

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955-Skikda

جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

Faculté des Technologie

كلية التكنولوجيا

Département: Génie Civil

قسم: الهندسة المدنية

Ref :D012116010D



المرجع: D012116010D

Thèse présentée en vue de l'obtention  
du diplôme de

**Doctorat L.M.D**

**Option: Géotechnique**

Contribution à l'étude du cisaillement à l'interface sol  
cohérent-matériau solide

Présentée par :

**Marwa Feligha**

**Mr. Hammoud Farid** MCA **Directeur de thèse** **Université de Batna**  
**Mr. Belachia Mouloud** Professeur **Co-directeur de thèse** **Université de Skikda**

Soutenue publiquement le 05/06/2016

**Devant le jury composé de :**

**Mr. Messast Salah** Professeur **Président** **Université de Skikda**  
**Mr. Nouaouria M<sup>ed</sup> Salah** Professeur **Examineur** **Université de Guelma**  
**Mr. Abbeche Khelifa** Professeur **Examineur** **Université de Batna**

## **REMERCIEMENTS**

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

*Je tiens à remercier le Docteur **Farid Hammoud** pour ses conseils, sa compétence scientifique, ses qualités morales et son encadrement qui m'ont permis d'aboutir à la finalisation de ce projet de recherche. Je remercie le Professeur **Mouloud Belachia** pour ses orientations et ses conseils durant l'élaboration de cette thèse. J'ai eu l'opportunité de travailler et de connaître un bon nombre de personnes durant ces cinq années de thèse. Chacune d'entre elles a contribué aux diverses phases de ce travail et je tiens à les remercier très chaleureusement. Merci à l'ensemble des professeurs des départements de génie civil et mécanique de l'université de Skikda, Guelma et de département de génie civil de l'université de Batna pour leur disponibilité et leur soutien. Je tiens plus particulièrement à remercier le Professeur **M<sup>ed</sup> Salah Nouaouria** pour m'avoir fourni de judicieux conseils durant la réalisation des essais à l'université de Guelma, de part ses expériences et ses connaissances.*

*Je tiens à remercier Professeur **Salah Messast**, qui a bien voulu examiner ce travail et présider le jury.*

*Mes remerciements vont aussi aux Professeur **M<sup>ed</sup> Salah Nouaouria** et **Khelifa Abbeche** d'avoir accepté d'examiner ce travail. Qu'ils sachent que j'ai été honorée par leur présence en tant que membres du jury, et qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.*

*Je remercie mes sœurs, mes frères, mes amis et toute ma famille pour leurs encouragements, leurs conseils et leur soutien.*

*Enfin, je souhaite adresser ma gratitude à **mes parents** pour leur soutien, leur patience et leur amour infini. Je leur dédie ce travail de recherche.*

***Feligha. M***

## Résumé

Le présent travail à caractère expérimental et numérique étudie le comportement de la résistance au cisaillement à l'interface sol - matériau solide.

Pour atteindre cet objectif, des essais expérimentaux ont été réalisés pour étudier le mécanisme de cisaillement d'interface, l'effet de la rugosité et le modèle de texture sur la résistance au cisaillement à l'interface. Quatre types de sols cohérents (deux type de kaolin « K1 et K2», argile de Guelma « CG», et mélange kaolin-argile de Guelma « K1G») et des interfaces d'acier et en papier abrasif, ont été utilisés dans des essais de cisaillement direct. Tous les essais ont été effectués dans des conditions de cisaillement drainés.

Les résultats obtenus indiquent que le comportement à l'interface sol-matériau solide varie selon la rugosité de surface. Trois modes de cisaillement peuvent avoir lieu: un cisaillement à l'interface, un cisaillement au sein du sol et finalement un cisaillement simultané à l'interface et au sein du sol (le second mode cependant, ne semble pas exister pour l'ensemble des essais réalisés). Il semble également que le type de matériau (acier ou papier d'abrasif) utilisé n'a pas une influence majeure sur la résistance au cisaillement. En outre, la résistance au cisaillement à l'interface est indépendante de la texture des surfaces.

L'objectif de la partie numérique est d'examiner les détails de modélisation de l'interaction sol-structure. Parallèlement à cette contribution rhéologique, une méthodologie générale de modélisation numérique par éléments finis (PLAXIS) et différences finies (FLAC) de l'essai de cisaillement direct modifié est proposée. En comparant les prévisions numériques avec les résultats expérimentaux, il est démontré que le comportement de l'essai de cisaillement à l'interface est correctement reproduit. Pour l'analyse numérique par le code de calcul aux éléments finis (PLAXIS), il semble que le coefficient réducteur de l'interface  $R_{inter}$  et le type de sol ont une influence direct sur les résultats numériques. Le critère de Mohr-Coulomb donne une bonne convergence pour K1 et K1G, et moins de précision pour CG. Parallèlement à cette modélisation, une analyse numérique par différences finies (FLAC) est menée. Il s'appuie sur le critère de Mohr-Coulomb, l'influence des éléments d'interface, la rigidité de cisaillement  $K_s$ , la rigidité normale  $K_n$ , et l'angle de frottement à l'interface  $\delta$  ont été étudiées. Les résultats numériques et expérimentaux sont comparés. En comparant les prévisions numériques aux résultats expérimentaux, il est montré que le comportement d'essai de cisaillement modifié est correctement reproduit. Par ailleurs, la comparaison de l'influence des modèles PLAXIS, FLAC est abordée.

**Mots-clés:** Différences finies (FLAC<sup>2D</sup>), éléments finis (PLAXIS<sup>2D</sup>), interface sol-matériau solide, texture, résistance au cisaillement à l'interface, rugosité, sols cohérents.

## ABSTRACT

Experimental and numerical studies of the shear strength behaviour of soil-solid material interface are presented herein.

In this work laboratory tests have been carried out to investigate shearing mechanism interface, the effect of roughness interface and texture models on friction angle between cohesive soils and steel, and abrasive paper material, using direct shear tests. All tests were carried out under consolidated drained shear conditions. Four types of soil have used namely: two types of kaolin « K1 and K2», clay of Guelma « CG», and mixing kaolin- clay of Guelma « K1G». The behaviour at the soils-solid interface was found to vary according to surface roughness. It also seems that the type of material (steel or paper of abrasive) used does not have a major influence on the shear strength. With respect to roughness, friction behaviour is likely to be classified generally into three failure modes, namely full sliding at the interface, shear failure within the soil, and a mixed behaviour where interface sliding and shear deformation of the soil specimen proceed simultaneously. For the second mode however, the shear strength at the interface soil-rough solid materials steel was found to be lower than the shear strength of the soil, for a soil that is classified of high plasticity clay (i.e. Guelma clay). Furthermore, it was found that the interfacial shear strength is independent of the textures surfaces for a given roughness.

The objective of the numerical part is to examine numerical modelling details of the soil-structure interface interaction which were treated in terms of modified direct shear test simulations. For numerical simulations the modified direct shear tests were modeled by the finite element method (PLAXIS) and finite differences method (FLAC) and interpreted. By comparing the numerical predictions with the experimental data, it is shown that the behaviour of the modified direct shear test is correctly reproduced. Considering the numerical analysis by finite elements model (PLAXIS), the reduction coefficient of the interaction  $R_{inter}$  and soil type directly affect the numerical results. The Mohr-Coulomb criterion gives good convergence for the K1 and K1G and less precision for the CG. Parallel to this modelling, numerical analysis by finite differences method (FLAC) is conducted. It is based on the Mohr-Coulomb criterion, the influence of the interface element shear stiffness  $K_s$ , normal stiffness  $K_n$ , and friction angle  $\delta$  was studied. The numerical and experimental results are compared. By comparing the numerical predictions with experimental results, it is shown that the modified shear test behaviour is correctly reproduced. Furthermore, results deduced from Plaxis are compared to those of Flac.

**Key words:** cohesive soils, finite difference method (FLAC), finite elements (PLAXIS), interface shearing resistance, surface roughness, soil-steel interface, texture models.

## ملخص

سلوك المنشآت في تطبيقات الهندسية المدنية مثل الجدران الاستنادية، الاوتاد، مشاكل التعزيز (الأرض المقوى) وأسس يعد من بين المشاكل المتعلقة للتفاعل تربة-هيكل. مقاومة القص على السطح البيئي مهمة جدا عند تصميم الهياكل التي لها اتصال مباشر مع التربة. ان الهدف الرئيسي لهذا البحث هو الدراسة التجريبية والعديدية للسلوك قوة القص على سطح البيئي بين التربة- الهياكل.

لتحقيق هذا الهدف، تم إجراء اختبارات تجريبية لدراسة آلية القص، تأثير خشونة، و الشكل الخارجي لسطح على قوة القص مستعملين أربعة أنواع من التربة متماسكة( نوعين من الكاولين « K1 و K2 » طين قالمة « CG » ، و خلط الكاولين - طين قالمة " « K1G » ) واستعمال مواد الفولاذ وورق الزجاج، وذلك باستخدام جهاز القص المباشر.

اثبتت النتائج المتحصل عليها أن السلوكيات عند السطح البيئي تربة -مواد الصلبة يتغير وفقا لخشونة السطح. يمكن لثلاثة أنماط القص أن تحدث: القص في السطح البيئي، القص في داخل التربة، وفي نهاية، قص على مستوى السطح البيئي وداخل التربة في ان واحد. بنسبة لجميع التجارب التي أجريت على تربة قالمة (CG) التي تصنف على أنها طين بلاستيكية لا يبدو وجود النمط الثاني لقص. النتائج المتحصل عليها أن ا نوع المواد المستخدمة في الاختبارات التجريبية (الفولاذ وورق زجاج) لا يكون له تأثير كبير على مقاومة القص على السطح البيئي، بالإضافة إلى ذلك، فان مقاومة القص على السطح البيئي مستقلة من الشكل الخارجي لسطح.

الهدف من هذا الجزء رقمي هو دراسة تفاصيل نمذجة تفاعل التربة-هيكل. إلى جانب هذه المساهمة الانسيابية، منهجية عامة النمذجة العددية بواسطة استعمال البرنامج الرقمي محدود عنصر (PLAXIS) والفرق محدود (FLAC) لتحديد مقاومة القص باختبار القص المباشر المقترح. بمقارنة التنبؤات العددية مع البيانات التجريبية، فإنه يظهر أن سلوك مقاومة القص على السطح البيئي يرد بشكل صحيح. لنمذجة العددية لاختبار القص نقترح نموذج ألتوبلستيك لموهر-كولوم. بمقارنة التنبؤات العددية مع البيانات التجريبية، يبدو أن معامل الحد للواجهة  $R_{inter}$  ونوع التربة يؤثر بشكل مباشر على النتائج العددية. نموذج موهر-كولوم يعطي تقارب جيد  $K1$  و  $K1G$  ، وأقل دقة  $CG$ . جنبا إلى جنب مع هذه النمذجة، يجري التحليل العددي بواسطة الفروق المحدودة (FLAC). نقترح نموذج ألتوبلستيك لموهر-كولوم، وتأثير عناصر واجهة صلابة القص  $K_n$ ،  $K_s$ ، وزاوية الاحتكاك  $\delta$ . تتم مقارنة النتائج العددية والتجريبية. بمقارنة التنبؤات العددية مع البيانات التجريبية، فإنه يظهر أن يرد سلوك اختبار القص تعديل بشكل صحيح. وعلاوة على ذلك، يتم تناول المقارنة بين تأثير نماذج PLAXIS وFLAC.

**الكلمات المفتاحية:** التربة المتماسكة، السطح البيئي تربة -مواد الصلبة، الشكل الخارجي لسطح. خشونة السطح، مقاومة القص على السطح البيئي ، محدود الفرق طريقة ( FLAC ) ، العناصر المحدودة ( PLAXIS ).

