influence of duration tests at constant rate of strain on measured 'drained' strength. *Géotechnique* 4, N° 1, 6-15.

**Haefeli, R. (1938).** Mechanische Eigenschaften von Lockergestein. *Scheiz; Bauzg* 111, 299-303.

**Haefeli, R. (1951).** Investigation and measurement of the shear strength of saturated cohesive soils. *Géotechnique* 2, N° 3, 186 -207.

**Hamilton, J. M. & Murff, J. D. (1988).** Probabilistic assessment of the collapse strengths of piles offshore structures. Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Behaviour of Offshore Structures. Trondheim, Norvège. Vol. 1, 393 -408.

**Hawkins, A. B. & Privett, K. D. (1985).** Measurement and use of residual shear strength of cohesive soils. *Ground Engineering* 18, N° 8, 22-29.

**Hermann, H. G. & Wolfskill, L. A. (1966).** Residual shear strength of weak shales. Rapport technique Engineering properties of nuclear craters. Report 5. MIT, Cambridge (USA).

**Hutchinson, H. G., Bromhead, E. N., & Lupini, J. F. (1980).** Additional observations on the Folkeston Warren landslides. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 13, 1-31.

**Hvorslev, M. J. (1937).** Über die Festikeitseigenschaften gtorber bindiger Boden. Thèse publiée par Danmarks Naturvidenskabelige Samfund Ingeniordenskabelige Skrifter, Copenhagen, Series A, N° 45.

**Hvorslev, M. J. (1939).** Torsion shear tests and their place in the determination of the shearing resistance of soils. Proc. ASTM, 999-1022.

- Jardine R. J. (1985).** Investigation of pile soil behaviour, with special reference to the foundations of offshore structures. Thèse de PhD, Université de Londres (Imperial College) (Angleterre).
- Kanji, M. A. (1974a).** Unconventional laboratory tests for the determination of the shear strength of soil-rock contacts. Proc. 3<sup>rd</sup> Congr. Int. Conf. Rock Mech., Denver 2A, 241-247.
- Kanji, M. A. (1974b).** The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils. Géotechnique 24, N° 4, 671-674.
- Kanji, M. A. & Wolle, C. M.(1977).** Residual strength : new testing and microstructure. Comptes rendus 9<sup>ème</sup> con. int. méc. sols, Tokyo 1,153-154.
- Kenney, T. C. (1965).** Direct shear tests on samples of Pepper and Bearpaw shales. Rapport interne F24-13.01, NGI, Oslo, Norway.
- Kenney, T. C. (1967).** The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils. Pro. Geotechnical Conf., Oslo 1, NGI, 123-129.
- Kenney, T. C. (1977).** Residual strength of mineral mixtures; Comptes rendus 9<sup>ème</sup> Con. Int. Méc. sols, Tokyo 1,155-160.
- Kishida, H & Uesugi, M. (1987).** Tests of interface between sand and steel in the simple shear apparatus. Géotechnique 37, N° 1, 45-52.
- Kraft, L. M., Cox, W. R. & Verner, E. A. (1981).** Pile load tests: cyclic loads and varying load rates. ASCE 107, N° GT1.
- La Gatta, D. P. (1970).** Residual strength of clays and clay shales by rotation shear tests. Harvard Soils Mechanics series, N°86, Cambridge, Massachussets, Université de Harvard (USA).
- Lambe, T. W. & Whitman, R. V. (1969).** Soil Mechanics. Wiley, New York.
- Lehane, B. M. (1992).** Experimental investigations of pile behaviour using instrumented field piles. Thèse de PhD, Université de Londres (Imperial College) (Angleterre).
- Lehane, B. M. & Jardine, R. J. (1992).** Residual strength characteristics of Bothe Kennar clay. Géotechnique 42, N° 2, 363-367.
- Lemos, L. J. L (1986).** The effect of rate on the residual strength of soils. Thèse de PhD, Université de Londres (Imperial College) (Angleterre).
- Lemos, L. J. L. & Vaughan, P. R. (2000).** Clay-interface shear resistance. Géotechnique 50, N° 1, 55-64.
- Lerat P., Schlosser F. et Vardoulakis I. (1997).** Nouvel appareil de cisaillement simple annulaire pour l'étude des interfaces matériau granulaire-structure, Comptes Rendus du quatorzième Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, 1, 363-366.
- Lupini, J. F. (1981).** The residual strength of soils. Thèse de PhD. Université de Londres (Angleterre).
- Lupini, J. F., Skinner, A. E. & Vaughan, P. R.(1981).** The drained residual strength of cohesive soils. Géotechnique 31, N° 2, 181-213.
- Maksimovic, M. (1989).** On the residual strength of clays. Géotechnique 39, N° 2, 347-351.
- Martins, J. P. (1983).** Shaft resistance of axially loaded piles in clay. Thèse de PhD, Université de Londres (Angleterre).
- Mesri, G. & Cepeda-Diaz, A. F. (1986).** Residual shear strength of clays and clay shales. Géotechnique 36, N° 2, 269-274.
- Negussey, D., Wijewickreme, W. K. D. & Vaid, Y. P. (1989).** Geomembrane interface friction. Canadian Geotechnical Journal 26, 165-169.

- Osipov, V. I. (1983).** Methods of studying clay microstructure. *Geotechnical Testing Journal* 6, N°1, 10-17.
- Paikowski, S. G., Player, C. M. & Connors, P. J. (1995).** A dual interface apparatus for testing unrestricted friction of soil along solid interfaces. *Geotechnical Testing Journal* 18, N°2, 168-193.
- Parry, R. H. G. & Swain, C. W. (1975).** Skin friction of piles in clay. Cambridge Report CUED/C-SOILS TR 28.
- Parry, R. H. G. & Swain, C. W. (1977).** A study of skin friction of piles in stiff clay. *Ground Engineering* 10, N° 10, 33 – 37.
- Potyondy, J. G. (1961).** Skin friction between soils and and construction materials. *Géotechnique* 11, N° 4, 339-353.
- Petly, D. J. (1966).** The shear strength of soils at large strains. Thèse de PhD. Université de Londres (Angleterre).
- Privett, K. D. (1980).** The engineering geology slopes in the south costwolds. Thèse de PhD. Université de Bristol (Angleterre).
- Ramiah, B. K., Dayalou, N. K & Purushothamaraj, P. (1970).** Influence of chemicals on residual strength of silty clay. *Soils and foundations* 10, 25-36.
- Rouaiguia, A. (1990).** Strength of soil-structure interfaces. Thèse de PhD, Université de la technologie de Loughborough (Angleterre).
- Seycek, J. (1978).** Residual shear strength of soils. *Bull. Int. Ass. Egng Geol.* 17, 73-75.
- Skempton, A. W. (1964).** Long term stability of clay. *Géotechnique* 14, N° 2, 77-108.
- Skempton, A. W & Petly, D. J. (1967).** The strength along structural discontinuities in stiff clays. *Pro. Geotechnical Conf., Oslo 2, NGI*, 29-46.
- Smart, P. & Tovey, N. K. (1982).** Electron microscopy of soils and sediments : Examples. Clarendon Press. Oxford.
- Smith, D. W. & Reitsma, M. G. (2002).** Towards an explanation for the residual friction angle in montmorillonite clay soil. *Environmental geomechanics*, EPFL Press.
- Stark, T. D. & Vettel, J. J. (1992).** Bromhead ring shear test procedure. *Geotechnical Testing Journal* 15, N°1, 24-32.
- Stark, T. D. & Eid, H. T. (1993).** Modified Bromhead ring shear apparatus. *Geotechnical Testing Journal* 16, N°1, 100-107.
- Stark, T. D. & Eid, H. T. (1994).** Drained residual strength of cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division* 120, N° 5, 856-871.
- Stark, T. D. & Poepfel, A. R. (1994).** Landfill liner interface strengths from torsional ring shear tests. *Journal of Geotechnical Engineering Division* 120, N° 3, 597-615.
- Stark, T. D. & Contreras, I. A. (1996).** Constant volume ring shear apparatus. *Geotechnical Testing Journal* 19, N° 1, 3-11.
- Subba Rao, K. S.; Allam, M. M. & Robinson, R. G. (1998).** Interfacial friction between sands and solid surface interfaces. *Geotechnical Engineering, Proc. Instn Civ. Engrs*, N° 131, 75-82.
- Subba Rao, K. S.; Allam, M. M. & Robinson, R. G. (2000).** Drained shear strength of fined-grained soil-solid surface interfaces. *Geotechnical Engineering, Proc. Instn Civ. Engrs*, N° 143, 75-81.

- Suzuki, M., Umezaki, T. Kawakami, H. (1997).** Relation between residual strength and shear displacement of clay in ring shear test. *Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineers*, N° 575/III – 40, 37-50 (en japonais).
- Tabor, (1987).** Friction and wear-Developments over the last past five years. *Proceedings of the International Institution of Mechanical Engineering, London*, Vol 1, Juillet, 157-172.
- Tiedemann, B. (1937).** Uber die schbfestigkeit bindiger Boden. *Bautecnik* 15, N° 30 & 33, 400-403 & 433-435.
- Tika-Vassilikos, T. E. (1991).** Clay-on-steel ring shear tests and their implications for displacement piles. *Geotechnical Testing Journal* 14, N°4, 457-463.
- Tika, T. E.(1999).** Ring shear tests on a carbonate sandy silt. *Geotechnical Testing Journal* 22, N°4, 342-355.
- Tika, T. E., Vaughan, P. R. & Lemos, L. J. (1996).** Fast shearing shearing of pre-existing shear zones in soils. *Géotechnique* 46, N° 2, 197-233.
- Tika, T. E. & Hutchinson, H. G.(1999).** Ring shear tests on soil from the Vaiont landslide slip surface. *Géotechnique* 49, N° 1, 59-74.
- Tomlinson, M. J. (1970).** The adhesion of piles in stiff clay. *Construction Industry Research and Information Association, CIRIA, Research Report* N° 26.
- Townsend, F. C. & Gilbert, P .A. (1973).** Tests to measure residual strengths of some clay shales. *Géotechnique* 23, N° 2, 261-271.
- Townsend, F. C. & Gilbert, P .A. (1974).** Engineering properties of clay shales, Report 2 : Residual strength and classification indexes of clay shales. *Technical report S-71-6, Soils and pavement laboratory, US Army Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg (USA).*
- Townsend, F. C. & Gilbert, P .A. (1976).** Effects of specimen type on the residual strength of clays and clayshales. *STP 599, ASTM, Philadelphia (USA), 43-65.*
- Tsiambaos, G. (1991).** Correlation of mineralogy and index properties with residual strength of Iraklion marls. *Engineering Geology* 30, 357-369.
- Tsubakihara, Y. & Kishida, H. (1993).** Frictional behaviour between normally consolidated clay and steel by two direct shear type apparatuses, V. *Soils Found.* 33, N°2, 1-13.
- Tsubakihara, Y., Kishida, H. & Nishiyima, T. (1993).** Friction between cohesive soils and steel. *Soils Found.* 33, N°2, 145-146.
- Uesugi, M. & Kishida, H. (1986a).** Influence factors of friction between steel and dry sands. *Soils Found.* 26, N°2, 29-42.
- Uesugi, M. & Kishida, H. (1986b).** frictional resistance at yield between steel and dry sands. *Soils Found.* 26, N°4, 139-149.
- Uesugi, M., Kishida, H. & Tsubakshara, Y. (1988).** Behaviour of sand particles in sand-steel friction. *Soils Found.* 28, N°1, 107-118.
- Uesugi, M., Kishida, H. & Tsubakshara, Y. (1989).** Friction between sand and steel under repeated loading. *Soils Found.* 29, N°3, 127-137.
- Uesugi, M., Kishida, H. & Uchikawa, Y. (1990).** Friction between dry sand and concrete under monotonic and repeated loading. *Soils Found.* 30, N°1, 115-128.
- Varnes, D. J. (1978).** Slope movement and types and processes. In *landslides : analysis and control. Special report* 172, chap. 2. Washington: Transportaion Research Board, National Academy of Sciences.
- Voight, B (1973).** Correalation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils. *Géotechnique* 23, N° 2, 265-267.

**Ward, H. C., (1982).** Profile characterization, Rough surfaces, Thomas, T. R., Ed., Longman, London, 261 p.

**Wesley, L. D. (1977).** Shear strength properties of halloysite and allophane clays in java, Indonesia. Géotechnique 27, N° 2, 125-136.

**Wong, K. Y. & Tovey, N. K. (1975).** A new specimen preparation technique for the scanning electron microscope. Géotechnique 25, N° 3, 142-145.

**Wolle, C. M. (1974).** Uso do microscopio electronoco de varredura na observação da microestrutura das argilas (en portugais). 5<sup>ème</sup> congrès, Assc. Brés. méc. sols. Sao Paulo, V. 2, 115-129.

**Yoshimi, Y & Kishida, T. (1981).** A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces. Geotechnical Testing Journal 4, N°4, 145-152.

# ANNEXE

## COURBES COEFFICIENT DE FROTTEMENT – DÉPLACEMENT HORIZONTAL ET COURBES DÉPLACEMENT VERTICAL - DÉPLACEMENT HORIZONTAL

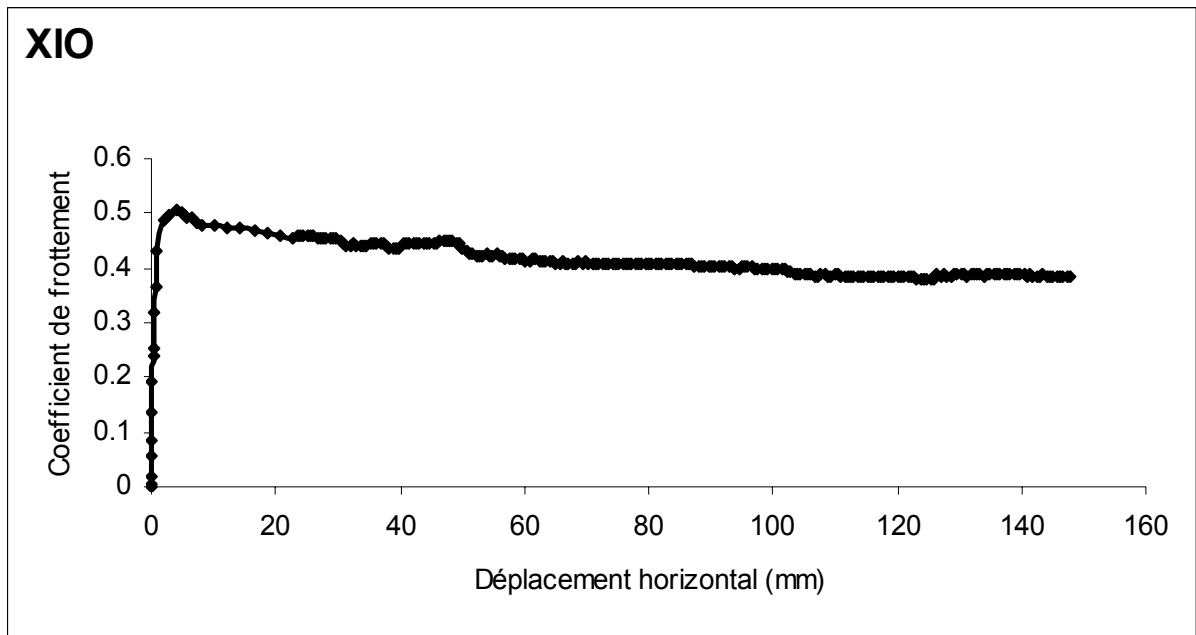
### NOMENCLATURE

	Essai	Type d'anneau	Vitesse (mm/mn)	Figure
Limon de Xeuilley	XIO	Origine	0,0356	A.1.a
	XIOCR	Origine	44,52	A.1.b
	XIOCL	Origine	0,0356	A.1.c
	XIA4	Acier/IA4	0,0356	A.2.a
	XIA4CR	Acier/ IA4	44,52	A.2.b
	XIA4CL	Acier/ IA4	0,0356	A.2.c
	XIA3	Acier/IA3	0,0356	A.3.a
	XIA3CR	Acier/ IA3	44,52	A.3.b
	XIA3CL	Acier/ IA3	0,0356	A.3.c
	XIA2	Acier/IA2	0,0356	A.4.a
	XIA2CR	Acier/ IA2	44,52	A.4.b
	XIA2CL	Acier/ IA2	0,0356	A.4.c
	XIA1	Acier/IA1	0,0356	A.5.a
	XIA1CR	Acier/ IA1	44,52	A.5.b
	XIA1CL	Acier/ IA1	0,0356	A.5.c
	XIB2	Béton/IB2	0,0356	A.6
	XIB1	Béton/IB1	0,0356	A.7

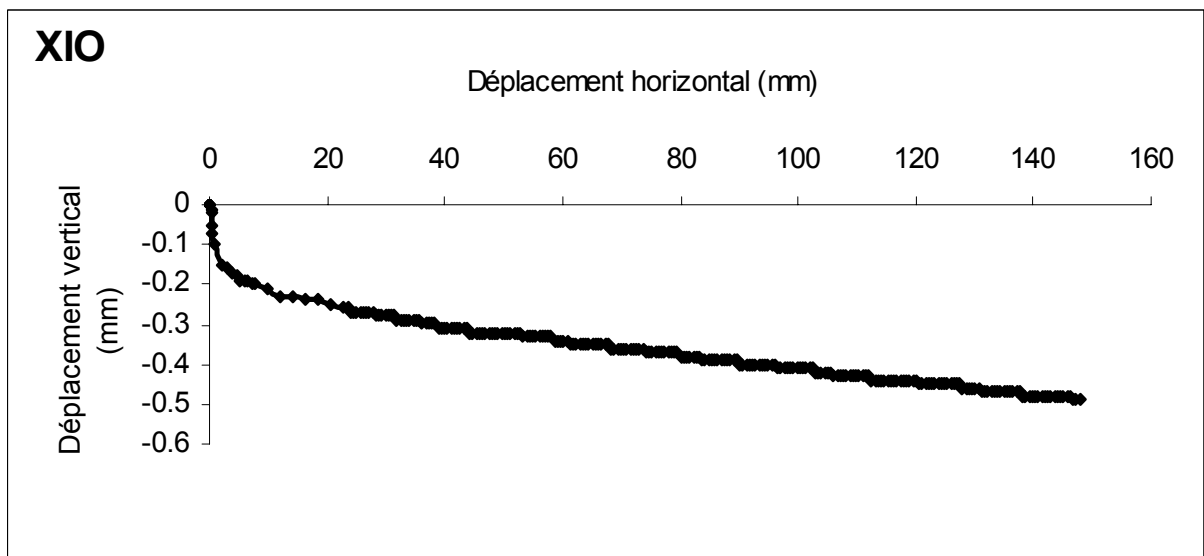
	Essai	Type d'anneau	Vitesse (mm/mn)	Figure
Limon de Xeuilley - kaolin	XKIO	Origine	0,0356	A.8.a
	XKIOCR	Origine	44,52	A.8.b
	XKIOCL	Origine	0,0356	A.8.c
	XKIA4	Acier/IA4	0,0356	A.9.a
	XKIA4CR	Acier/ IA4	44,52	A.9.b
	XKIA4CL	Acier/ IA4	0,0356	A.9.c
	XKIA3	Acier/IA3	0,0356	A.10.a
	XKIA3CR	Acier/ IA3	44,52	A.10.b
	XKIA3CL	Acier/ IA3	0,0356	A.10.c
	XKIA2	Acier/IA2	0,0356	A.11.a
	XKIA2CR	Acier/ IA2	44,52	A.11.b
	XKIA2CL	Acier/ IA2	0,0356	A.11.c
	XKIA1	Acier/IA1	0,0356	A.12.a
	XKIA1CR	Acier/ IA1	44,52	A.12.b
XKIA1CL	Acier/ IA1	0,0356	A.12.c	
XKIB2	Béton/IB2	0,0356	A.13	
XKIB1	Béton/IB1	0,0356	A.14	

	Essai	Type d'anneau	Vitesse (mm/mn)	Figure
Kaolin	KIO	Origine	0,0356	A.15.a
	KIOCR	Origine	44,52	A.15.b
	KIOCL	Origine	0,0356	A.15.c
	KIA4	Acier/IA4	0,0356	A.16.a
	KIA4CR	Acier/ IA4	44,52	A.16.b
	KIA4CL	Acier/ IA4	0,0356	A.16.c
	KIA3	Acier/IA3	0,0356	A.17.a
	KIA3CR	Acier/ IA3	44,52	A.17.b
	KIA3CL	Acier/ IA3	0,0356	A.17.c
	KIA2	Acier/IA2	0,0356	A.18.a
	KIA2CR	Acier/ IA2	44,52	A.18.b
	KIA2CL	Acier/ IA2	0,0356	A.18.c
	KIA1	Acier/IA1	0,0356	A.19.a
	KIA1CR	Acier/ IA1	44,52	A.19.b
	KIA1CL	Acier/ IA1	0,0356	A.19.c
	KIB2	Béton/IB2	0,0356	A.20
	KIB1	Béton/IB1	0,0356	A.21

	Essai	Type d'anneau	Vitesse (mm/mn)	Figure
Bentonite	BIO	Origine	0,0356	A.22.a
	BIOCR	Origine	44,52	A.22.b
	BIOCL	Origine	0,0356	A.22.c
	BIA4	Acier/IA4	0,0356	A.23.a
	BIA4CR	Acier/ IA4	44,52	A.23.b
	BIA4CL	Acier/ IA4	0,0356	A.23.c
	BIA3	Acier/IA3	0,0356	A.24.a
	BIA3CR	Acier/ IA3	44,52	A.24.b
	BIA3CL	Acier/ IA3	0,0356	A.24.c
	BIA2	Acier/IA2	0,0356	A.25.a
	BIA2CR	Acier/ IA2	44,52	A.25.b
	BIA2CL	Acier/ IA2	0,0356	A.25.c
	BIA1	Acier/IA1	0,0356	A.26.a
	BIA1CR	Acier/ IA1	44,52	A.26.b
	BIA1CL	Acier/ IA1	0,0356	A.26.c
	BIB2	Béton/IB2	0,0356	A.27
	BIB1	Béton/IB1	0,0356	A.28

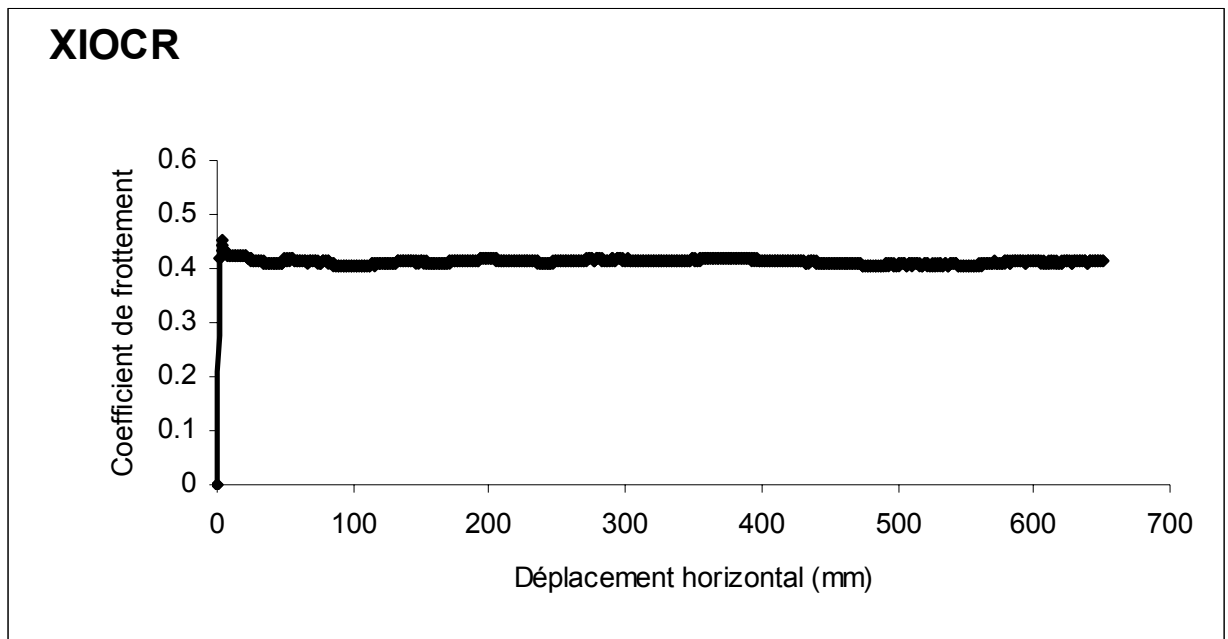


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

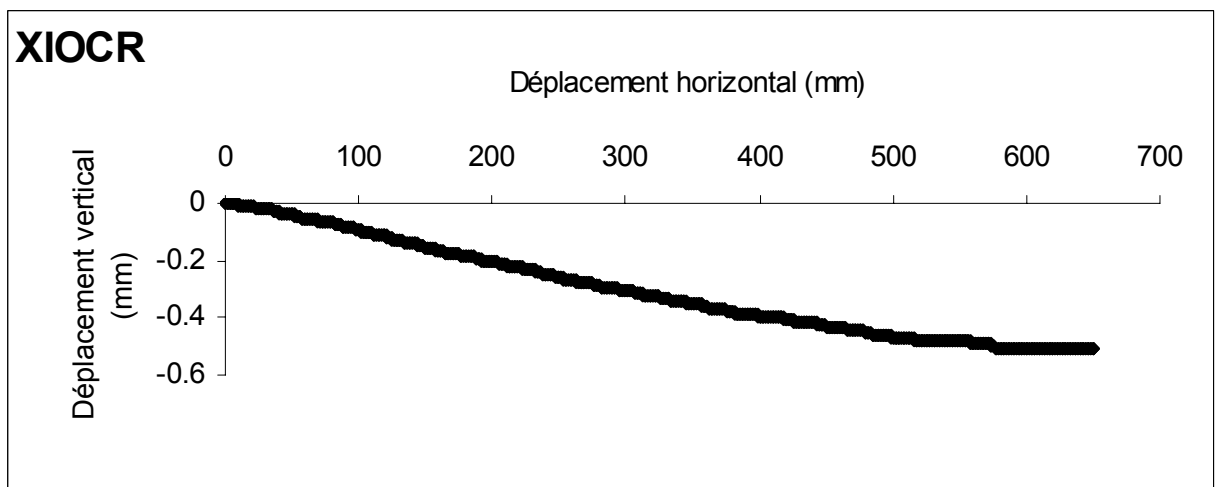


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.1.a** Résultats de l'essai XIO

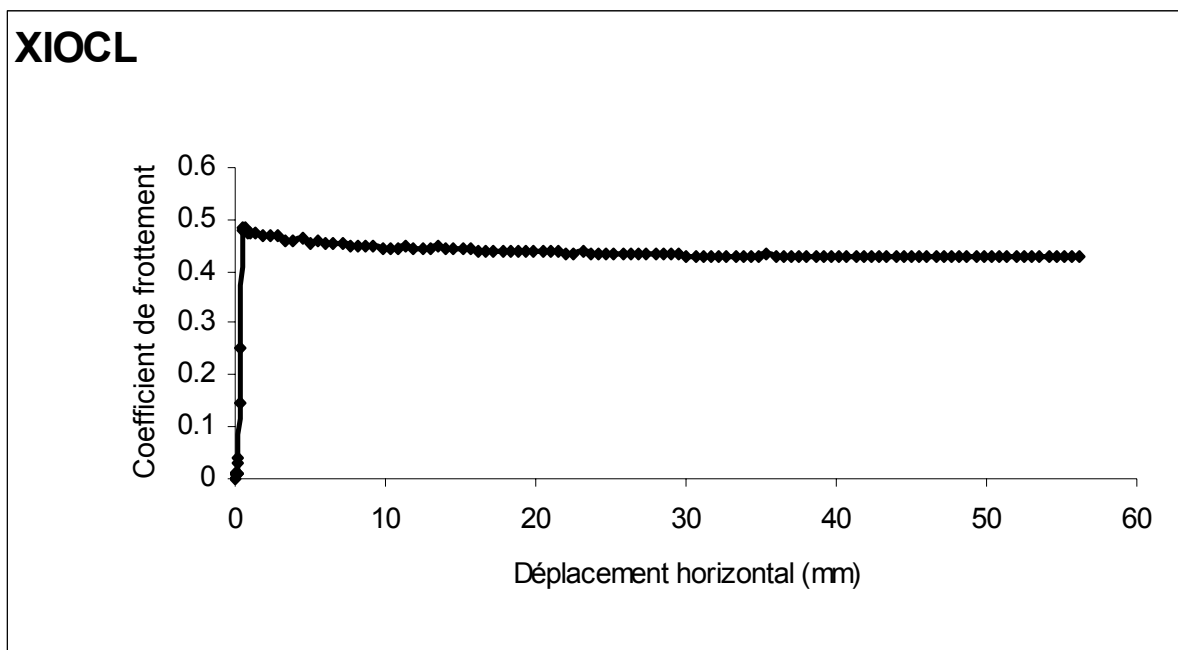


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

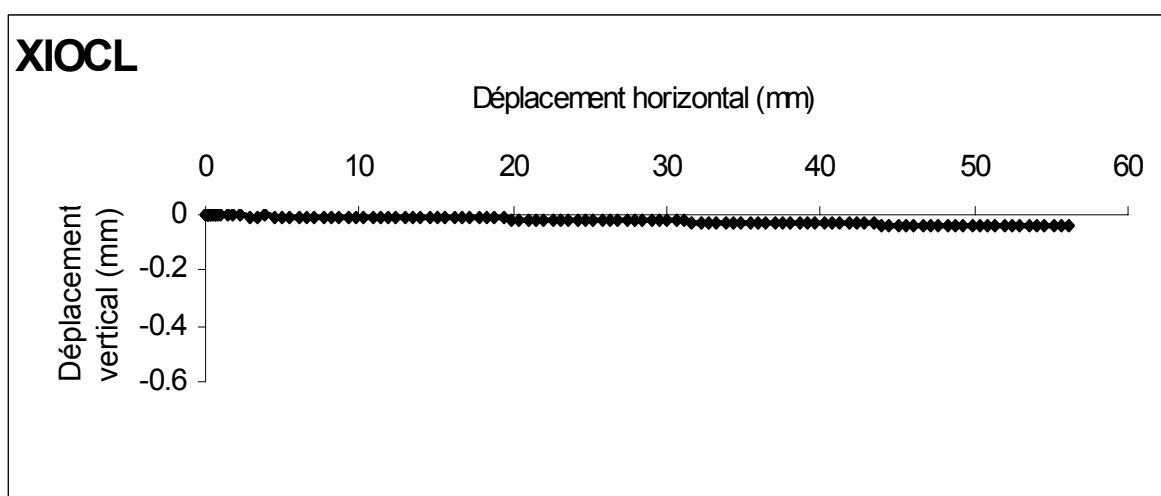


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.1.b** Résultats de l'essai XIOCR

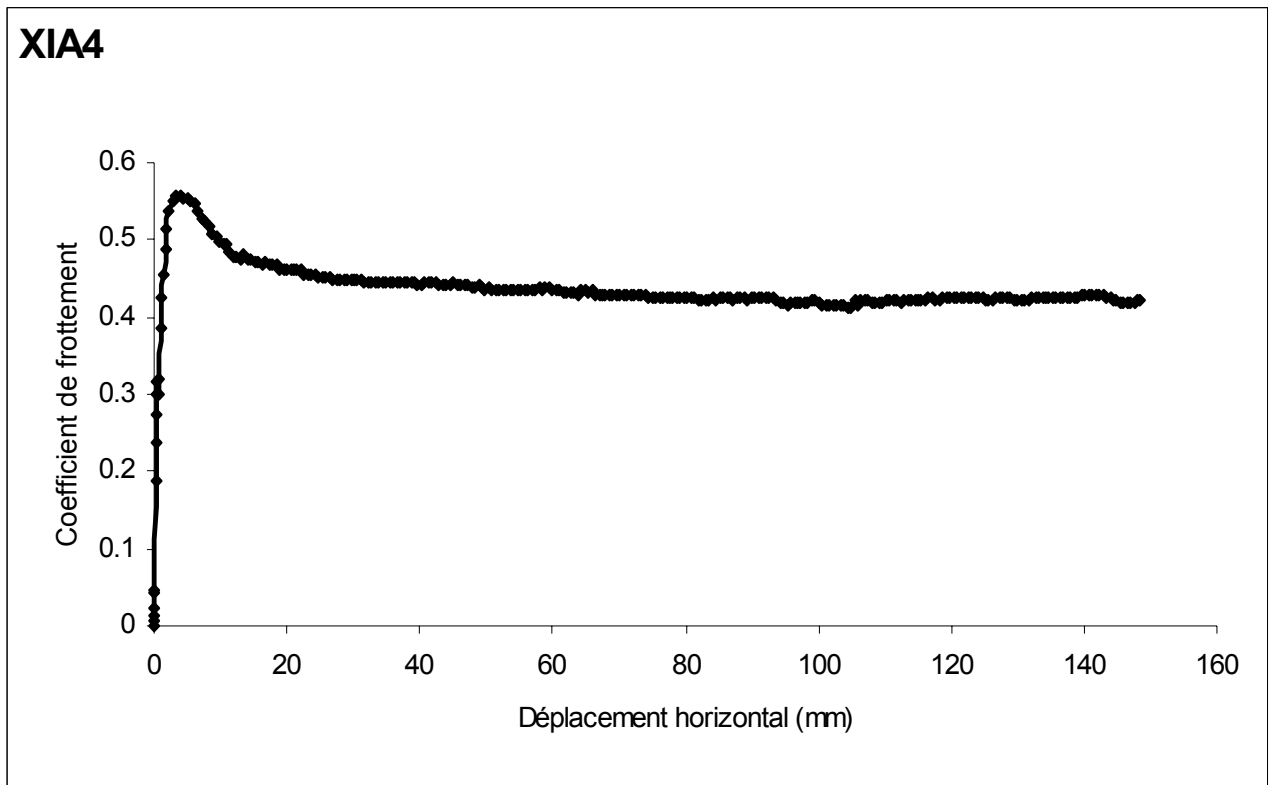


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

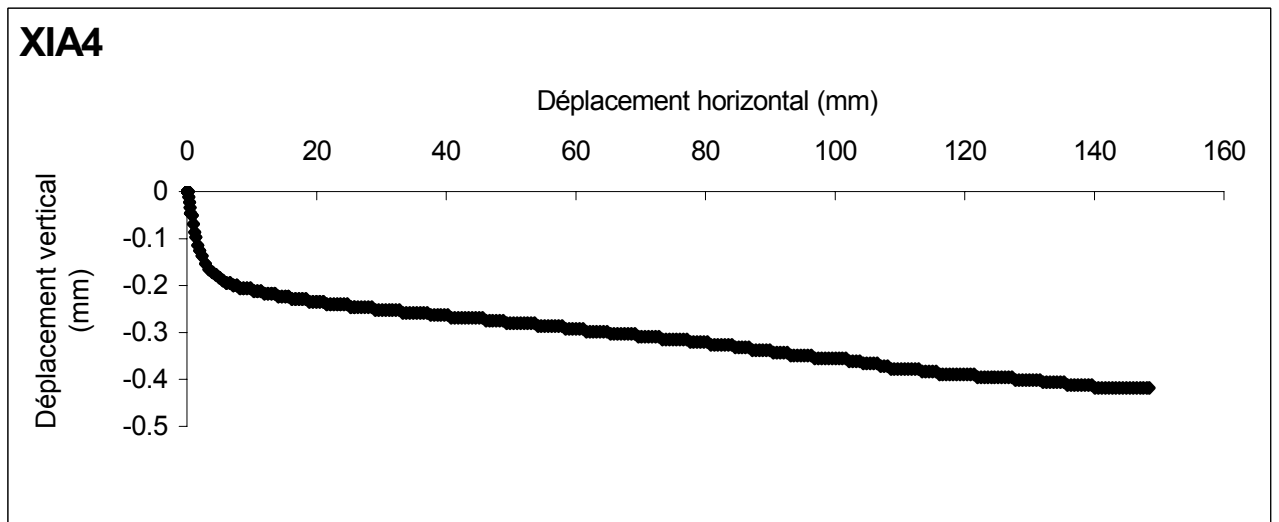


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.1.c** Résultats de l'essai XIOCL

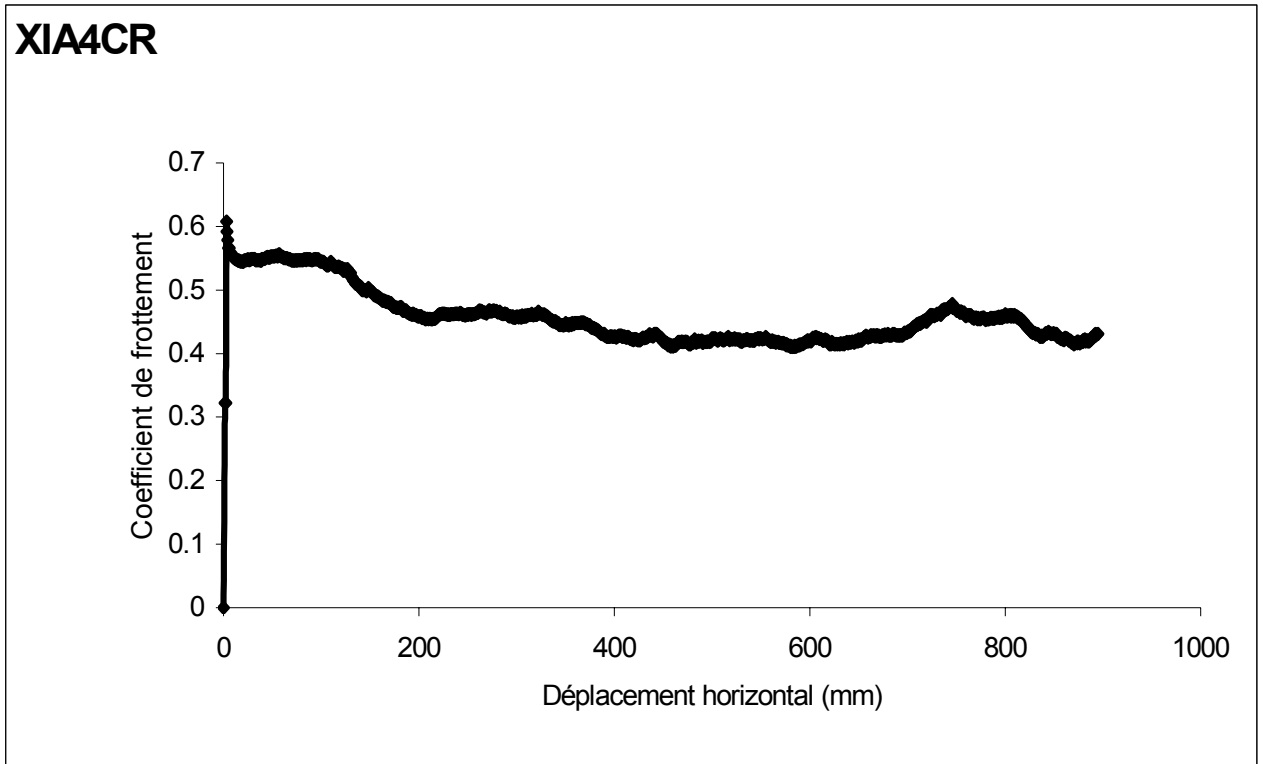


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

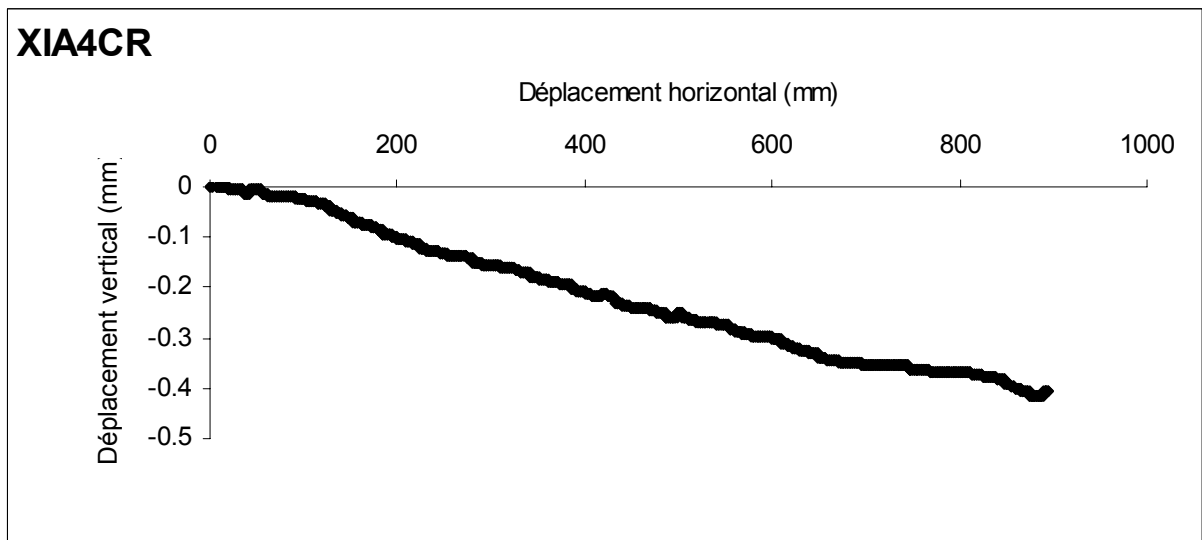


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.2.a** Résultats de l'essai XIA4