---

## LISTE DES FIGURES

---

<i>Figure 1.1</i> Coupe d'un massif de sol et ligne de glissement.....	6
<i>Figure 1.2</i> Courbes typiques contrainte de cisaillement - déformation et enveloppes de rupture pic et de résiduelle .....	7
<i>Figure 1.3</i> Essais de cisaillement annulaire sur des mélanges sable - bentonite (d'après Lupini et al, 1981).....	9
<i>Figure 1.4</i> Effet du pourcentage d'argile sur les conditions au pic (d'après Hammoud, 2006).....	10
<i>Figure 1.5</i> Principe de l'essai de cisaillement direct modifié.....	13
<i>Figure 1.6</i> Conditions aux limites dans la direction normale de l'interface (d'après Evgin et Fakharian 1996).....	14
<i>Figure 1.7</i> Schéma représentant le mode de cisaillement par Subba Rao, et al (1998).....	15
<i>Figure 1.8</i> Principe de l'essai de cisaillement simple d'après Kishida et Uesugi, (1987).....	16
<i>Figure 1.9</i> Principe de l'essai de cisaillement annulaire .....	17
<i>Figure 1.10</i> Appareil de cisaillement simple annulaire (ACSA).....	18
<i>Figure 1.11</i> Appareil de cisaillement tridimensionnel .....	19
<i>Figure 1.13</i> Dispositif expérimental des essais d'arrachement (d'après Abderrahim et Tisot, 1992).....	20
<i>Figure 1.14</i> Dépendance du coefficient de frottement d'interface avec la rugosité.....	22
<i>Figure 1.15</i> Visualisation du déplacement des particules lors d'un essai de cisaillement avec une surface rugueuse (d'après Uesugi et al, 1988).....	22
<i>Figure 1.16</i> Dépendance de l'angle de frottement à la paroi avec la rugosité normalisée, $R_n$ .....	23
<i>Figure 1.18</i> Effet du changement de la rugosité sur la résistance au cisaillement .....	27
<i>Figure 1.19</i> Relation entre l'angle de frottement et la rugosité relative .....	28
<i>Figure 1.20</i> Géométrie des inclusions étudiées d'après Hryciw et Irsyam (1993).....	29
<i>Figure 1.21</i> Model de textures utilisées par Dejong et al (2001).....	30
<i>Figure 1.22</i> Géométrie des inclusions étudiées par Dove et Jarrett (2002).....	31
<i>Figure 1.23</i> Interfaces utilise par Tan et al, 2008.....	31
<i>Figure 1.24</i> Courbes contrainte de cisaillement - déplacement tangentiel obtenues dans le cas de cisaillement d'interface argile-acier .....	32
<i>Figure 1.25</i> Model de textures utilisées par Shakir et Zhu, 2009.....	32
<i>Figure 1.27</i> Paramètres de quantification de la rugosité de surface .....	33
<i>Figure 1.28</i> Variation de l'angle de frottement interne en fonction de la fraction argileuse (d'après Doolan ,2011) .....	34
<i>Figure 1.29</i> la relation entre l'angle de frottement et l'indice de surconsolidation (d'après Subba Rao et al, 2000).....	35
<i>Figure 1.30</i> Variation de l'angle de frottement à l'interface en fonction de la vitesse de cisaillement (d'après Teuten 2012) .....	36
<i>Figure 1.31</i> Influence de la vitesse sur la résistance au cisaillement.....	36

<b>Figure 2.1</b> Définition du paramètre de rugosité $R_a$ .....	40
<b>Figure 2.2</b> Définition du paramètre de rugosité $R_{max}$ .....	40
<b>Figure 2.4</b> Définition de la rugosité normalisée $R_n$ .....	42
<b>Figure 2.5</b> Schéma pour la détermination de la rugosité maximale $R_{max}$ dans la configuration expérimentale utilisée. ....	43
<b>Figure 2.6</b> Type de contacts, (a) : contact sur une facette ( $d \leq d_{lim}$ ) et (b) : contact sur une arête ( $d > d_{lim}$ ) .....	43
<b>Figure 2.7</b> Détermination de $D_{moy}$ pour l'argile de Guelma (CG).....	44
<b>Figure 2.8</b> Schéma d'un profilomètre classique à stylet.....	45
<b>Figure 2.9</b> Principe de la microscopie confocale .....	46
<b>Figure 2.10</b> Principe de l'ellipsomètre à modulation de phase. ....	46
<b>Figure 2.11</b> Schéma du profilomètre 3D vidéo laser à capteur optique.....	47
<b>Figure 2.12</b> Topographie des plaques d'acier.....	48
<b>Figure 2.13</b> Modèles de texture d'interfaces utilisées en 2D.....	49
<b>Figure 2.14</b> Modèles de texture d'interfaces en 3D obtenus à partir du profilomètre laser.....	49
<b>Figure 2.15</b> Relation entre $R$ et $D_{moy}$ .....	51
<b>Figure 2.16</b> Profils de surfaces d'acier.....	52
<b>Figure 3.1</b> Modélisation du contact .....	54
<b>Figure 3.2</b> Modes de déformation de l'interface : a) mode d'adhésion, b) mode glissement, c) mode décollement.....	55
<b>Figure 3.3</b> Discrétisation numérique du problème de contact sol-structure (Potts et Zdravkovic 1999 ; Potts et al. 2002).....	56
<b>Figure 3.4</b> Éléments d'interface sans épaisseur .....	57
<b>Figure 3.5</b> Élément joint de type Goodman.....	57
<b>Figure 3.6</b> Élément joint de type ressort .....	58
<b>Figure 3.7</b> Critère de Modèle de Mohr Coulomb.....	59
<b>Figure 3.8</b> Élément d'interface isoparamétrique à 8 nœuds (De Gennaro et Frank 2005).....	60
<b>FIGURE 3.9</b> .....	64
<b>Figure 3.10</b> Courbe intrinsèque de Mohr-Coulomb.....	65
<b>Figure 3.11</b> Surface de rupture du modèle de Mohr-Coulomb pour un sol sans cohésion.....	65
<b>Figure 3.13</b> Surface de rupture du modèle de SSM.....	67
<b>Figure 3.14</b> Distribution des nœuds et des points de contrainte dans les éléments d'interface et jonction avec les éléments du sol.....	68
<b>Figure 3.15</b> Séquence de calcul Flac, d'après Itasca (2005).....	71
<b>Figure 3.16</b> Discrétisation mixte.....	72
<b>Figure 3.17</b> Représentation du critère de Mohr-Coulomb dans le plan de Mohr.....	76
<b>Figure 3.18</b> Comparaison des critères de Mohr-Coulomb et Tresca dans l'espace des contraintes principales d'après Itasca (2000).....	76
<b>Figure 3.19</b> Distribution de secteurs représentatifs à nœuds d'interface.....	78
<b>Figure 3.20</b> Détail des composants d'un élément d'interface.....	78

<i>Figure 3.21</i> Dimension de la zone utilisée pour le calcul de la raideur.....	80
<i>Figure 4.1</i> Appareil de Casadrade utilisé dans cette étude .....	84
<i>Figure 4.2</i> Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boîte.....	84
<i>Figure 4.3</i> Vue de côté de l'appareil de cisaillement direct .....	85
<i>Figure 4.4</i> Vue de côté de l'appareil de cisaillement modifié.....	86
<i>Figure 4.5</i> Placement du sol à l'intérieur du volume .....	87
<i>Figure 4.6</i> Position du dispositif d'application de l'effort normal par rapport au bras de levier .....	87
<i>Figure 4.7</i> Dispositif expérimental.....	89
<i>Figure 4.8</i> Courbes granulométriques des sols étudiés.....	91
<i>Figure 4.9</i> Abaque de plasticité de Gasagrande et position des sols étudiés.....	91
<i>Figure 5.1</i> Comparaison des courbes obtenues pour trois essais en cisaillement sol-sol.....	98
<i>Figure 5.2</i> Courbes intrinsèques déduites .....	99
<i>Figure 5.3</i> Courbes contrainte de cisaillement-déplacement horizontal pour les essais sol - sol.....	101
<i>Figure 5.4</i> Corrélation entre le pourcentage d'argile et l'angle de frottement .....	102
<i>Figure 5.5</i> Corrélation entre l'indice de plasticité et l'angle de frottement.....	103
<i>Figure 5.6</i> Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal pour KI.....	106
<i>Figure 5.7</i> Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal pour CG.....	108
<i>Figure 5.8</i> Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal pour KIG.....	110
<i>Figure 5.9</i> Relation entre $\delta/\phi$ et $R_a$ .....	112
<i>Figure 5.10</i> Relation entre $\delta/\phi$ et $D_{av}$ .....	113
<i>Figure 5.11</i> Relation entre $\delta/\phi$ et $R$ .....	113
<i>Figure 5.12</i> Mode de cisaillement à l'interface .....	116
<i>Figure 5.13</i> Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal obtenues dans le cas de KI .	118
<i>Figure 5.15</i> Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal obtenues dans le cas CG.....	121
<i>Figure 5.17</i> Contrainte normal - contrainte de cisaillement pour l'ensemble des sols étudiés.....	124
<i>Figure 5.18</i> Contrainte de cisaillement d'interface pour différents modèles de texture, $\sigma_n=109$ kPa.....	124
<i>Figure 5.19</i> Contrainte de cisaillement d'interface pour différents modèles de texture, $\sigma_n=150$ kPa.....	125
<i>Figure 5.20</i> Contrainte de cisaillement d'interface pour différents modèles de texture, $\sigma_n=204$ kPa.....	125
<i>Figure 6.1</i> Essai de cisaillement modifié post pic.....	129
<i>Figure 6.3</i> Modèle géométrique de la boîte de cisaillement modifié.....	131
<i>Figure 6.4</i> Maillage du modèle.....	133
<i>Figure 6.5</i> Génération des conditions initiales: a) pressions interstitielles; b) contraintes initiales.....	134
<i>Figure 6.6</i> Procédures de chargement pour essai de cisaillement d'interface .....	134
<i>Figure 6.7</i> Distribution du déplacement vertical dû à l'application de $\sigma_n$ .....	135
<i>Figure 6.8</i> Distribution de la contrainte de cisaillement le long de la zone d'interface.....	135
<b>FIGURE 6.9</b> DISTRIBUTION DE DEPLACEMENT VERTICAL A LA ZONE D'INTERFACE .....	135
<i>Figure 6.10</i> Distribution de la contrainte de cisaillement le long de la zone d'interface pour les cas de maillage dans le cas de KI .....	137
<i>Figure 6.11</i> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1S11 .....	140
<i>Figure 6.12</i> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1S12 .....	140

<b>Figure 6.13</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI3 .....	140
<b>Figure 6.14</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI4 .....	141
<b>Figure 6.15</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI1 .....	141
<b>Figure 6.16</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI2.....	141
<b>Figure 6.17</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI3.....	142
<b>Figure 6.18</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI4.....	142
<b>Figure 6.19</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI1.....	143
<b>Figure 6.20</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI2.....	144
<b>Figure 6.21</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI3.....	144
<b>Figure 6.22</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI4.....	144
<b>Figure 6.23</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI1.....	146
<b>Figure 6.24</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI2.....	146
<b>Figure 6.25</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI3.....	146
<b>Figure 6.26</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI4.....	147
<b>Figure 7.1</b> Procédé général de résolution proposée pour la modélisation numérique d'un essai de cisaillement d'interface.....	149
<b>Figure 7.2</b> Modèle de simulation d'essai de cisaillement d'interface .....	150
<b>Figure 7.3</b> Maillage adopté pour la modélisation.....	153
<b>Figure 7.4</b> Modèle géométrique de la boîte de cisaillement d'interface .....	153
<b>Figure 7.5</b> Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal obtenues dans le cas K1SI1 pour $\sigma_n=109\text{kPa}$ .....	155
<b>Figure 7.6</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI1 .....	155
<b>Figure 7.7</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI2 .....	156
<b>Figure 7.8</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI3 .....	156
<b>Figure 7.9</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI4 .....	156
<b>Figure 7.10</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI1 .....	157
<b>Figure 7.11</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques K1AI2.....	157
<b>Figure 7.12</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI3.....	157
<b>Figure 7.13</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI4.....	158
<b>Figure 7.14</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI1.....	159
<b>Figure 7.15</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI2.....	159
<b>Figure 7.16</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI3.....	159
<b>Figure 7.17</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI4.....	160
<b>Figure 7.18</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI1.....	161
<b>Figure 7.19</b> Comparaison des résultats expérimentaux numériques pour K1GSI2 .....	161
<b>Figure 7.20</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI3.....	161
<b>Figure 7.21</b> Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI4.....	162