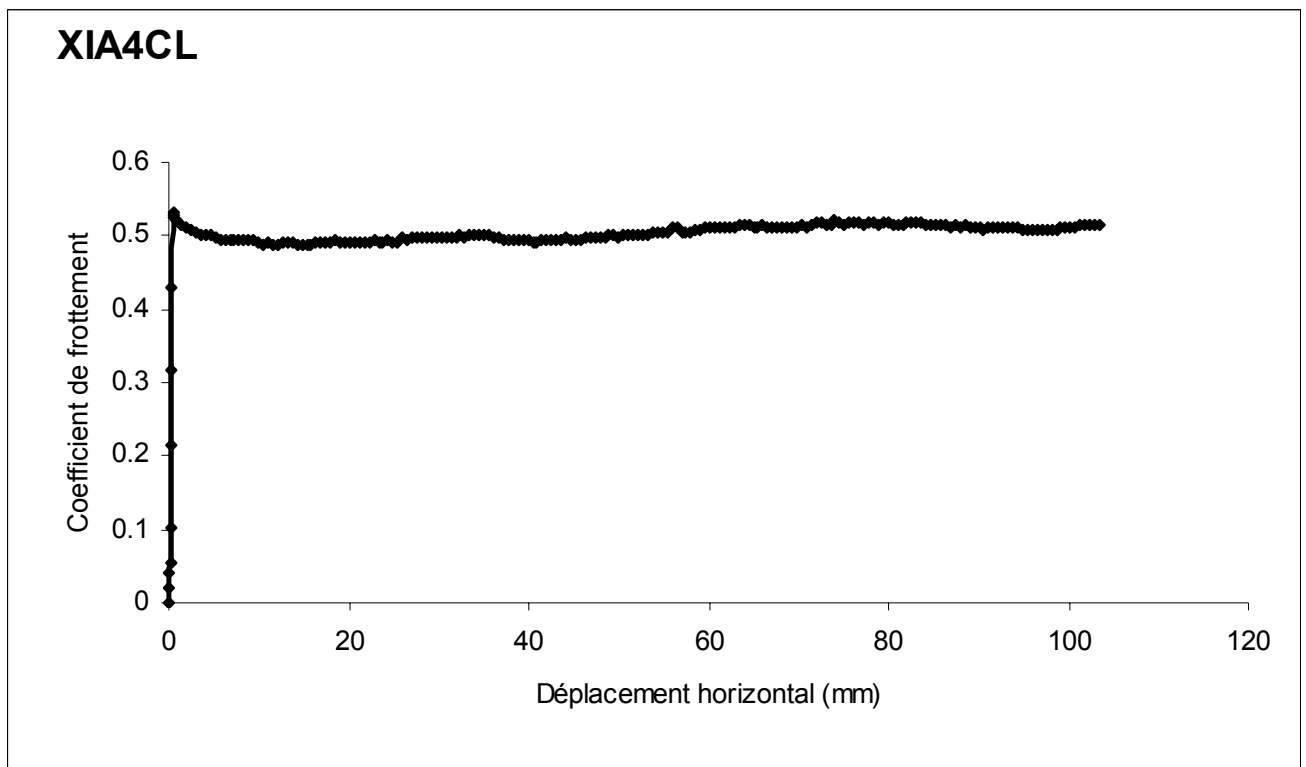


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

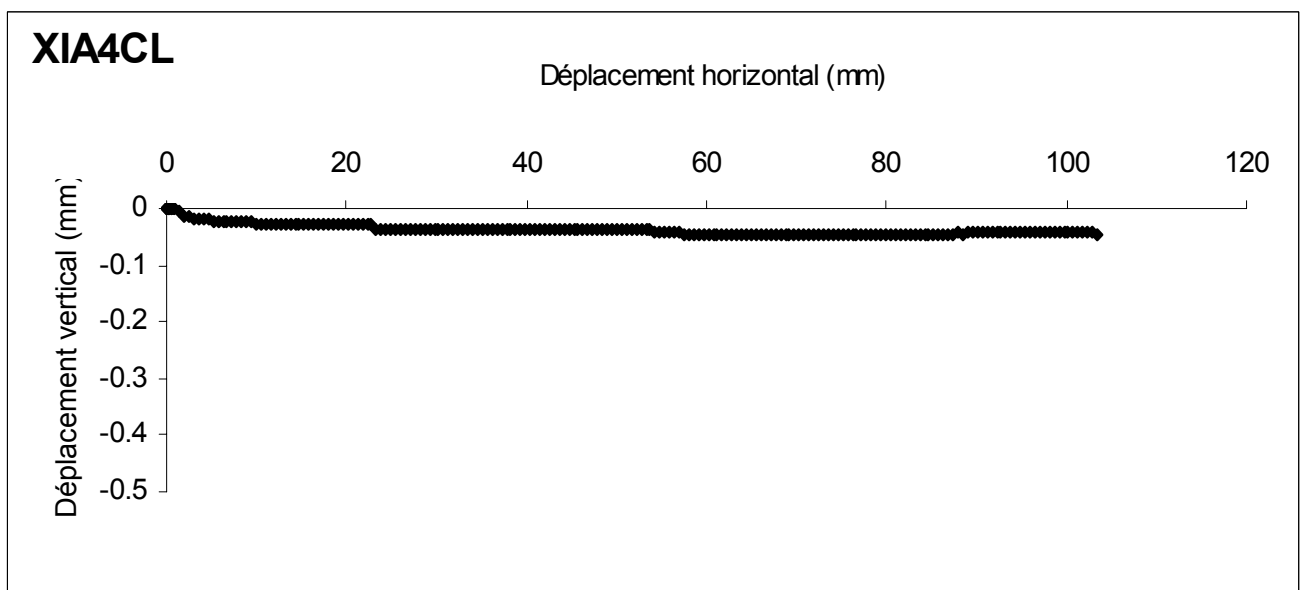


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.2.b** Résultats de l'essai XIA4CR

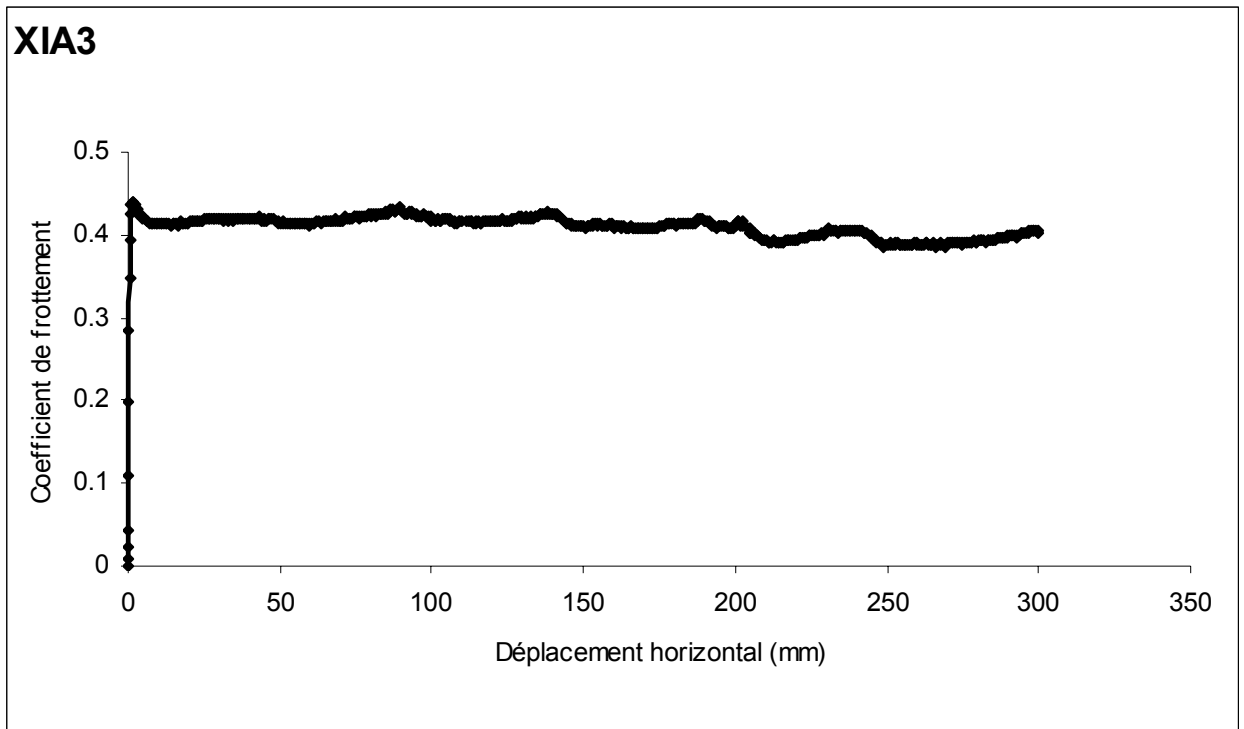


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

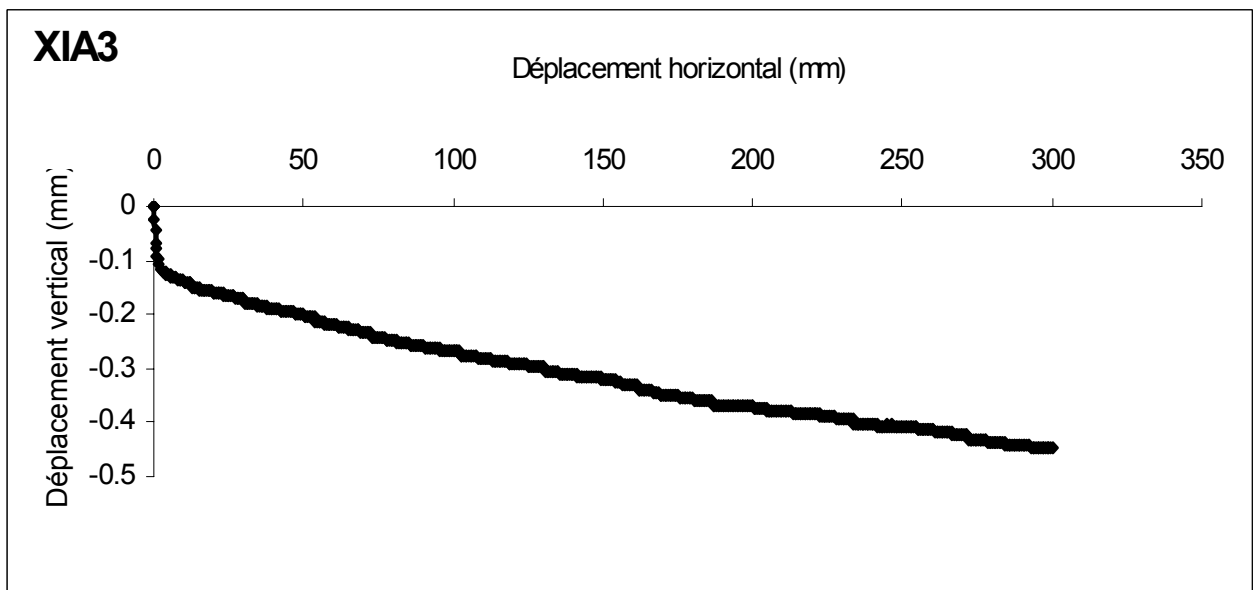


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.2.c** Résultats de l'essai XIA4C

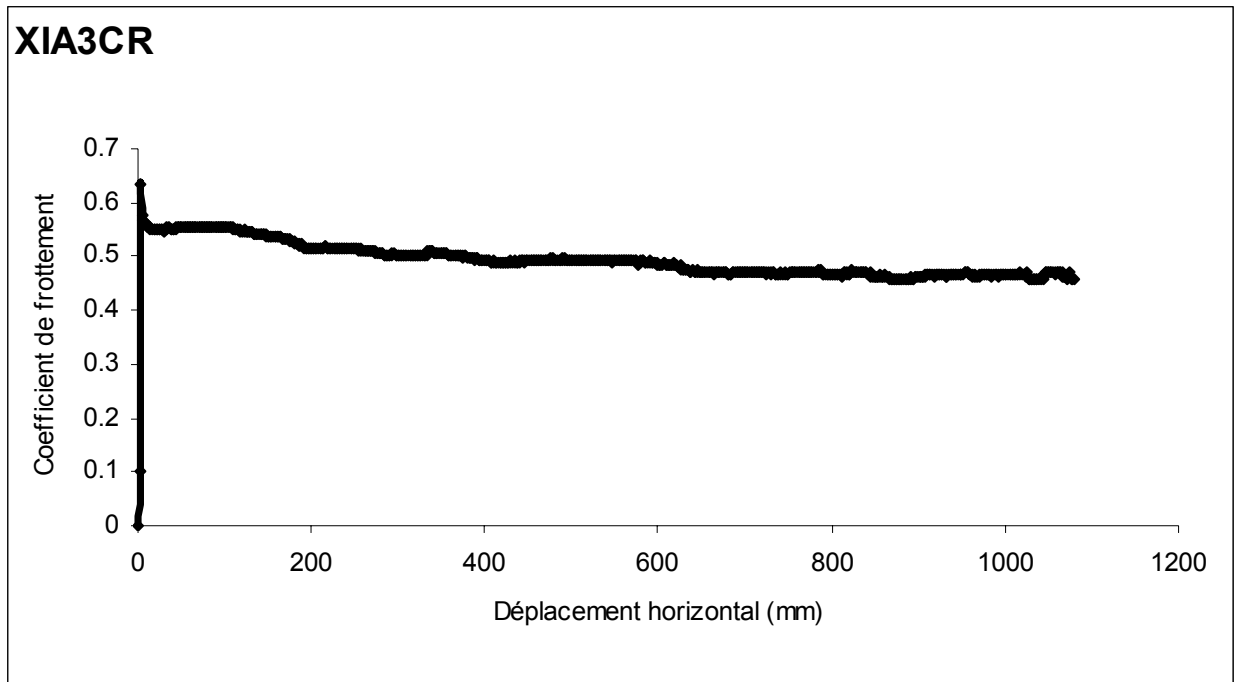


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

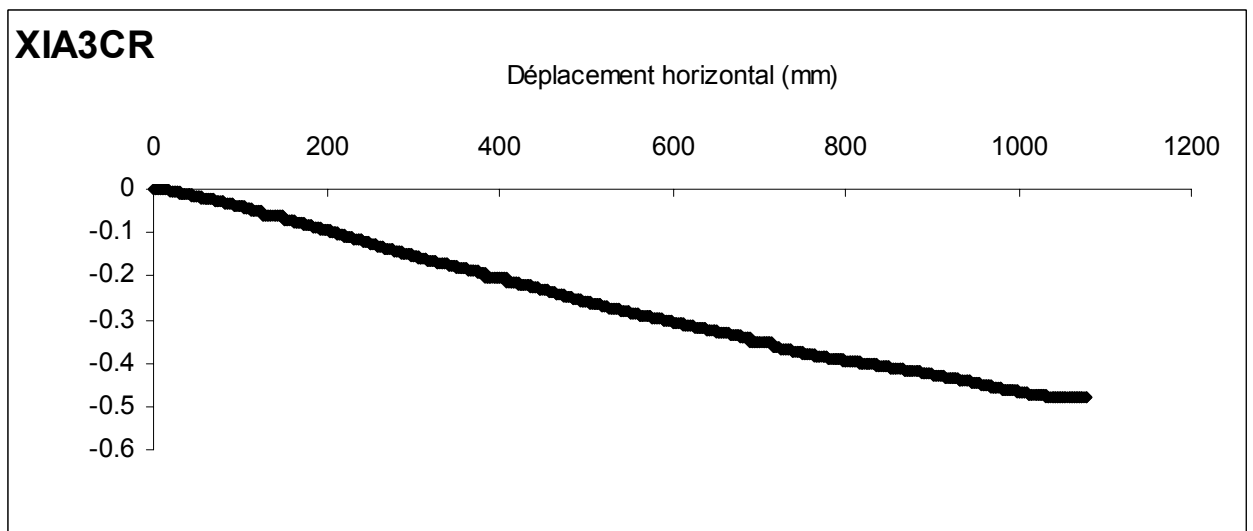


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.3.a** Résultats de l'essai XIA3

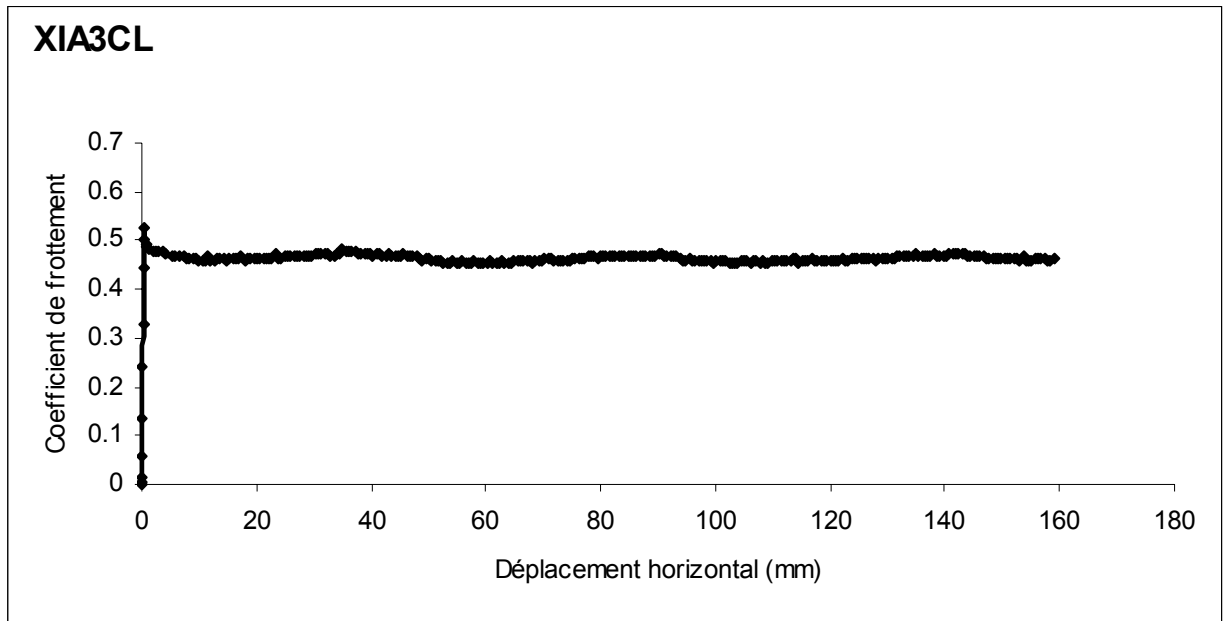


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

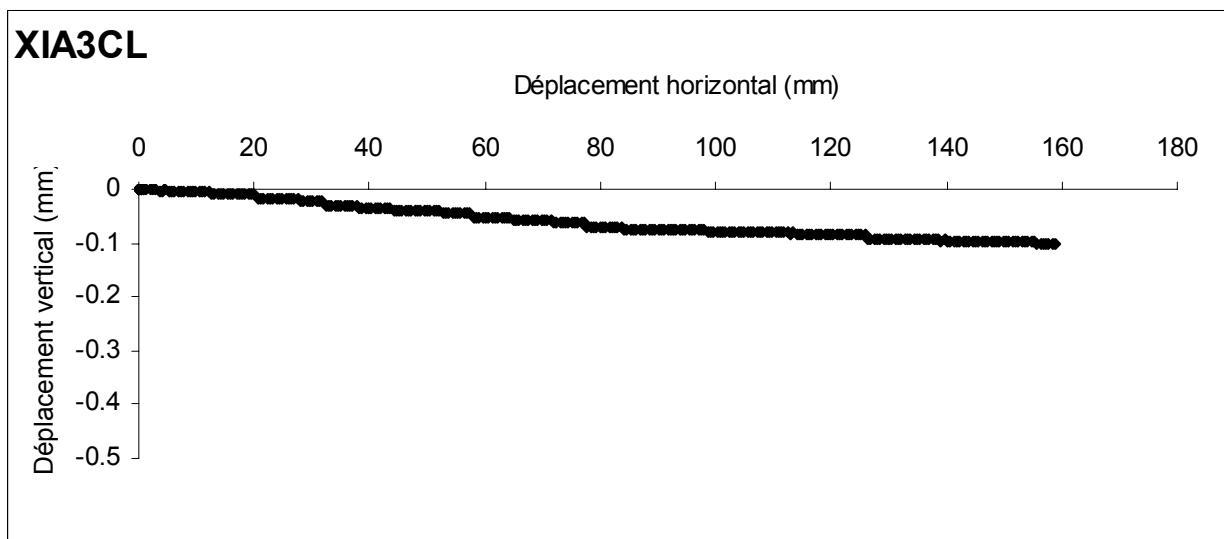


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.3.b** Résultats de l'essai XIA3CR

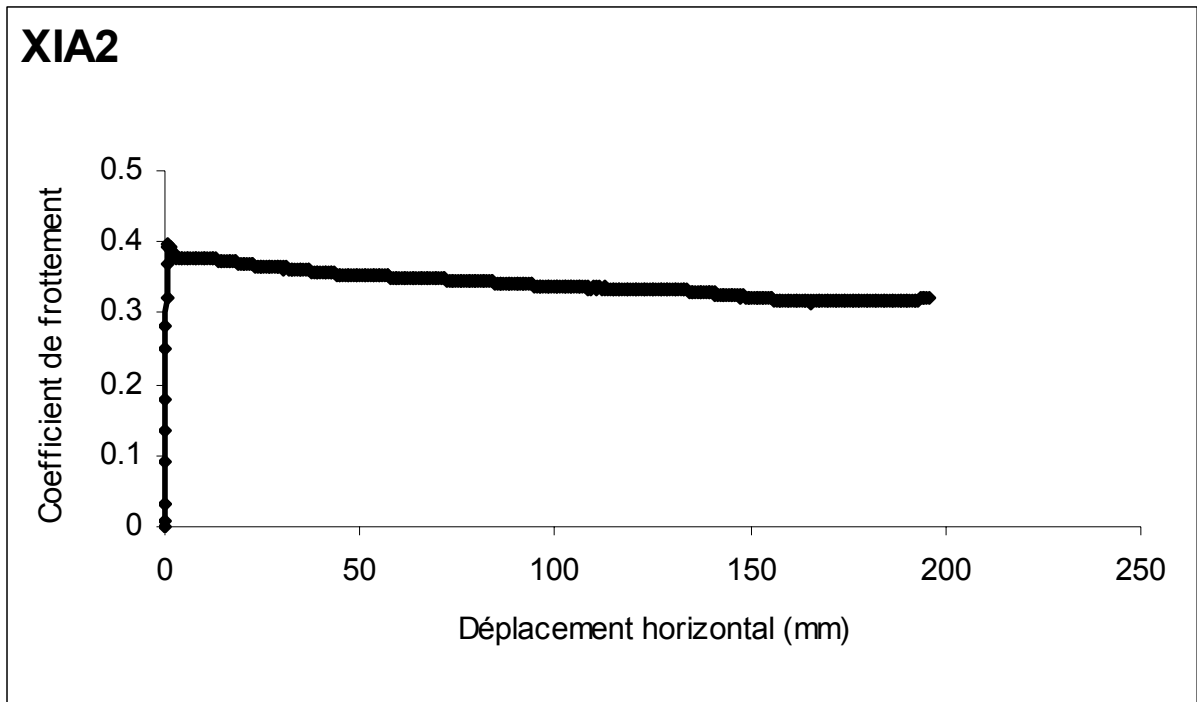


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

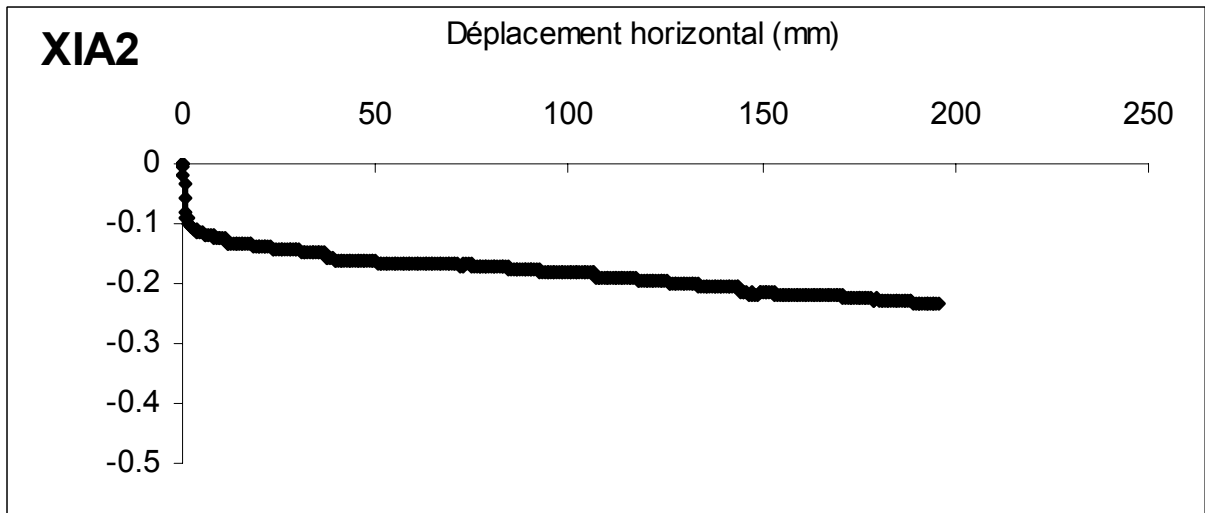


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.3.c** Résultats de l'essai XIA3CL

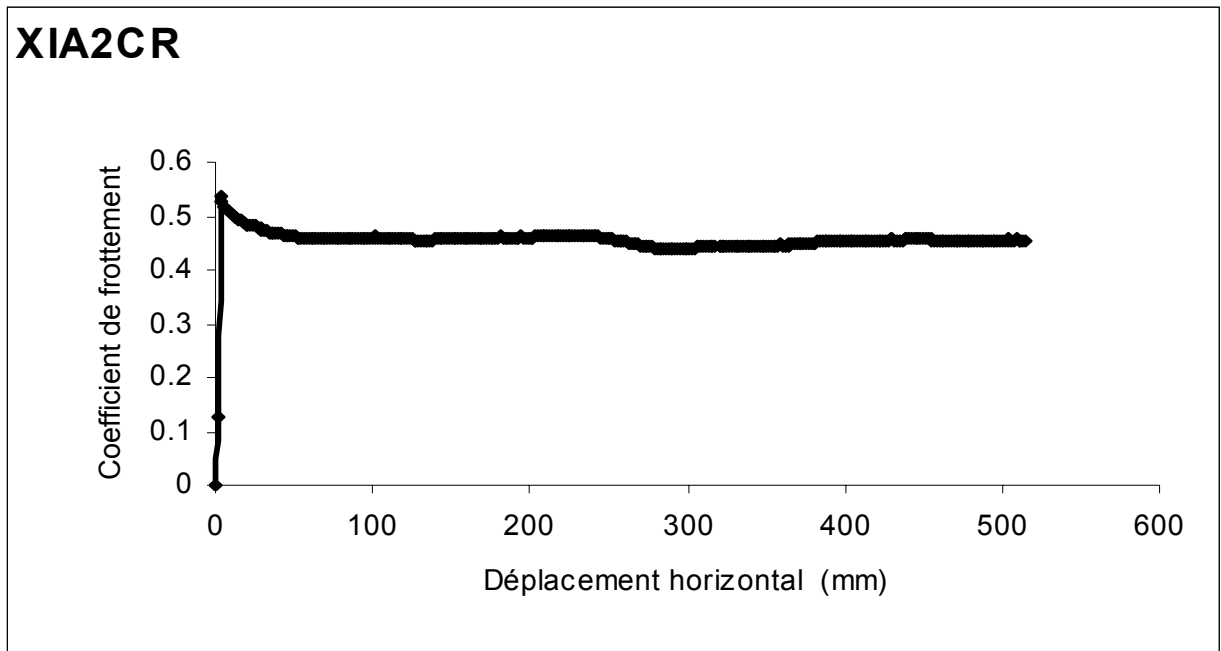


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

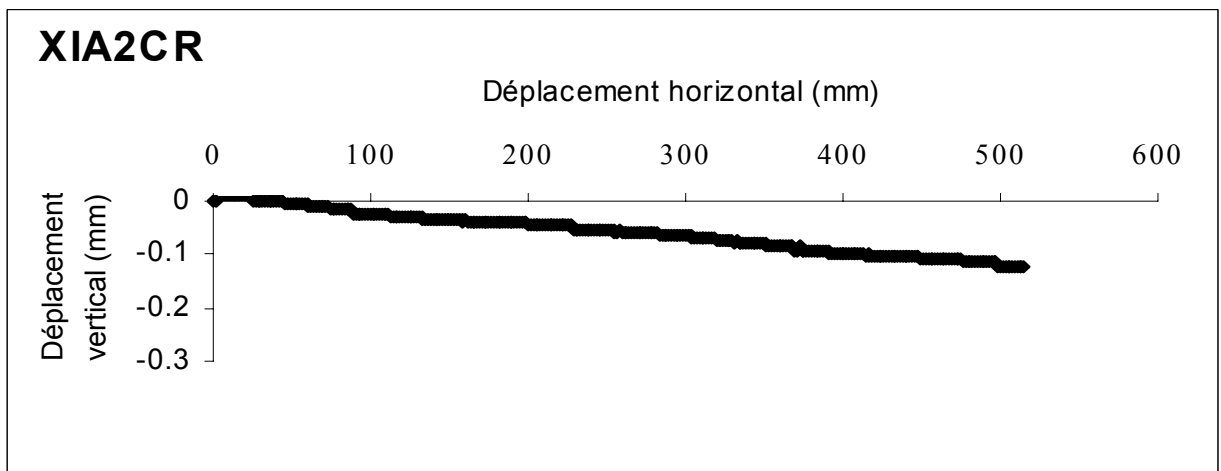


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.4.a** Résultats de l'essai XIA2

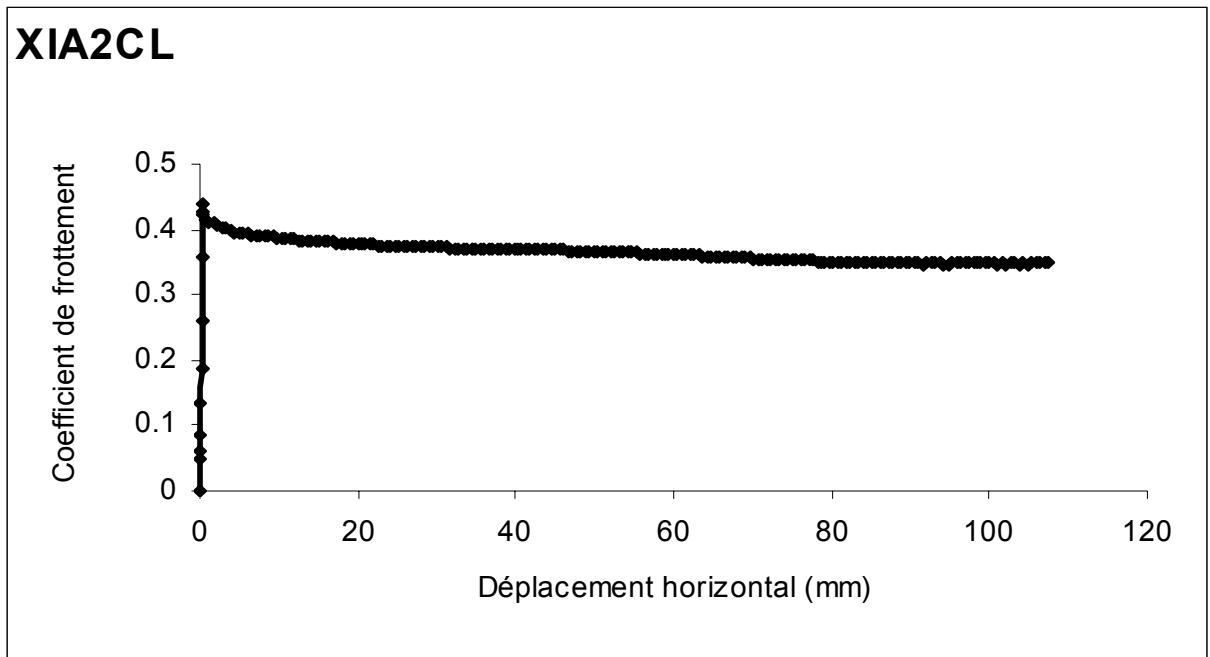


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

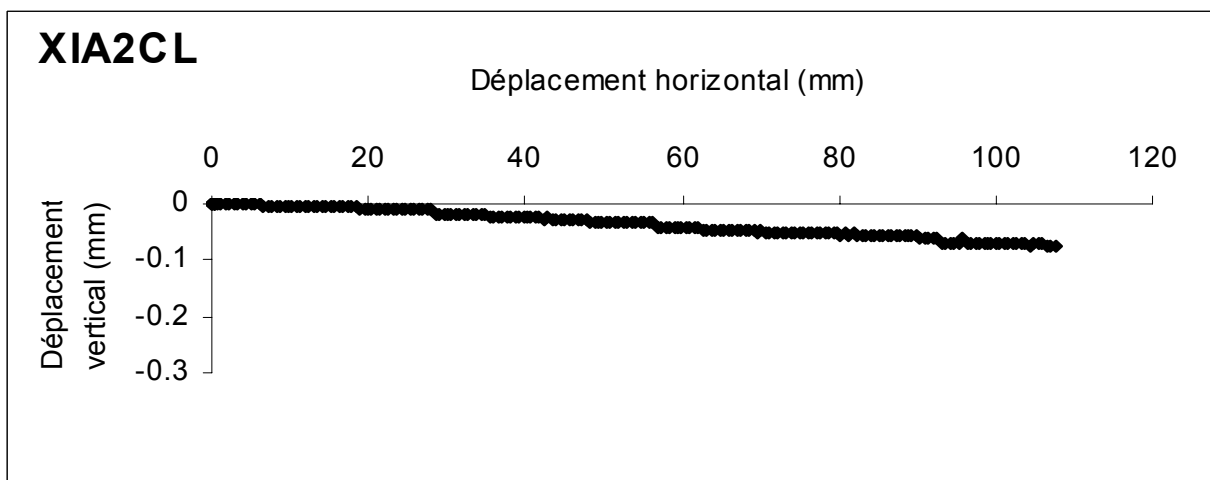


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.4.b** Résultats de l'essai XIA2CR

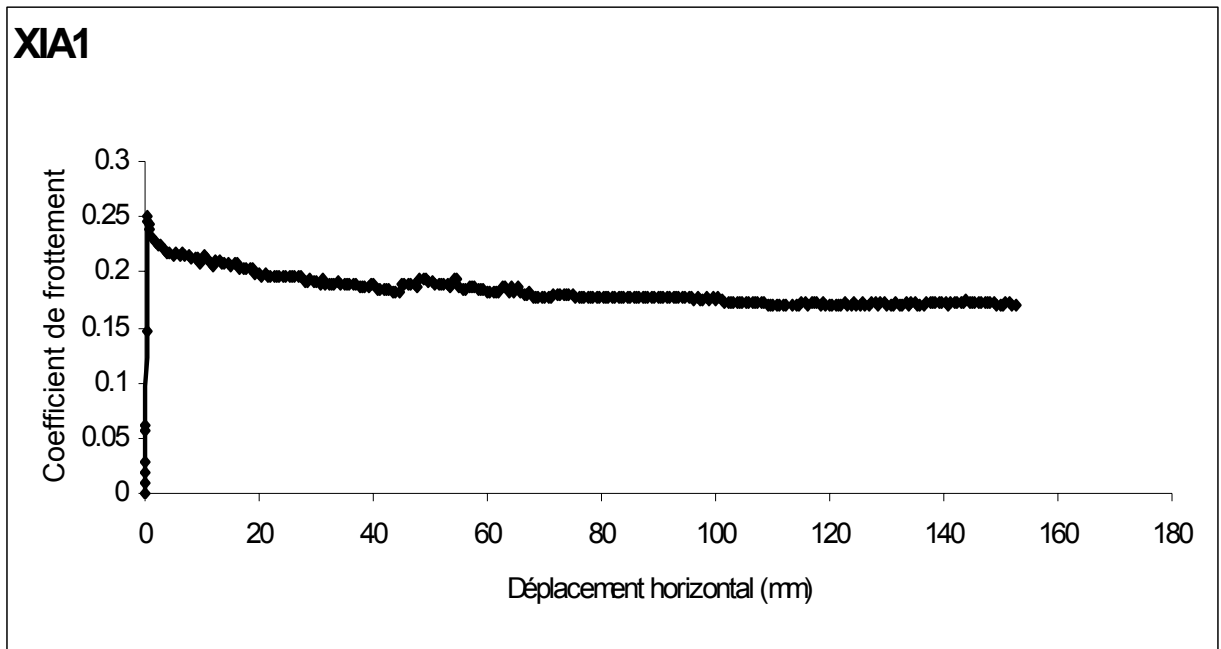


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

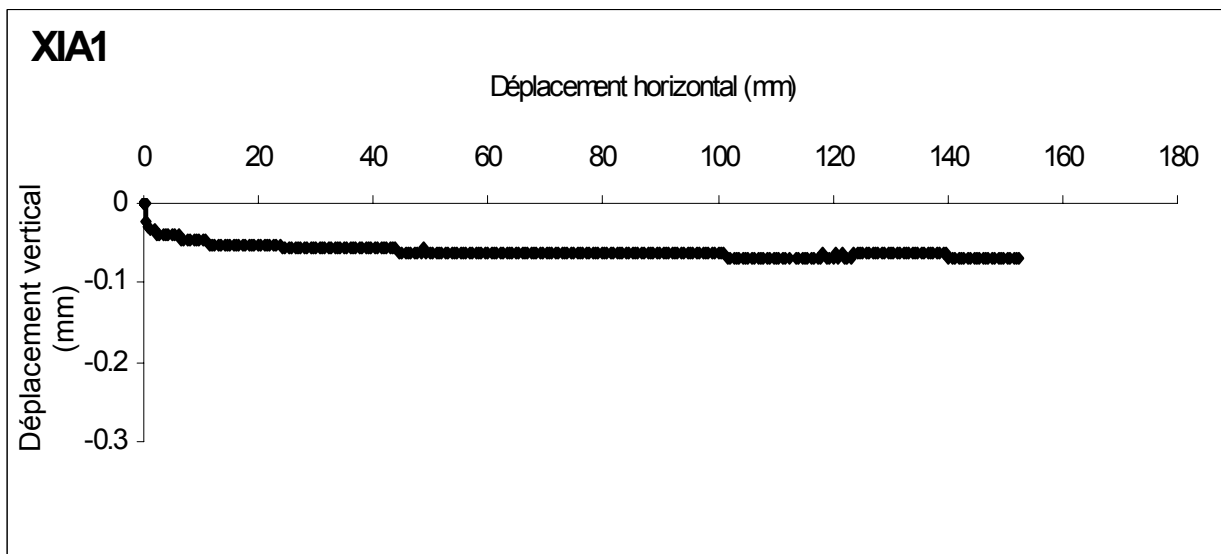


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.4.c** Résultats de l'essai XIA2CL

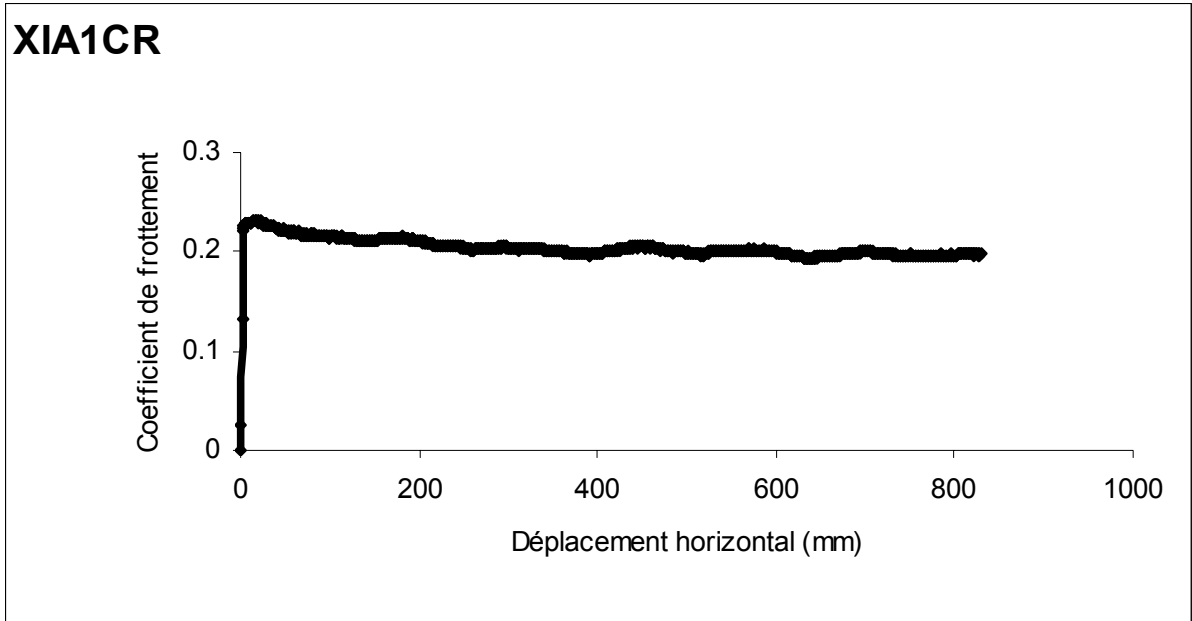


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

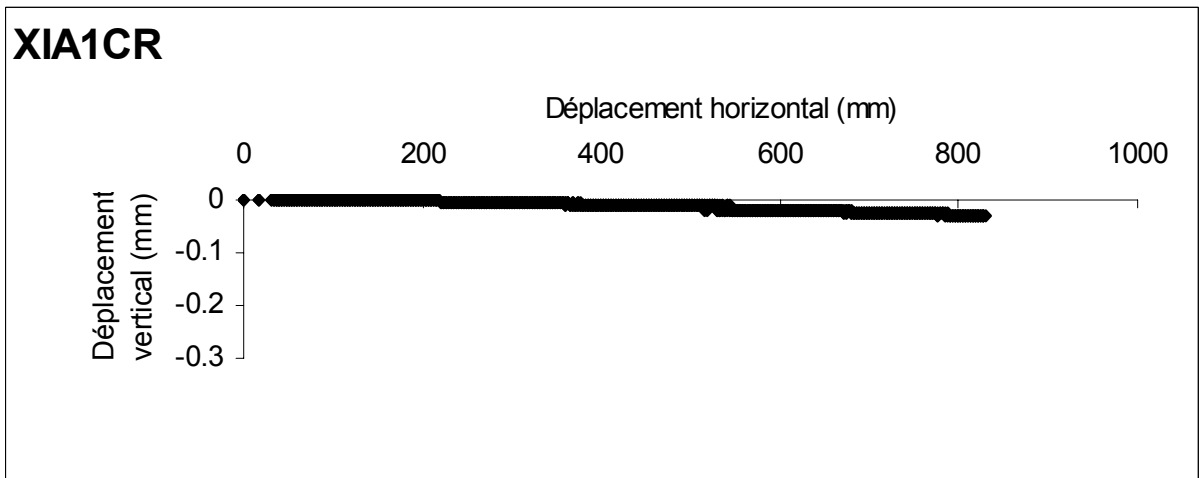


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.5.a** Résultats de l'essai XIA1

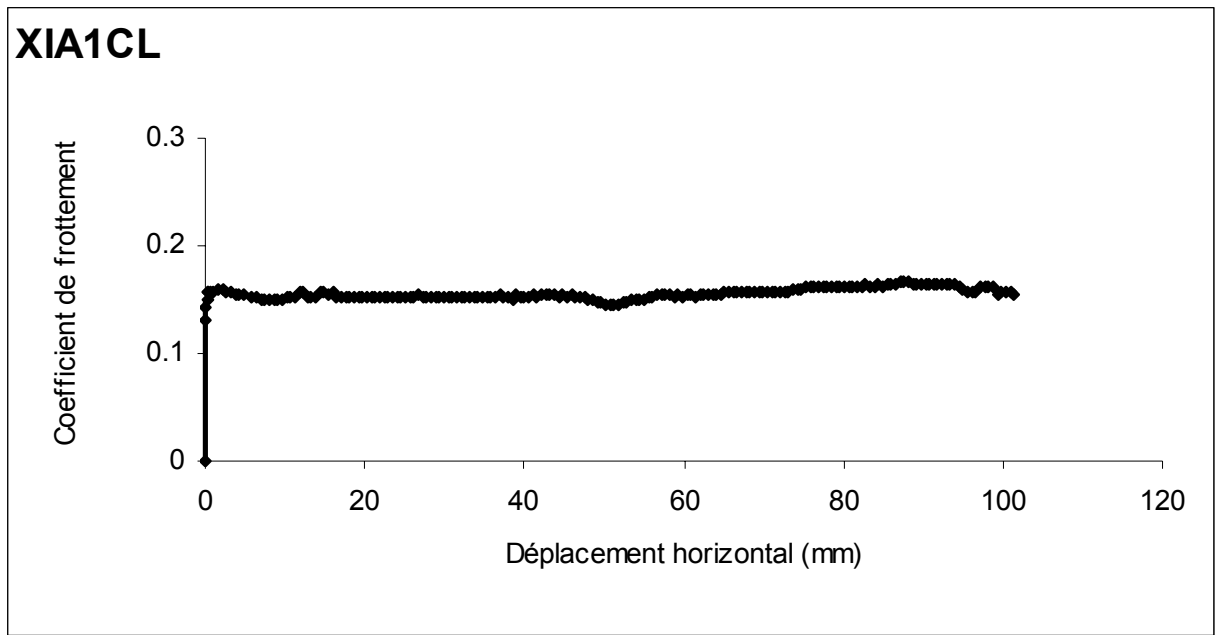


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

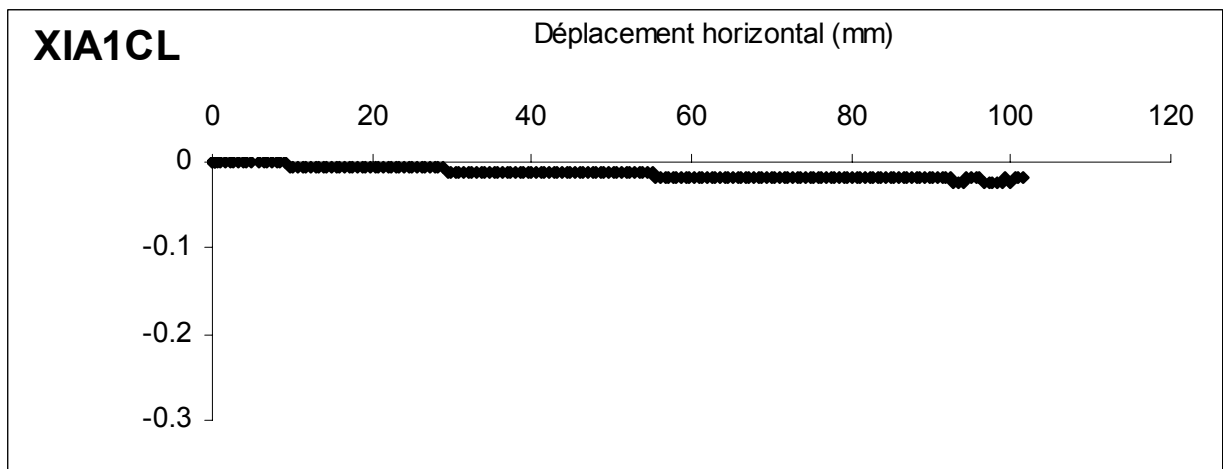


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.5.b** Résultats de l'essai XIA1CR

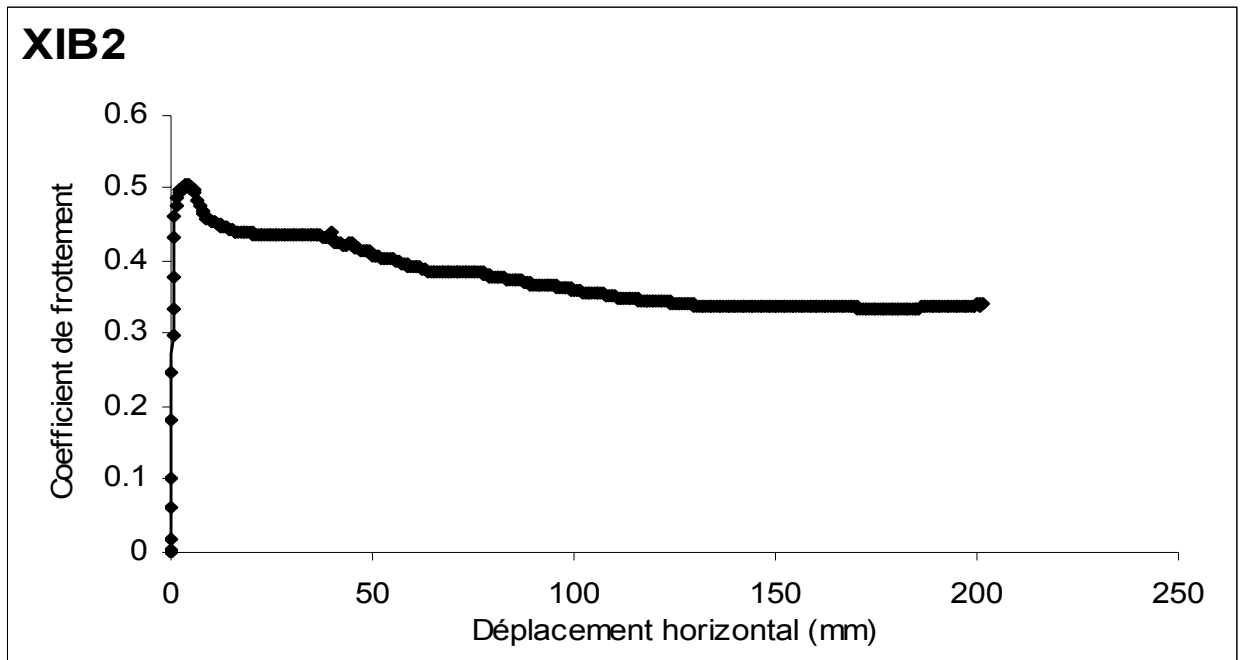


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

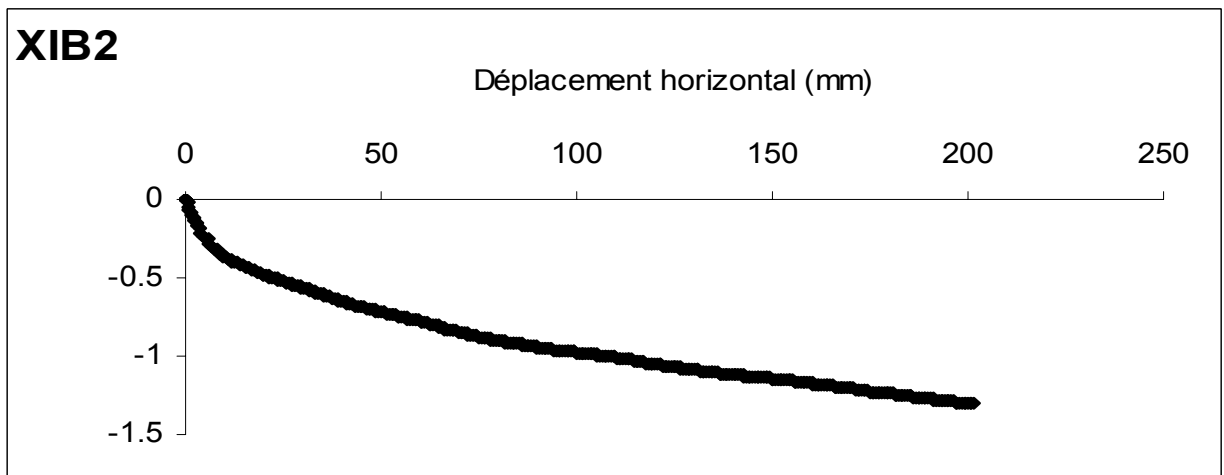


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.5.c** Résultats de l'essai XIA1CL

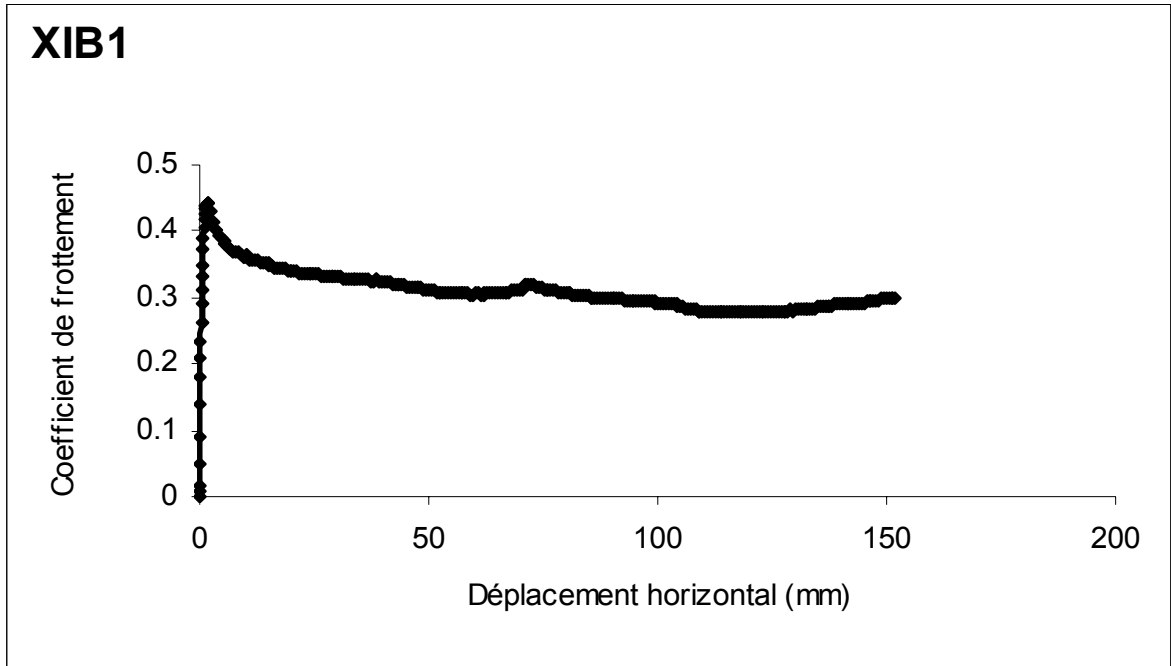


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

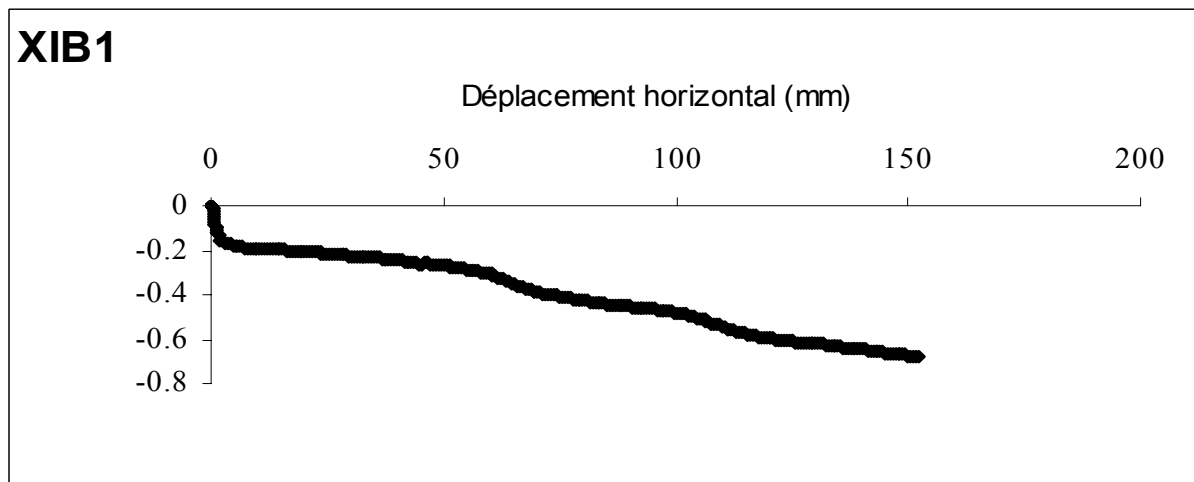


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.6** Résultat de l'essai XIB2

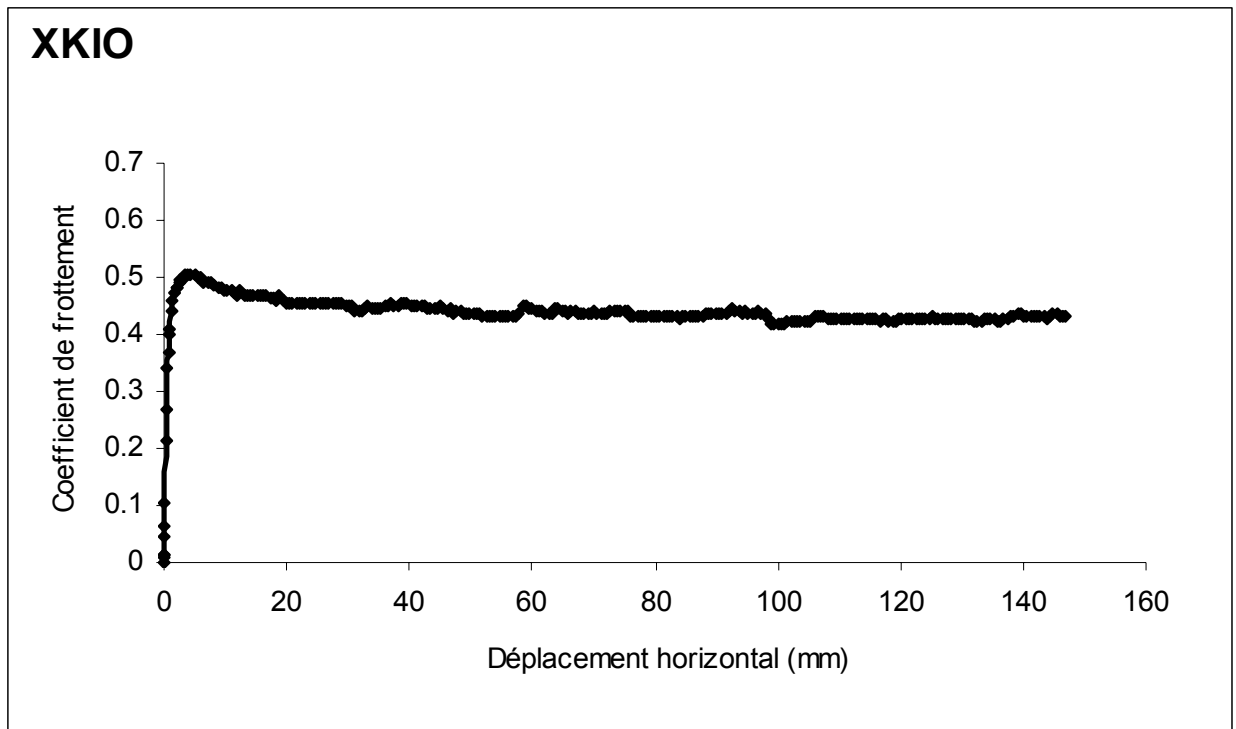


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

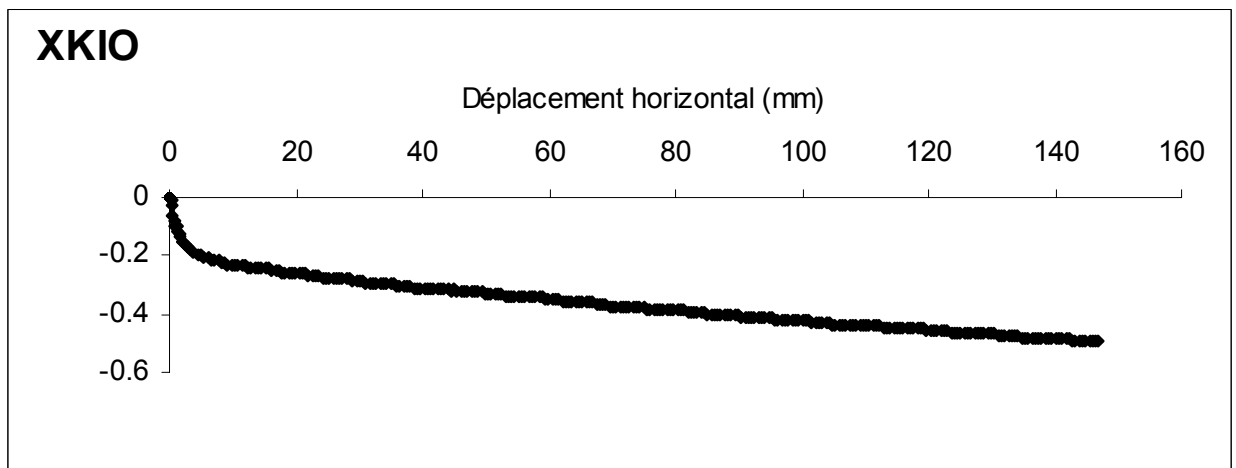


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.7** Résultat de l'essai XIB1

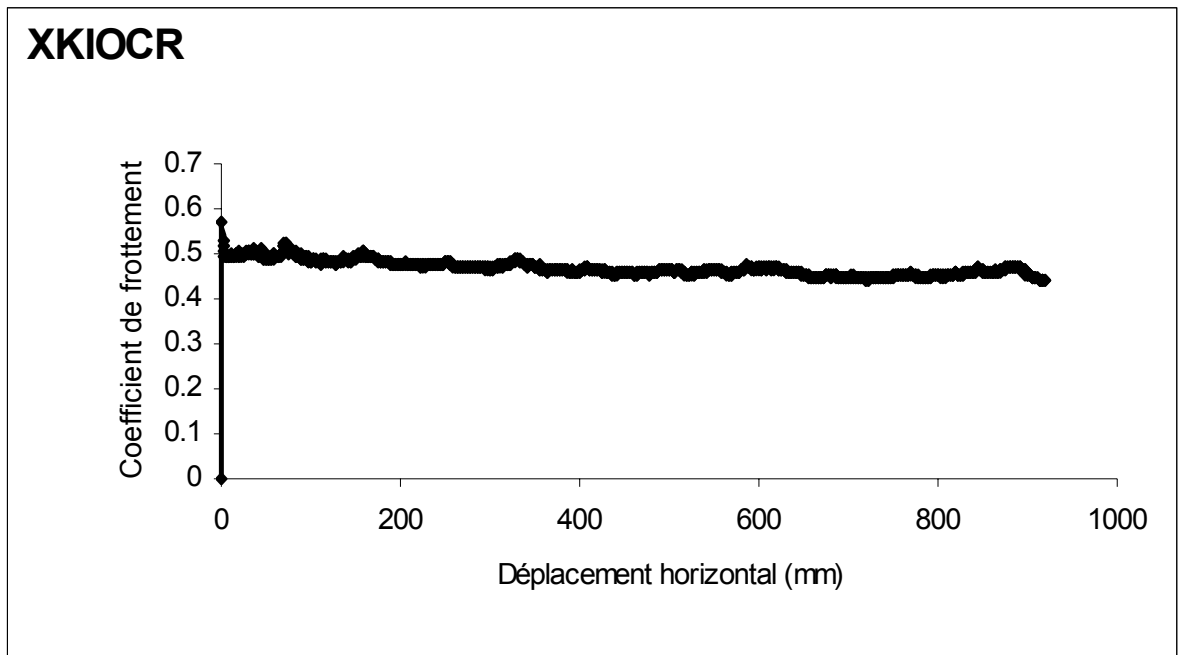


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

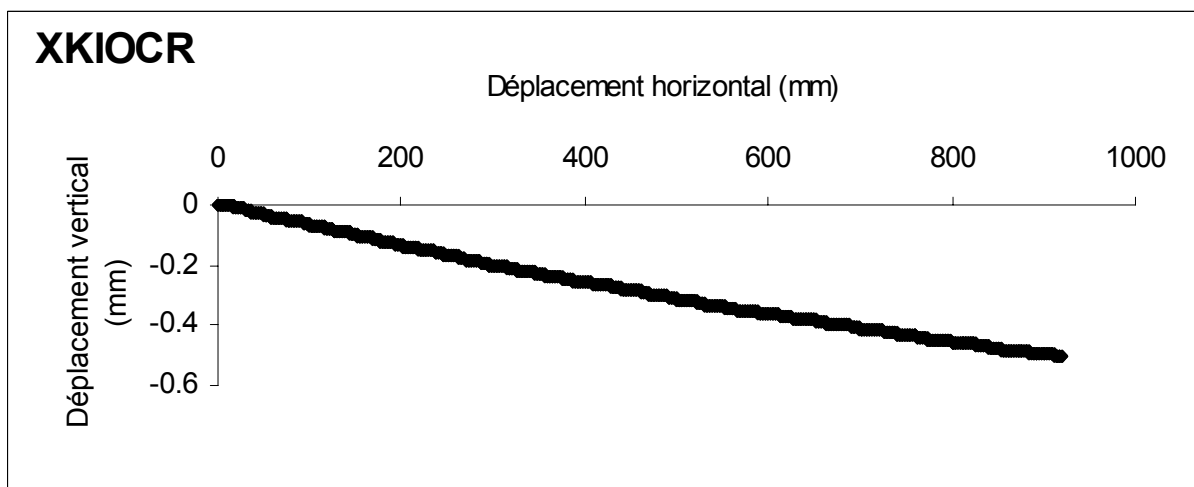


b) Courbe déplacement vertical –déplacement horizontal

**Figure A.8.a** Résultats de l'essai XKIO

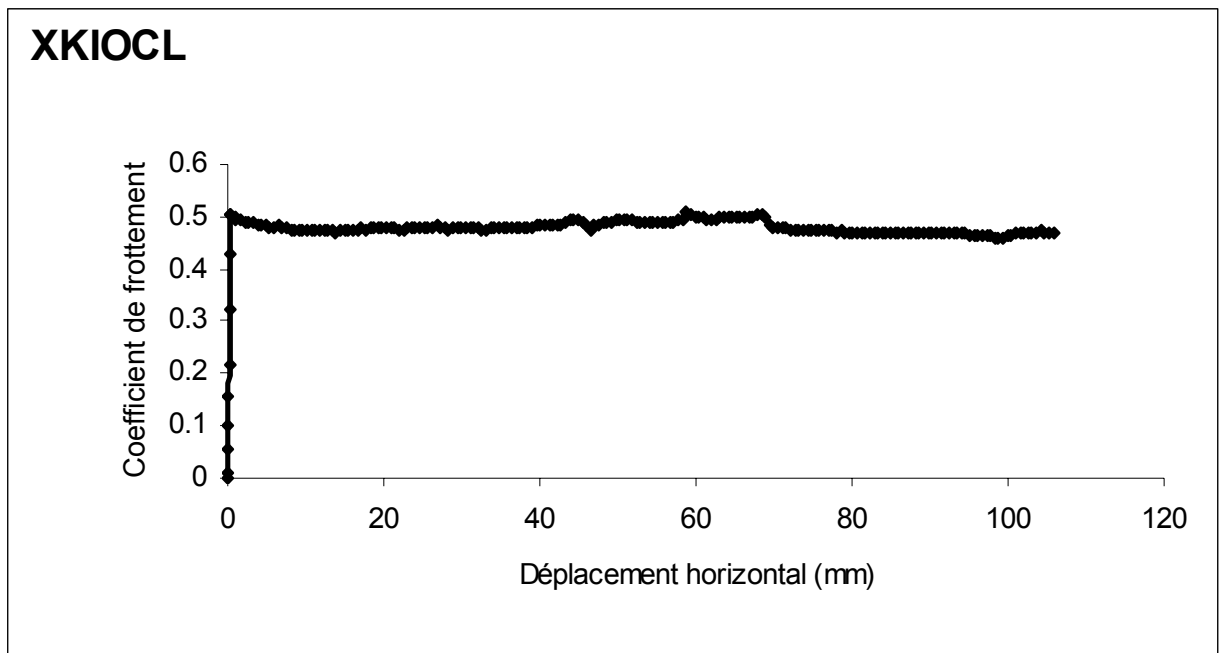


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

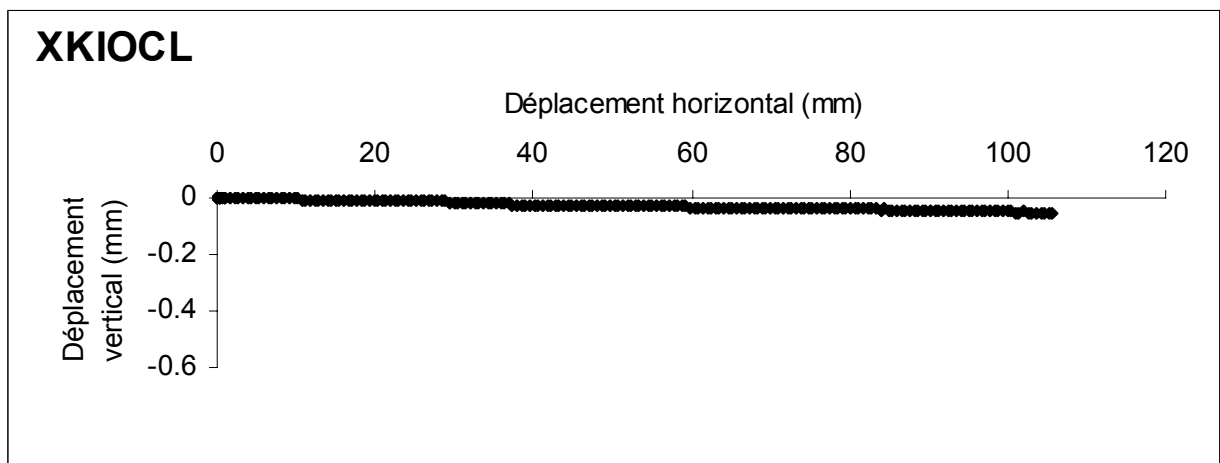


b) Courbe déplacement vertical –déplacement horizontal

**Figure A.8.b** Résultats de l'essai XKIOCR

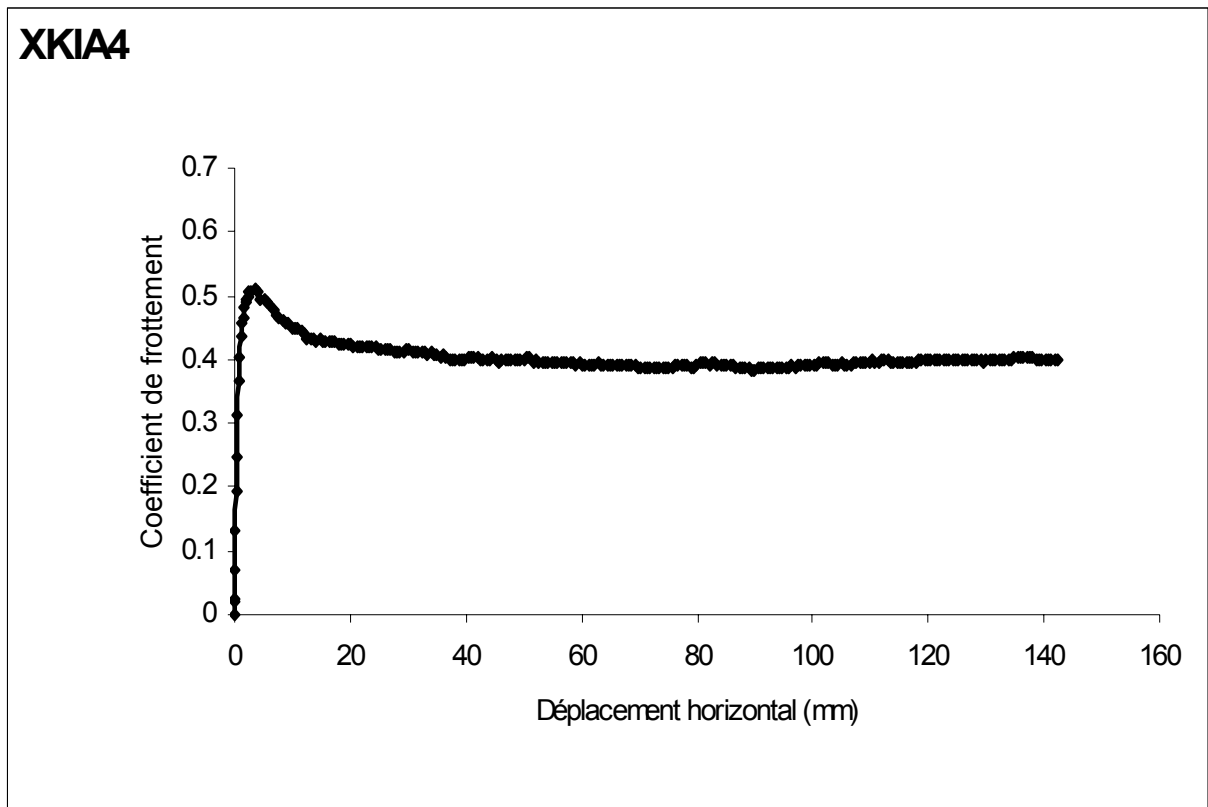


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

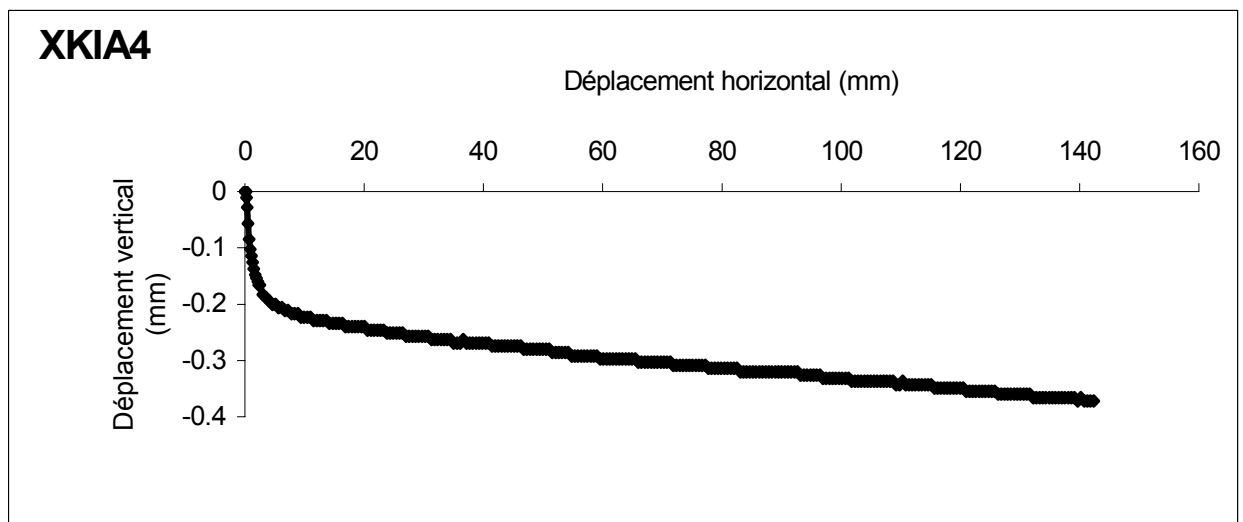


b) Courbe déplacement vertical –déplacement horizontal

**Figure A.8.c** Résultats de l'essai XKIOCL

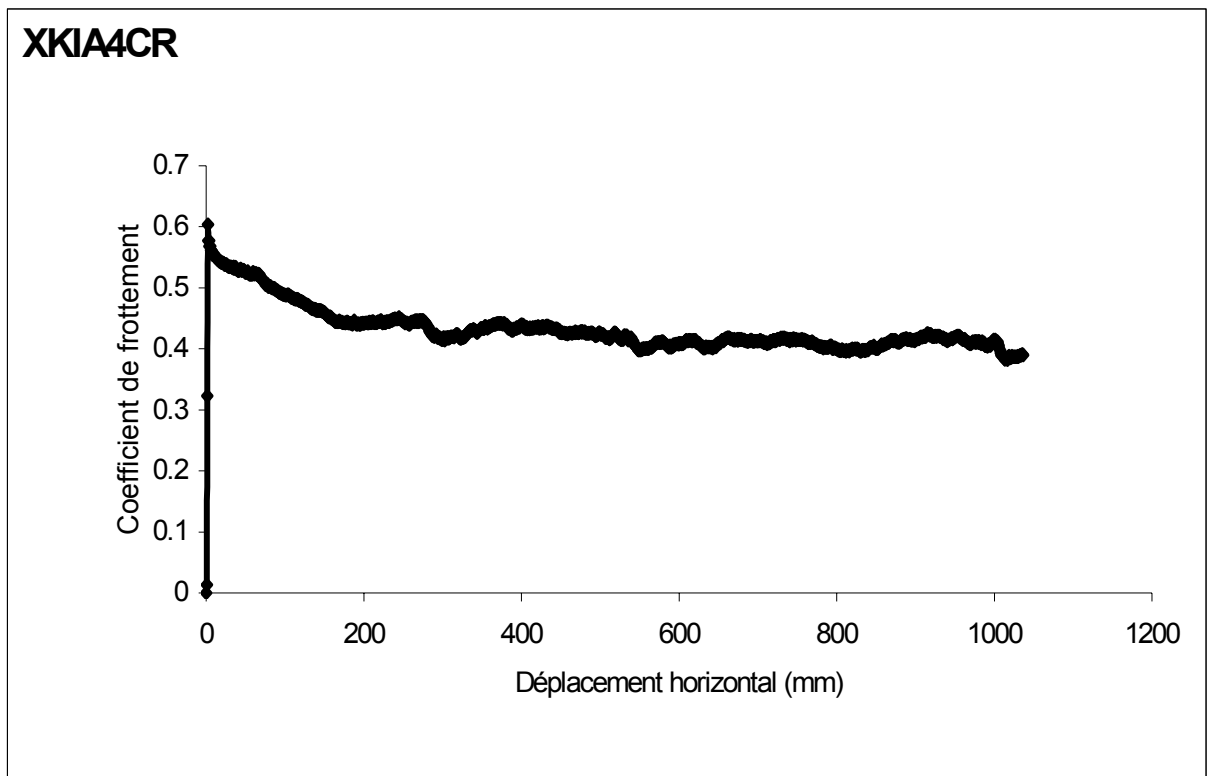


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

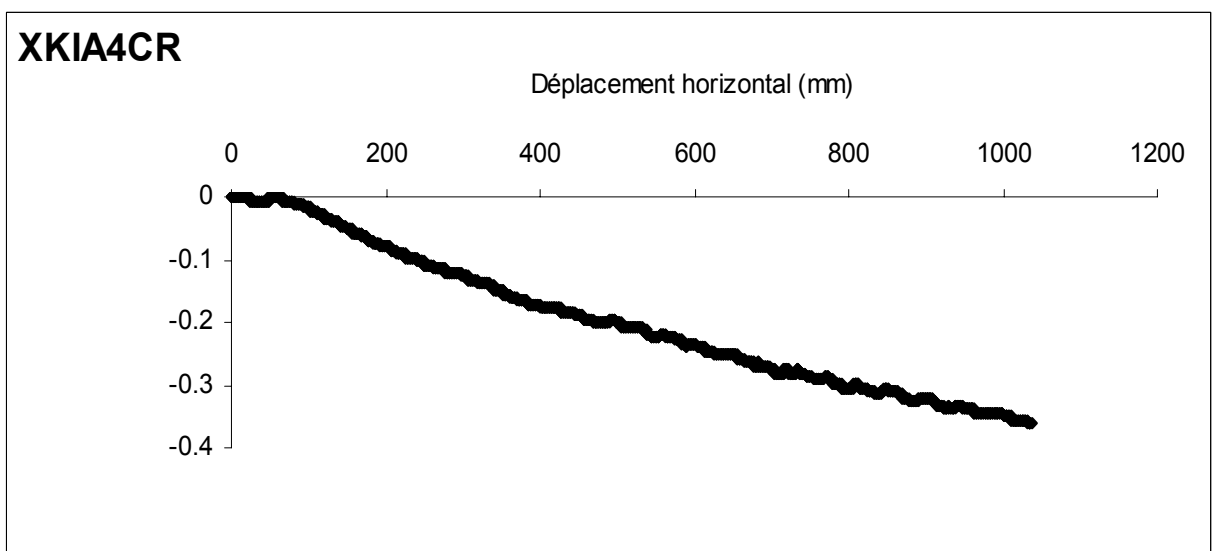


b) courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.9.a** Résultats de l'essai XKIA4

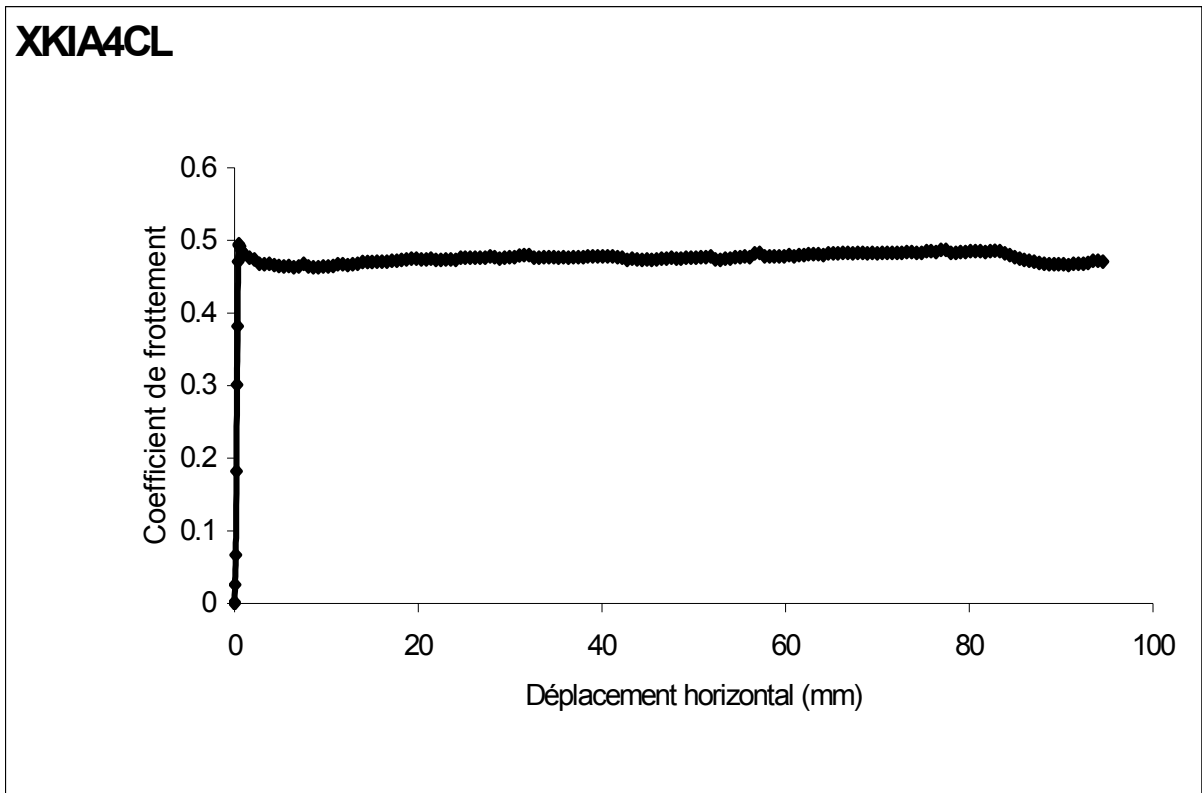


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

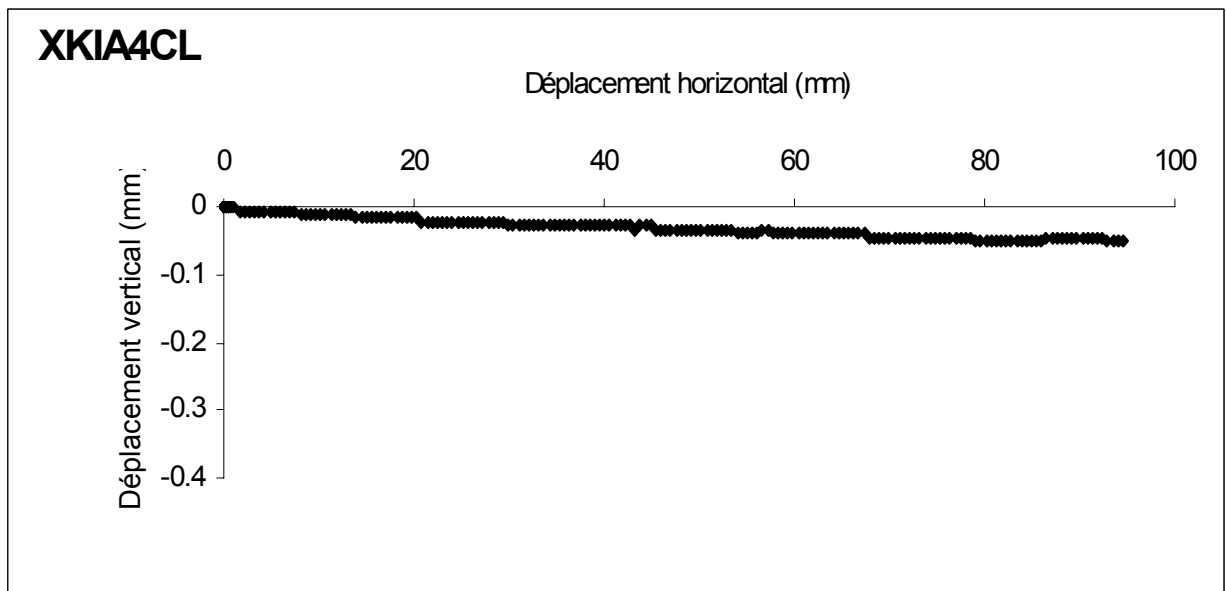


b) courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.9.b** Résultats de l'essai XKIA4CR