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

<i>Tableau 1.1 Synthèse des valeurs expérimentales sur l'épaisseur de la couche d'interface (Frih 2005)..</i>	21
<i>Tableau 1.2 Coefficients de frottement sol - matériaux de construction proposés (d'après Potyondy, 1961)</i>	26
<i>Tableau 1.3 Résumé des résultats des essais réalisés sur le kaolin (d'après Tan et al, 2008).....</i>	29
<i>Tableau 1.4 Résumé des essais de cisaillement direct et d'interface.....</i>	30
<i>Tableau 1.5 Valeurs de R pour chaque type d'interface.....</i>	33
<i>Tableau 1.6 les résultats obtenus de l'angle de frottement et l'adhésion.....</i>	34
<i>Table 2.1 Caractéristiques de rugosité.....</i>	48
<i>Tableau 2.2 Valeurs de Ra (<math>\mu\text{m}</math>) des plaques utilisés.....</i>	51
<i>Tableau 2.3 Valeurs de R.....</i>	51
<i>Tableau 4.1 Caractéristiques physiques des sols utilisés.....</i>	90
<i>Tableau 4.2 Valeurs de bleu de méthylène des sols étudiés.....</i>	92
<i>Tableau 4.3 Résumé des essais conduits sur le Kaolin, (K1).....</i>	93
<i>Tableau 4.4 Résumé des essais conduits sur le Kaolin(K2).....</i>	94
<i>Tableau 4.5 Résumé des essais conduits sur l'argile de Guelma (CG).....</i>	94
<i>Tableau 4.6 Résumé des essais conduits sur le mélange l'argile de Guelma kaolin(K1G).....</i>	95
<i>Tableau 5.1 Résumé des résultats des essais de cisaillement sol-sol.....</i>	99
<i>Tableau 5.2 Corrélation entre <math>l_p</math> et <math>\phi</math> par Terzaghi et al. (1987).....</i>	103
<i>Tableau 5.3 Résumé des résultats des essais d'interface réalisés sur K1.....</i>	107
<i>Tableau 5.4 Résumé des résultats des essais réalisés sur l'argile de Guelma.....</i>	109
<i>Tableau 5.5 Résumé des résultats des essais réalisés sur K1G.....</i>	111
<i>Tableau 5.6 Résumé des résultats des essais réalisés sur les sols étudiés.....</i>	112
<i>Tableau 6.1. Caractéristiques mécaniques des sols.....</i>	132
<i>Tableau 6.2 Caractéristiques mécaniques des interfaces.....</i>	133
<i>Tableau 6.3 Types de maillages testés pour les calculs.....</i>	136
<i>Tableau 6.4 Résumé des valeurs de <math>R_{inter}</math> et <math>\delta/\phi</math> dans le cas de K1.....</i>	138
<i>Tableau 6.5 Variation des résultats numériques et expérimentaux pour K1.....</i>	139
<i>Tableau 6.6 Résumé des résultats <math>R_{inter}</math> et <math>\delta/\phi</math> de dans le cas CG.....</i>	142
<i>Tableau 6.7 Variation des résultats numériques et expérimentaux pour CG.....</i>	143
<i>Tableau 6.8 Résumé des résultats <math>R_{inter}</math> et <math>\delta/\phi</math> de dans le cas K1G.....</i>	145
<i>Tableau 6.9 Variation des résultats numériques et expérimentaux pour K1G.....</i>	145
<i>Tableau 7.1 Caractéristiques géomécaniques des sols.....</i>	150
<i>Tableau 7.2 Caractéristiques des plaques d'acier.....</i>	151
<i>Tableau 7.3 Les valeurs de <math>K_n</math>, <math>K_s</math> pour K1.....</i>	152
<i>Tableau 7.4 Les valeurs de <math>K_n</math>, <math>K_s</math> pour CG.....</i>	152

<b>Tableau 7.5</b> Les valeurs de $K_n$ , $K_s$ pour KIG.....	152
<b>Tableau 7.6</b> Variation des résultats numériques et expérimentaux pour KI .....	155
<b>Tableau 7.7</b> Variation des résultats numériques et expérimentaux pour CG.....	158
<b>Tableau 7.8</b> Variation des résultats numériques et expérimentaux pour CG.....	160
<b>Tableau 7.9</b> Comparaison des résultats numériques sur KI.....	163
<b>Tableau 7.10</b> Comparaison des résultats numériques sur CG.....	163
<b>Tableau 7.11</b> comparaison des résultats numériques sur KIG.....	163

---

## Notation et abréviations principales

---

<b>A</b>	: Secteur représentatif associée au nœud d'interface
<b>B<sub>i</sub></b>	: la longueur du creux
<b>c<sub>i</sub></b>	: adhésion
<b>c'<sub>p</sub></b>	: cohésion effective de pic
<b>D<sub>50</sub></b>	: diamètre des particules correspondant sur la courbe granulométrique du matériau granulaire à 50% en poids.
<b>D<sub>moy</sub></b>	: Diamètre moyen des particules du sol pesé
<b>E</b>	: module d'Young
<b>F</b>	: la fonction de charge
<b>f<sub>n</sub></b>	: force normale
<b>f<sub>s,max</sub></b>	: force de cisaillement
<b>g(x)</b>	: potentiel plastique
<b>H<sub>i</sub></b>	: la hauteur de creux
<b>H</b>	: épaisseur de l'interface
<b>I<sub>p</sub></b>	: Indice de plasticité
<b>K<sub>n</sub></b>	: la rigidité normale
<b>K<sub>t</sub></b>	: la rigidité tangentielle
<b>K<sub>x</sub></b>	: perméabilité dans la direction x
<b>K<sub>y</sub></b>	: perméabilité dans la direction y
<b>L</b>	: Longueur d'analyse
<b>L<sub>e</sub></b>	: Longueur de la droite moyenne du profile ou longueur d'échantillonnage prise en compte pour la définition de la rugosité
<b>L<sub>i</sub></b>	: est la longueur entre les creux adjacents
<b>m<sub>g</sub></b>	: masse gravitationnelle
<b>MSV</b>	: Valeur quadratique moyenne ou Mean Square Value
<b>N</b>	: Nombre de mesures de l'amplitude
<b>Q</b>	: le potentiel plastique
<b>R</b>	: Rugosité relative
<b>R<sub>a</sub></b>	: Rugosité arithmétique moyenne
<b>R<sub>e</sub></b>	: Pic maximal
<b>R<sub>f</sub></b>	: Creux minimal
<b>R<sub>no</sub></b>	: le rapport entre la base et la hauteur
<b>R<sub>n</sub></b>	: Rugosité normalisée
<b>R<sub>max</sub></b>	: la distance entre le point le plus haut et le point le plus bas sur une longueur considérée L égale au diamètre moyen des particules (L=D <sub>50</sub> )
<b>R<sub>p</sub></b>	: Indice de rugosité du profile
<b>R<sub>q</sub></b>	: Rugosité quadratique moyenne
<b>R<sub>inter</sub></b>	: le facteur réducteur d'interface
<b>U<sub>t</sub></b>	: le déplacement tangentiel relatif
<b>U<sub>t,p</sub></b>	: le déplacement tangentiel relatif au pic

$U_n$	: le déplacement normal relatif
$t_f$	: Temps de rupture
$y_i$	: Amplitude discrète du profile par rapport à la droite moyenne
$y(x)$	: Amplitude du profile par rapport à la droite moyenne
$Z_2$	: RMS de la dérivée première du profile $Z_2$
$\alpha_i$	: l'angle de creux
$\delta$	: angle de frottement à l'interface
$\delta_{ij}$	: Indice de Kronecker...
$\delta_p / \varphi_p'$	: Coefficient de frottement maximum ou de pic
$\varepsilon$	: déformation
$\sum F_i$	: force nette non équilibré au nœud
$\Delta x$	: pas de discrétisation ou d'échantillonnage
$\Delta t$	: pas de temps
$\Phi$	: Angle de frottement interne
$\varphi'_p$	: Angle de frottement interne maximum ou au pic
$\varphi'_r$	: Angle de frottement interne résiduel
$\rho_h$	: poids volumique humide
$\rho_d$	: poids volumique sec
$\gamma_{sat}$	: densité saturé
$\nu$	: coefficient de poisson
$\sigma'_n$	: contrainte effective normale
$T$	: Contrainte de cisaillement
$\tau_p$	: Contrainte de cisaillement de pic
$\psi'$	: angle de dilatance

---

# TABLE DES MATIERES

---

*Remerciement*

*Résumé*

*Abstract*

*Résumé Arabe*

*Liste des figures*

*Liste des tableaux*

*Notation et abréviation général*

<i>Introduction général</i> .....	1
<b>CHAPITRE I RESISTANCE AU CISAILLEMENT A L'INTERFACE</b> .....	<b>5</b>
1.1 INTRODUCTION.....	5
1.2 RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS COHERENTS.....	5
1.2.1 Notion de résistance au cisaillement.....	5
1.2.2 Quelque définition de la résistance au cisaillement des sols.....	8
1.2.3 Effet de la fraction argileuse.....	8
1.3 CARACTERISATION DU COMPORTEMENT DE L'INTERFACE SOL-MATERIAUX SOLIDES.....	10
1.3.1 Définition de l'interface sol - structure.....	10
1.3.2 Notion de la résistance au cisaillement à l'interface.....	11
1.4 MESURE DE LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT A L'INTERFACE AU LABORATOIRE .....	12
1.4.1 Boite de cisaillement direct modifié.....	13
1.4.2 Essai de cisaillement direct simple.....	16
1.4.3 Appareil de cisaillement annulaire.....	16
1.4.4 Essai de cisaillement simple annulaire .....	17
1.4.5 Appareil de cisaillement tridimensionnel.....	18
1.4.6 Appareil d'arrachement à symétrie de révolution .....	19
1.5 COUCHE D'INTERFACE.....	20
1.6 MECANISME DE RUPTURE A L'INTERFACE .....	21
1.6.1 Cas des sols pulvérulent (grenus).....	21
1.6.2 Cas des sols cohérents .....	23
1.7 INFLUENCE DE DIFFERENTS PARAMETRES SUR LE COMPORTEMENT DE L'INTERFACE .....	24
1.7.1 Effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement à l'interface sol cohérent - structure	
24	
1.7.2 Effet de la texture.....	29

1.7.2.1	Cas des sols pulvérulents .....	29
1.7.2.2	Cas des sols cohérents.....	31
1.7.3	Effet de la fraction argileuse .....	34
1.7.4	Effet de l'historique des contraintes .....	34
1.7.5	Effet de la vitesse .....	35
1.8	CONCLUSIONS .....	36
<b>CHAPITRE II INTERFACES UTILISEES ET QUANTIFICATION DE LA RUGOSITE DE SURFACE .....</b>		<b>38</b>
2.1	INTRODUCTION.....	38
2.2	PARAMETRES DE MESURE DE LA RUGOSITE .....	39
2.2.1	Rugosité arithmétique moyenne ( $R_a$ ).....	39
2.2.2	Hauteur maximum entre pic et creux ( $R_{max}$ ).....	40
2.2.3	Pic maximal ( $R_e$ ) et creux minimal ( $R_f$ ).....	40
2.2.4	Rugosité quadratique moyenne ( $R_q$ ).....	41
2.2.5	Valeur quadratique moyenne ou Mean Square Value (MSV).....	41
2.2.6	RMS de la dérivée première du profilé ( $Z_2$ ).....	41
2.2.7	Indice de rugosité du profilé ( $R_p$ ) .....	41
2.3	QUANTIFICATION DE LA RUGOSITE DANS LE CAS D'INTERFACE SOL-MATERIAU SOLIDE .....	41
2.3.1	Rugosité normalisée $R_n$ .....	42
2.3.2	Rugosité relative $R$ .....	43
2.4	TECHNIQUES DE CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE .....	44
2.4.1	Profilomètre à stylet.....	44
2.4.2	Techniques optiques.....	45
2.5	INTERFACES UTILISES .....	47
2.5.1	Plaque d'acier.....	48
2.5.2	Plaque avec papier abrasif.....	48
2.6	ECHANTILLONNAGE .....	49
2.7	RESULTATS DES MESURES DE RUGOSITE .....	50
2.8	CONCLUSIONS .....	52
<b>CHAPITRE III MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACE .....</b>		<b>53</b>
3.1	INTRODUCTION.....	53
3.2	LOI D'INTERFACE ET CONDITIONS AUX LIMITES.....	53
3.3	MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS .....	55
3.3.1	Approche de type contact.....	56
3.3.1.1	Adaptation de la rigidité.....	57
3.3.1.2	Lois élastoplastique .....	58
3.3.1.3	Loi incrémentale.....	59
3.3.1.4	Contact avec des conditions supplémentaires.....	59
3.3.2	Approche de type couche mince .....	60

3.3.3	<i>L'outil de simulation numérique PLAXIS2D</i> .....	61
3.3.3.1	Les options par défaut et les solutions approchées .....	61
3.3.3.2	Influence du maillage.....	63
3.3.3.3	Modèle de comportement.....	64
3.3.3.3.1	Modèle élastique linéaire.....	64
3.3.3.3.2	Modèle de Mohr - Coulomb (MC).....	65
3.3.3.3.3	Modèle de sol avec écouissage (Hardening Soil Model HSM).....	65
3.3.3.3.4	Modèle pour sols mous (Soft Soil Model SSM) .....	66
3.3.3.3.5	Modèle pour sols mous avec effet du temps (Soft Soil Creep Model SSCM) .....	67
3.3.3.4	Modèle de comportement de l'interface dans PLAXIS.....	67
3.3.3.4.1	Facteur réducteur de l'interface ( $R_{inter}$ ).....	68
3.4	MODELISATION DU COMPORTEMENT D'INTERFACE PAR LA METHODE DES DIFFERENCES FINIS .....	69
3.4.1	<i>L'outil de simulation numérique FLAC</i> .....	70
3.4.1.1	Schéma de résolution explicite.....	70
3.4.1.2	Formulation numérique en différences finies: passage du problème continu à la discrétisation.....	71
3.4.1.3	Analyse Lagrangienne .....	72
3.4.1.4	Formulation numérique.....	73
3.4.1.4.1	Equation du mouvement.....	73
3.4.1.4.2	Amortissement.....	73
3.4.2	<i>Méthodologie de simulation avec FLAC</i> .....	74
3.4.3	<i>Modèles de comportement</i> .....	74
3.4.3.1	Modèle nul (matériau excavé).....	75
3.4.3.2	Modèle élastique.....	75
3.4.3.3	Modèle de Mohr Coulomb .....	75
3.4.3.4	Modèle de Drucker-Prager.....	76
3.4.3.5	Modèle radoucissant- durcissant.....	77
3.4.3.6	Modèle modifié de Cam Clay.....	77
3.4.3.7	Modèle de Hoek-Brown.....	77
3.4.4	<i>Modèle de comportement de l'interface dans FLAC</i> .....	77
3.5	COMPARAISON AVEC D'AUTRES METHODES NUMERIQUES .....	80
3.6	PROPRIETES D'INTERFACE EQUIVALENTES PAR FLAC ET PLAXIS .....	81
3.7	CONCLUSION .....	82
<b>CHAPITRE IV MATERIEL D'ESSAI ET PROCEDURE EXPERIMENTALE .....</b>		<b>83</b>
4.1	INTRODUCTION.....	83
4.2	APPAREIL D'ESSAI .....	83
4.2.1	<i>Description de l'appareil de cisaillement direct et principe de fonctionnement</i> .....	83
4.2.2	<i>Essai de cisaillement d'interface</i> .....	85
4.3	PREPARATION DE L'ECHANTILLON .....	86
4.4	PROCEDURE EXPERIMENTALE .....	88

4.5	MATERIAUX ETUDIES .....	89
4.6	PROGRAMME D'ESSAI .....	92
4.7	CONCLUSION .....	96
<b>CHAPITRE V PRESENTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION.....</b>		<b>97</b>
5.1	INTRODUCTION.....	97
5.2	RESULTATS DES ESSAIS .....	97
5.2.1	<i>Répétitivité des essais</i> .....	97
5.2.2	<i>Cisaillement sol - sol</i> .....	99
5.2.3	<i>Effet de la rugosité sur le cisaillement à l'interface sol - matériau solide</i> .....	103
5.2.3.1	Essais sur le kaolin, K1 .....	104
5.2.3.2	Essais sur l'argile de Guelma (CG) .....	107
5.2.3.3	Essais sur le mélange argile de Guelma - kaolin (K1G).....	109
5.2.4	<i>Analyse des résultats et interprétation</i> .....	111
5.2.4.1	Effet de $R_a$ , $D_{av}$ et R sur le cisaillement à l'interface .....	111
5.2.4.2	Mécanismes de cisaillement d'interface.....	114
5.2.5	<i>Effet de la texture de surface sur le cisaillement à l'interface sol - matériau solide</i> .....	117
5.2.5.1	Résultats des essais.....	117
5.2.5.1.1	Essais sur le kaolin, K1 .....	117
5.2.5.1.2	Essais sur le kaolin, K2 .....	119
5.2.5.1.3	Essais sur l'argile de Guelma, CG .....	120
5.2.5.1.4	Essais sur le mélange kaolin-argile de Guelma, K1G .....	121
5.2.5.2	Analyse et interprétation .....	123
5.3	LIMITATIONS DE L'APPAREIL DE CISAILLEMENT DIRECT MODIFIE .....	125
5.4	CONCLUSIONS .....	126
<b>CHAPITRE VI MODELISATION NUMERIQUE DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT A L'INTERFACE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS .....</b>		<b>129</b>
6.1	INTRODUCTION.....	129
6.2	MODELISATION 2-D DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT MODIFIE SOUS CHARGE MONOTONE .	130
6.2.1	<i>Conception du modèle numérique et procédure de simulation</i> .....	130
6.2.1.1	Recueil des données.....	131
6.2.1.2	Génération du maillage.....	133
6.2.1.3	Définition des conditions initiales .....	133
6.2.2	<i>Phases de calcul pour la modélisation de l'essai de cisaillement d'interface</i> .....	134
6.2.3	<i>Effet du maillage</i> .....	136
6.3	VALIDATION DU MODELE: COMPARAISON ENTRE LES PREVISIONS DU MODELE ET LES RESULTATS EXPERIMENTAUX .....	137
6.3.1	<i>Cas de K1</i> .....	138
6.3.2	<i>Cas de CG</i> .....	142

6.3.3	<i>Cas de K1G</i> .....	145
6.4	CONCLUSION.....	147
<b>CHAPITRE VII MODELISATION NUMERIQUE DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT A L'INTERFACE PAR LA METHODE DES DIFFERENCES FINIS.....</b>		<b>148</b>
7.1	INTRODUCTION.....	148
7.2	SIMULATION NUMERIQUE PAR FLAC .....	148
7.2.1	<i>Conception du modèle numérique</i> .....	148
7.2.1.1	Sol étudiés.....	150
7.2.1.2	Plaques d'acier utilisées.....	151
7.2.1.3	Interface sol-acier .....	151
7.2.2	<i>Unité et convention de signe</i> .....	152
7.2.3	<i>Maillage</i> .....	152
7.2.4	<i>Condition aux limites et initiales</i> .....	153
7.3	PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS .....	154
7.3.1	<i>Effet des paramètres d'interface</i> .....	154
7.3.1.1	Cas de K1.....	154
7.3.1.2	Cas de CG.....	158
7.3.1.3	Cas de K1G.....	160
7.4	COMPARAISON ENTRE LES PREVISIONS NUMERIQUES ET LES RESULTATS EXPERIMENTAUX .....	162
7.5	CONCLUSION.....	164
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>		<b>166</b>
<b>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>		<b>171</b>

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'analyse des interactions entre les ouvrages de génie civil et les sols, est une préoccupation de plus en plus forte dans le domaine de la géotechnique. De nombreux problèmes de génie civil sont concernés par l'interaction sols-structures. On cite comme exemples, les problèmes 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). Compte tenu du comportement de ces ouvrages souvent conditionné par les conditions à l'interface, il est indispensable de développer des modèles fiables et capables de décrire le comportement de cisaillement à l'interface sous chargements monotone. L'étude de ce comportement sous chargement monotone a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux (Potyondy,1961; Wemick,1979; Hoteit,1990; Rouaiguia,1990; Tsubakihara et Kishida,1993; Hammoud, 2006; SubbaRao,2000 ; Shakir, 2009; Suriyavut, 2013) et de modélisation (Goodman et al, 1968; Ghamboussi et al, 1973; Boulon et al, 1988; Boulon et al., 1995; Suriyavut, 2013 ...etc.). 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.

En réalité, la transmission des efforts de la structure vers le sol se fait à travers une fine couche de sol en contact avec la structure, appelée couche d'interface ou communément interface. Elle a la particularité d'être placée à la frontière entre deux milieux, généralement de caractéristiques notablement différentes et dont l'emplacement est connu. En effet, une grande partie des ruptures observées dans ces structures se produit au sein de cette couche. L'interface est le siège de phénomènes mécaniques complexes: elle génère des localisations de déformations et des concentrations de contraintes significatives. Ces phénomènes sont fortement influencés par les caractéristiques mécaniques du sol et de l'élément structural, généralement très contrastés. Les paramètres de frottement à l'interface sont essentiels, particulièrement, pour l'évaluation de la stabilité des ouvrages.

La résistance au cisaillement à l'interface 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 de facteurs liés à l'interface et au sol. La résistance à l'interface sol-structure peut-être différente de celle du sol lui-même, Potyondy (1961) a proposé d'exprimer la résistance à l'interface sous une forme similaire à la loi de Coulomb, qui s'écrit :

$$\tau = c_i + \sigma_n \operatorname{tg}\delta$$

$c_i$  : adhésion, négligé en général

$\delta$  : angle de frottement à l'interface

$\sigma_n$  : contrainte normale

En conséquence, l'équation de la résistance au cisaillement devient

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}\delta$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\tau}{\sigma_n}$$

Les travaux présentés dans ce mémoire à caractère expérimental et numérique ont pour but essentiellement de caractériser le comportement mécanique de l'interface entre un milieu cohérent et une structure rigide.

La première partie qui constitue une étude à caractère expérimental porte sur le cisaillement à l'interface matériau solide-sol cohérent en utilisant l'appareil de cisaillement direct modifié. Un certain nombre de facteurs pouvant affecter l'interaction sol-acier, particulièrement le type de sol, la rugosité de surface, le matériau constituant l'interface et la texture d'interface, sont examinés. Les résultats des séries d'essais de cisaillement entre des sols cohérents et de matériau solide de différentes rugosités et différentes textures sont présentés. Quatre types de sol cohérent, à savoir le kaolin (K1, K2), l'argile de Guelma (CG) et un mélange l'argile de Guelma-kaolin (K1G), ont servi de support aux études expérimentales. Les matériaux solides considérés sont l'acier et le papier abrasif. Des essais de cisaillement direct modifiés impliquant un cisaillement sol-sol ont été également conduits en plus des essais d'interface. L'objectif de la seconde partie est de modéliser l'essai de cisaillement direct modifié en utilisant le code de

calcul par éléments finis PLAXIS et par la méthode des différences finies (FLAC) et de comparer les résultats numériques avec les résultats expérimentaux.

Le travail réalisé est présenté en sept chapitres.