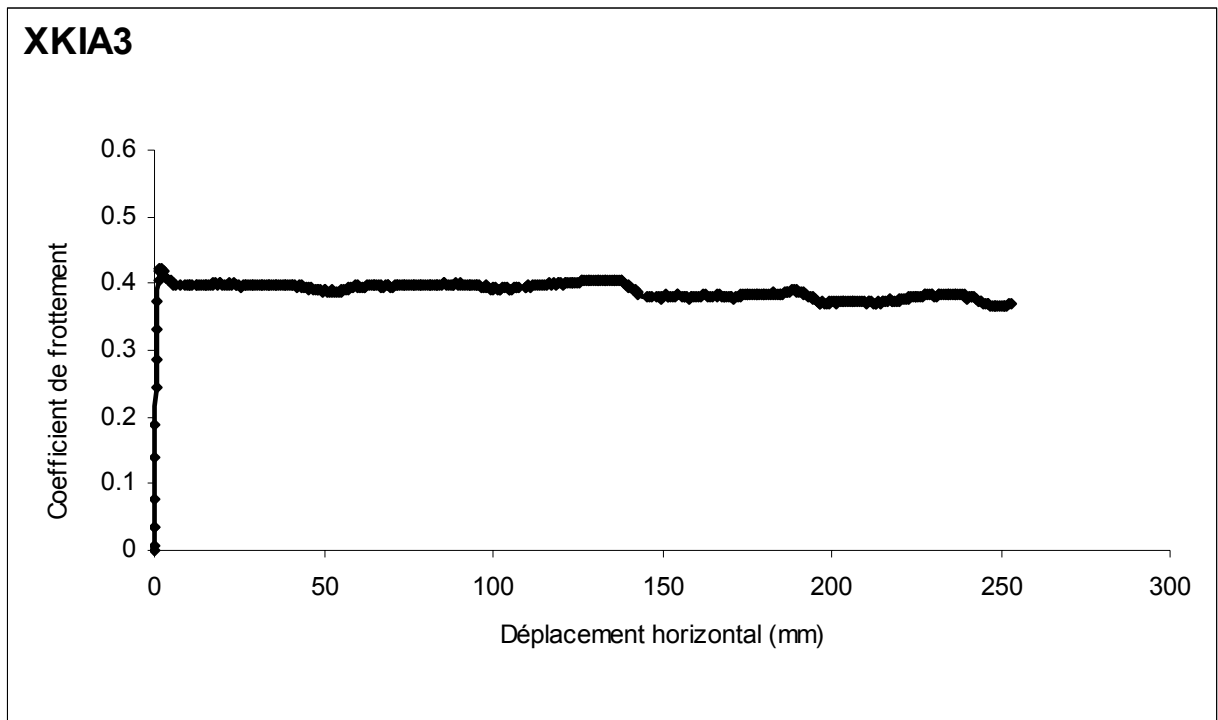


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

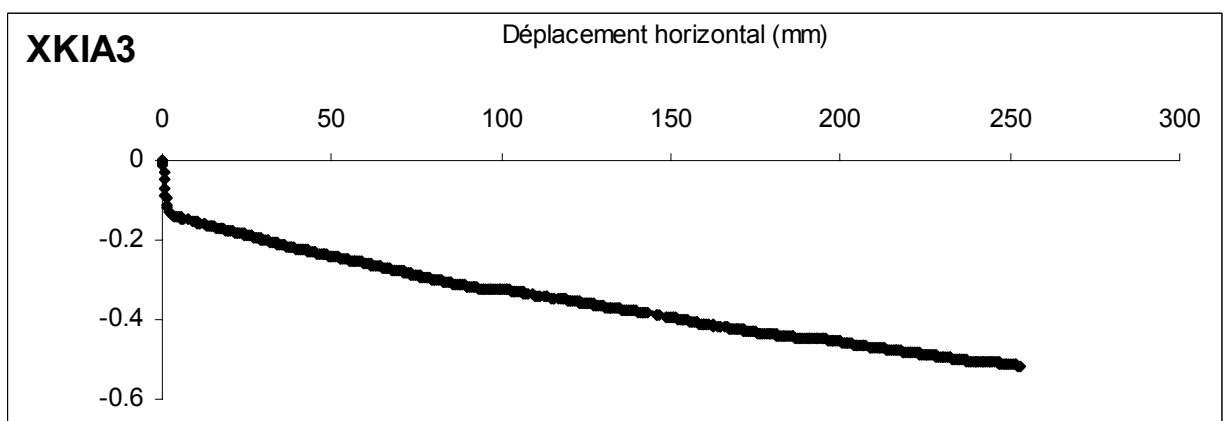


b) courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.9.c** Résultats de l'essai XKIA4CL

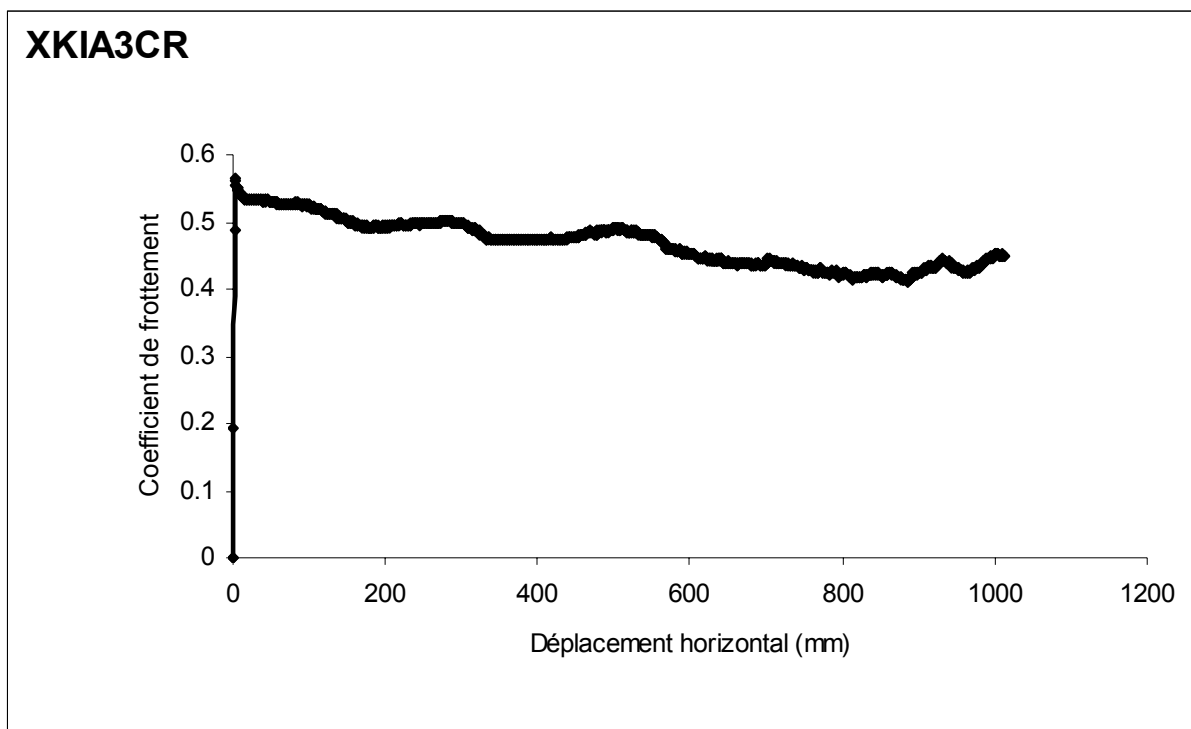


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

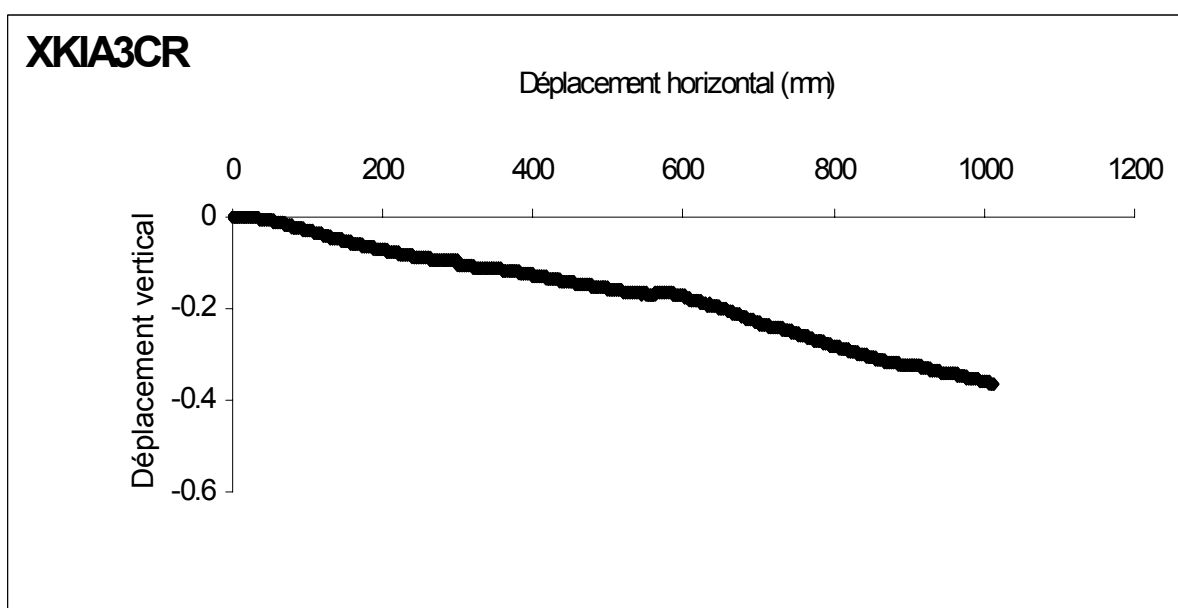


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.10.a** Résultats de l'essai XKIA3

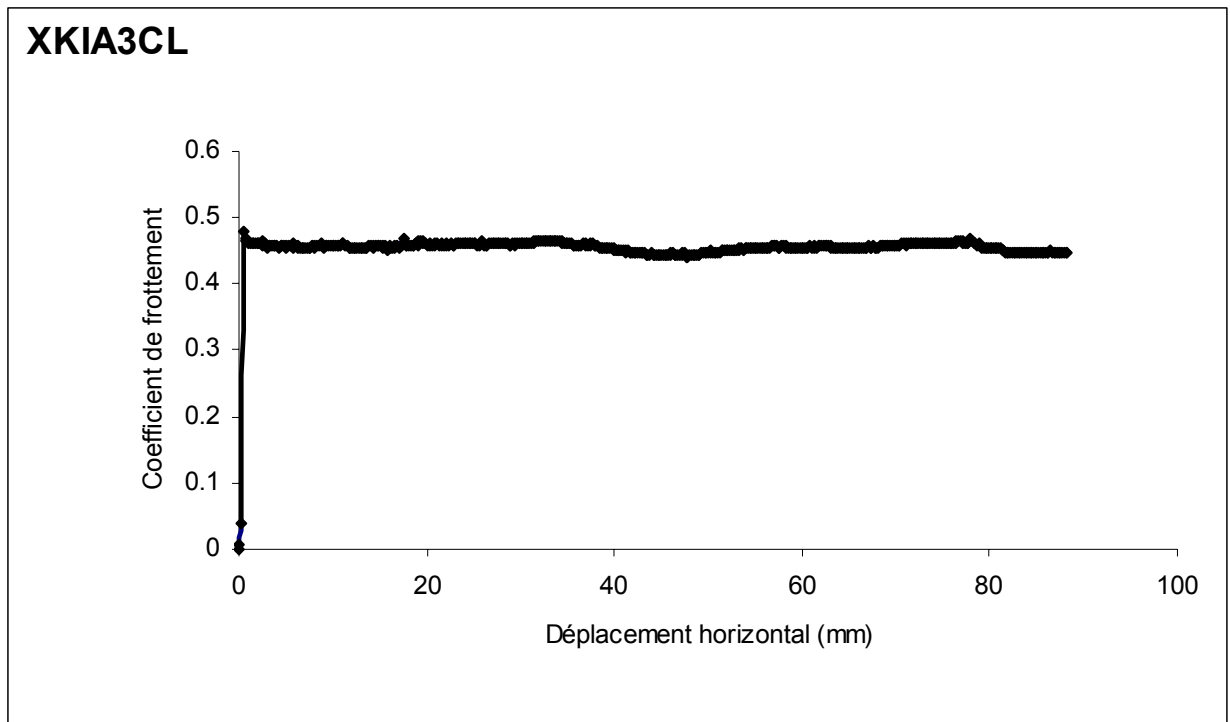


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

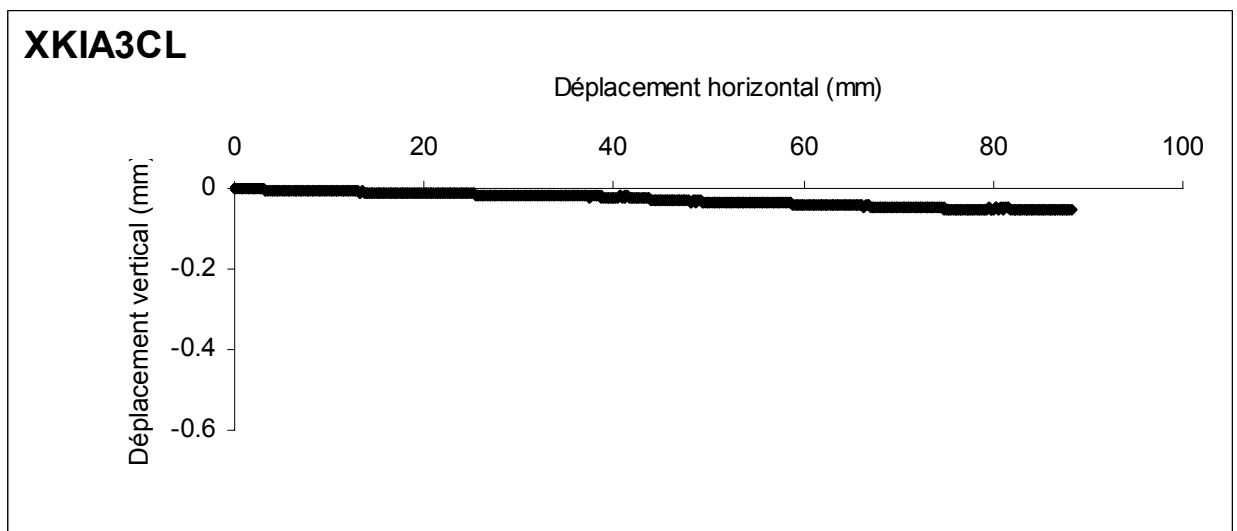


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.10.b** Résultats de l'essai XKIA3CR

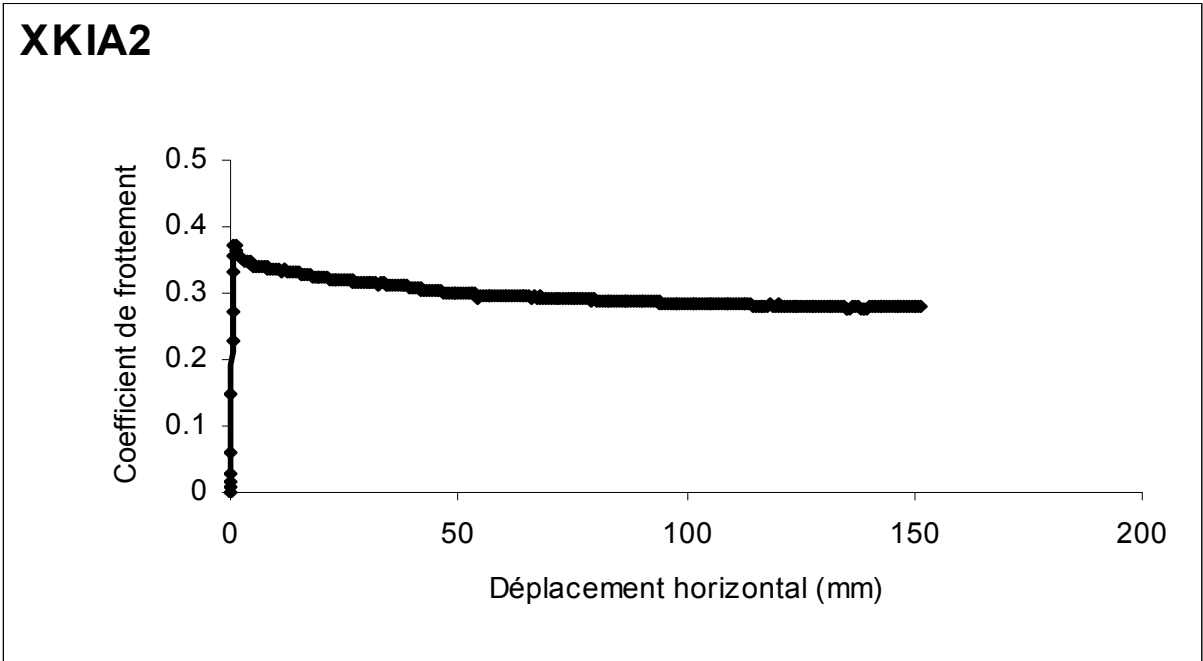


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

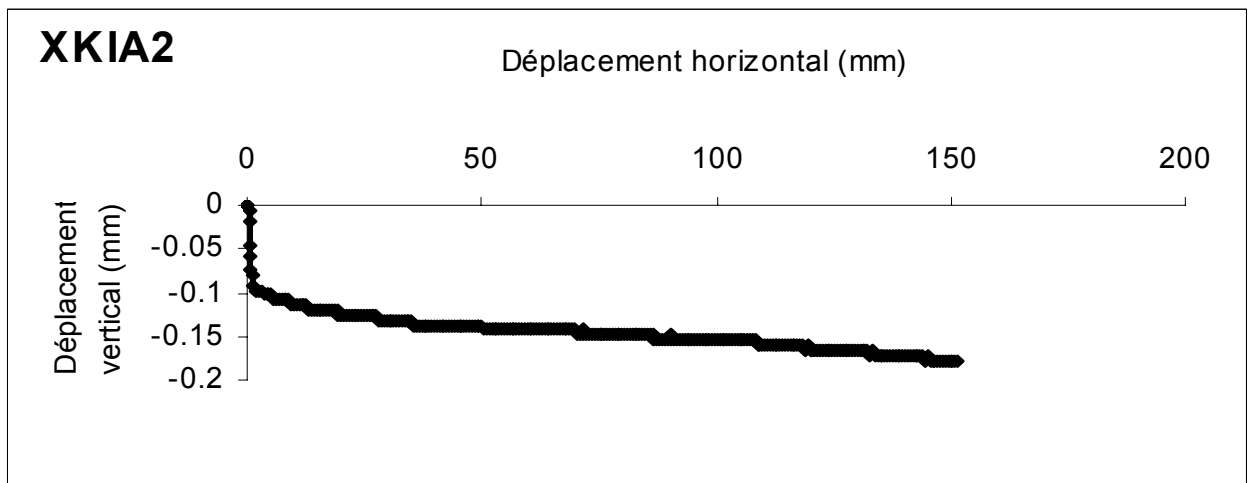


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.10.c** Résultats de l'essai XKIA3CL

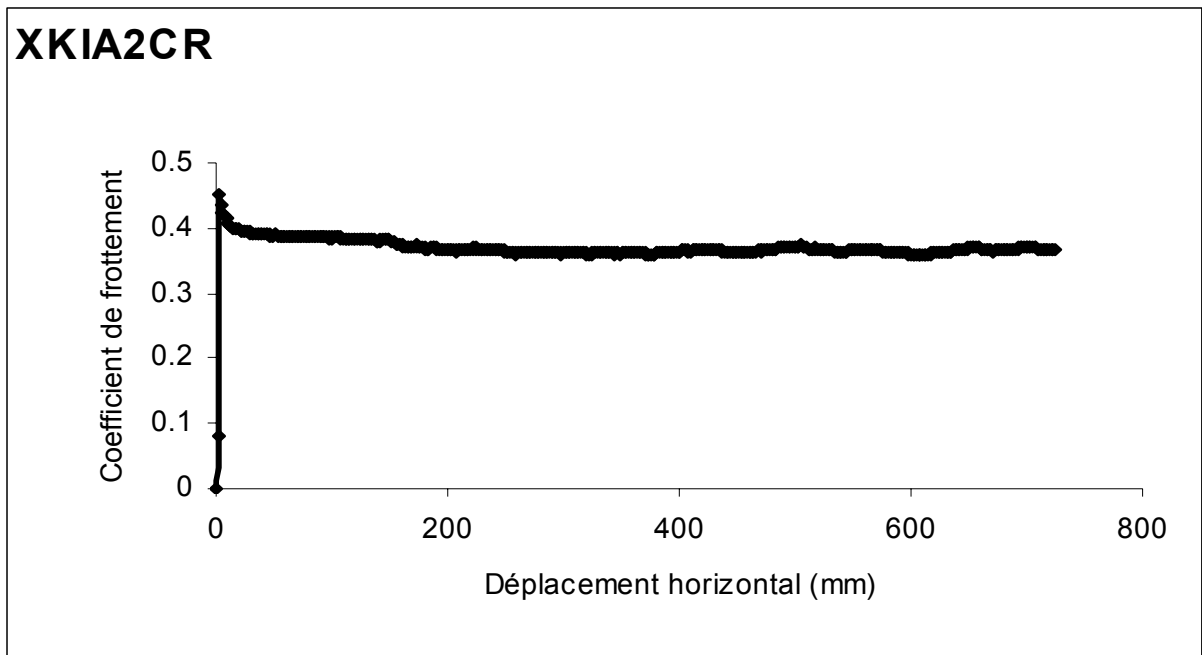


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

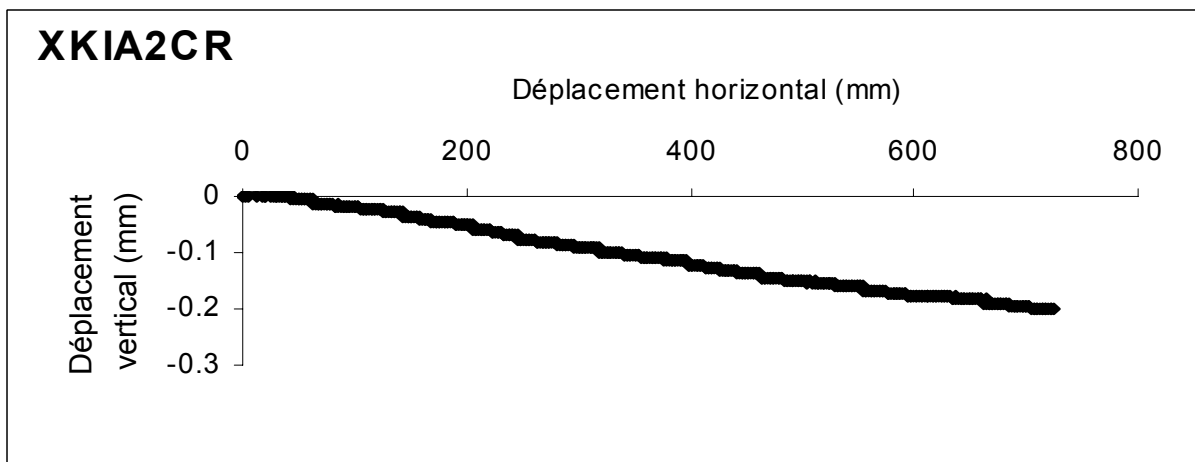


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.11.a** Résultats de l'essai XKIA2

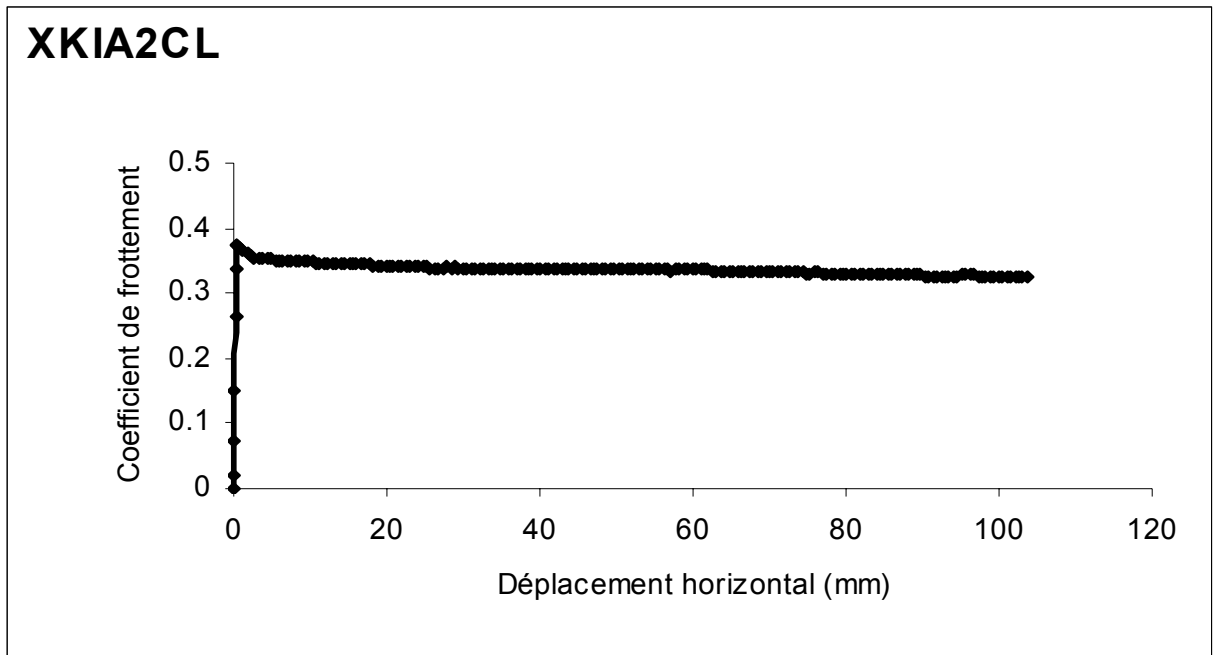


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

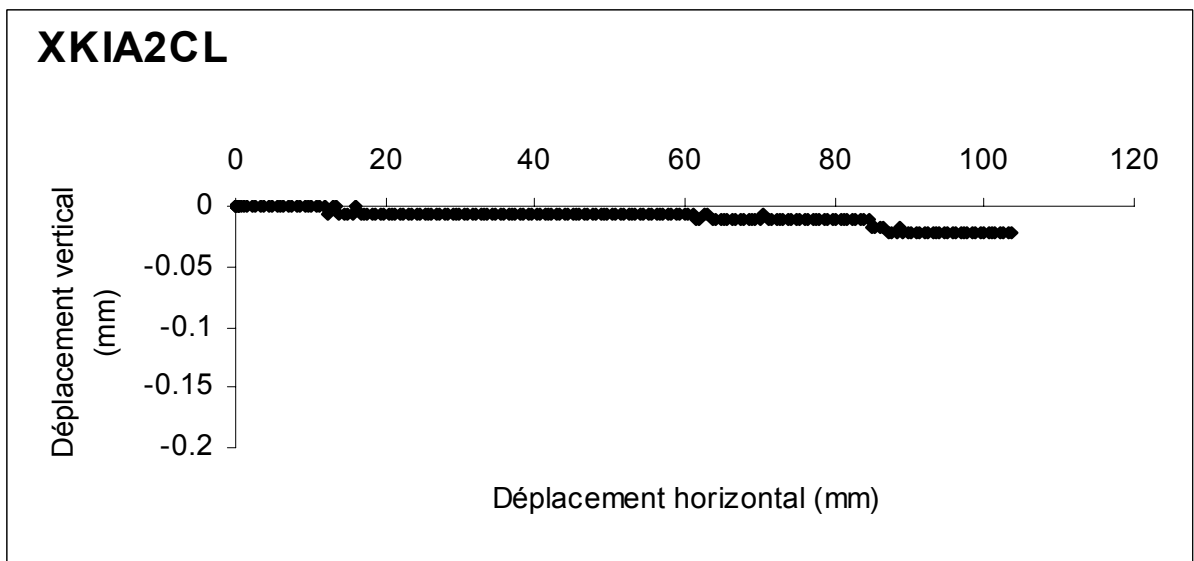


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.11.b** Résultats de l'essai XKIA2CR

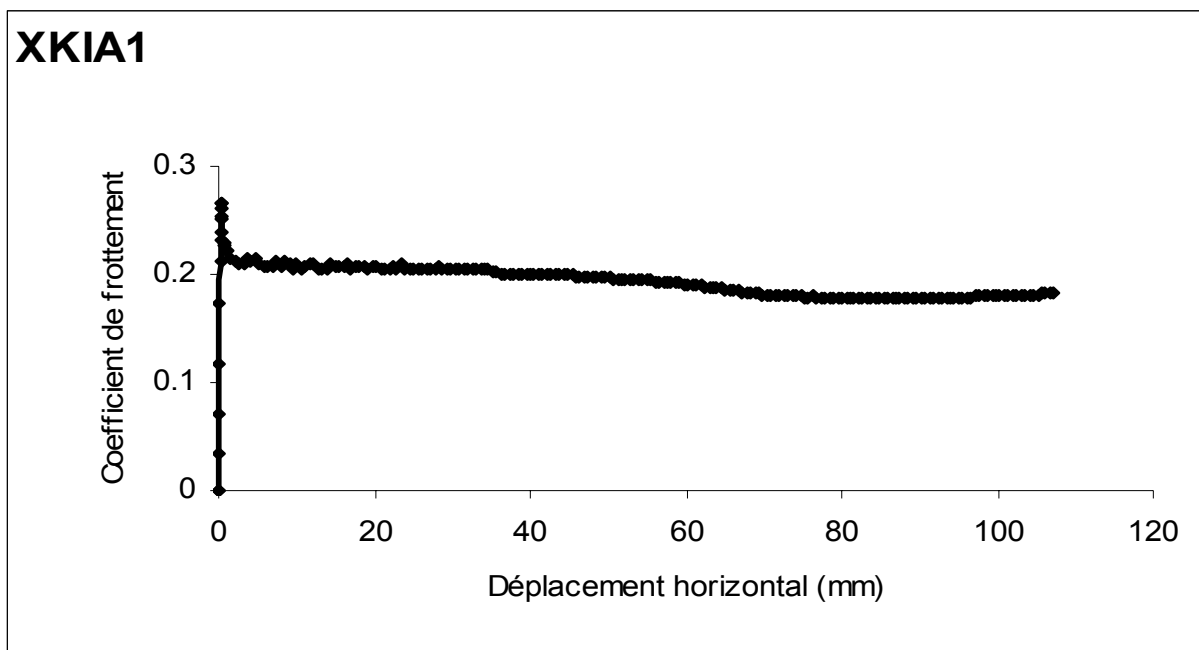


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

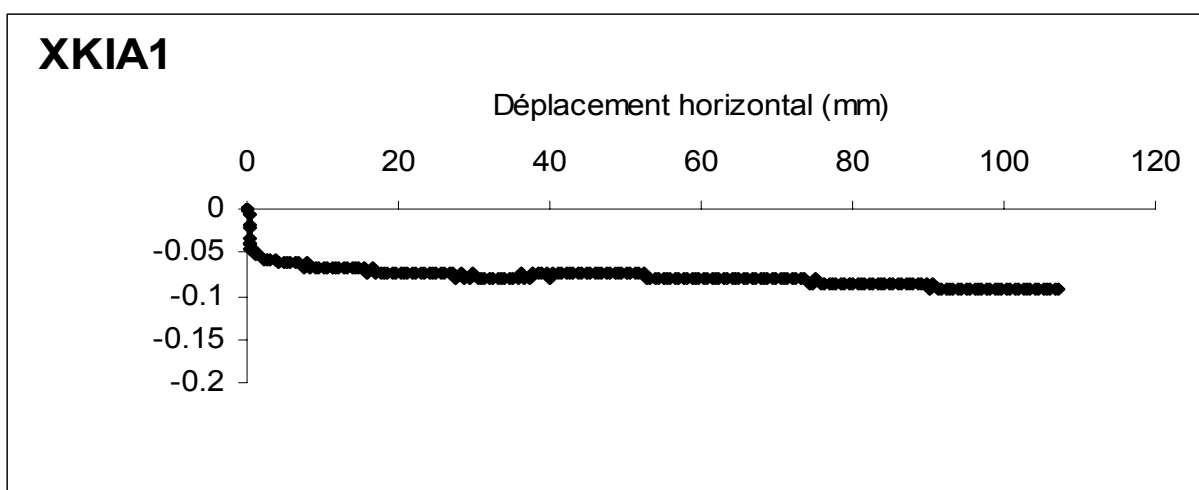


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.11.c** Résultats de l'essai XKIA2CL

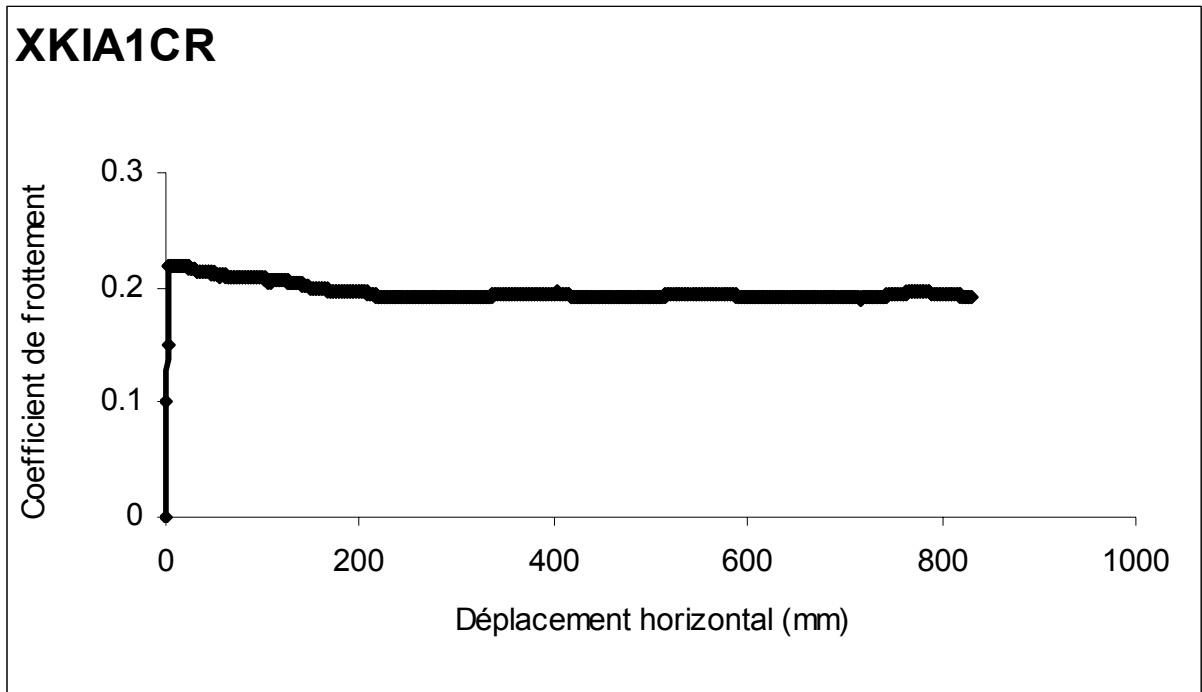


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

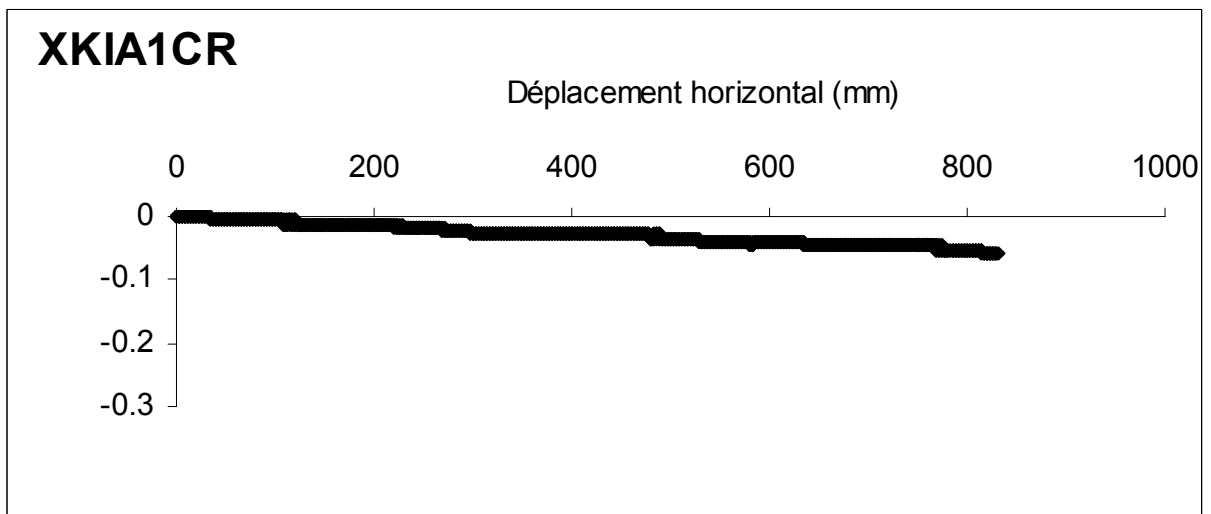


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.12.a** Résultats de l'essai XKIA1

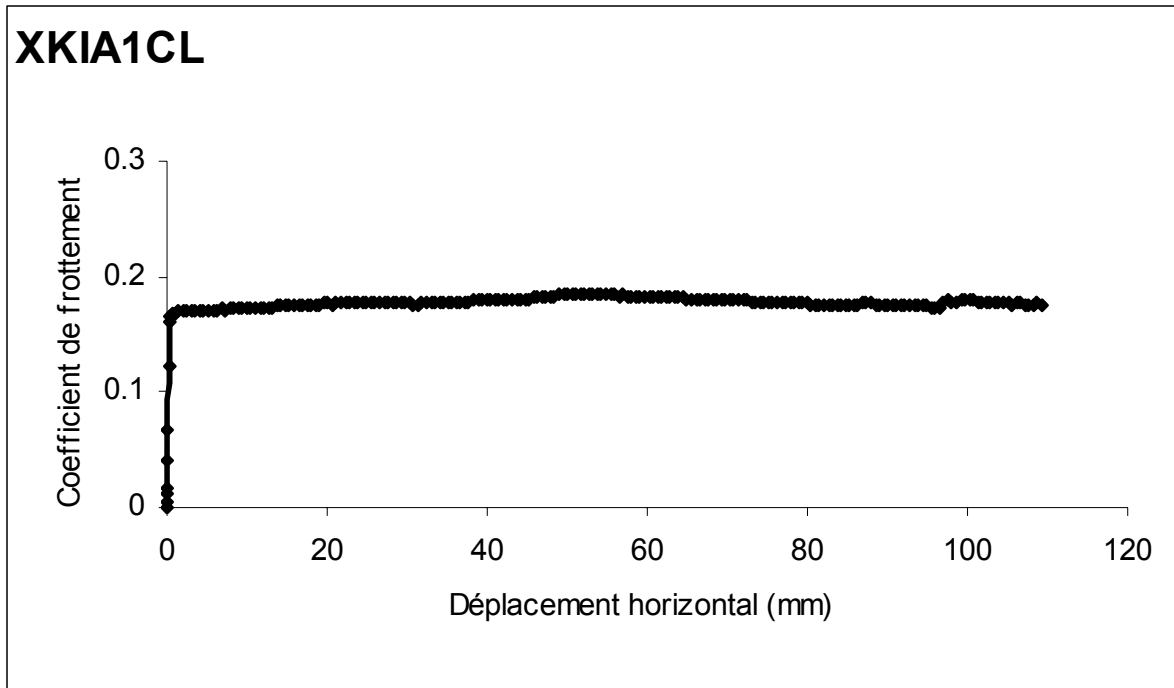


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

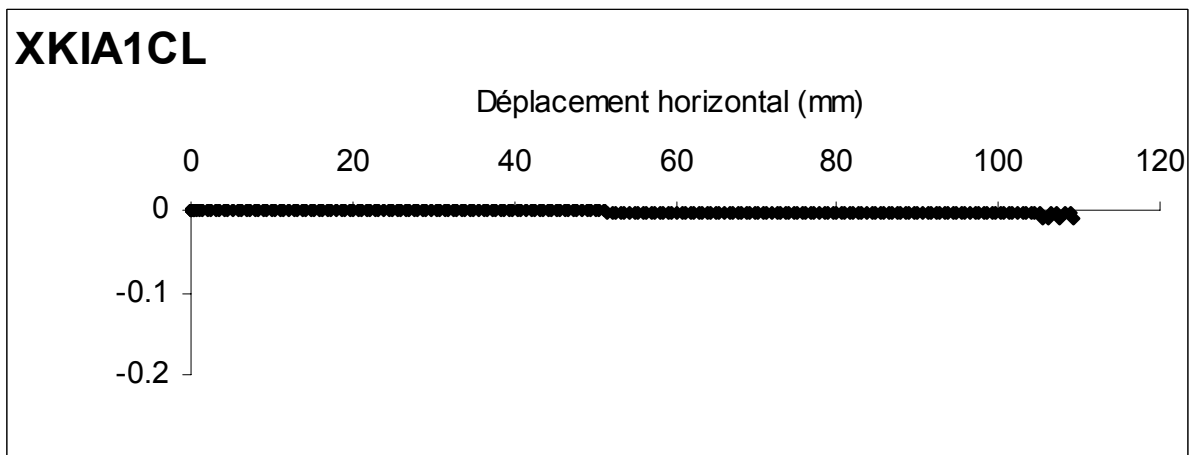


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.12.b** Résultats de l'essai XKIA1CR