Dans le chapitre 1, nous résumons les connaissances acquises sur le comportement de cisaillement à l'interface sous chargement monotone du point de vue expérimentations. Ce chapitre comprend les définitions de la résistance au cisaillement à l'interface et les mécanismes de la rupture progressive qui conduisent à son développement. Les principaux appareillages utilisés pour l'étude en laboratoire du comportement de l'interface sols-structures sont également présentés. Une revue des principaux facteurs ayant une influence sur la résistance au cisaillement est aussi donnée dans ce chapitre. Le chapitre 2 décrit les moyens d'obtention des interfaces d'acier et de papier abrasif et traite les méthodes de quantification des rugosités des surfaces et les paramètres utilisés. Les profils de rugosité obtenus sont également présentés. Le chapitre 3 retrace les bases de la caractérisation mécanique de l'interface sol-structure du point de vue analyse numérique, des modèles de comportement rhéologiques et des traitements numériques par éléments finis et différences finies. Le chapitre 4 présente une description de l'appareil de cisaillement direct, ainsi que 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 sous forme des courbes contrainte de cisaillement-déplacement horizontal au Chapitre 5. Les résultats sont alors discutés et interprétés également dans ce chapitre. Le chapitre 6, s'intéresse à l'analyse bidimensionnelle numérique par éléments finis en utilisant le logiciel PLAXIS afin d'étudier le comportement de cisaillement à l'interface. Pour cela, une méthodologie générale est proposée pour la modélisation des essais de cisaillement direct modifiés. Cette méthodologie tient compte des effets de la rugosité d'interface (facteur réducteur de l'interface  $R_{inter}$ ) et le type du sol. Nous comparons enfin les prédictions du modèle avec les résultats obtenus dans le cadre de ce travail. Le chapitre 7, reprend la méthodologie générale de modélisation des essais au cisaillement modifiés présentée au chapitre 6, en faisant une analyse bidimensionnelle au moyen de la méthode des différences finies (FLAC) et en considérant pour l'interface le modèle glissant (bonded interface). Cette méthodologie tient compte des effets des éléments d'interface: la rigidité de cisaillement  $K_s$ , la rigidité normale  $K_n$ , et l'angle de frottement

à l'interface  $\delta$ . Les hétérogénéités sont bien identifiées, mais globalement, les chemins sont conformes à l'expérience. Finalement, les principales conclusions concernant les résultats obtenus, ainsi qu'une liste de suggestions est également présentée pour ce qui est des expériences futures que nous estimons utiles.

## **CHAPITRE I Résistance au cisaillement à l'interface**

### **1.1 Introduction**

La maîtrise de l'aspect complexe de l'interaction sol - structure et des déformations du sol nécessitent une bonne connaissance de leur comportement mécanique. De très nombreux travaux concernent le comportement de cisaillement à l'interface. Ils existent différentes situations 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). Dans ces cas le transfert des charges se fait à travers une mince couche 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 des propriétés de deux matériaux de natures différentes. La transmission des efforts et des déplacements entre le sol et le matériau solide dépend fondamentalement du comportement de cette couche d'interface.

Ce chapitre commence par une synthèse bibliographique sur la résistance au cisaillement des sols. Nous discutons sur la caractérisation du comportement d'interaction sol - structure qui concerne de vastes sujets abordés depuis relativement longtemps. Ensuite, nous faisons une revue de quelques appareils utilisés dans l'étude du comportement de l'interface. Plus spécifiquement, nous analysons l'influence du rapport entre la rugosité et les paramètres géotechnique sur le comportement de rupture lors de sollicitation de cisaillement. Les travaux les plus récents sont cités.

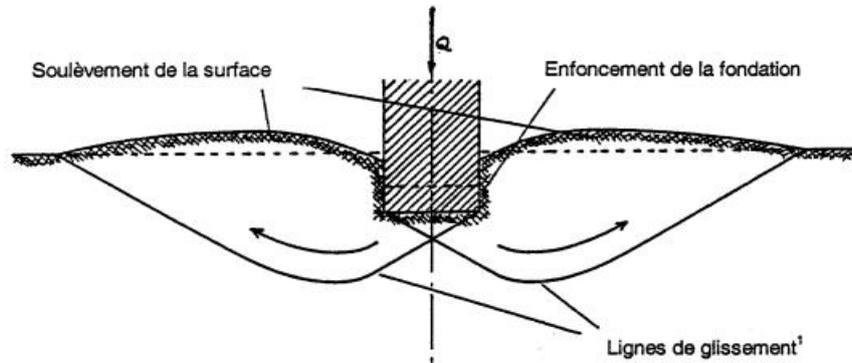
### **1.2 Résistance au cisaillement des sols cohérents**

Dans tous les problèmes de stabilité des sols, il est nécessaire de connaître la résistance du sol. Cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent.

#### **1.2.1 Notion de résistance au cisaillement**

Lorsqu'un système de force est appliqué à un volume déterminé d'un sol, il se développe en général des contraintes de cisaillement. Ces contraintes de cisaillement entraînent des déformations du sol. Ces déformations peuvent être importantes le long

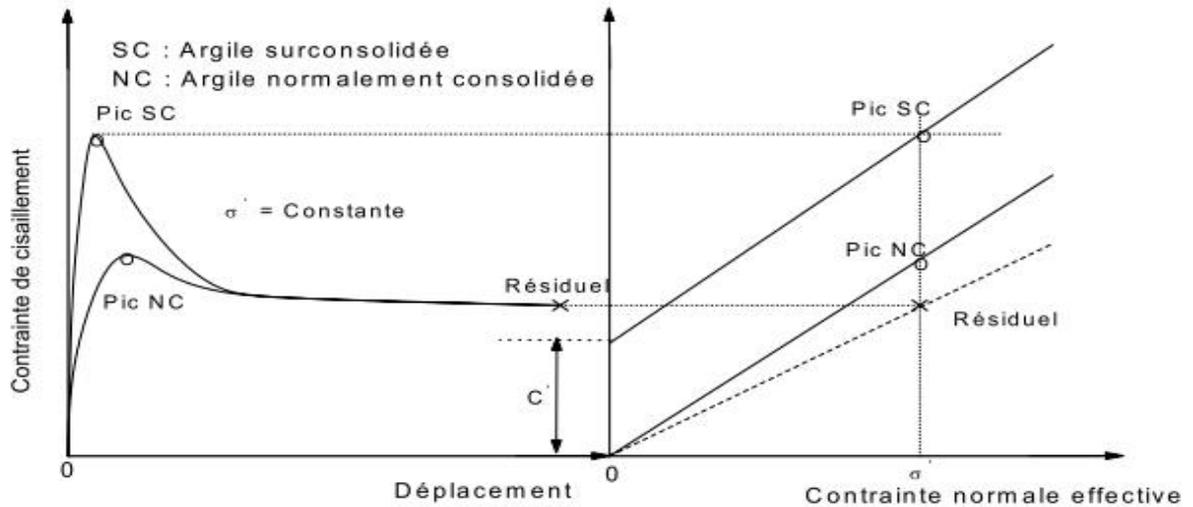
de certaines surfaces que l'on appelle surface de glissement ou surface de rupture. La rupture du sol se produit par glissement relatif des grains les uns par rapport aux autres et non par rupture des grains eux-mêmes. C'est le cas par exemple d'une fondation située sur la surface d'un sol et chargée jusqu'à la rupture (Figure 1.1).



**Figure 1.1** Coupe d'un massif de sol et ligne de glissement

La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement dans le plan de rupture, au moment de la rupture. Cependant, cette notion de résistance au cisaillement n'est pas toujours facile à définir, que ce soit dans un essai de laboratoire, ou dans le sol sur lequel est construit l'ouvrage. En effet, si on porte l'évolution de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction de la déformation  $\varepsilon$  dans le plan de cette contrainte de cisaillement, on obtient une courbe contrainte-déformation (loi de comportement) qui a l'allure de la figure 1.2. Ainsi 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. 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 1.2 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.



**Figure 1.2** Courbes typiques contrainte de cisaillement - déformation et enveloppes de rupture pic et de résiduelle

Dans un matériau cohérent, les particules sont liées entre elles par des forces préexistantes 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 pour des petits déplacements:

$$\tau_p = c + \sigma_n \operatorname{tg}\varphi \quad (1.1)$$

Où,

$\tau_p$  : Résistance au cisaillement de pic

$\sigma_n$ : Contrainte normale au plan de rupture

$c$  : Cohésion

$\varphi$ : Angle de frottement interne du sol

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

La résistance au cisaillement est généralement déterminée au moyen d'essai de cisaillement direct et l'essai triaxial.

### **1.2.2 Quelques définitions de la résistance au cisaillement des sols**

Le concept de la résistance au cisaillement, qui a été initialement mis en valeur par le travail de Coulomb en (1773) présenté à l'académie royale des sciences à Paris, a contribué significativement à la compréhension du comportement des sols soumis au cisaillement. 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. Elle est généralement utilisée pour décrire le cisaillement des sols.

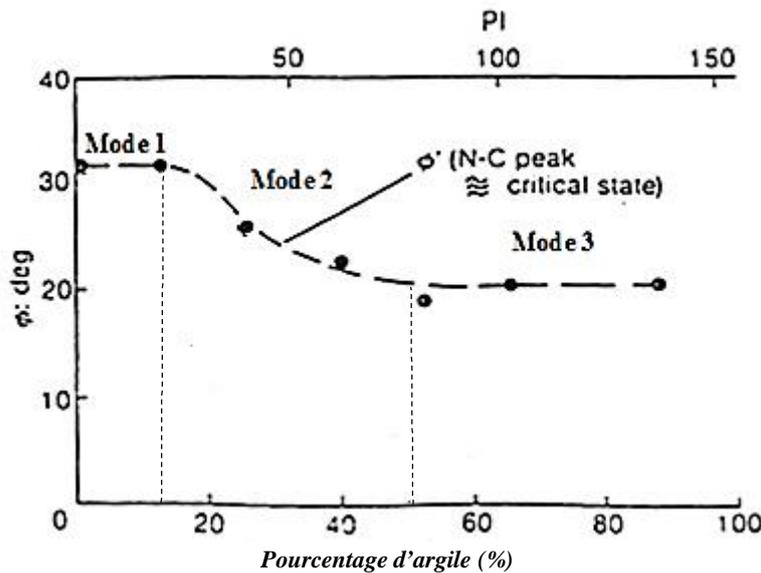
La résistance au cisaillement peut être définie d'après La Gatta (1970), comme étant la résistance au cisaillement atteinte par un sol après une déformation continue sous un état constant de contraintes effectives et d'indice des vides. L'approche micromécanique proposée par Santamarina et al. (2001), suggère que la résistance maximale dans les sols est perdue quand des déplacements irréversibles des particules se produisent. Cette approche est valide principalement pour les matériaux granulaires, bien que certains auteurs tels que Burland et al. (1973), Leon-Resendiz (1989), mentionnent son applicabilité aux argiles normalement consolidés. Das (2002), définit la résistance au cisaillement du sol en tant que "la résistance interne à l'unité de surface " que la masse de sol peut offrir à résister à la rupture et au glissement selon un plan quelconque à l'intérieur. D'autre part Mitchell et Soga (2005), ont défini la résistance au cisaillement maximale comme étant la résistance disponible dans le squelette minéral de sol avant que des déformations permanentes de cisaillement se produisent le long du plan de rupture. Cette résistance maximale est due essentiellement au frottement entre les particules des sols fins, mais dans certains cas, il y a des forces additionnelles qui fournissent une cohésion entre les particules (c-à-d les sols cimentés, les forces capillaires dans les sols partiellement saturés, les forces de Van Der Waals dans les sols limoneux argileux).

### **1.2.3 Effet de la fraction argileuse**

Lupini et al. (1981) ont conduit des essais de cisaillement annulaires sur des argiles mélangées artificiellement. Ils ont enregistré l'évolution de la résistance au cisaillement (pic et résiduelle) et ont montré une orientation progressive des particules

d'argile le long de la surface de cisaillement. Ils ont également postulé que l'angle de frottement au pic dépend des propriétés intrinsèques des constituants du sol considéré l'indice de plasticité et la fraction argileuse. Trois modes de comportement sont illustrés dans la figure 1.3, qui montre des résultats d'essais de cisaillement annulaires sur des mélanges sable - bentonite.

Le mode 1, qui implique des argiles contenant une forte proportion de particules rondes (fraction argileuse  $\leq 20\%$ ), 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  $\phi'$  importants ( $\phi' > 30^\circ$ ).

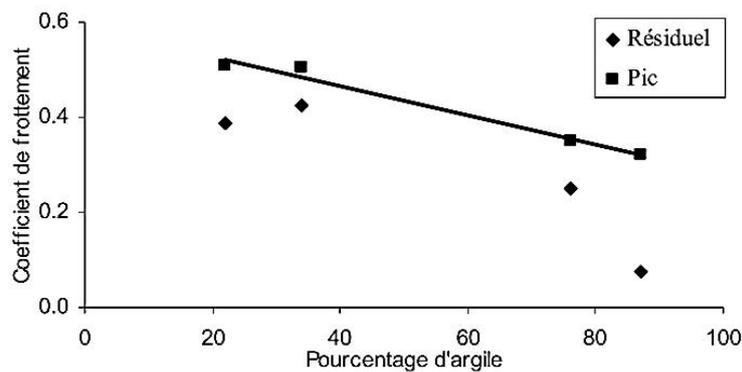


**Figure 1.3** Essais de cisaillement annulaire sur des mélanges sable - bentonite (d'après Lupini et al, 1981)

Le mode 3, se produit dans les argiles pour lesquelles la teneur en particules plates de faible frottement est importante (fraction argileuse  $> 50$ ). Dans les argiles montrant un tel mode de comportement, les angles de frottement  $\phi$  sont relativement faibles ( $\phi=22^\circ$ ). Le mode 2, implique en même temps les deux types de comportement de cisaillement précédents et se produit lorsque les proportions de particules plates et rondes sont du même ordre ( $20 < \text{fraction argileuse} < 50$ ).

D'après Hammoud (2006) 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, les contraintes au pic sont obtenues pour de faibles déplacements tangentiels: environ 4 mm pour le limon de Xeuilley et du

mélange limon de Xeuilley-kaolin, 2 mm pour le kaolin et 0,6 mm pour la bentonite. De ce fait indiquant que le déplacement nécessaire pour atteindre le pic diminue avec le pourcentage de fraction argileuse. 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 maximal, comme le montre la figure 1.4. La résistance au pic semble diminuer linéairement avec l'augmentation de la fraction argileuse.



**Figure 1.4** Effet du pourcentage d'argile sur les conditions au pic (d'après Hammoud, 2006)

### 1.3 Caractérisation du comportement de l'interface sol-matériaux solides

#### 1.3.1 Définition de l'interface sol - structure

L'étude réalisée concerne l'interface sol cohérent - structure. La transmission des efforts (de la structure vers le milieu cohérent ou l'inverse) est liée à l'interface entre les deux milieux. Dans cette partie, quelques définitions et quelques méthodes utilisées pour étudier le comportement d'interface entre un matériau solide et un sol, sont présentées.

Plytas (1985) appelle interface, la fine zone de sol siège de grands changements de structure et de rupture dus au cisaillement localisé intervenant au contact d'une inclusion dans le sol, sollicitée axialement. Boulon (1988) définit les interfaces sol-structure comme étant de purs concepts et constitués principalement par une partie du sol au contact avec la structure et secondairement, parfois par quelques particules arrachées à la structure. Hoteit (1990) définit l'interface comme étant une limite commune de deux systèmes permettant des échanges entre ceux-ci. Ainsi Hassan (1995) définit l'interface comme une frontière commune à deux systèmes différents à travers laquelle des échanges ont lieu. Elle est également décrite comme une

discontinuité entre deux matériaux aux propriétés différentes (Desai et Rigby 1995) ou, encore, comme une zone mince de sol "remanié" (perturbé) au contact direct de la structure (De Gennaro 1999; Karabatakis et Hatzigogos 2001; Gaba et al, 2003). D'un point de vue géométrique, l'interface sol-structure est définie comme la fine zone de sol qui se forme entre la surface de la structure et le volume de sol l'entourant (De Gennaro 1999; Cai et Ugai 2002) comme mentionné auparavant.

### 1.3.2 Notion de la résistance au cisaillement à l'interface

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 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.

L'adhérence est la propriété du matériau par laquelle deux surfaces sont jointes quand elles entrent en contact et liées par les forces intermoléculaires (Santamarina, 2001).

En conséquence, la résistance au cisaillement à l'interface sol - surface quelconque, dans le domaine des petits déplacements s'écrit:

$$\tau = c_i + \sigma_n \operatorname{tg} \delta \quad (1.2)$$

Avec,

$\sigma_n$  : contrainte normale à la surface

$c_i$  : adhérence

$\delta$ : angle de frottement sol-surface

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

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \delta \quad (1.3)$$

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

$$\tan \delta = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (1.4)$$

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

Depuis les années 60, de nombreux types d'appareillages ont été développés. De la boîte de cisaillement direct plan modifiée aux derniers appareils utilisés, la complexité des essais n'a cessé d'augmenter: comme nous allons le voir, des essais où les paramètres sont bien contrôlés, nécessitent un équipement adapté sophistiqué.

La plupart des dispositifs d'essai d'interface de sol-structure sont conçus pour mesurer le déplacement relatif entre le sol et les matériaux structuraux sous les charges appliquées. Pour des buts de recherche, il est parfois aussi nécessaire de mesurer séparément le glissement à l'interface et la déformation de cisaillement de la masse de sol.

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 les 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.

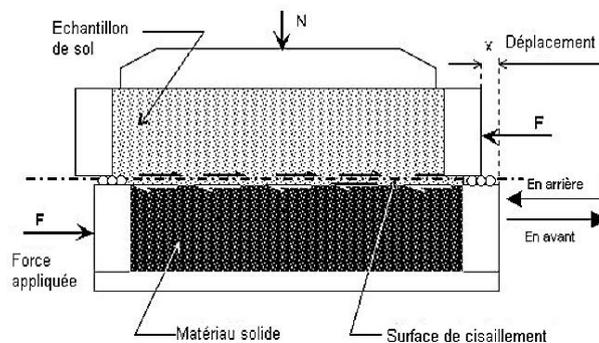
Plusieurs études ont été publiées concernant l'essai en laboratoire des interfaces. Le plus souvent, les essais d'interface ont été réalisés sur plusieurs types d'interfaces: sol-structure, sol-roche, roche-roche et sol-sol. On note qu'une partie importante de ces essais sont consacrés à l'interface sol-matériaux géosynthétique ou sol-acier. Les résultats de ces essais ont permis de divulguer les principaux aspects fondamentaux du comportement des interfaces.

Bien que le comportement mécanique des interfaces a fait l'objet de nombreuses études expérimentales. La plupart des études menées ne permettent pas de réaliser un essai où les critères suivants soient respectés simultanément:

- conditions aux limites parfaitement contrôlées,
- effets de bords suffisamment faibles pour ne pas invalider les résultats obtenus,
- grands déplacements de cisaillement possibles sans perte de matériau,
- visualisation du mouvement des grains dans l'échantillon et, en particulier dans la couche d'interface,
- mesure de la composante normale de la contrainte au sein de la couche d'interface,
- possibilité d'effectuer des chargements monotones ou cycliques selon différents chemins.

### 1.4.1 Boite de cisaillement direct modifié

L'idée première d'une boîte de cisaillement direct appartient à Alexandre Collin (1846), mais c'est à Casagrande qui l'a mis au point et lui a donné la diffusion que l'on connaît actuellement. L'appareil de cisaillement modifié dérive de la boîte de cisaillement direct classique (Figure 1.5). Pour cela, le matériau doit être placé dans une des demi-boîtes et le matériau solide dans l'autre. Au cours de l'essai la surface de l'interface varie.

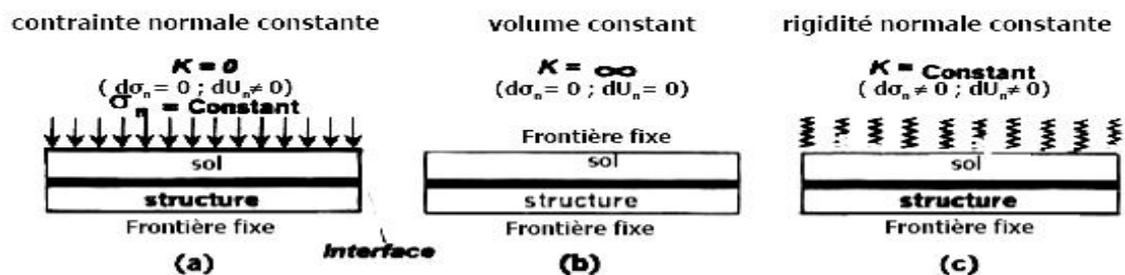


**Figure 1.5** Principe de l'essai de cisaillement direct modifié

On note que le comportement de l'interface sols - structures sous chargement monotone a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux au moyen de cet appareil. 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. Le plan de séparation des deux demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement d'éprouvette. Cet équipement du

laboratoire a été l'objet de plusieurs modifications, afin de réduire ses principaux défauts (Wernick 1978; Tubacanon et al 1995).

On peut classer les essais d'interface en essais à contrainte normale constante "CNC" (Wernick 1978; Al-Douri et Poulos 1991; Tubacanon et al 1995; De Gennaro 1999; Dumitrescu 2005; Suriyavut 2013), à volume constant "VC" (Schlosser et Guilloux 1981; Leratet 1995) ou à rigidité normale constante "RNC" (Hoteit 1990; Evgin et Fakharian 1996; Ghionna et Mortara 2002; Suriyavut 2013). D'après Schlosser et Guilloux (1981), on pourrait déduire que l'essai le plus représentatif de la réalité est celui à volume constant; en effet les auteurs affirment que la mise en traction (ou en compression) d'un matériau solide dans le sol produit des contraintes de cisaillement dont les valeurs ne sont significatives que dans une zone limitée autour de l'inclusion. Dans cette zone, le sol a tendance à augmenter de volume par suite de la dilatance, mais s'en trouve en partie empêché par le reste du sol. Il en résulte une augmentation importante de la contrainte normale sur le pourtour de la zone de cisaillement et par suite à la surface de la structure, c'est le phénomène de dilatance empêchée. Par ailleurs, les essais à contrainte normale constante et à volume constant ont été considérés par plusieurs auteurs comme des chemins de cisaillement extrêmes contrairement à l'essai à rigidité normale constante qui est considéré comme un chemin intermédiaire qui permet de bien simuler les conditions réelles de frottement (Boulon 1988; Hassan 1995 ; Fakharian et Evgin 2000 ; Ghionna et Mortara 2002). Une autre classification des essais d'interface consiste à les diviser en essais de cisaillement direct qui sont présentés comme des dispositifs simples où l'on impose au sol de glisser par rapport à l'interface et essais de cisaillement simple qui se différencient des précédents par le fait que la surface de l'interface sol - matériau reste constante tout au long de l'essai et par l'identification séparée des composantes de déplacement (glissement, cisaillement). Les observations expérimentales sont classées selon le type de sollicitation (CNC, VC ou RNC) (Figure 1.6).