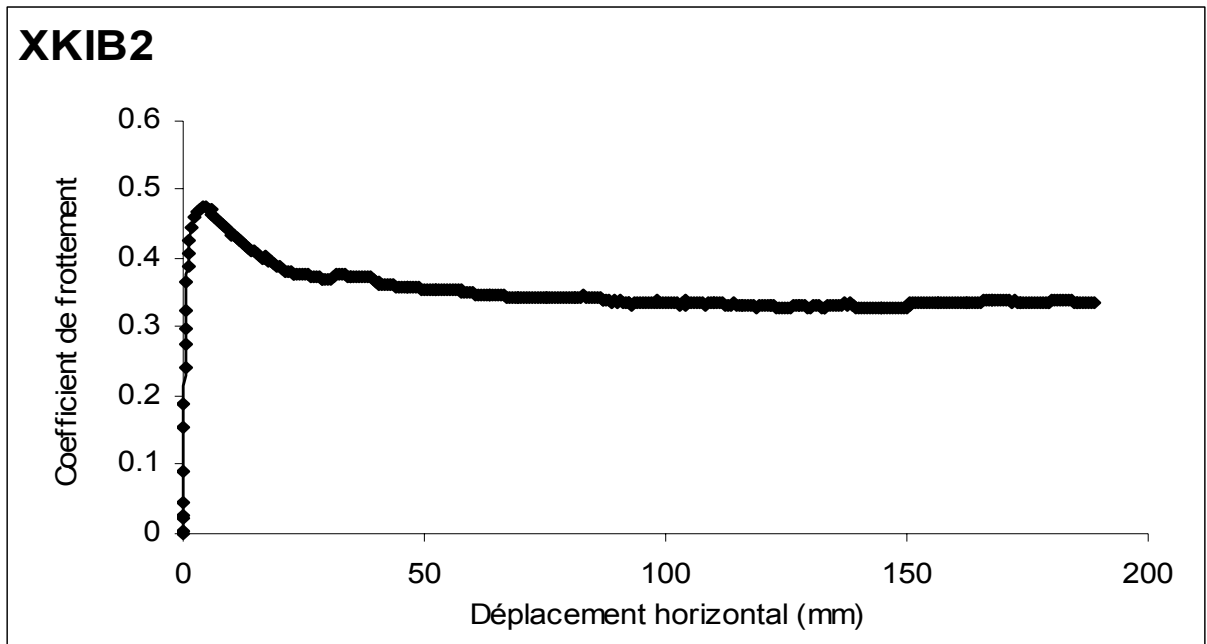


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

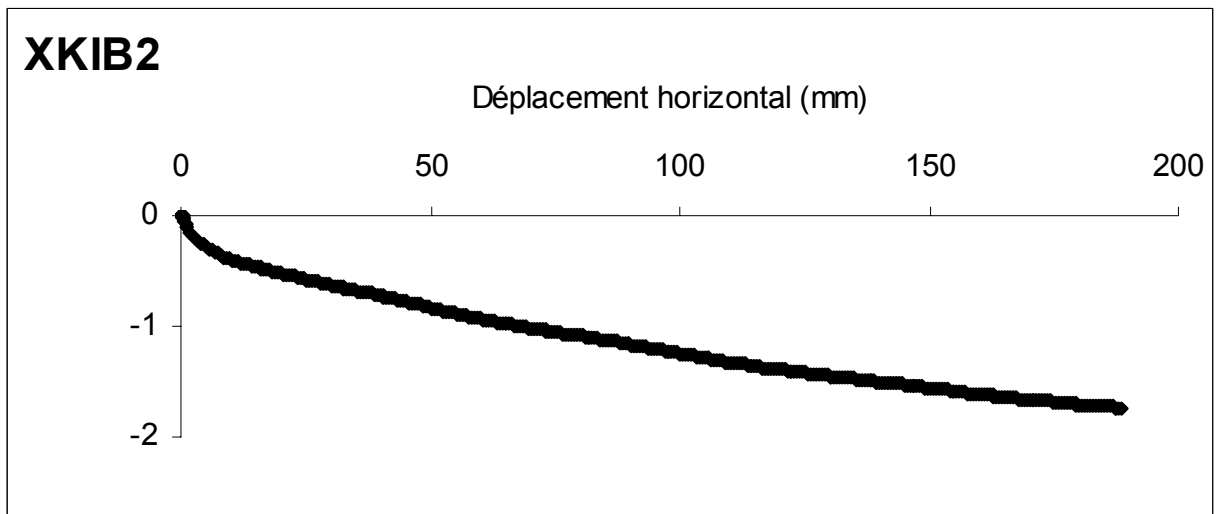


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.12.c** Résultats de l'essai XKIACL

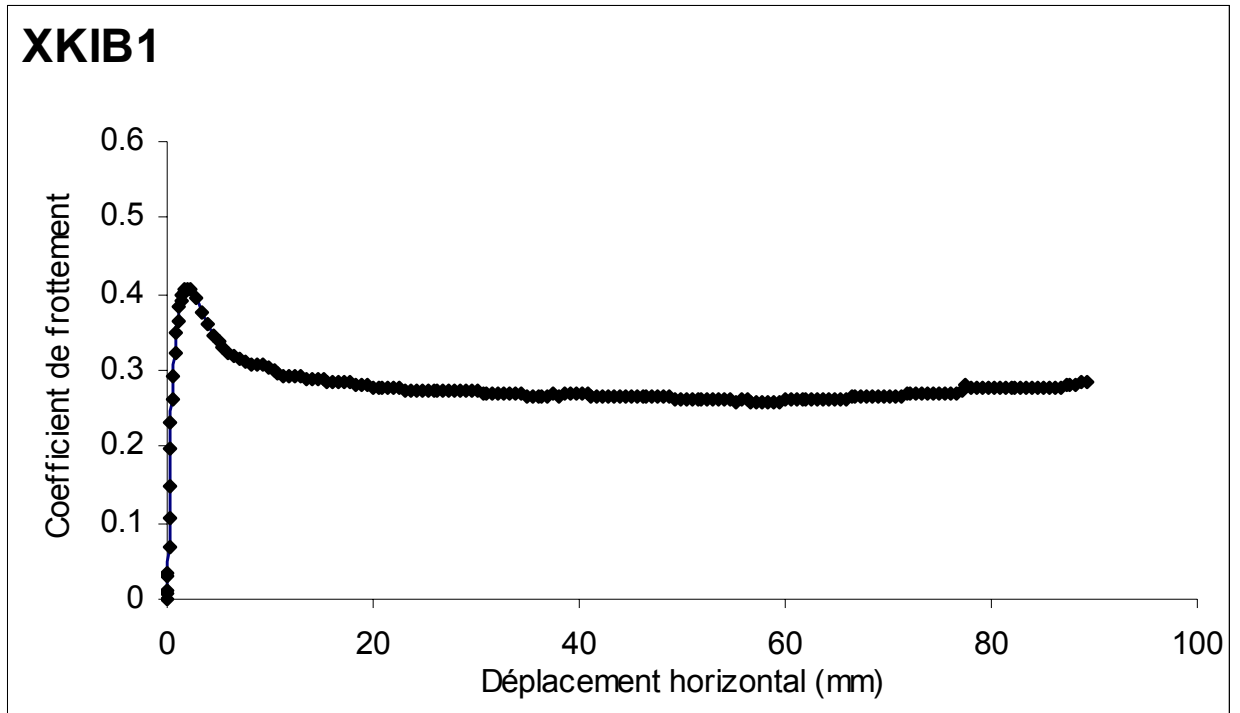


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

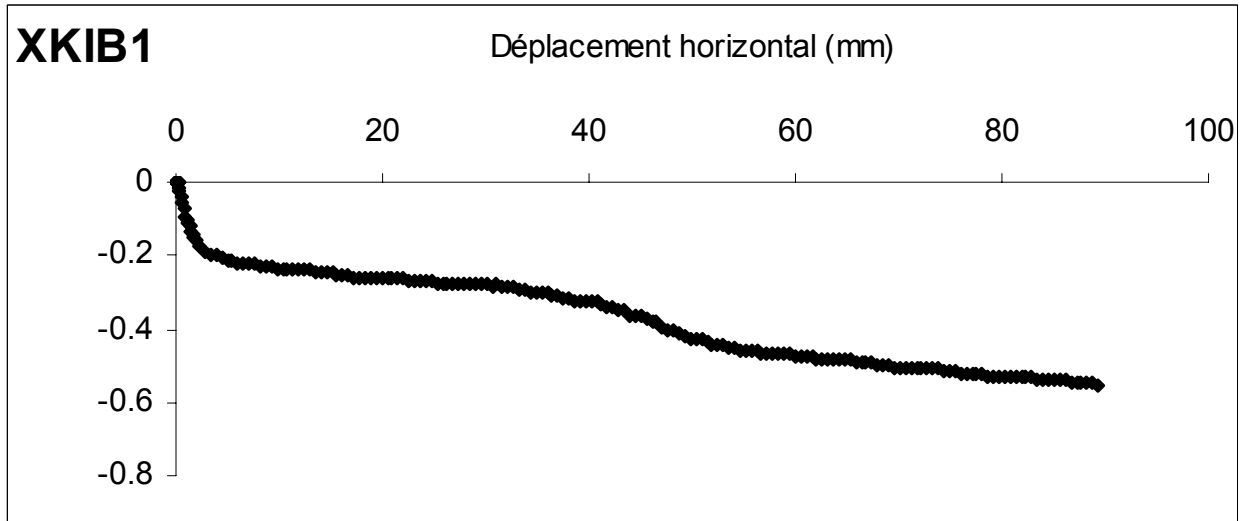


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.13** Résultat de l'essai XKIB2

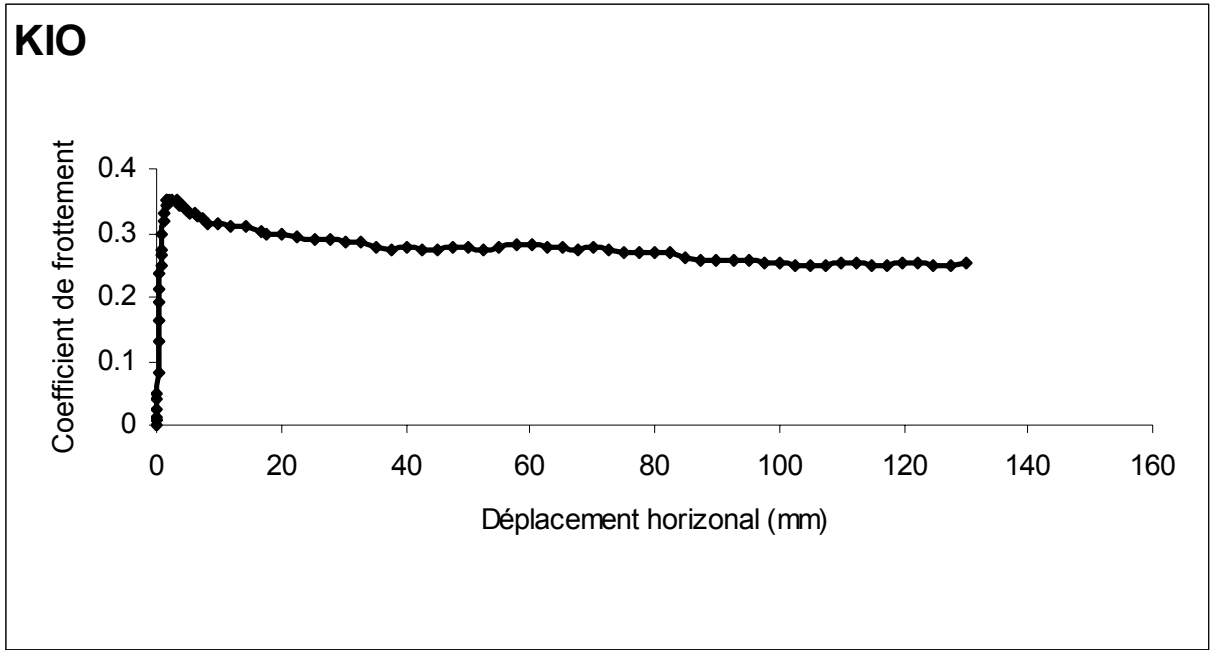


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

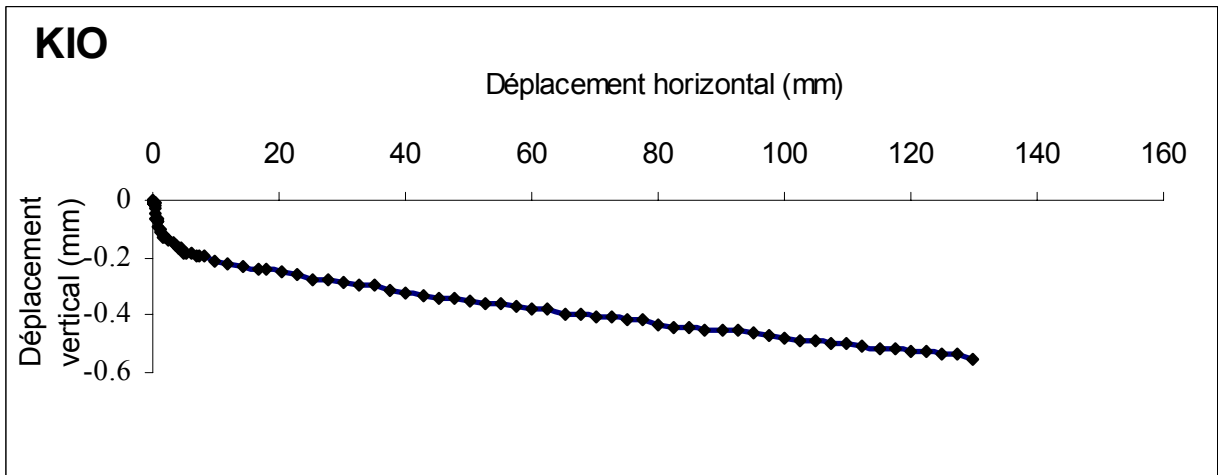


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.14** Résultat de l'essai XKIB1

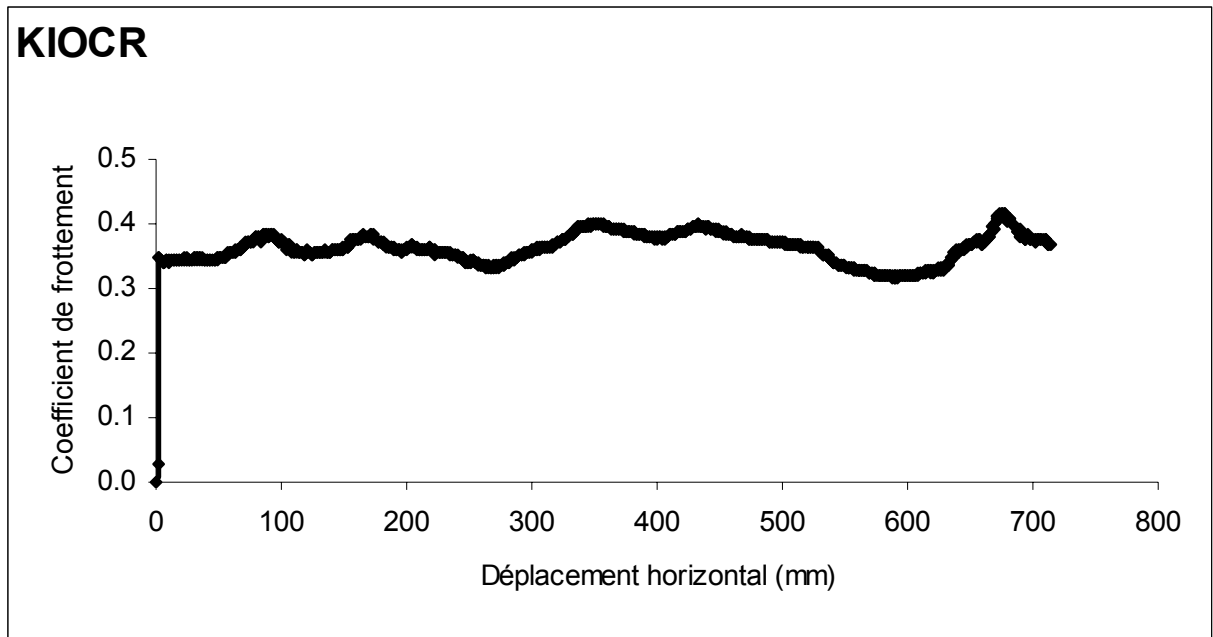


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

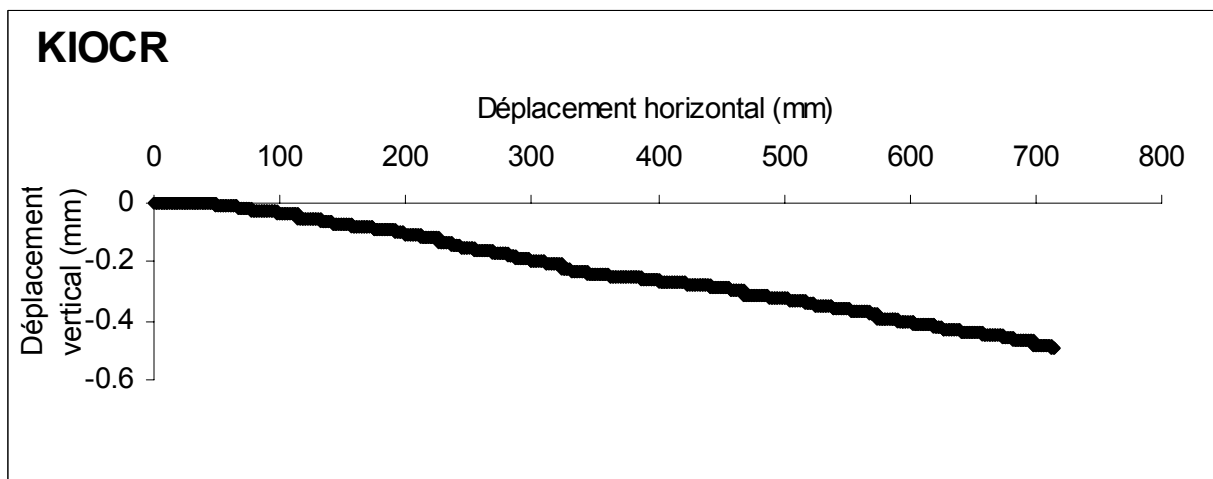


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.15.a** Résultats de l'essai KIO

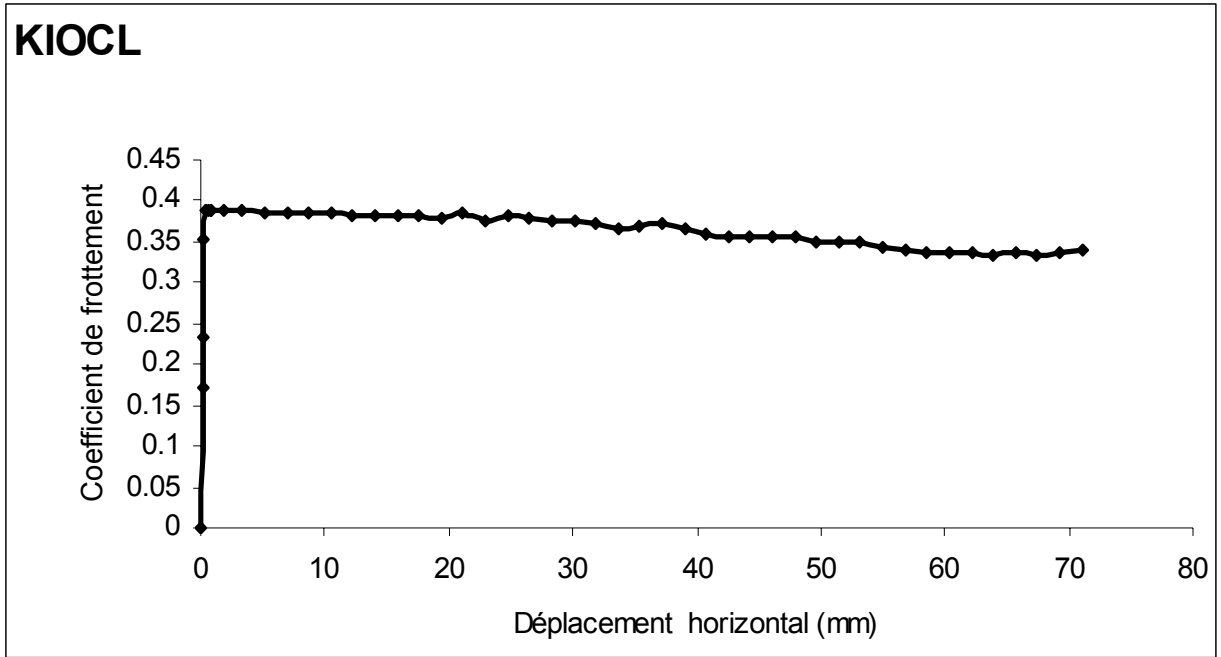


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

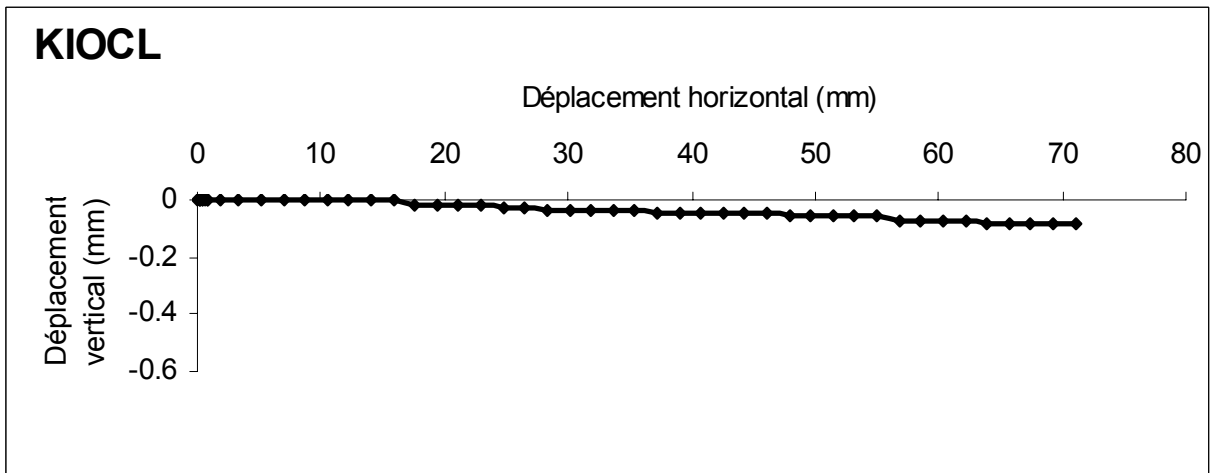


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.15.b** Résultats de l'essai KIOCR

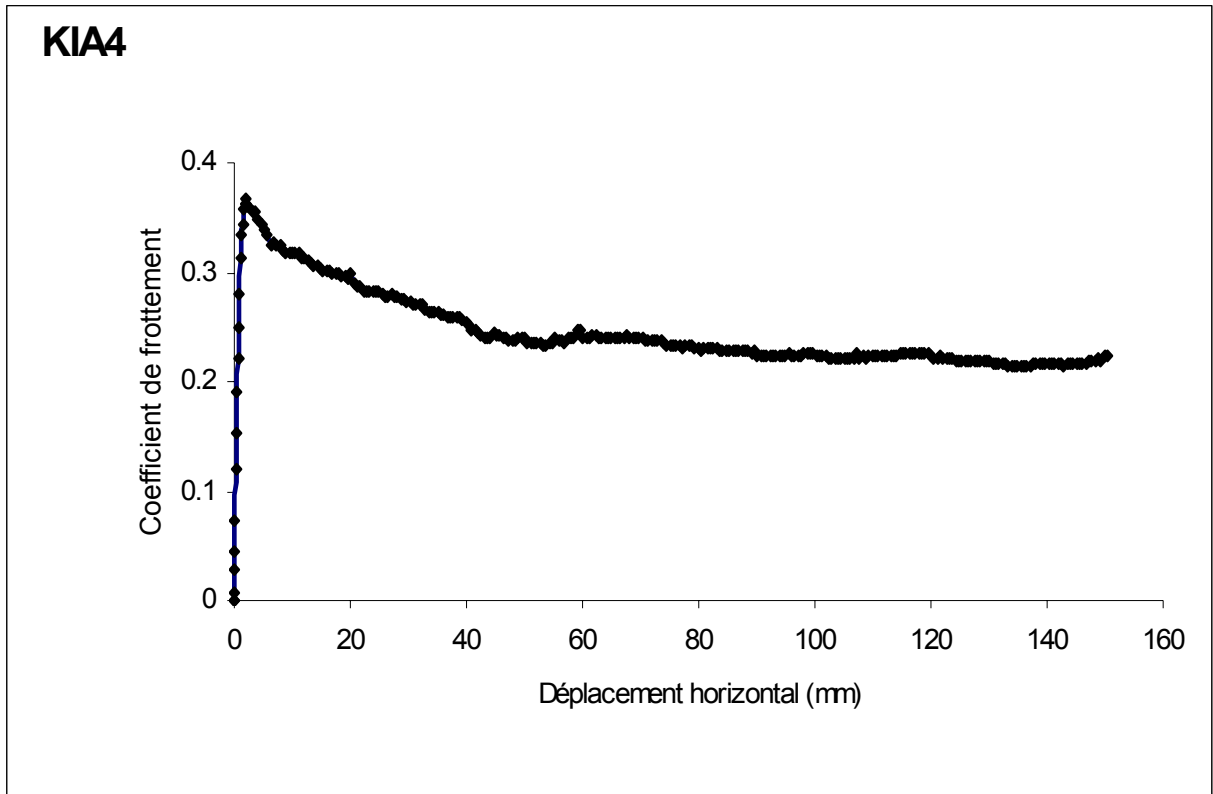


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

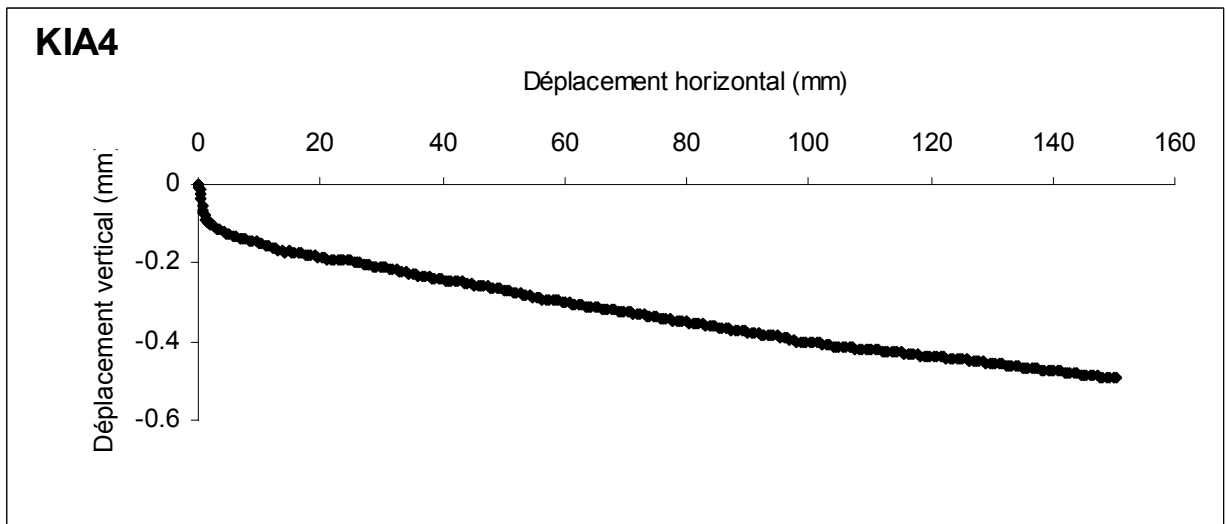


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.15.c** Résultats de l'essai KIOCL

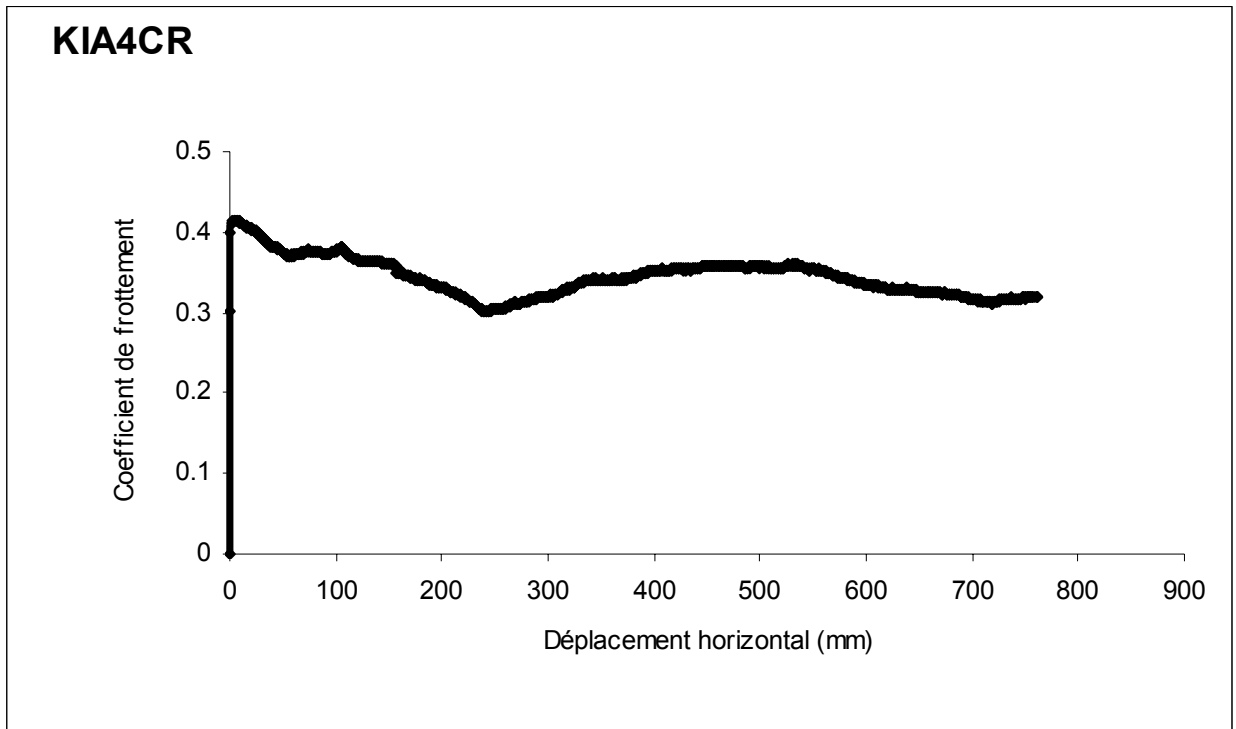


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

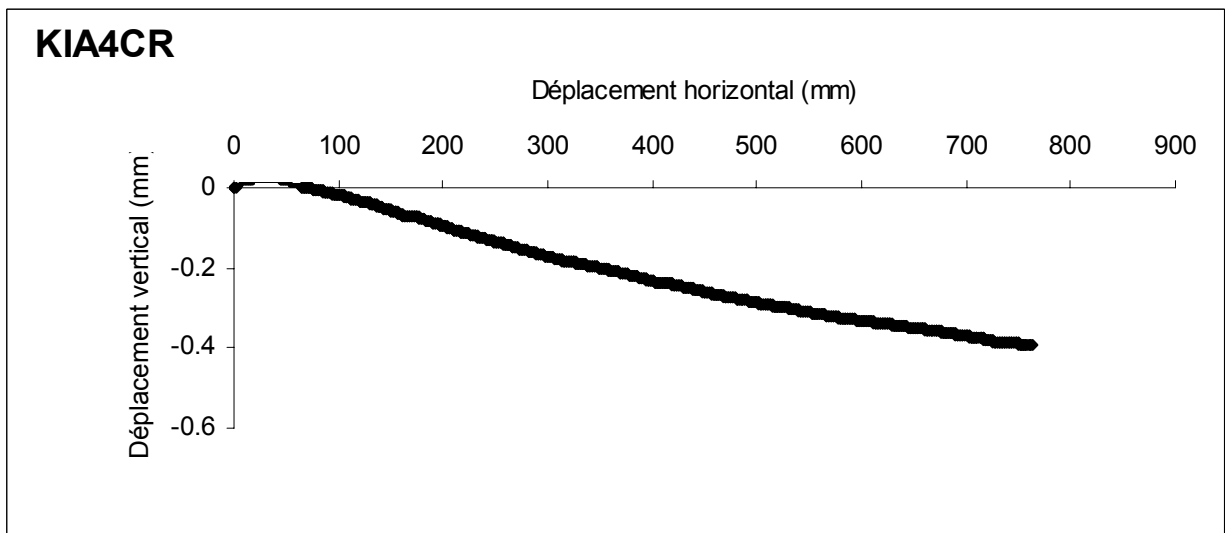


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.16.a** Résultats de l'essai KIA4

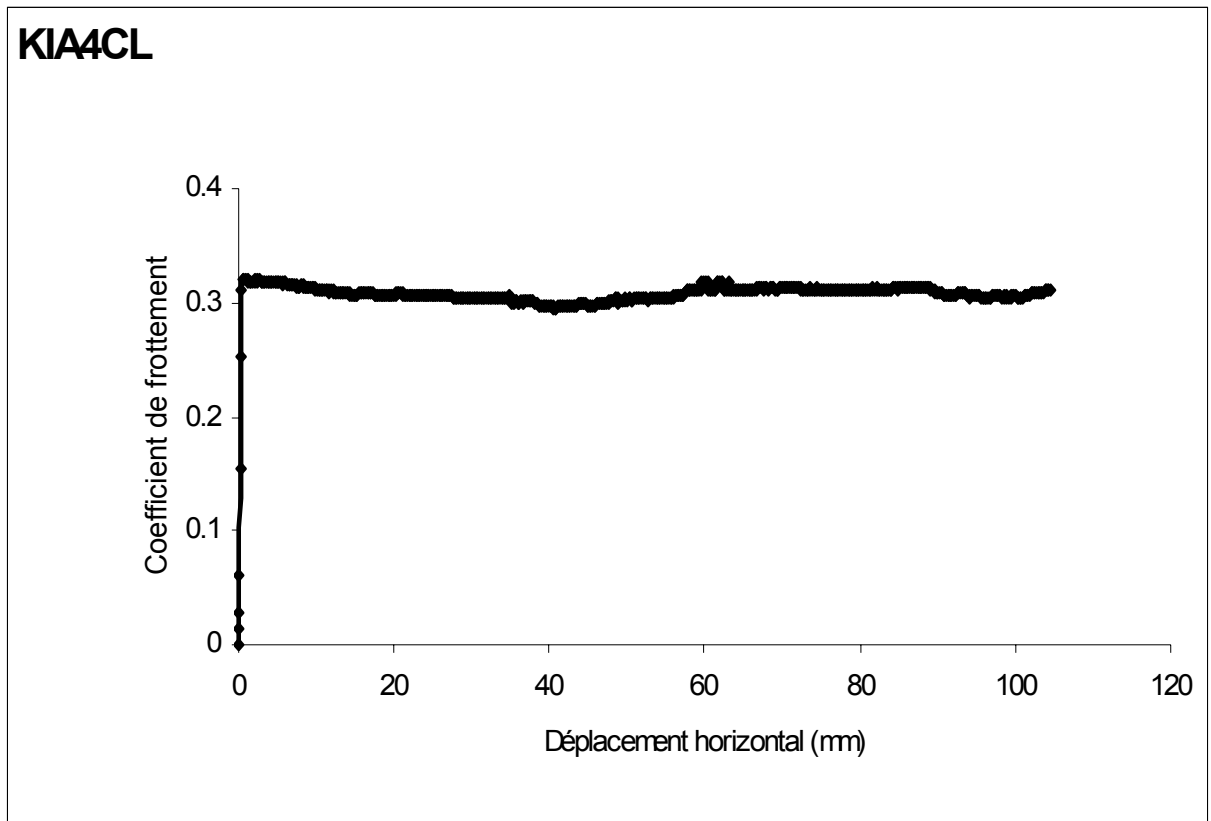


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

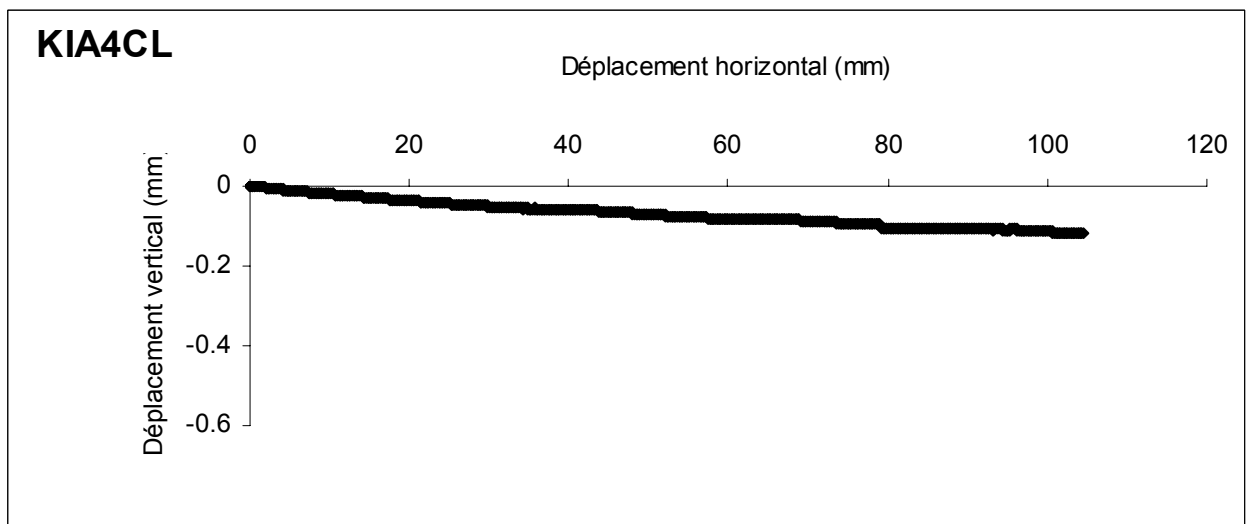


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.16.b** Résultats de l'essai KIA4CR

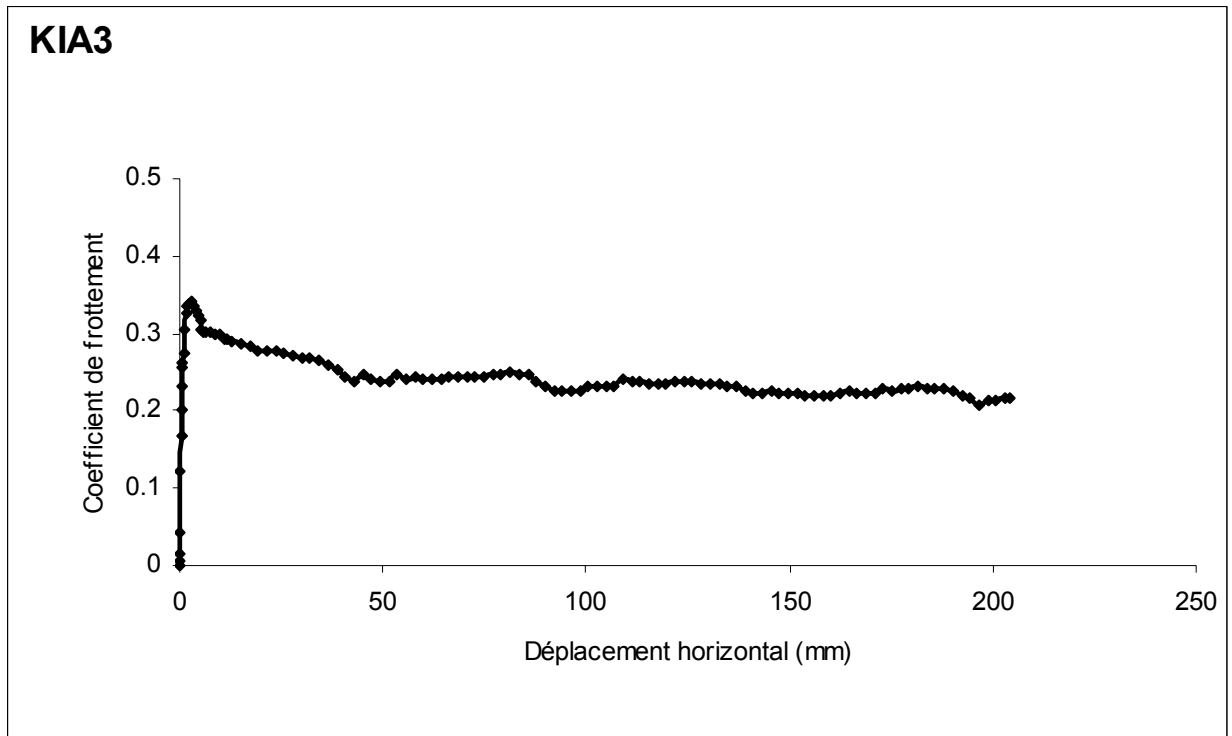


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

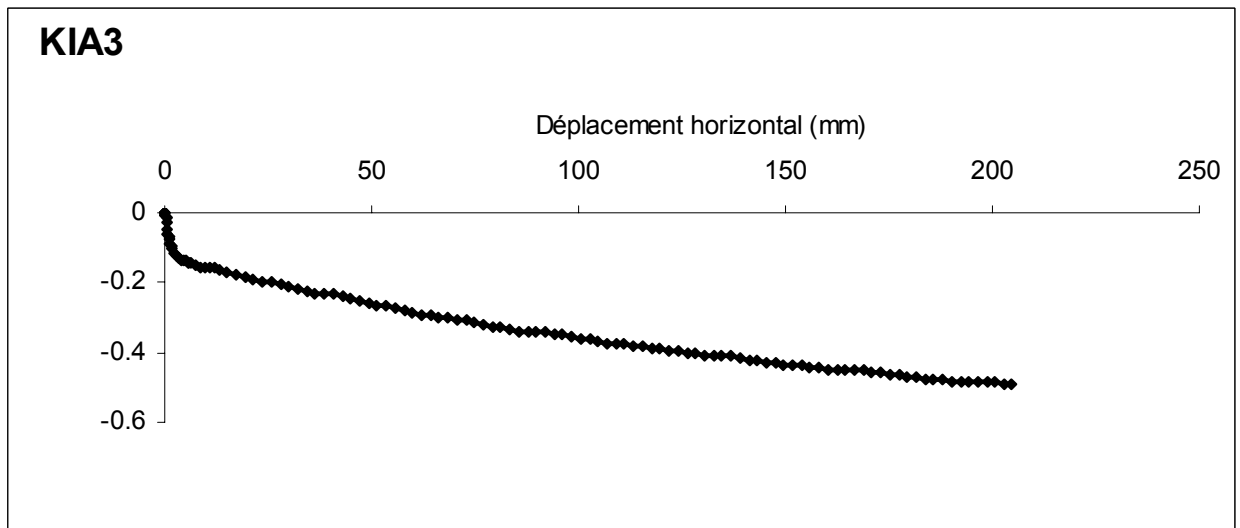


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.16.c** Résultats de l'essai KIA4CL

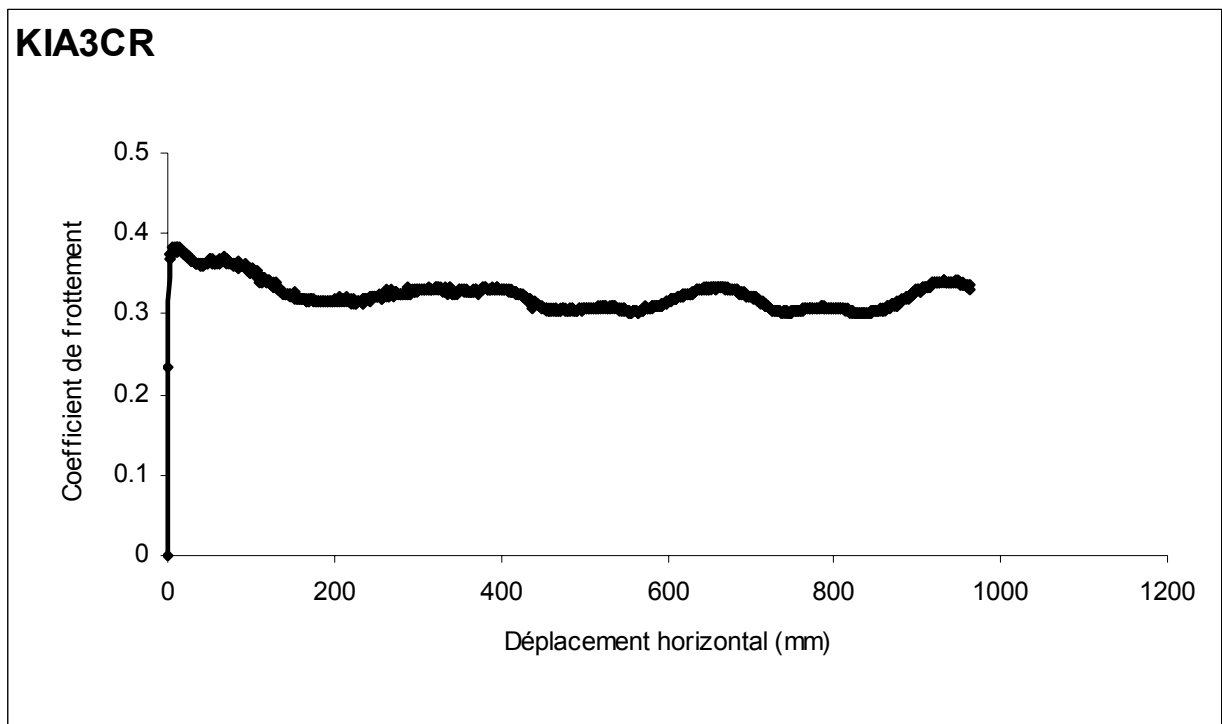


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

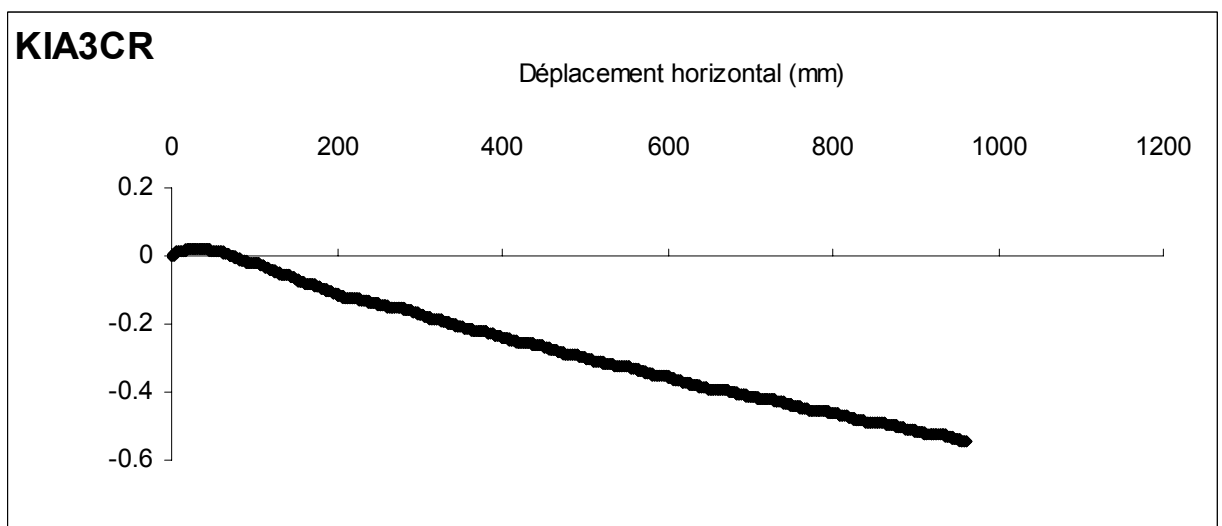


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.17.a** Résultats de l'essai KIA3

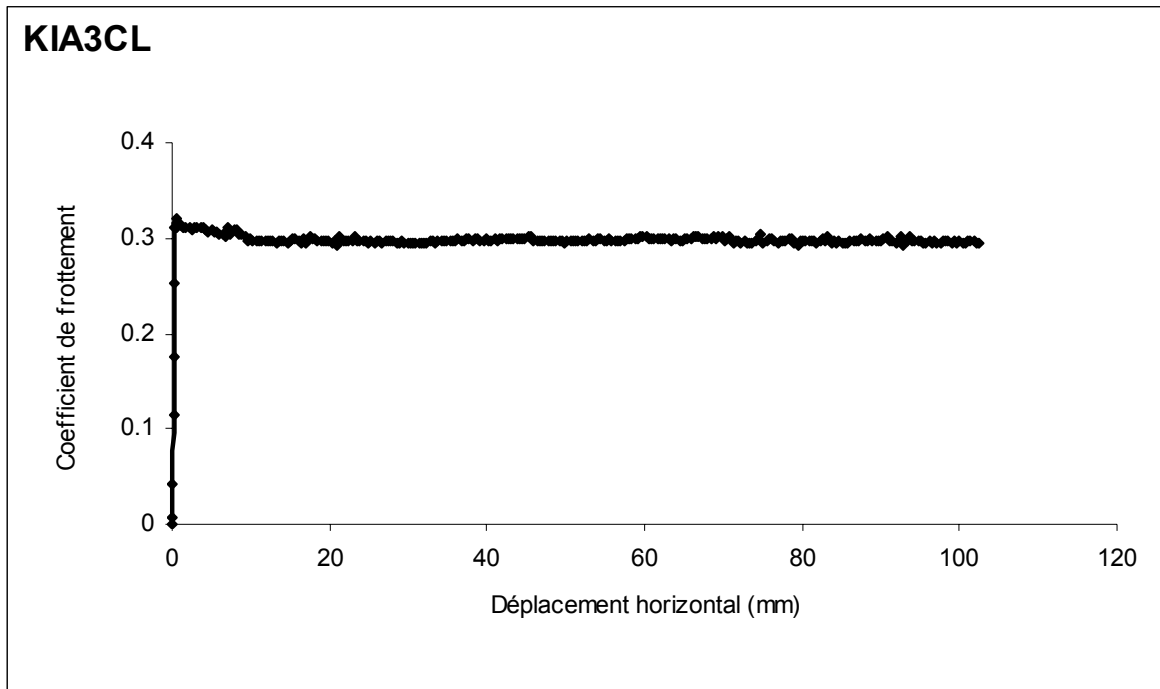


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

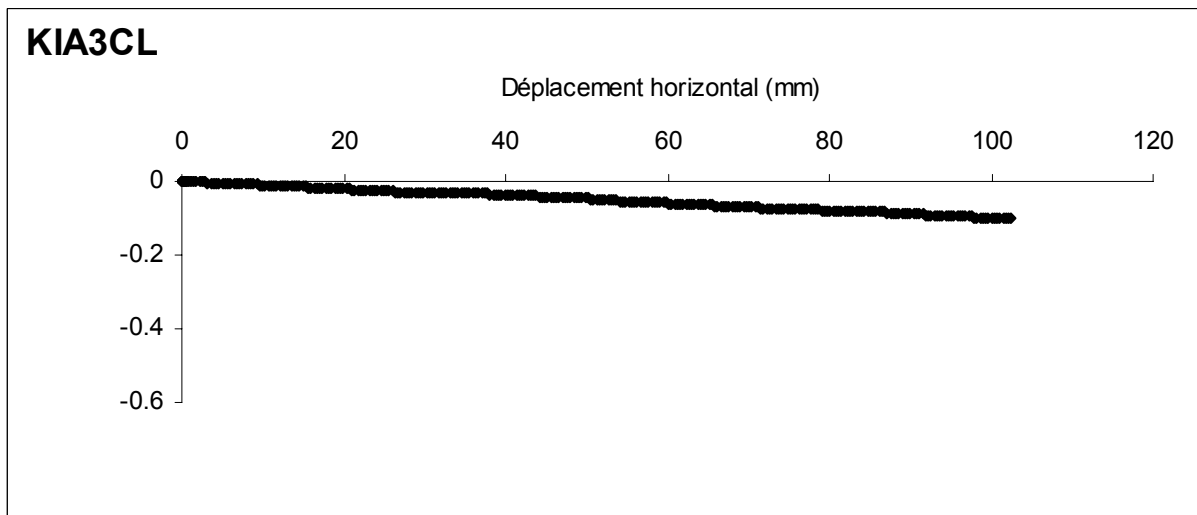


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.17.b** Résultats de l'essai KIA3 CR

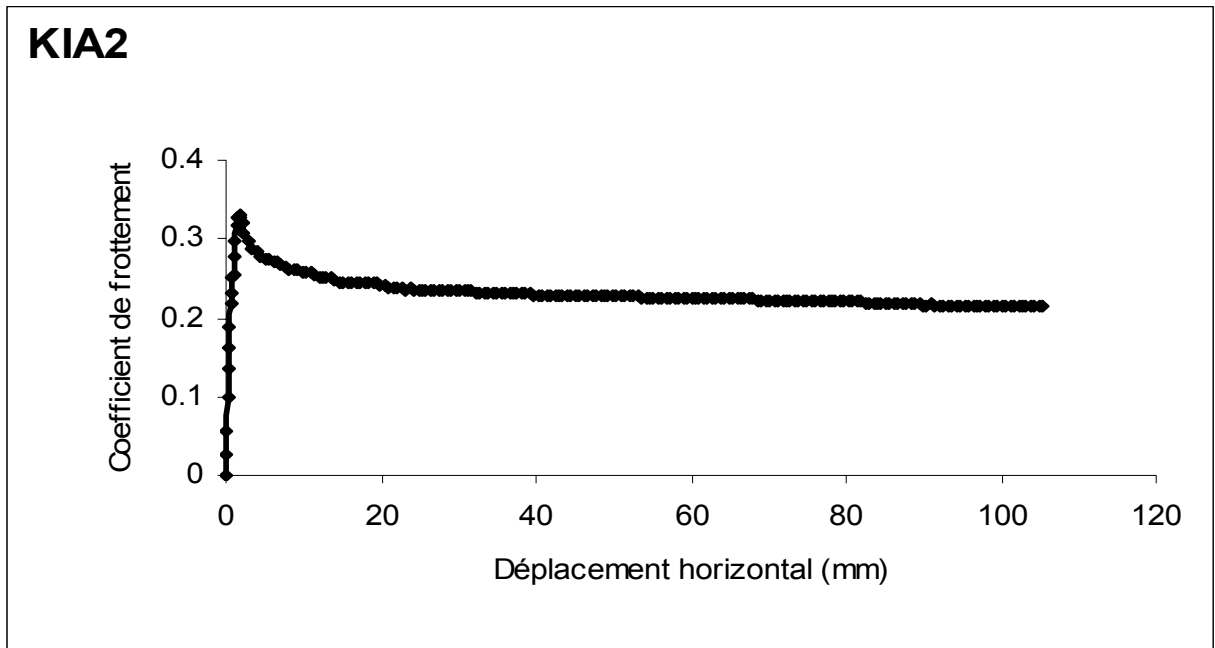


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

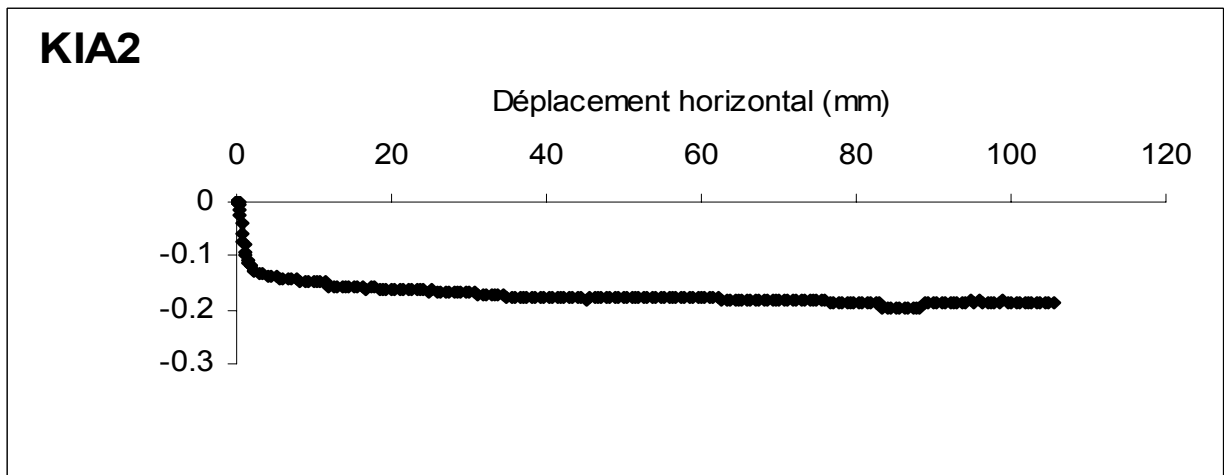


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.17.c** Résultats de l'essai KIA3CL

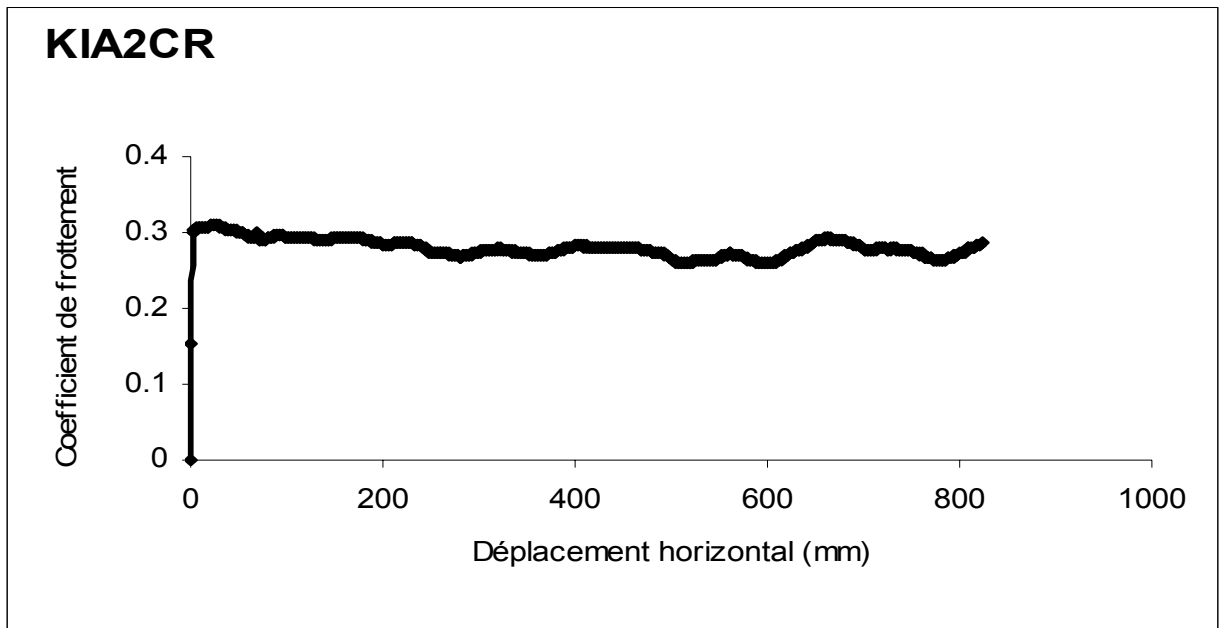


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

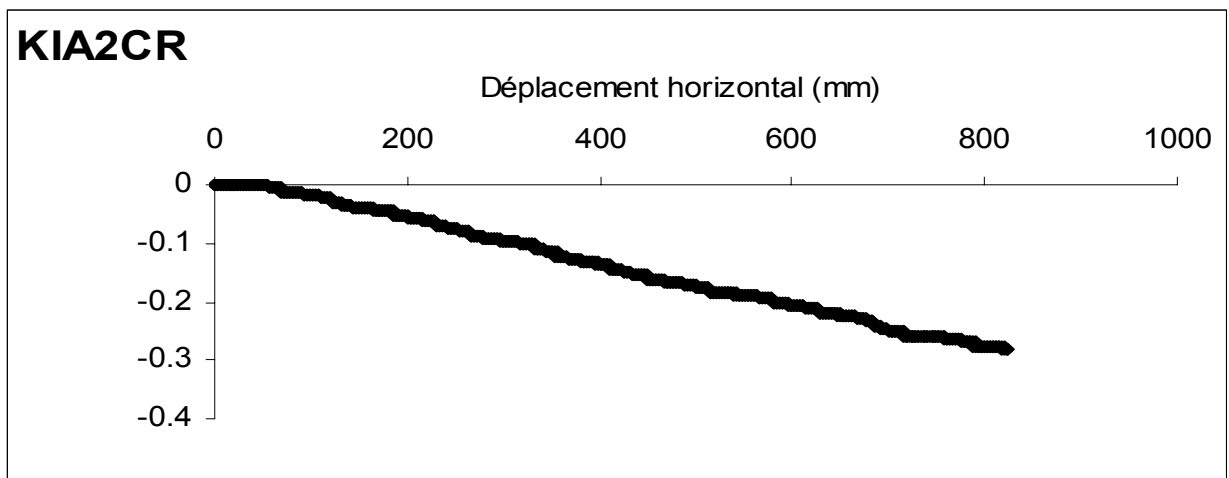


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.18.a** Résultat de l'essai KIA1

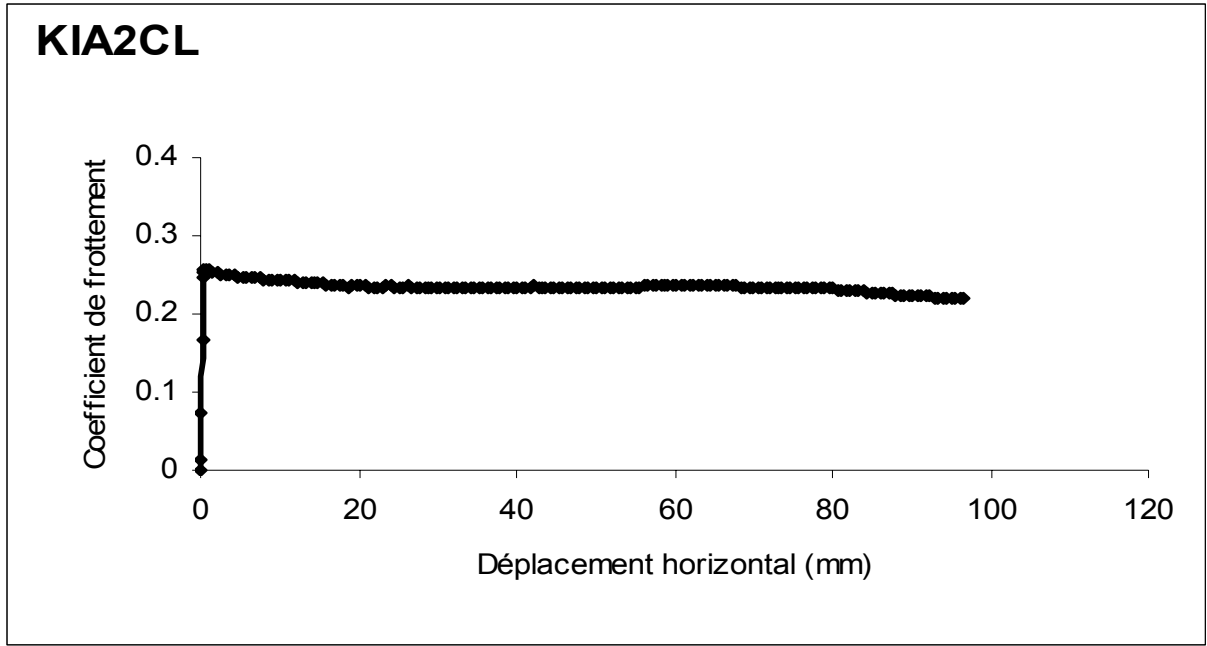


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

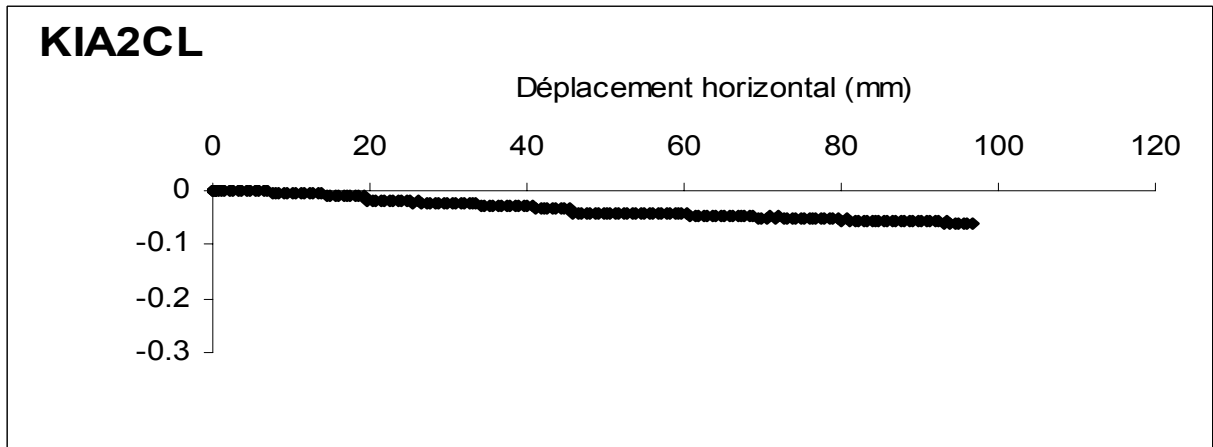


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.18.b** Résultat de l'essai KIA1CR

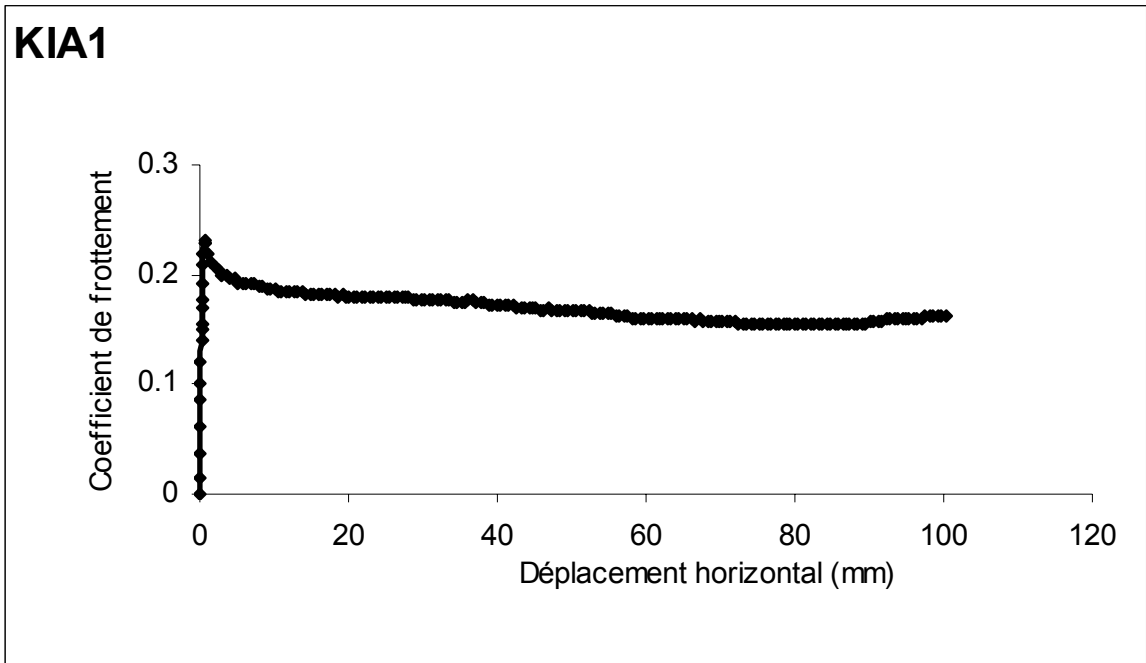


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

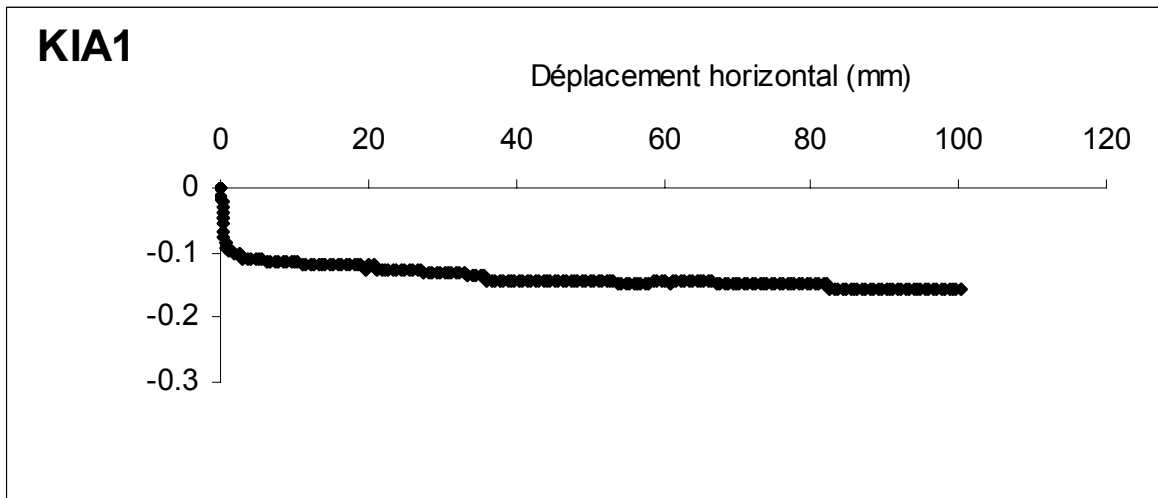


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.18.c** Résultat de l'essai KIA1CL

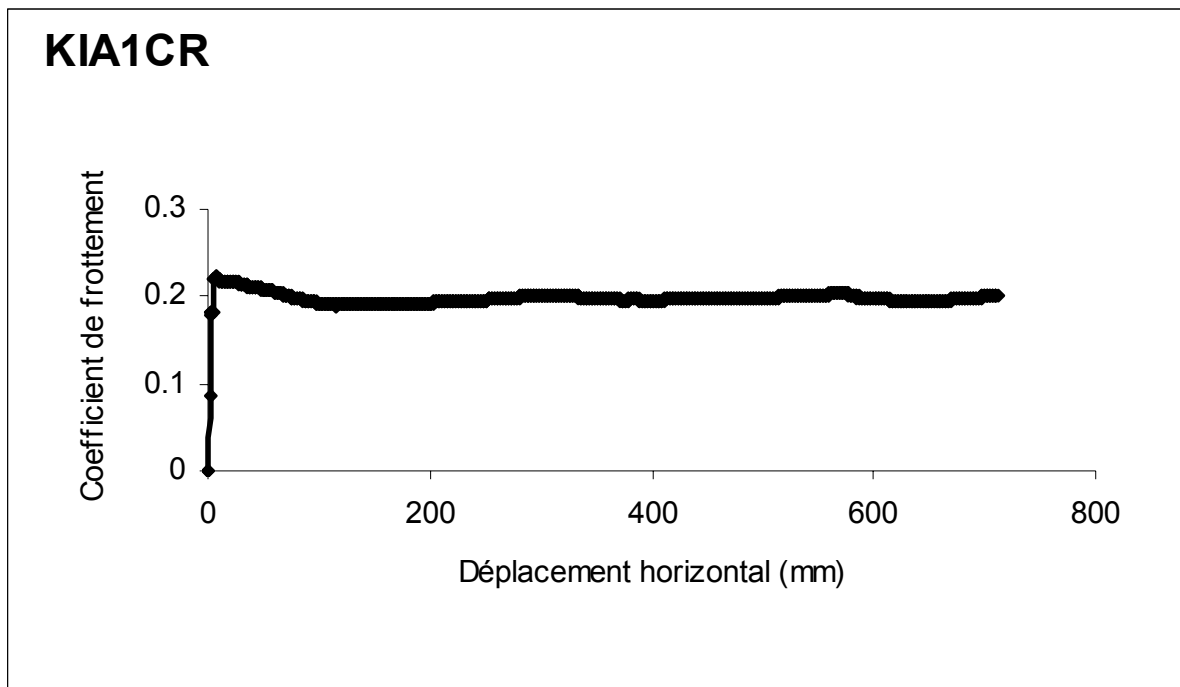


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

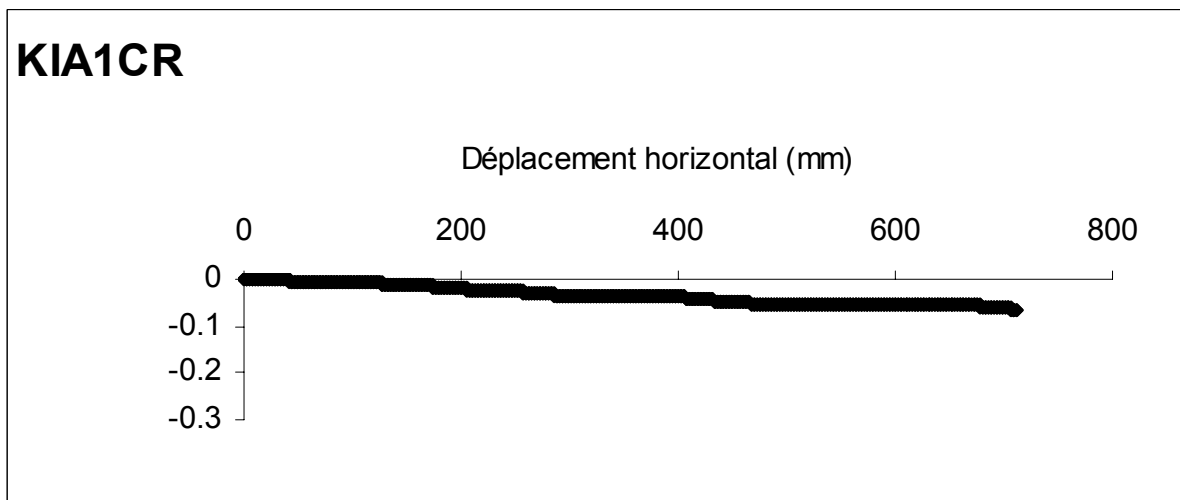


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.19.a** Résultat de l'essai KIA1

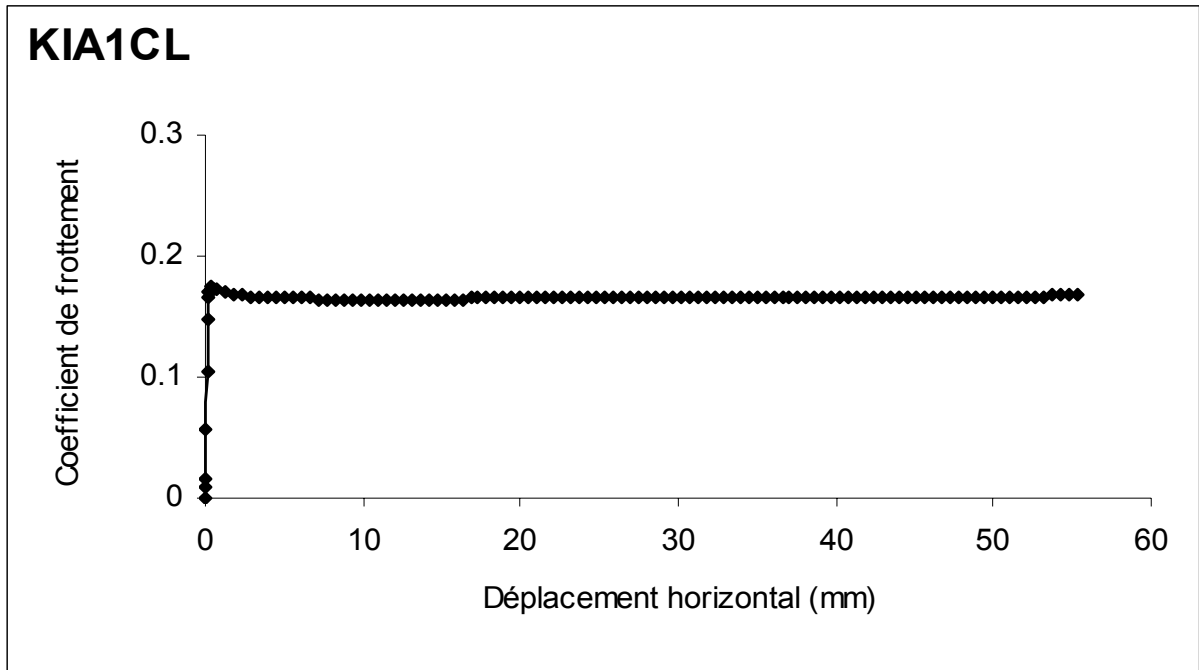


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

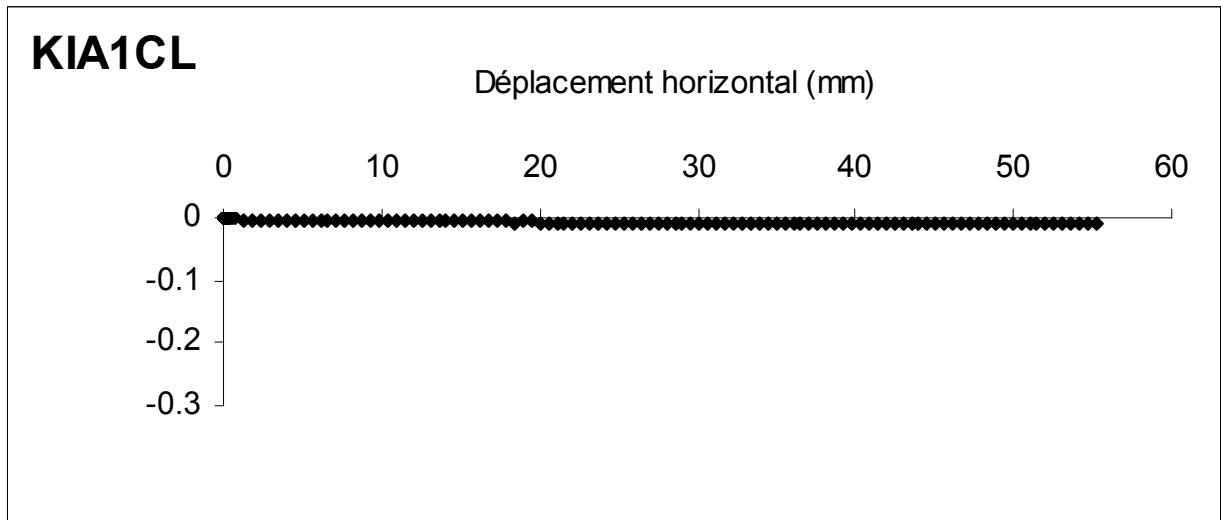


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.19.b** Résultat de l'essai KIA1CR

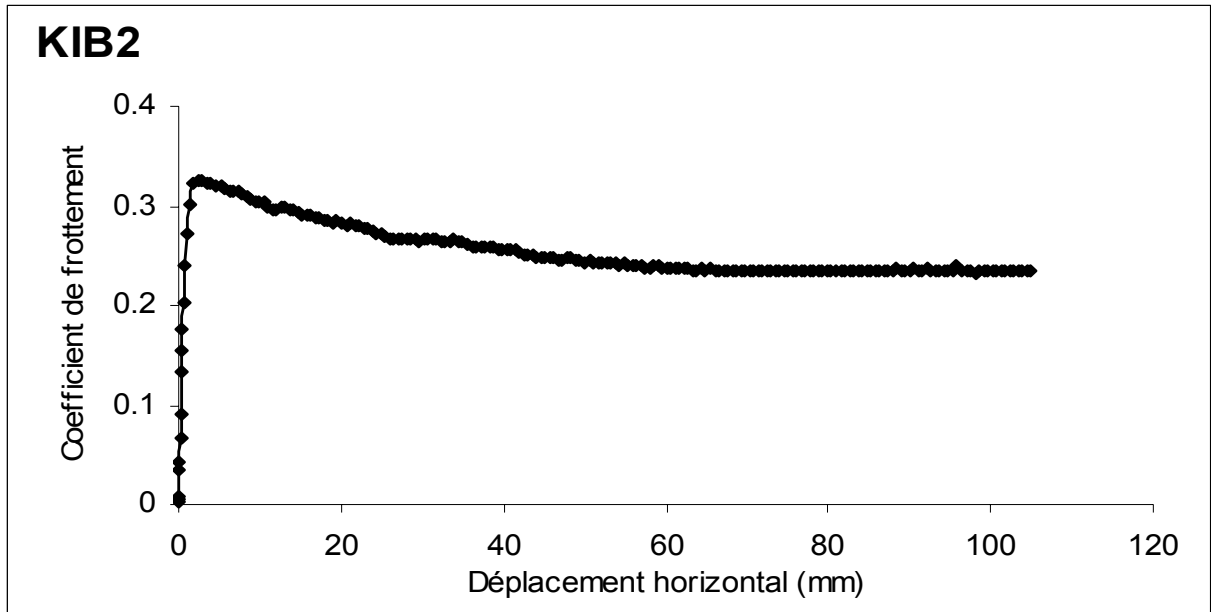


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

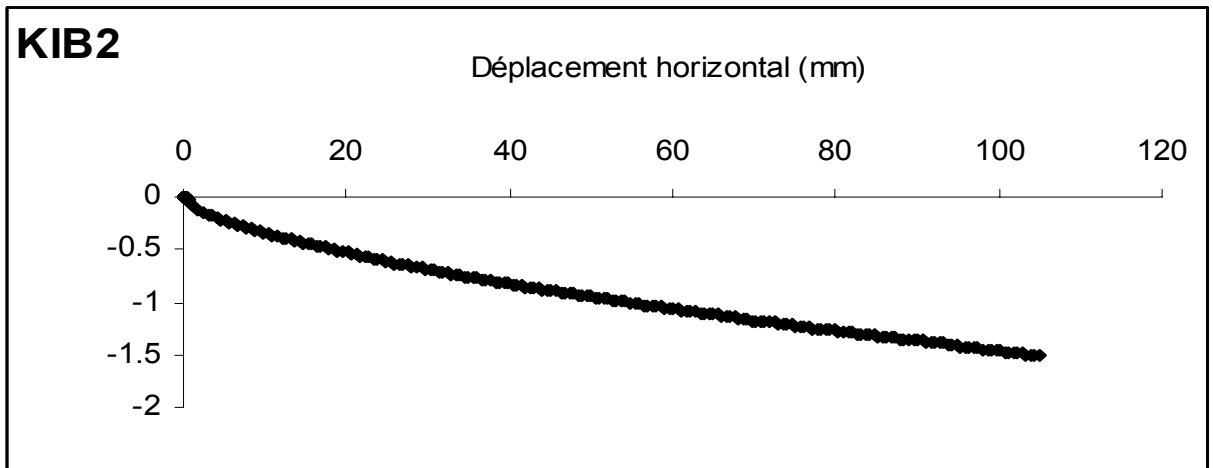


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.19.c** Résultat de l'essai KIA1CL