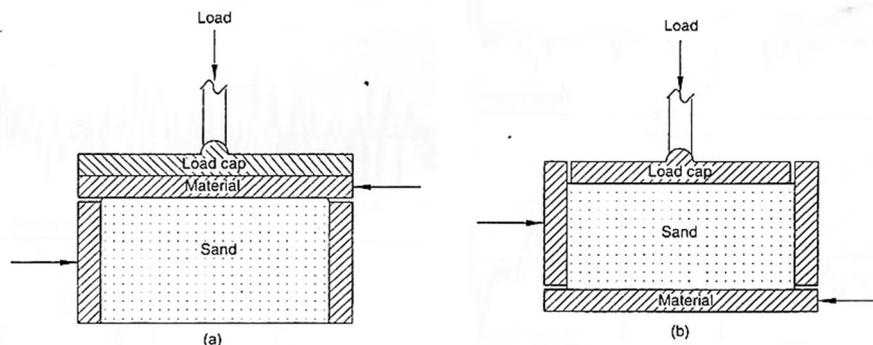


**Figure 1.6** Conditions aux limites dans la direction normale de l'interface (d'après Evgin et Fakharian 1996)

Dans le cas d'essais d'interface à contrainte normale constante, l'interface peut se contracter ou se dilater librement. Dans ce cas, les courbes typiques des essais de cisaillement sont, d'une part, l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel relatif ( $U_t$ ,  $\tau$ ) et, d'autre part, l'évolution du déplacement normal en fonction du déplacement tangentiel relatif ( $U_t$ ,  $U_n$ ). La condition de contrainte normale constante est la plus fréquente et la plus simple à reproduire du point de vue des conditions aux limites. Si le chargement se fait à volume constant, les déplacements normaux par contre, sont empêchés. Dans ce cas, la contrainte normale augmente ou diminue selon que le sol au voisinage de l'interface tend à se dilater ou se contracter. Enfin, la condition de rigidité normale constante permet de présenter l'évolution de la contrainte normale et du déplacement normal qui reproduit l'état de dilatance ou de contractance de l'interface.

Subba Rao et al (1998) ont réalisé une série d'essais de cisaillement modifié où la différence fondamentale entre les essais réalisés dans chacun des deux appareils réside dans le mode de cisaillement comme illustre la figure 1.7. Dans le mode « a », l'échantillon est placé dans la demi-boîte inférieure et la plaque dans la demi-boîte supérieure alors que pour le mode « b », il a à éliminer l'échantillon dans la demi-boîte supérieure. Bien qu'ayant des principes différents, des essais réalisés sur des échantillons identiques dans les deux modes, ont montré qu'il y a une bonne concordance entre les résultats obtenus.

Les principaux avantages de la boîte de cisaillement modifié sont sa simplicité et son adaptabilité à partir d'une boîte classique. Les problèmes sont les mêmes que ceux de la boîte classique, à savoir : la possibilité de perte de matériau durant l'essai, la non homogénéité des contraintes à l'interface, la surface de contact non constante et le frottement parasite entre les deux demi-boîtes. Ce dispositif ne rend pas possible des essais à volume constant. La distinction des composantes de déplacement dû au glissement et à la déformation de cisaillement est difficile.

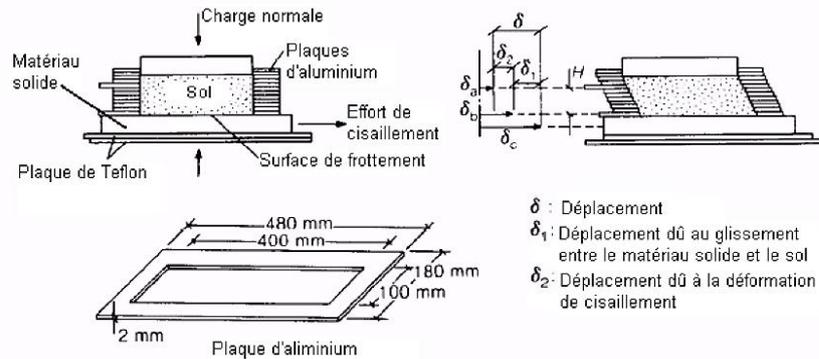


**Figure 1.7** Schéma représentant le mode de cisaillement par Subba Rao, et al (1998)

### 1.4.2 Essai de cisaillement direct simple

La boîte de cisaillement simple a été intensivement utilisée dans les essais d'interfaces, pendant les deux dernières décennies, principalement pour les interfaces de sable - acier et argile - acier. De conception semblable à l'essai de cisaillement direct, à quelques exceptions, cet essai permet à l'échantillon de se déformer librement et uniformément (Figure 1.8). La différence par rapport au premier type d'essai porte essentiellement sur les conditions aux limites appliquées au sol. Trois types d'appareils ont été développés et utilisés pour les essais d'interfaces :

- l'appareil de cisaillement simple de type Roscoe (1953);
- l'appareil de cisaillement cylindrique de l'Institut Géotechnique de Norvège (NGI) conçu par Bjerrum et Landva (1966);
- l'appareil de cisaillement rectangulaire Kishida et Uesugi (1987);

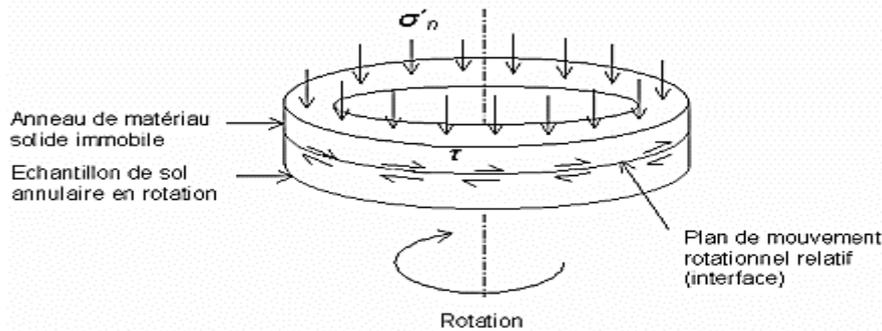


**Figure 1.8** Principe de l'essai de cisaillement simple d'après Kishida et Uesugi, (1987)

L'appareil de cisaillement simple plan permet donc, contrairement à la boîte de cisaillement direct, de pouvoir mesurer séparément les déformations de cisaillement et les déplacements de glissement. Cependant, il présente les mêmes inconvénients que la boîte de cisaillement direct (concentration des contraintes aux extrémités, déplacements limités, etc.) et de plus, la détermination des contraintes dans le plan de cisaillement n'est pas possible.

### 1.4.3 Appareil de cisaillement annulaire

L'appareil de cisaillement annulaire peut être adapté à l'étude des interfaces comme la boîte de cisaillement direct. Cet appareil permet des essais à très grands déplacements sans effets de bord (Figure 1.9).



**Figure 1.9** Principe de l'essai de cisaillement annulaire

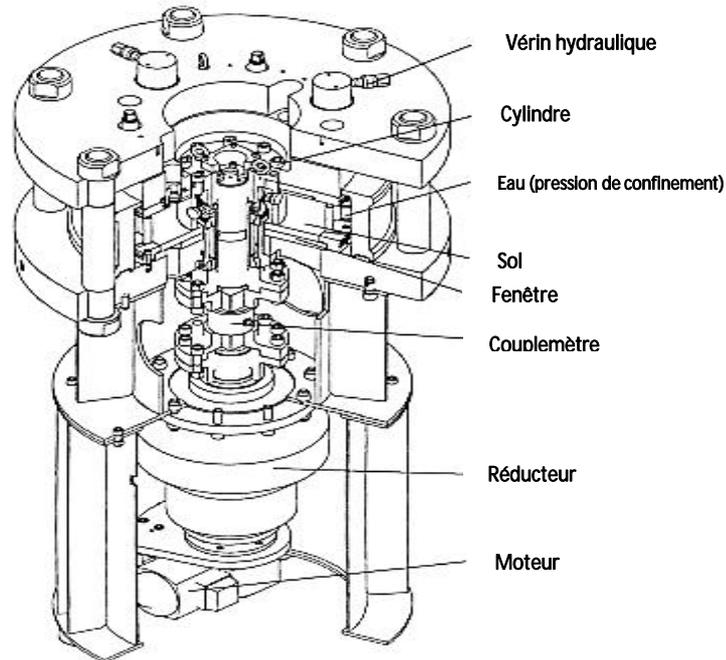
L'appareil de cisaillement annulaire permet de faire subir à l'échantillon un cisaillement continu et illimité sur des échantillons toriques sans avoir à stopper et changer la direction du mouvement de cisaillement. Plusieurs appareils ont été développés durant les quarante dernières années (La Gatta 1970; Bishop et al. 1971; Bouceck 1977; Bromhead 1979). Deux types d'appareils ont été développés et utilisés pour les essais d'interfaces:

- L'appareil IC/NGI, a été développé conjointement par NGI (Norwegian Geotechnical Institute, Norvège) et IC (Imperial College, Angleterre). Le cisaillement se produit dans un plan prédéterminé à l'intérieur du corps de l'échantillon loin de la plaque de chargement supérieure.
- L'appareil de Bromhead, a été conçu et évalué à la Polytechnique de Kingston (Angleterre). Le cisaillement se produit dans un plan adjacent à la plaque de chargement supérieure.

#### 1.4.4 Essai de cisaillement simple annulaire

Acar et al. (1982) décrivent les aspects théoriques et le principe de fonctionnement d'un appareil de cisaillement simple annulaire (ACSA). Adjémian et Evesque (2001) proposent une version constituée d'un cylindre tournant métallique en contact avec un échantillon de sol soumis à des contraintes radiale et verticale (Figure 1.10). Le système permet le contrôle de la pression et du volume de l'échantillon pendant les essais. Une fenêtre sur l'embase inférieure permet la visualisation de l'échantillon durant les essais et donc rend possible la distinction des déplacements dus au glissement et à la déformation du sol. Les conditions aux limites en déplacement sont homogènes sur toute l'interface. Par contre, le montage et la réalisation des essais sont complexes. Le dispositif et l'échantillon sont de grandes dimensions. Adjémian et

Evesque (2001), visaient des applications dans le domaine du renforcement des sols par des inclusions.



**Figure 1.10** Appareil de cisaillement simple annulaire (ACSA)

De Gennaro (1999) a analysé le comportement des pieux par une étude expérimentale sur les interfaces en comparant les résultats obtenus à l'ACSA avec d'autres appareils.

Chambon et al (2002, 2003, 2004, 2006) traitent du comportement mécanique des failles lors de séismes en pratiquant un cisaillement sur une longue distance. Ils ont étudié des phénomènes d'arrêt et de reprise du cisaillement, de dégradation du matériau à proximité du cylindre intérieur et ont étudié le mouvement du matériau à l'aide d'une méthode de corrélations d'image. L'influence de l'eau et de l'anisotropie de la contrainte de confinement sur le comportement d'interface sont étudiées par Azanza (1998) avec des applications dans le chargement de pieux et le glissement des fondations superficielles. Bagi (1999) présente une étude numérique et expérimentale sur l'interface sol-béton en vue de l'application aux parois moulées avec le développement d'un cylindre interne en béton pour l'ACSA.

#### 1.4.5 Appareil de cisaillement tridimensionnel

L'appareil présenté par Fakharian et Evginest (1996) composé par une boîte de cisaillement simple (Figure 1.11) permet l'application simultanée de l'effort normal et des contraintes de cisaillement dans deux plans. Les déplacements de glissement sont

distingués des déformations de cisaillement du matériau. Des conditions d'effort normal constant ou de rigidité normale imposée sont possibles. L'appareil présente les désavantages courants des essais de cisaillement simple.

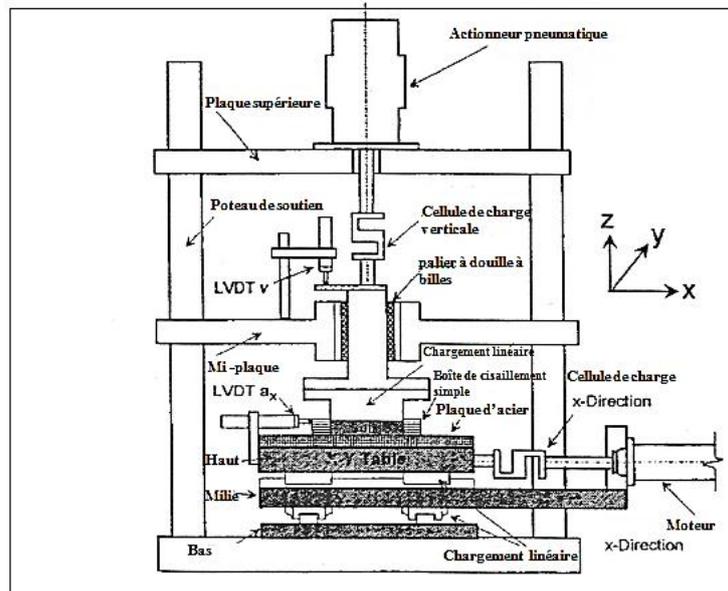


Figure 1.11 Appareil de cisaillement tridimensionnel

#### 1.4.6 Appareil d'arrachement à symétrie de révolution

Cet appareil est basé sur une modification d'une cellule triaxiale afin de permettre l'introduction d'une tige et donc de rendre possible une meilleure compréhension du comportement d'interface sol-pieux. Coyle et Sulaiman 1967, Brumund et Leonards 1973 utilisent des tiges en différents matériaux (acier, béton lisse et rugueux) et déterminent des coefficients de frottement statique et dynamique (schéma de l'appareil sur la Figure 1.12).