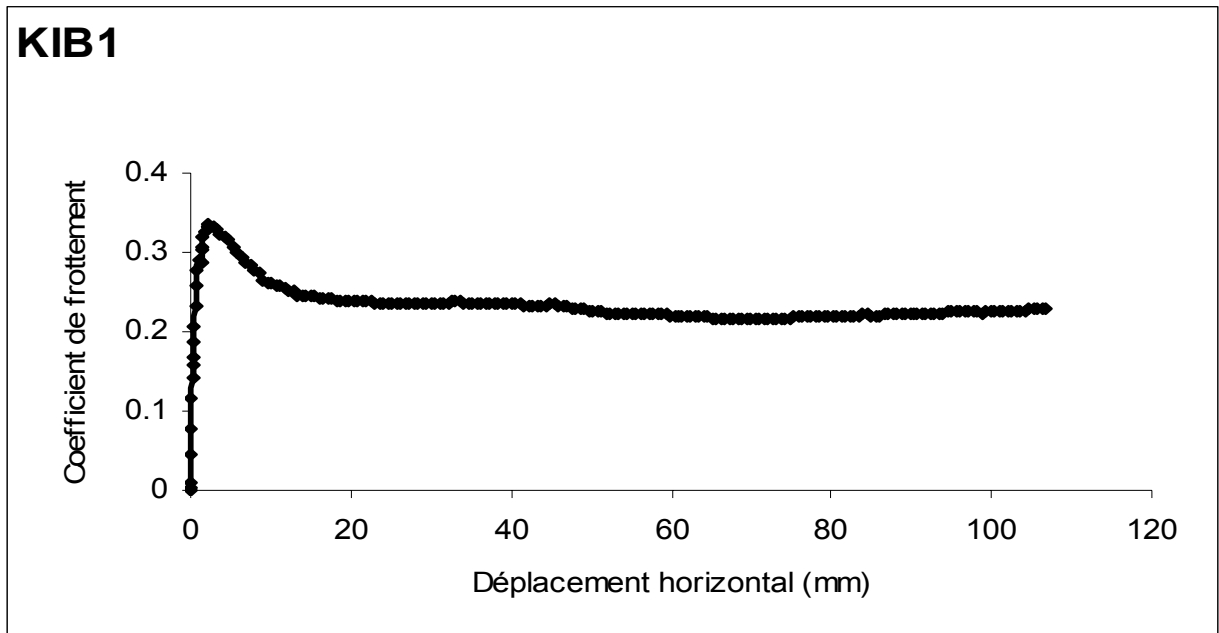


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

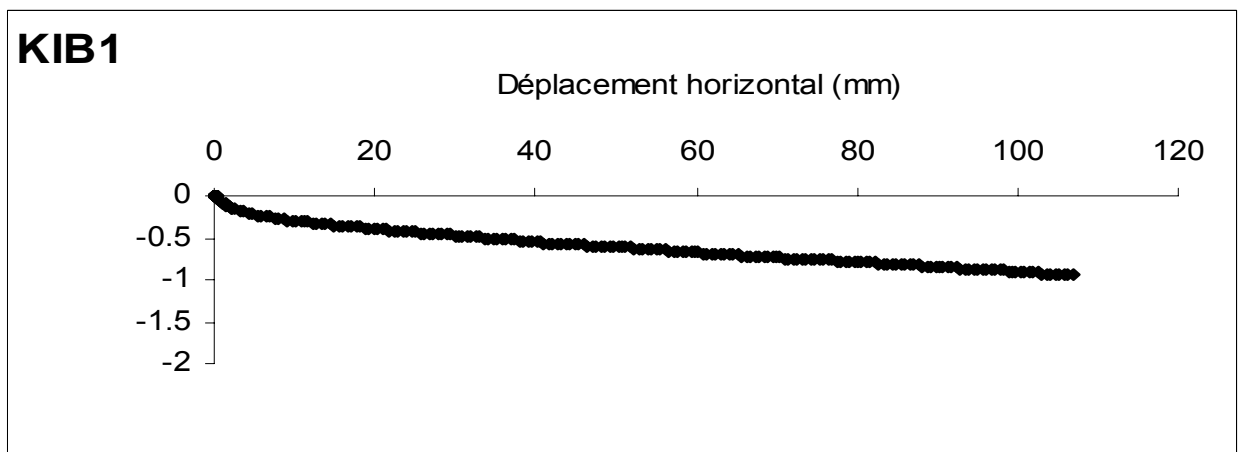


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.20** Résultat de l'essai KIB2

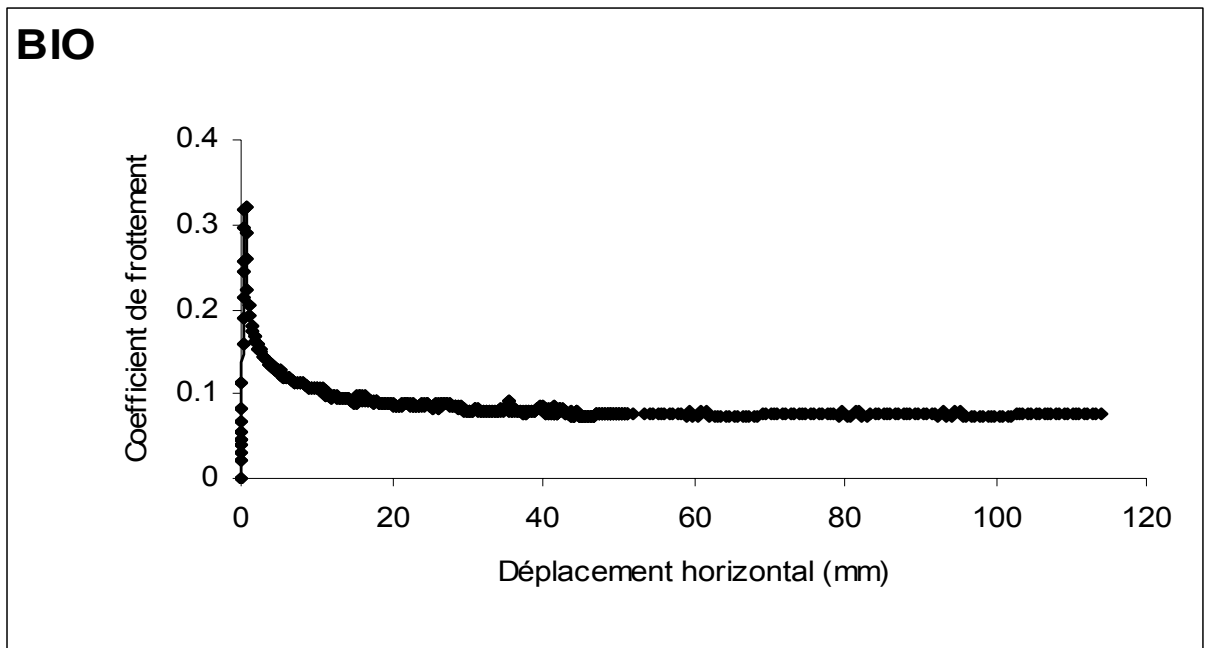


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

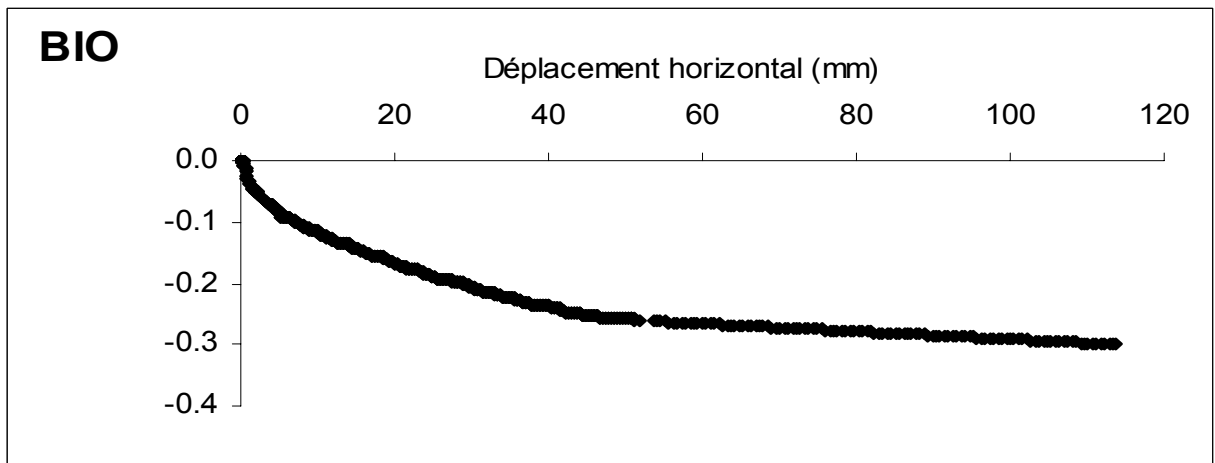


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.21** Résultat de l'essai KIB1

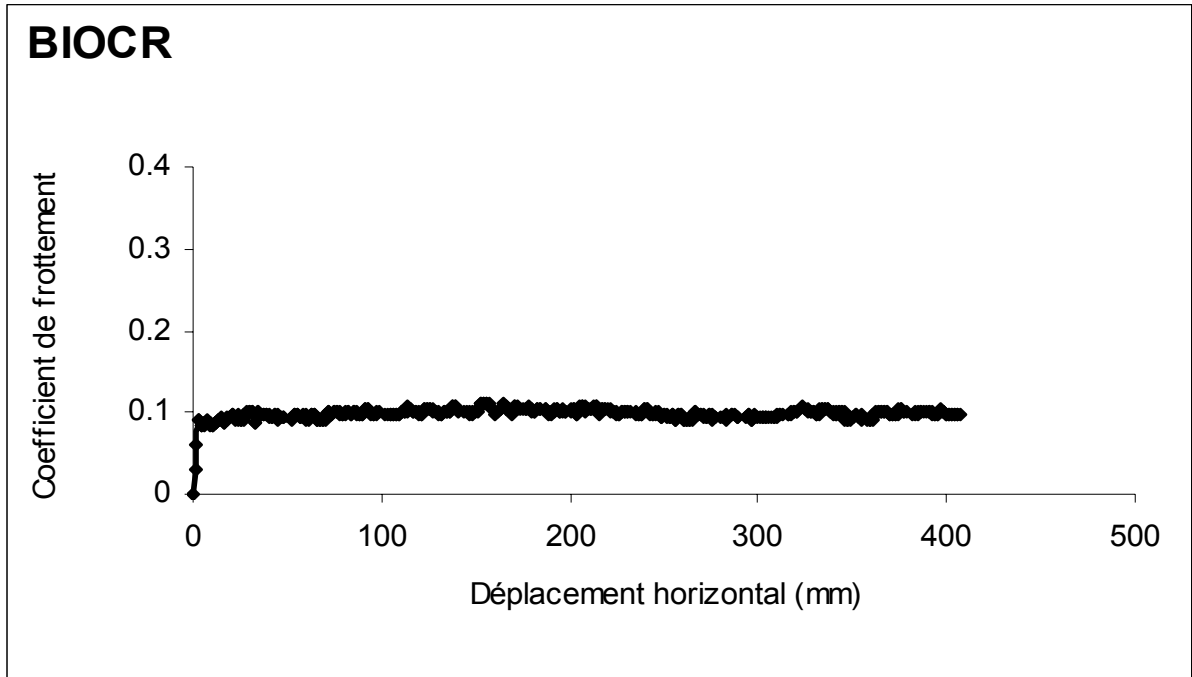


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

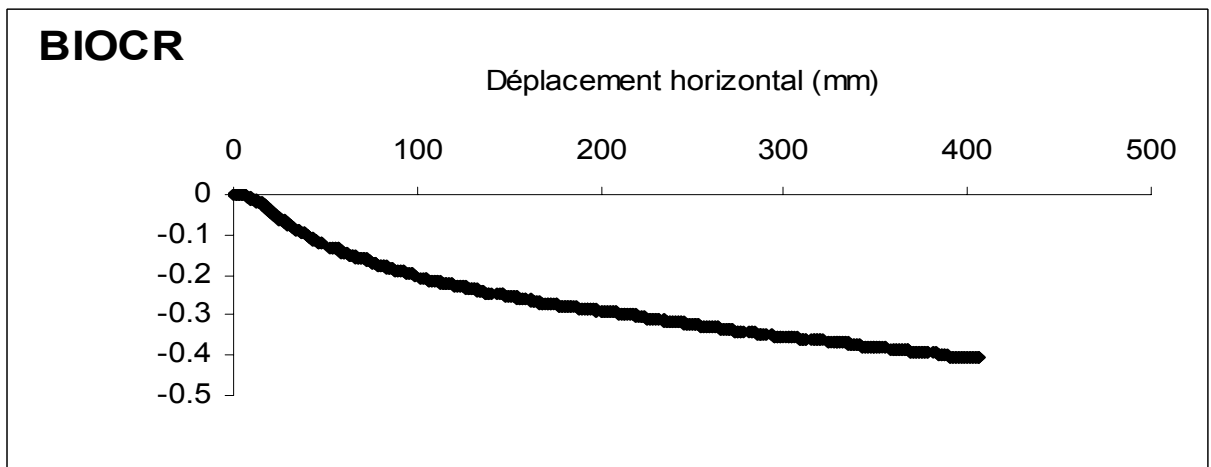


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.22.a** Résultat de l'essai BIO

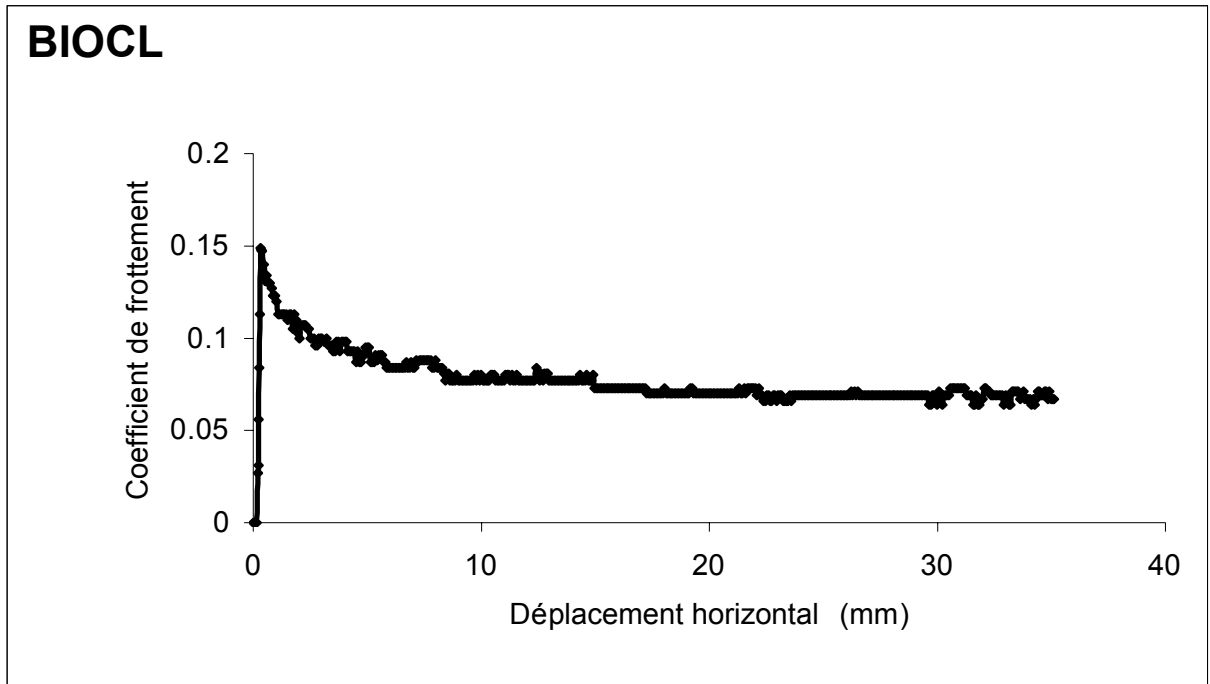


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

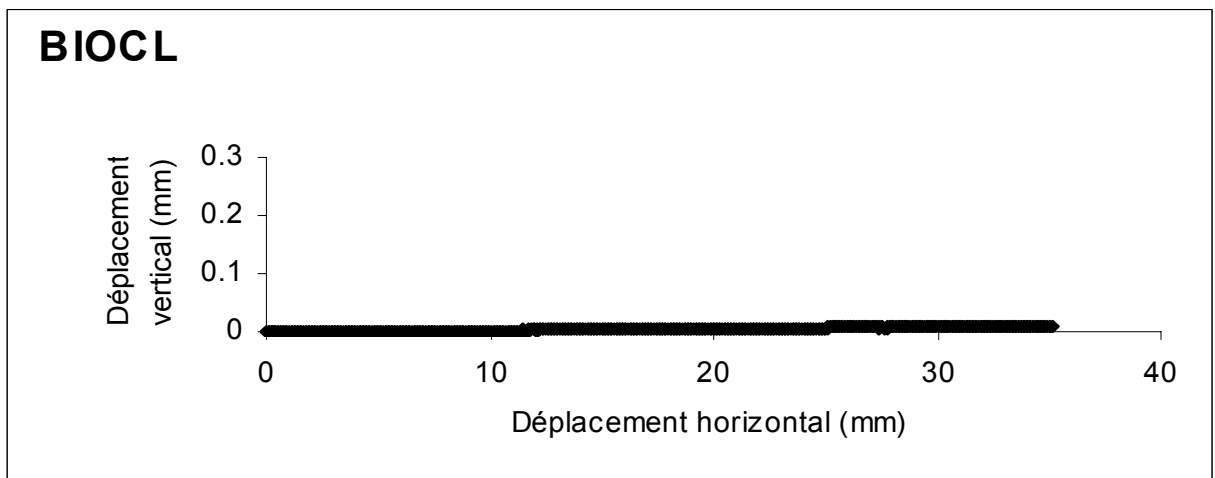


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.22.b** Résultat de l'essai BIOCR

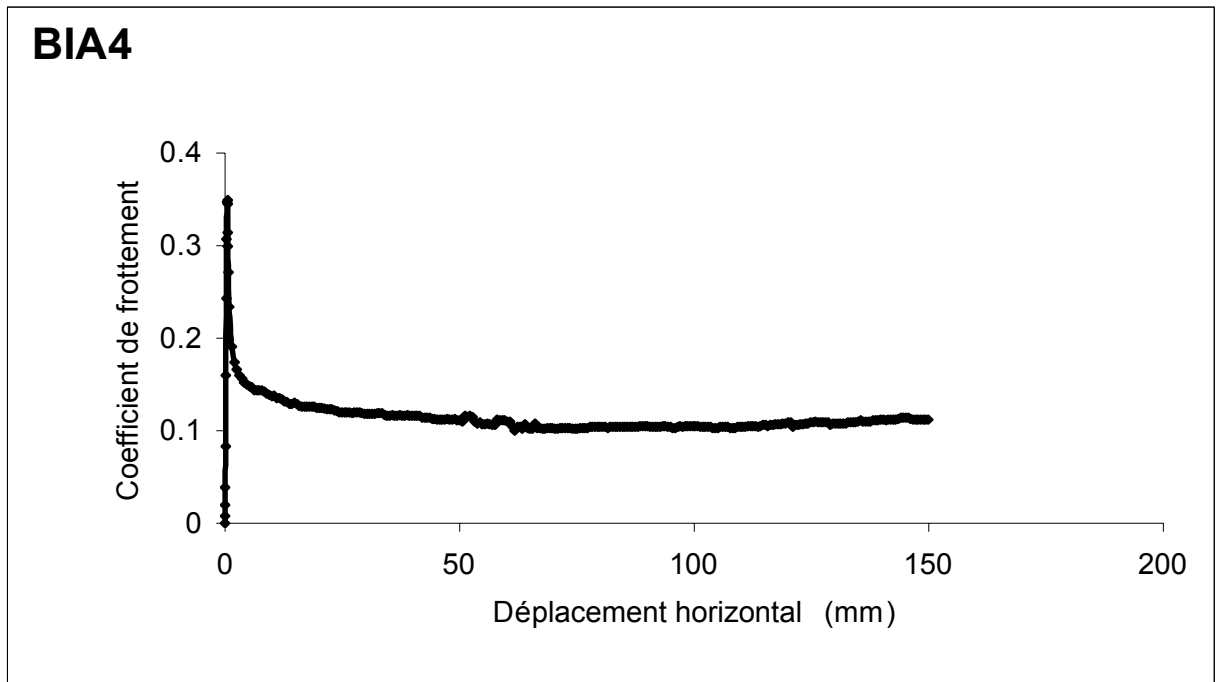


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

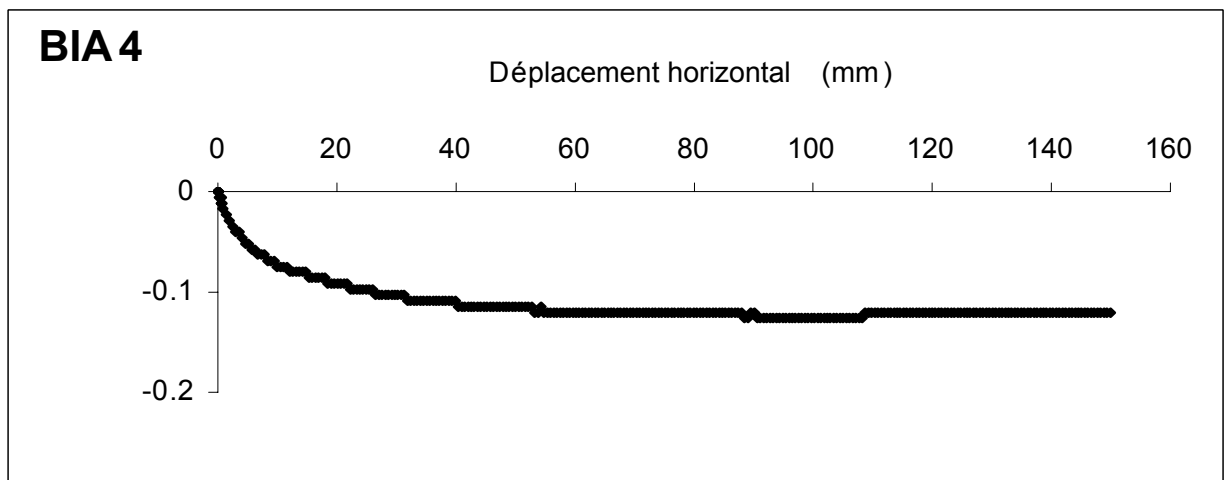


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.22.c** Résultat de l'essai BIOCL

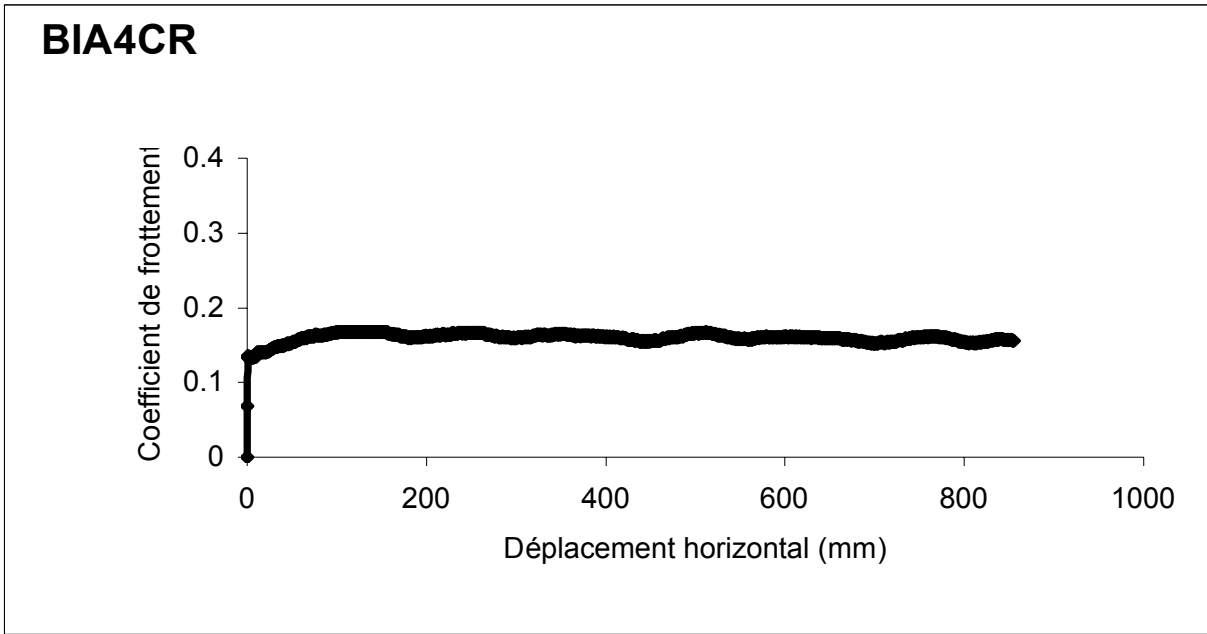


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

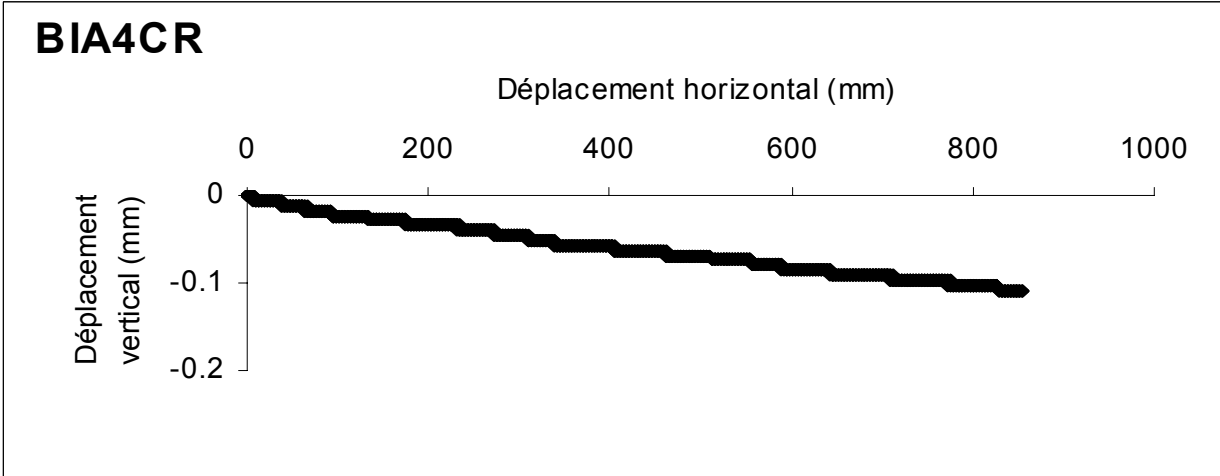


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.23.a** Résultats de l'essai BIA4

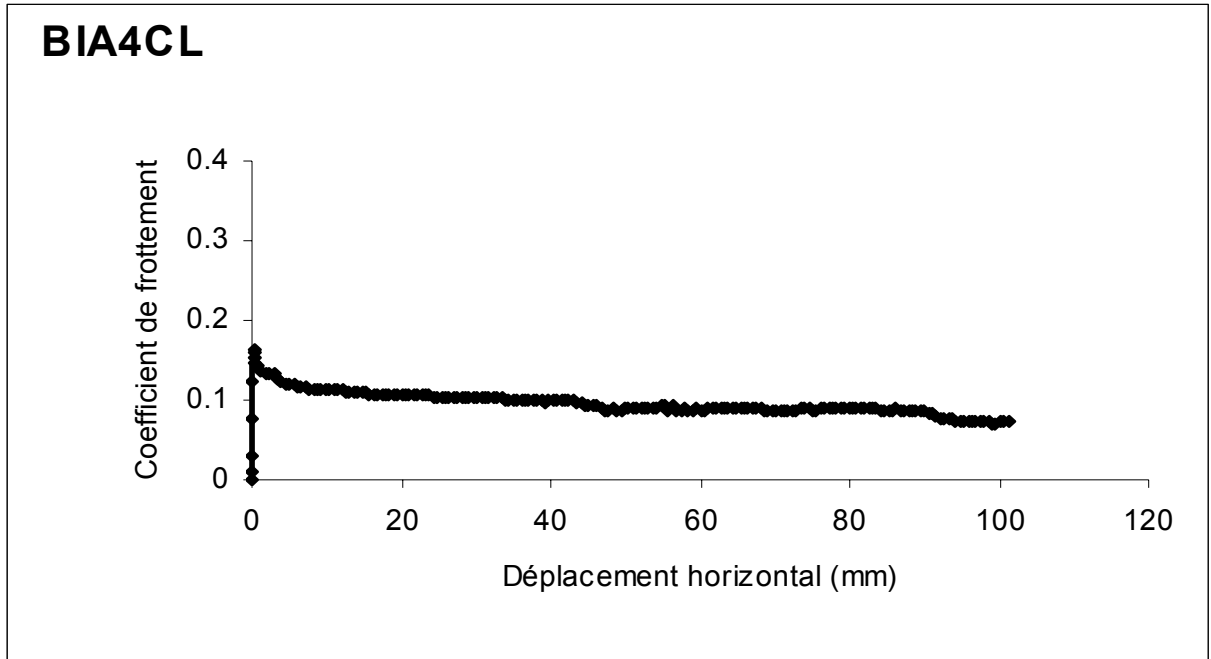


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

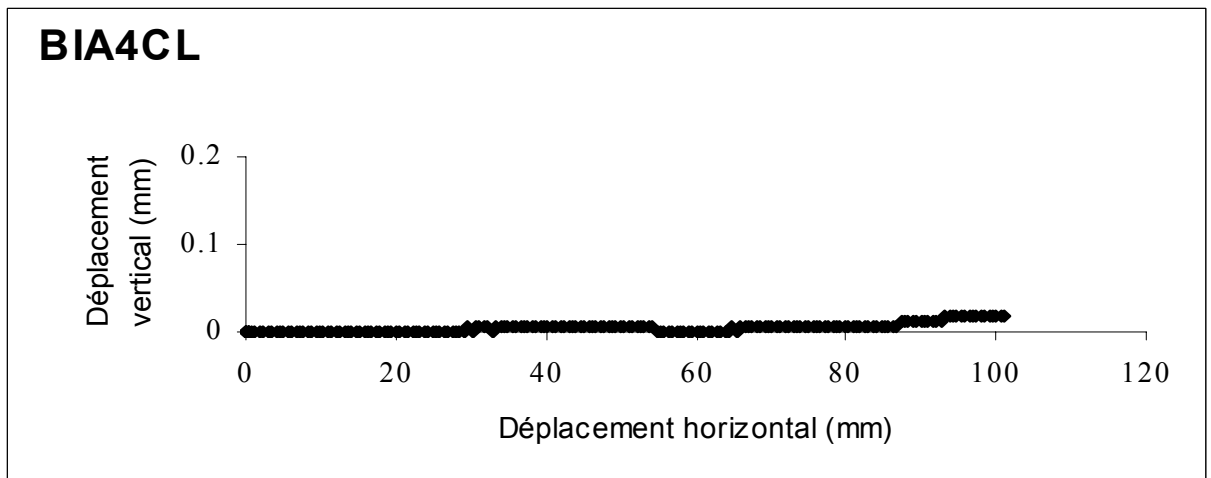


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.23.b** Résultats de l'essai BIA4CR

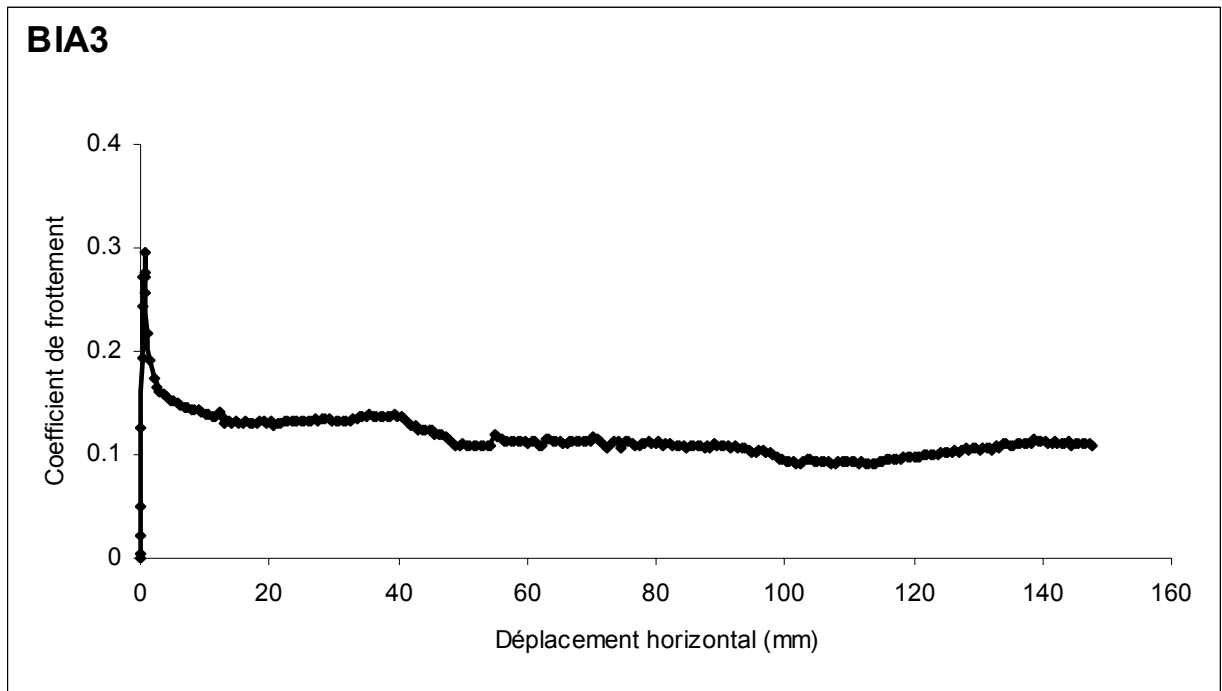


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

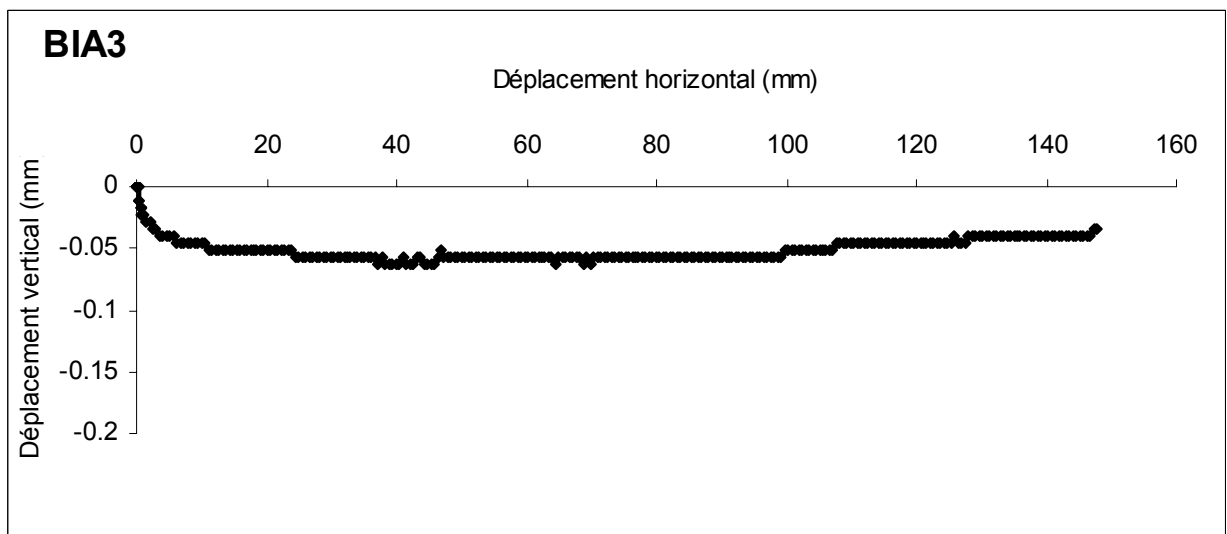


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.23.c** Résultats de l'essai BIA4CL

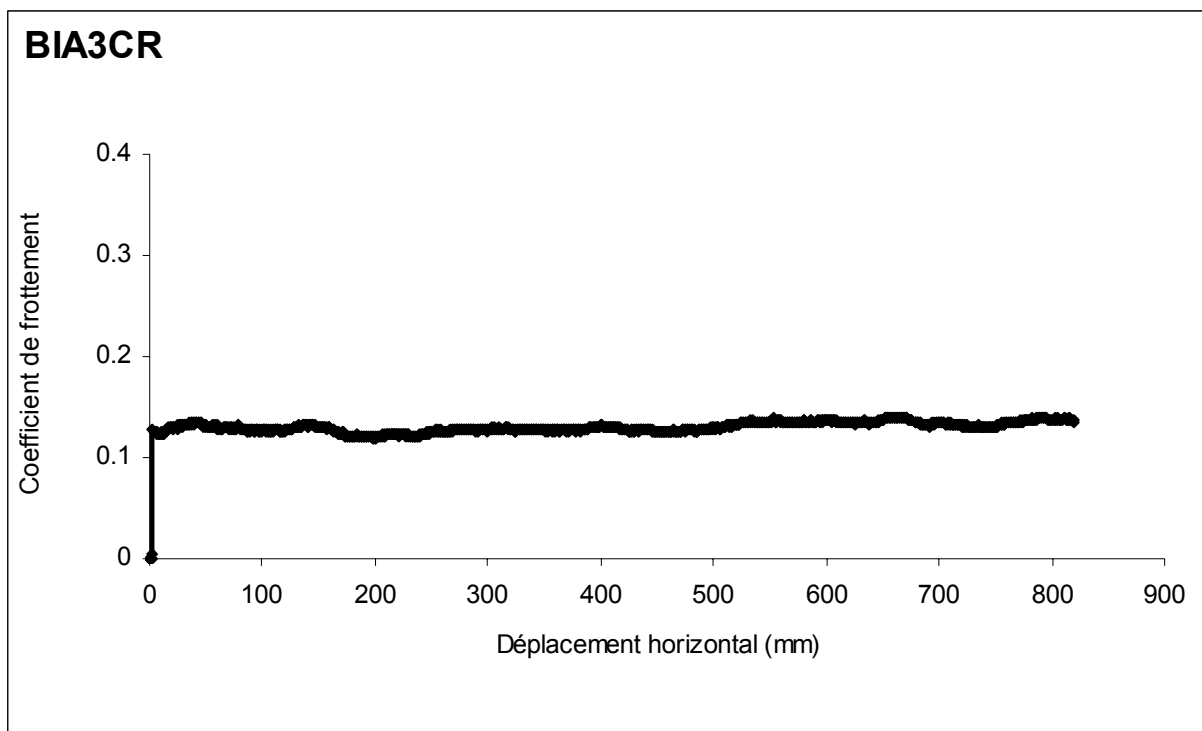


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

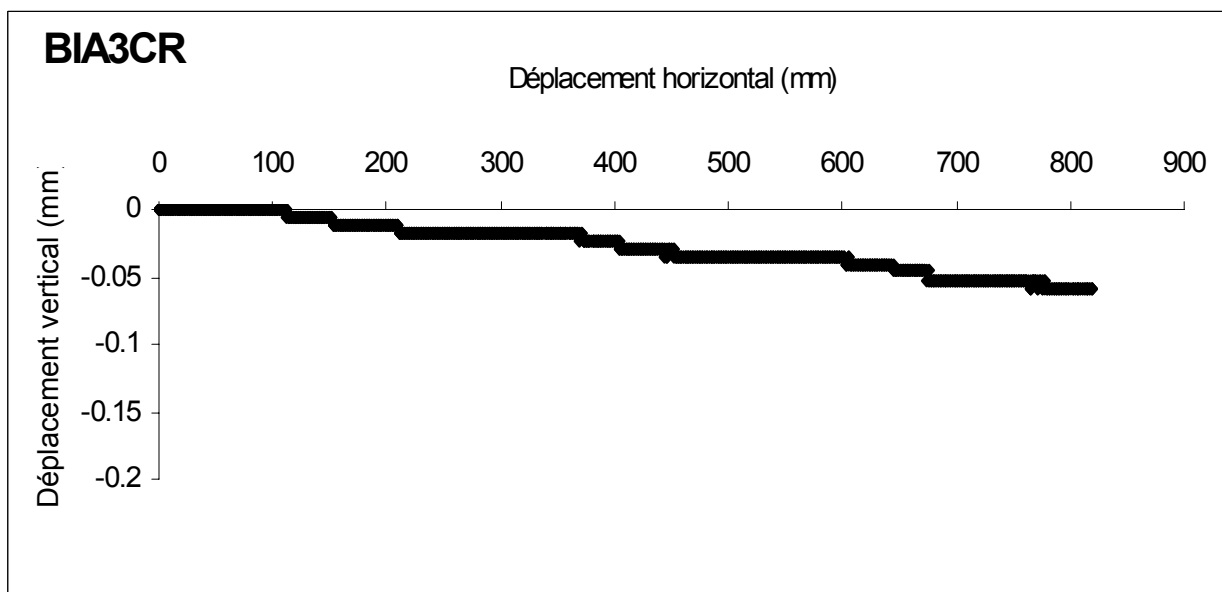


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.24.a** Résultats de l'essai BIA3

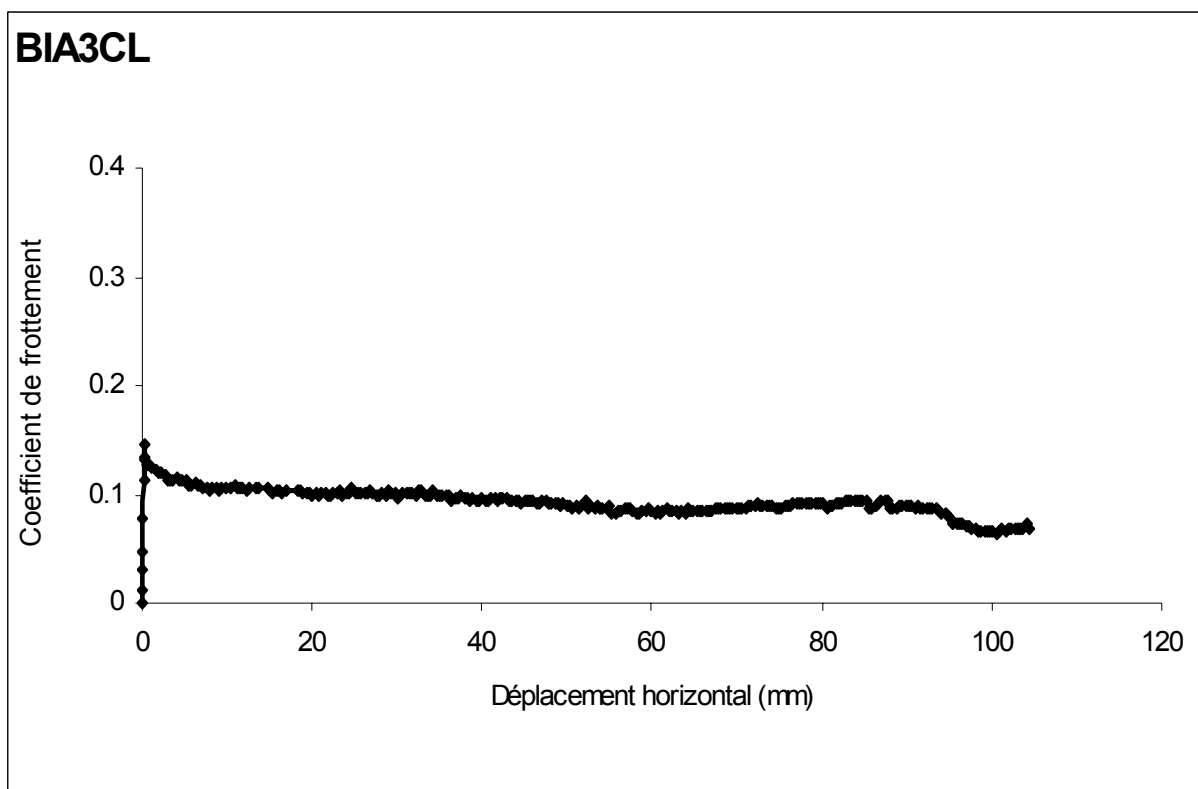


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

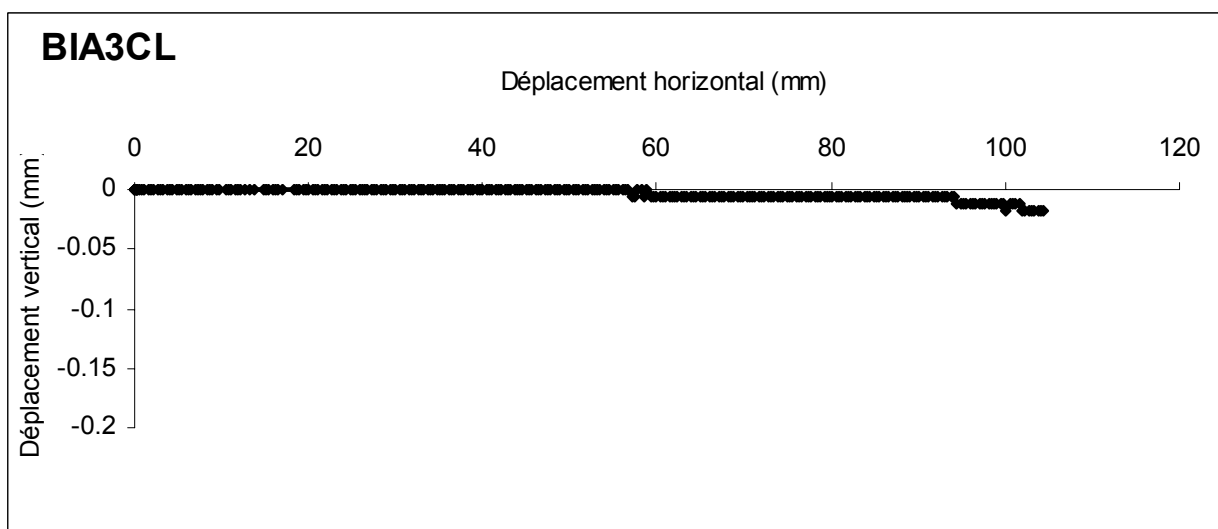


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.24.b** Résultats de l'essai BIA3CR

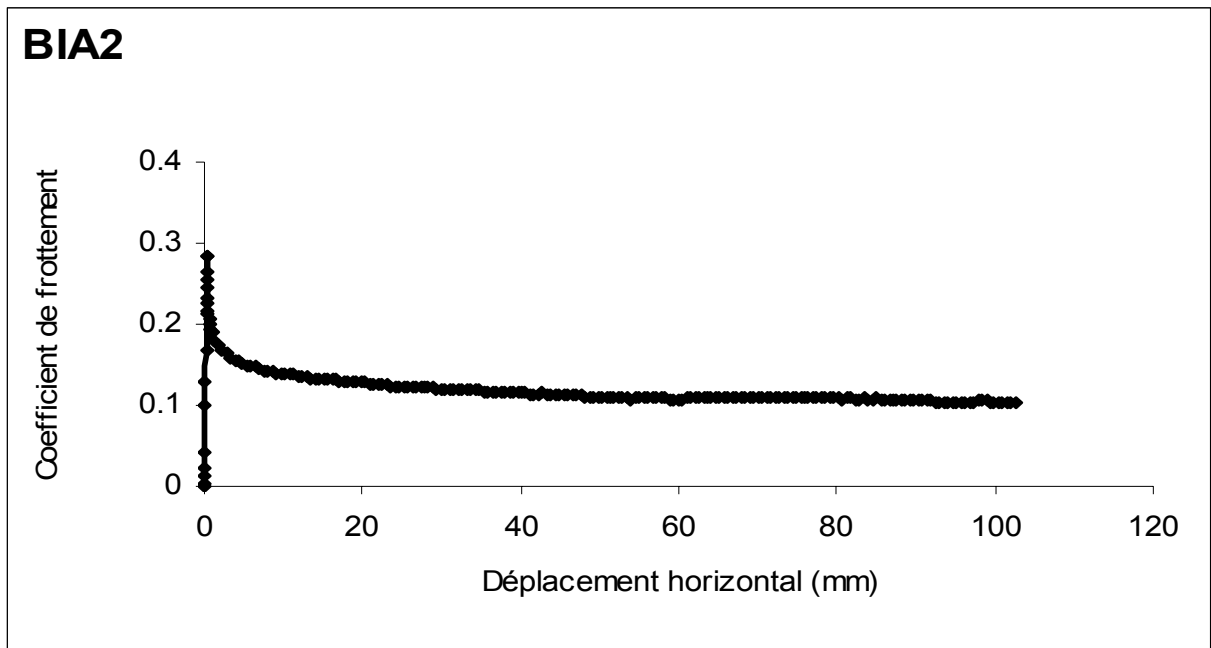


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

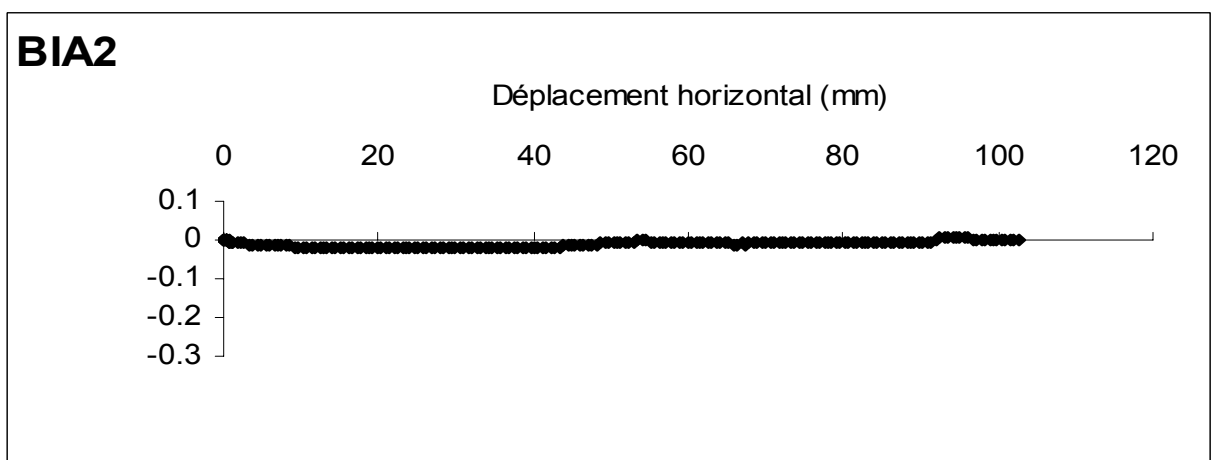


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.24.c** Résultats de l'essai BIA3CL

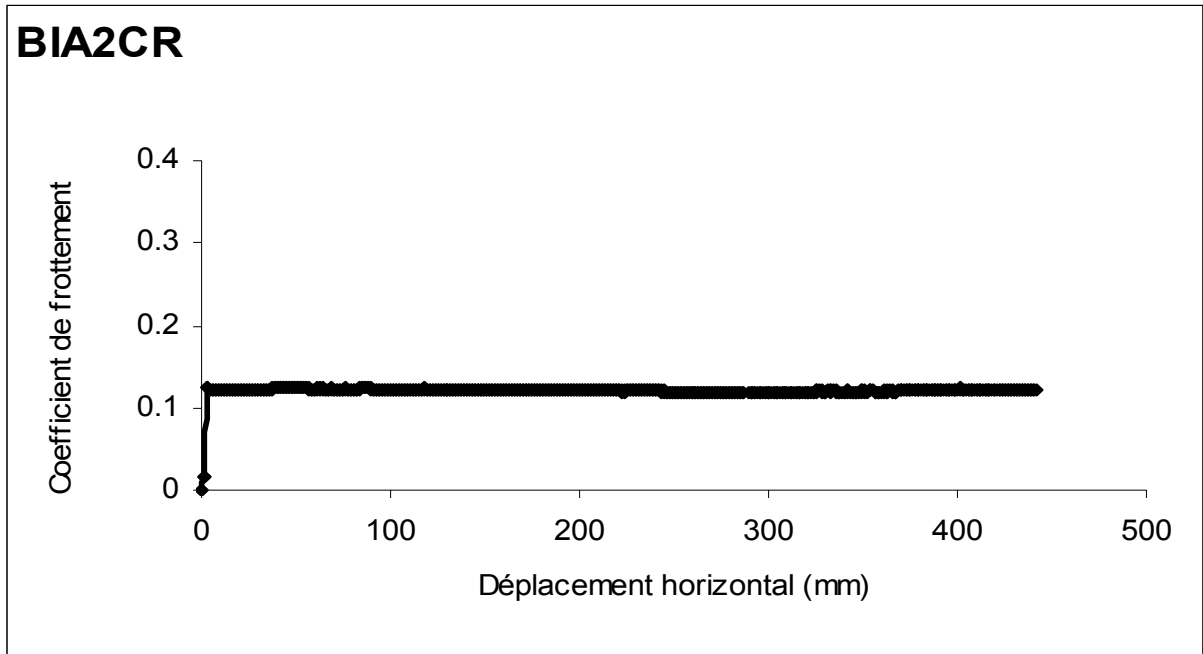


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

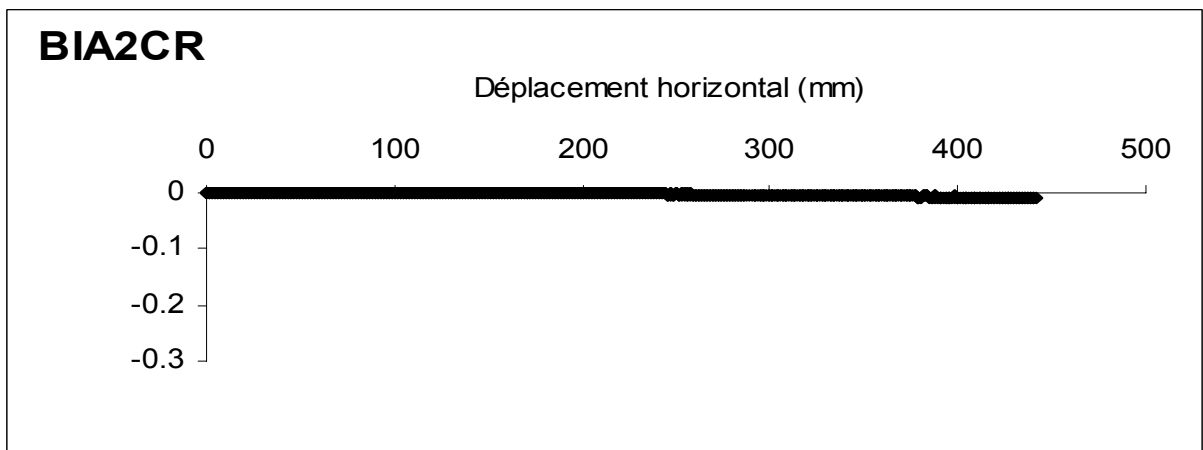


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.25.a** Résultats de l'essai BIA2

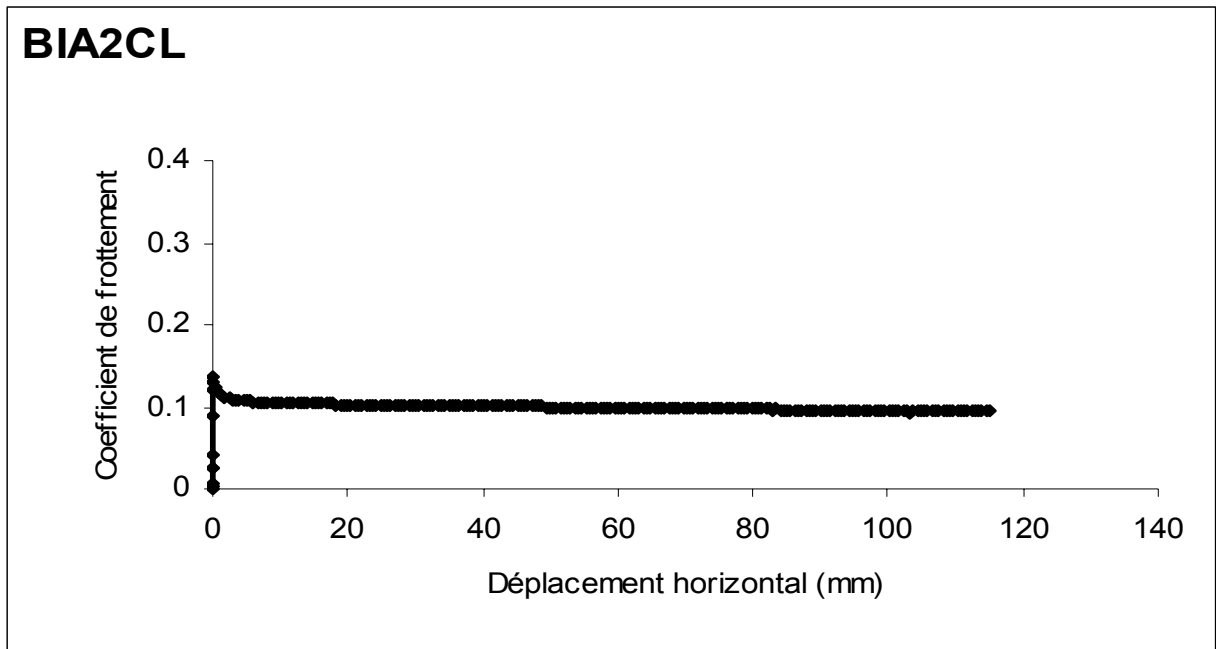


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

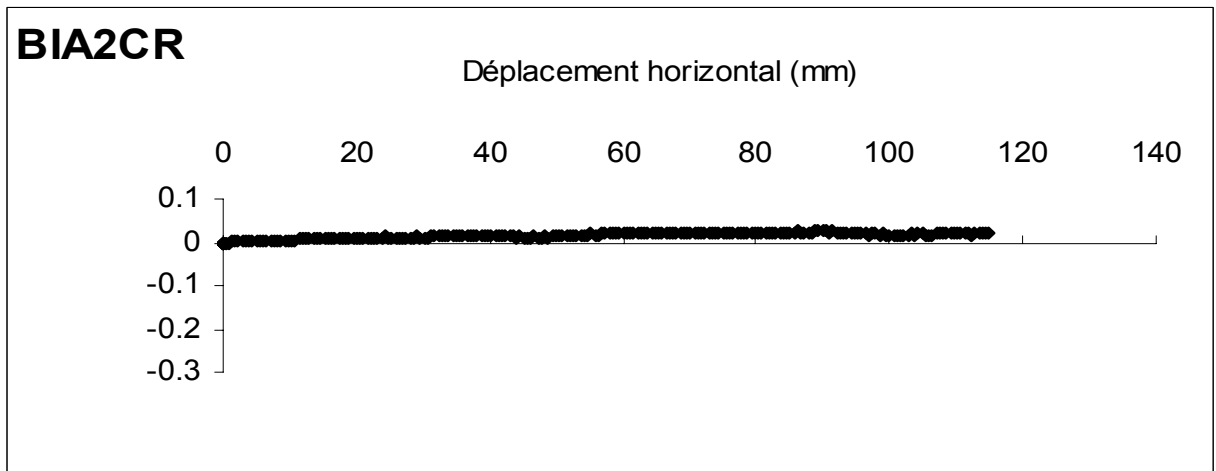


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.25.b** Résultats de l'essai BIA2CR

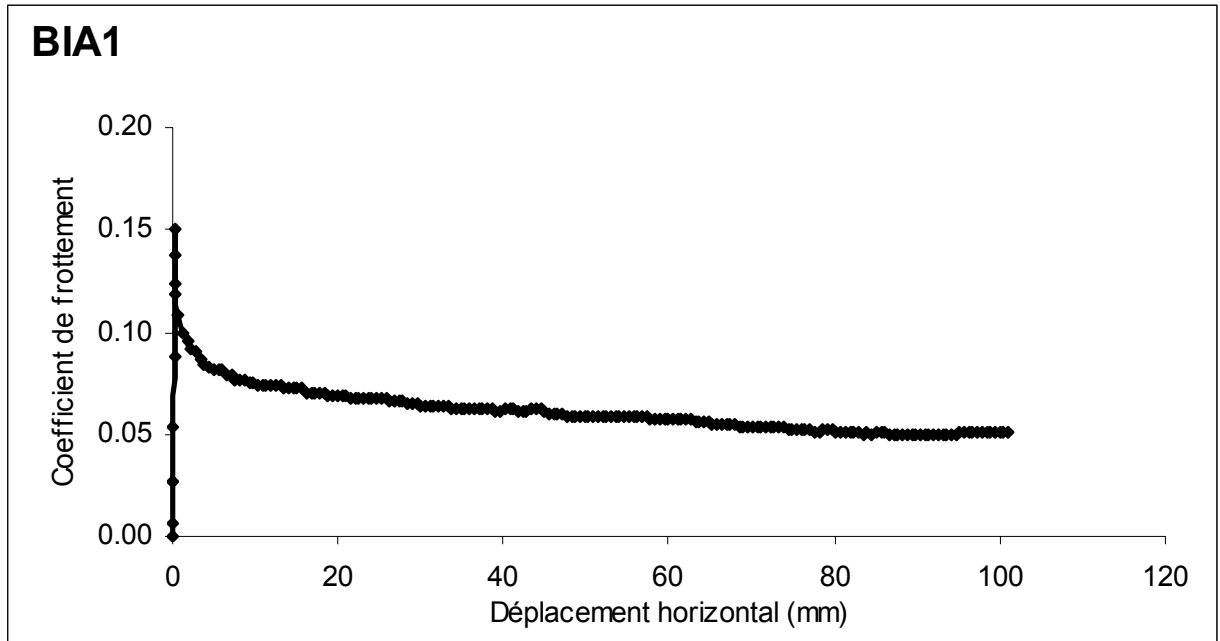


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

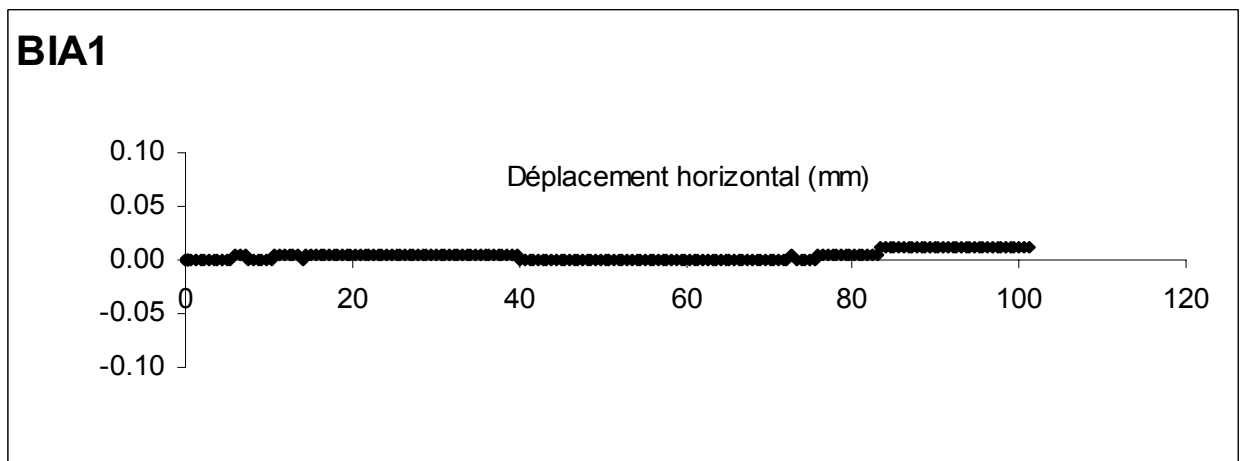


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.25.c** Résultats de l'essai BIA2CL

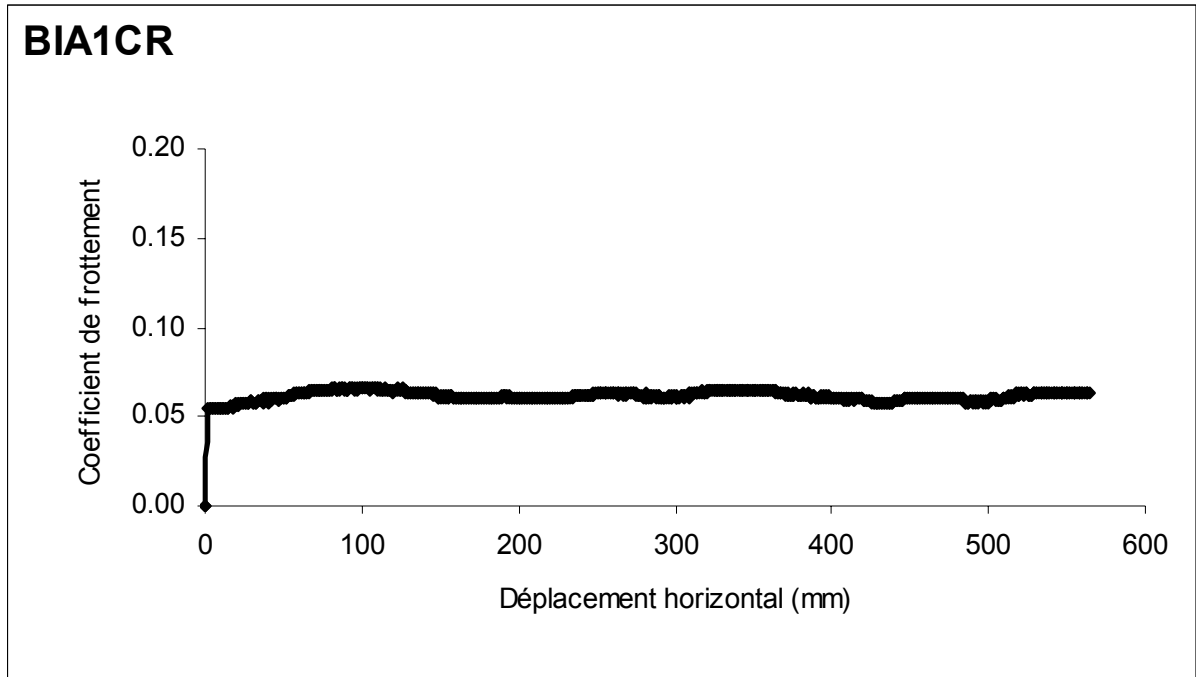


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

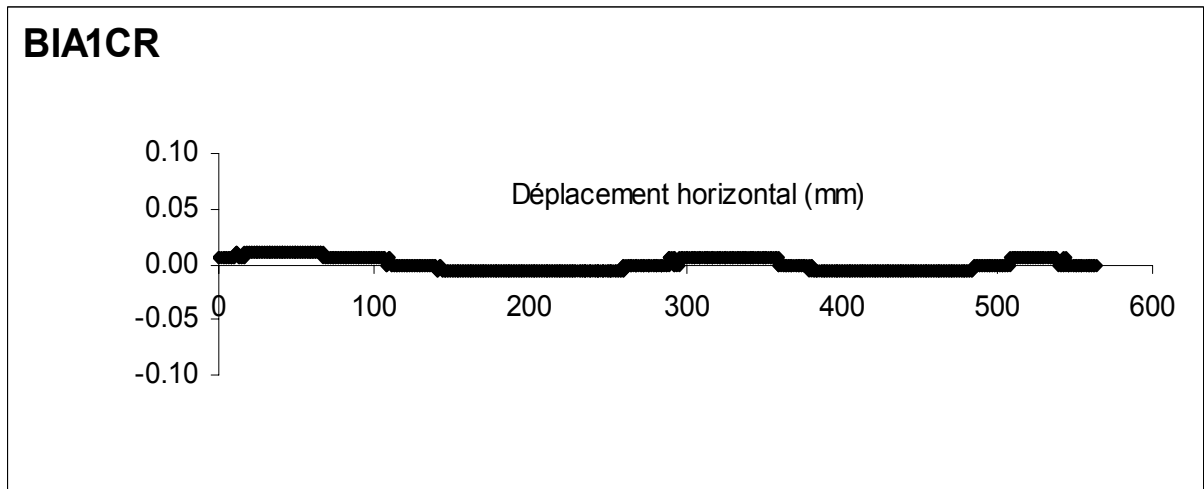


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.26.a** Résultats de l'essai BIA1

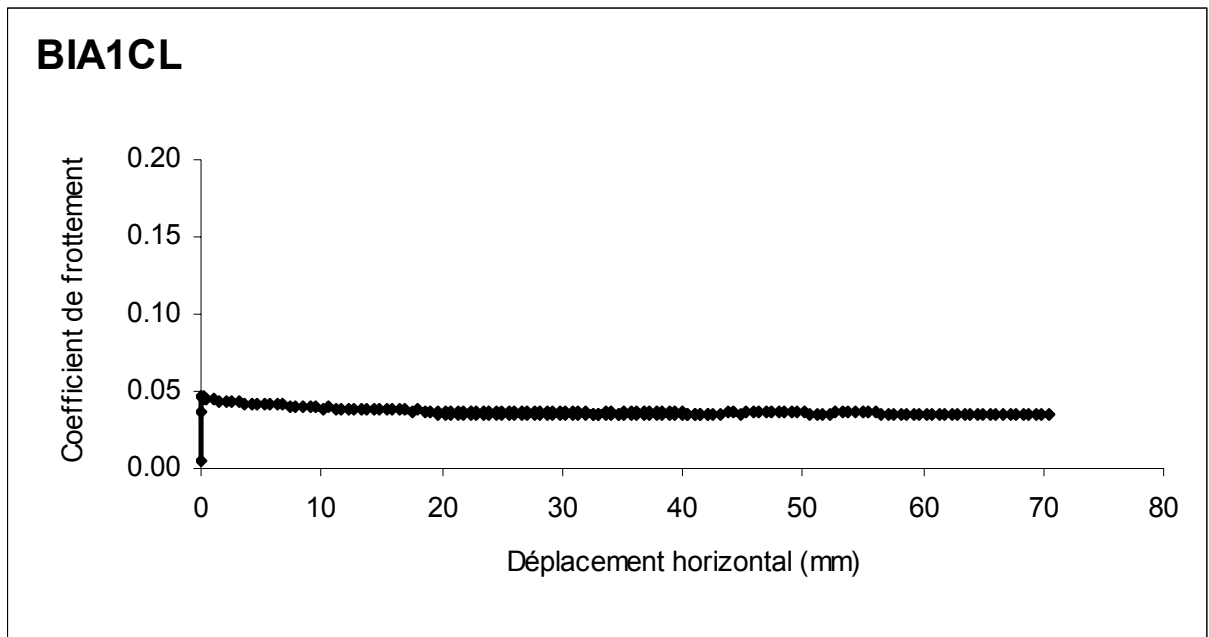


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

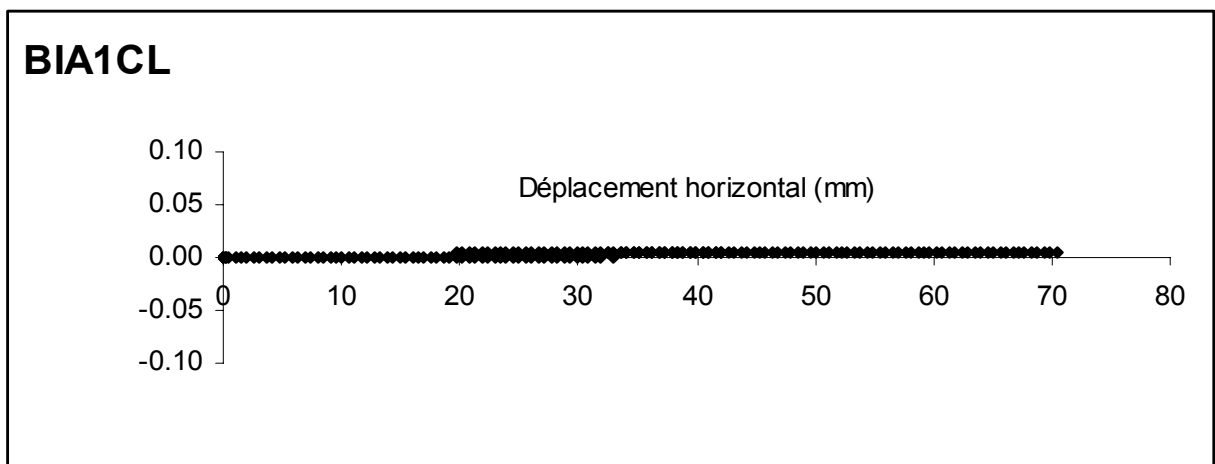


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.26.b** Résultats de l'essai BIA1CR

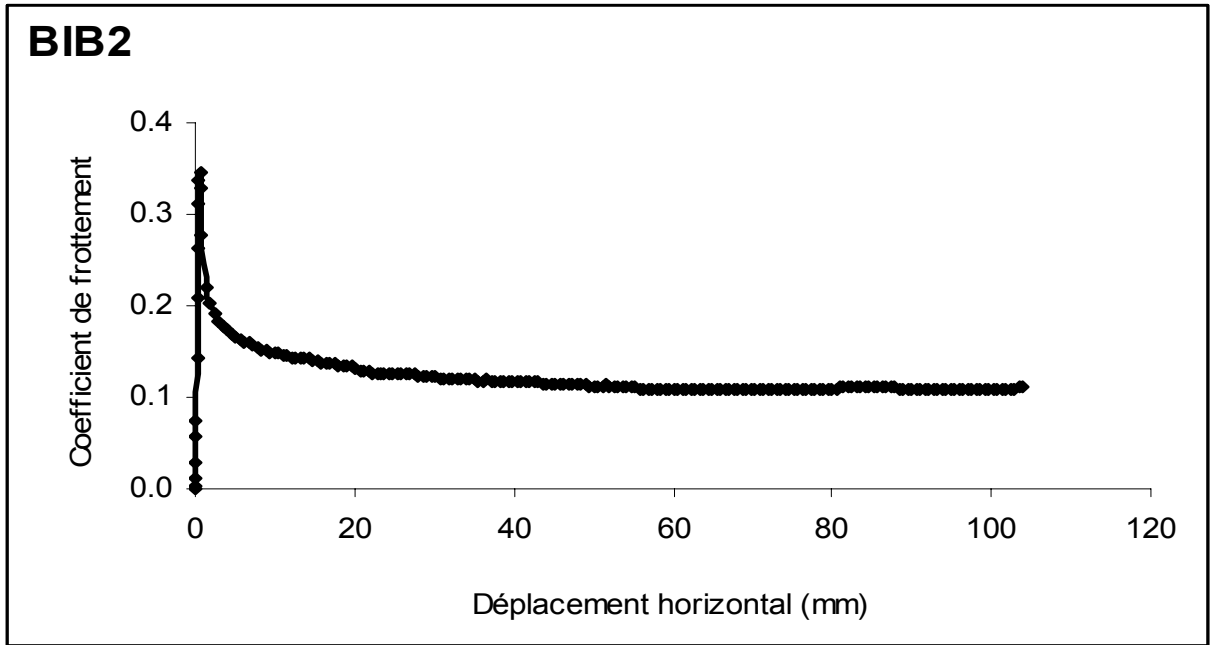


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

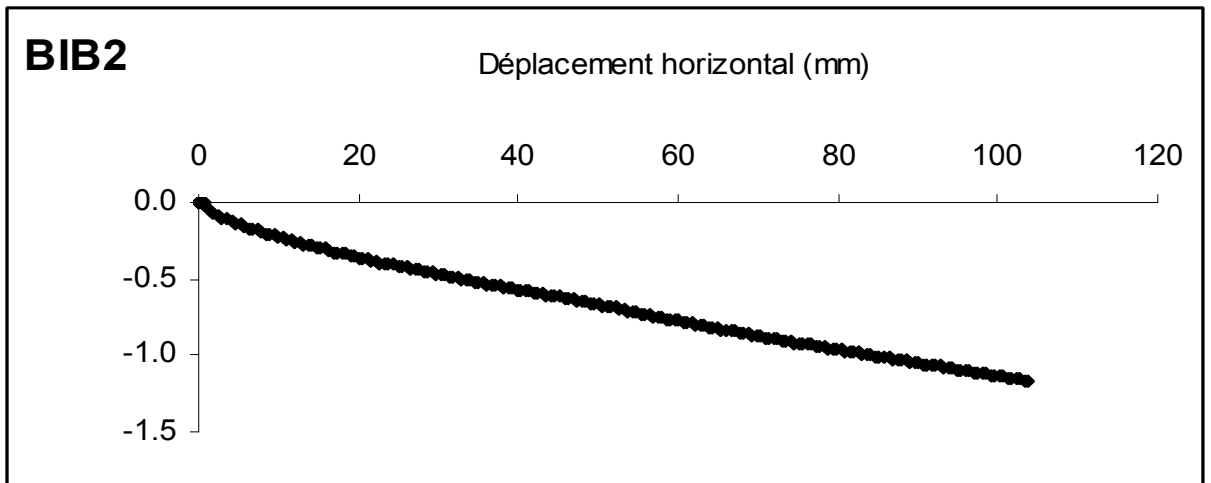


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.26.c** Résultats de l'essai BIA1CL

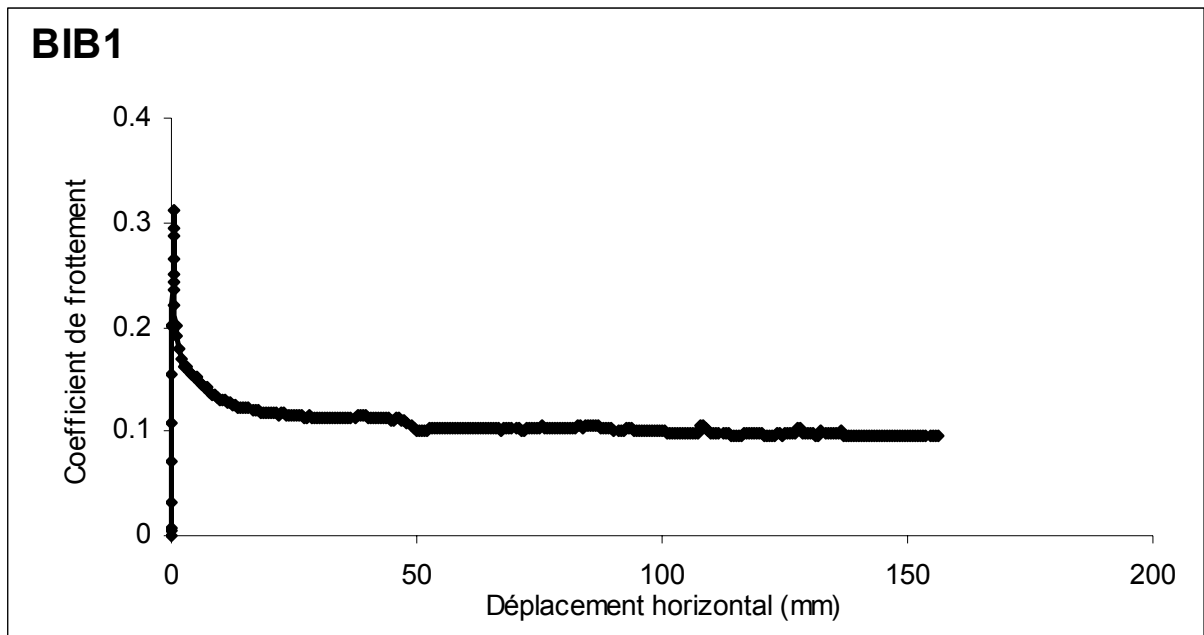


a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal

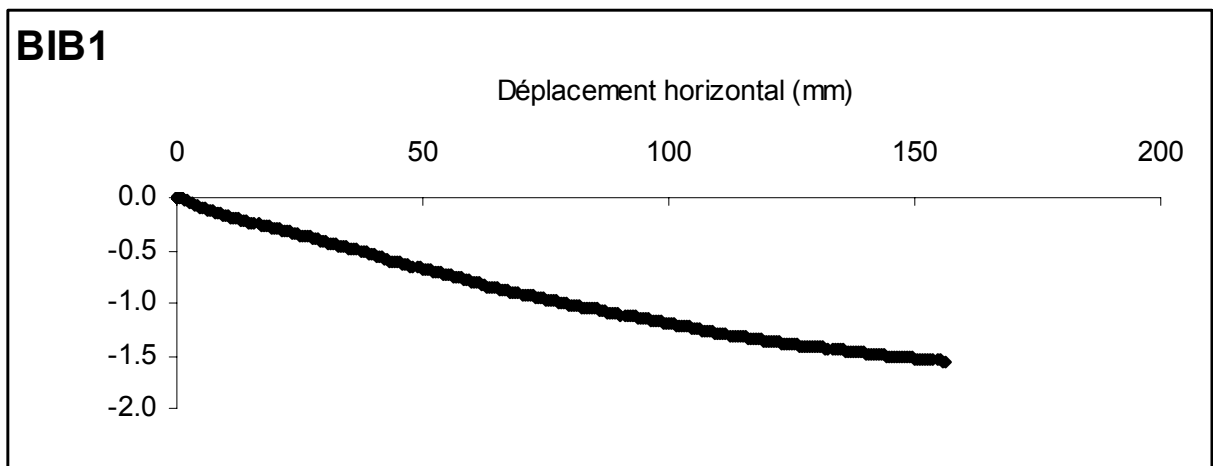


b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.27** Résultats de l'essai BIB2



a) Courbe coefficient de frottement – déplacement horizontal



b) Courbe déplacement vertical – déplacement horizontal

**Figure A.28** Résultats de l'essai BIB1