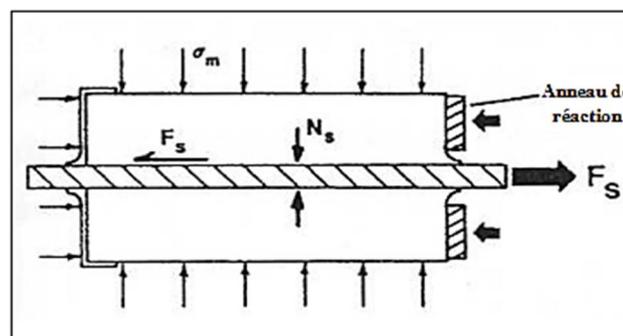
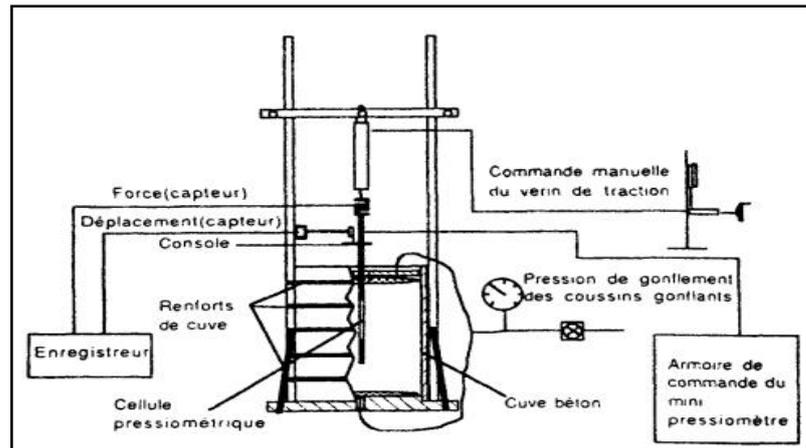


Figure 1.12 Appareil de cisaillement à symétrie de révolution (d'après Brumund et Leonards, 1973)

Une version modifiée du système proposé par Abderrahim et Tisot (1992) rend possible le contrôle de la pression agissant sur l'interface. La tige, munie d'une cellule pressiométrique liée à un contrôleur pression-volume est attachée à un dispositif d'arrachement et à des capteurs de déplacement (Figure 1.13).

Un désavantage est la concentration des contraintes à l'extrémité du chargement et le fait que l'on ne puisse pas identifier indépendamment les composantes du déplacement.



**Figure 1.13** Dispositif expérimental des essais d'arrachement (d'après Abderrahim et Tisot, 1992)

## 1.5 Couche d'interface

La plupart des études antérieures sur la couche d'interface ou la bande de cisaillement sol - interface reportées par la bibliographie ont été réalisées pour les sables et peu d'études concernent des sols cohérents.

La couche d'interface peut être visualisée au cours des essais au laboratoire à l'aide des photographies, radiographies, etc. L'épaisseur de la couche d'interface, qui se forme dans un milieu granulaire au contact avec un élément de structure, dépend essentiellement de la taille des grains, de la densité du matériau, de la rugosité de l'interface et des conditions aux limites extérieures. Unterreiner (1994) affirme que l'épaisseur d'une couche d'interface n'est pas une caractéristique intrinsèque au sol et à l'interface, mais plutôt le résultat du problème aux limites étudié pour une géométrie donnée. Hassan (1995) a présenté l'étude la plus détaillée réalisée sur le comportement individuel des grains dans la zone d'interface (étude microscopique). En plus de la détermination de l'épaisseur de cette couche, les champs de déformation de l'échantillon et la rotation de quelques grains marqués ont été soigneusement examinés.

L'auteur a constaté que l'épaisseur de la couche d'interface diminue avec la densité. Lerat (1996) a observé la couche d'interface en faisant simultanément des prises photographiques et vidéo. Il a montré clairement que l'épaisseur de la couche d'interface augmente pour des rugosités élevées. Plusieurs autres auteurs ont observé l'épaisseur de la couche d'interface pour différents types d'essais, de sol et de rugosité de structure. Ces études sont résumées dans le tableau 1.1 (Frih 2005). L'épaisseur varie de 0-1  $D_{50}$  à 40  $D_{50}$ .

**Tableau 1.1** Synthèse des valeurs expérimentales sur l'épaisseur de la couche d'interface (Frih 2005)

Conditions d'essais		Epaisseur de la couche d'interface en fonction de $D_{50}$	Source
Appareil	Etat de rugosité		
Cisaillement direct annulaire	lisse	0-1	Yoshimi et Kishida (1981)
	rugueux	5-8	
Cisaillement simple plan	lisse	0-1	Uesugi et al. (1988)
	rugueux	5	
Cisaillement direct	lisse	0-1	Hoteit (1990)
	rugueux	5-10	
Silo en déformation plane	lisse	10	Tejchman et Wei (1995)
	très rugueux	40	
	très rugueux	30 à 40	
Cisaillement direct plan	lisse	0-1	Hassan (1995)
	rugueux	6-7	
	rugueux	4-5	
Cisaillement simple annulaire	lisse	0-1	Lerat (1996)
	rugueux	6-8	
Cisaillement simple annulaire	rugueux	6-7	Chambon et al. (2004)

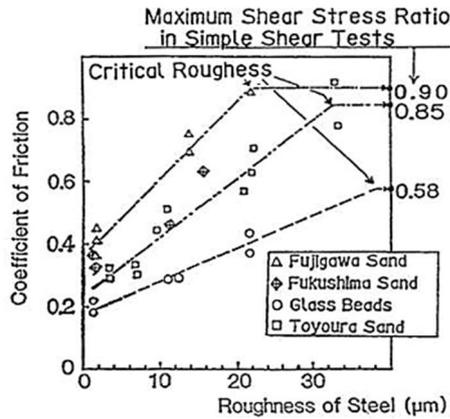
## 1.6 Mécanisme de rupture à l'interface

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

### 1.6.1 Cas des sols pulvérulent (grenus)

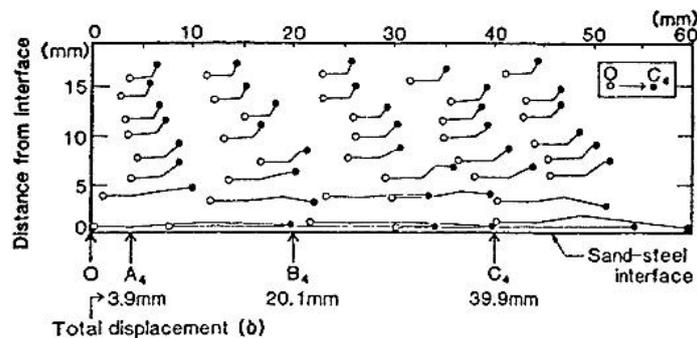
D'après Uesugi et Kishida (1986), si la rugosité normalisée  $R_n$  (voir définition au chapitre 2) est inférieure à la valeur critique (Figure 1.14), un glissement a lieu au

niveau de l'interface. Au contraire, si la rugosité critique est atteinte ou dépassée, la rupture a lieu dans la masse du matériau.



**Figure 1.14** Dépendance du coefficient de frottement d'interface avec la rugosité

Uesugi et al (1988) ont modifié l'appareil de cisaillement simple plan, en équipant une paroi d'une fenêtre en verre, pour pouvoir visualiser le comportement des particules lors des essais de cisaillement. La figure 1.15, montre le champ de déplacement d'un certain nombre de particules et sa décomposition en déplacement tangentiel et en déplacement normal dans l'épaisseur de l'échantillon lors d'un essai de cisaillement à l'interface. Pour une interface rugueuse, le déplacement tangentiel se localise près de l'interface et est accompagné d'une forte dilatance volumique. En observant des photographies successives, les auteurs ont noté que non seulement les particules glissent mais aussi tournent le long de l'interface. Par contre, dans le cas d'une interface lisse, la déformation du sol est uniformément répartie dans sa masse, sans phénomène de variation de volume.



**Figure 1.15** Visualisation du déplacement des particules lors d'un essai de cisaillement avec une surface rugueuse (d'après Uesugi et al, 1988)

À partir d'expériences avec des billes de verre, Paikowsky et al. (1995), ont confirmé la notion de rugosité critique et ont mis en évidence l'existence de trois zones (Figure 1.16).

Dans la première zone ( $R_n < 0,01$ ), ils n'ont observé pas d'influence de  $R_n$  sur la valeur de l'angle de frottement à l'interface. La paroi est définie comme lisse par rapport aux grains. Dans la deuxième zone ( $0,01 \leq R_n \leq 0,5$ ), ils ont vérifié une croissance à peu près linéaire de l'angle de frottement de l'interface avec la rugosité normalisée  $R_n$  (zone de rugosité intermédiaire par rapport aux grains). La troisième zone ( $R_n > 0,5$ ) correspond à des rugosités qui dépassent la rugosité critique et donc, se classifie comme rugueuse par rapport aux grains.

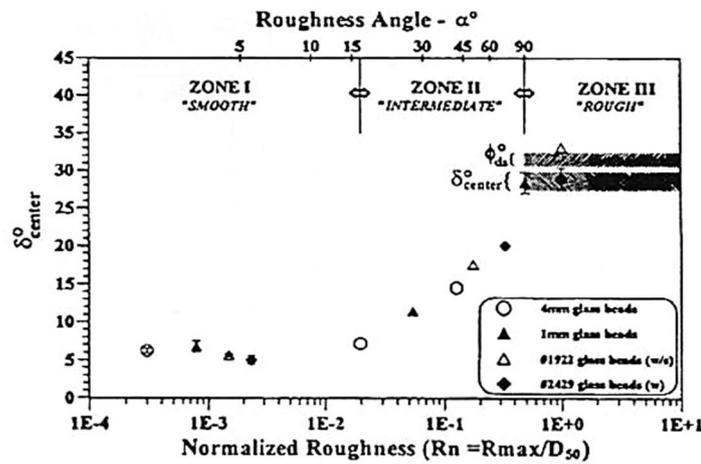
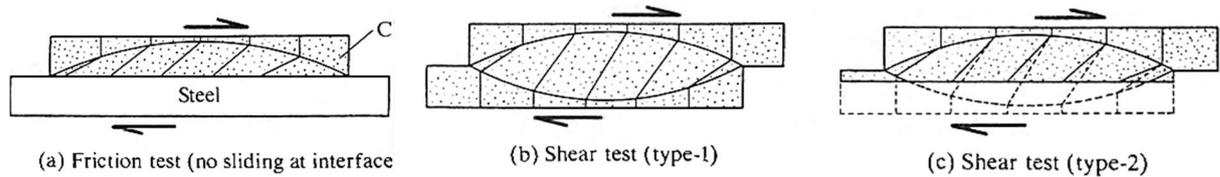


Figure 1.16 Dépendance de l'angle de frottement à la paroi avec la rugosité normalisée,  $R_n$

### 1.6.2 Cas des sols cohérents

Tsubakihara et 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, ils ont postulé une rugosité critique pour l'acier de  $R_{max} = 10 \mu\text{m}$  ( $L_a = 0,2 \text{ mm}$ ) (voir définition au chapitre 2) approximativement. 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. Les deux modes de cisaillement sont illustrés sur le schéma ci-dessous (Figure 1.17).



**Figure 1.17** Mode de rupture déterminée à partir de la boîte de cisaillement (d'après Tsubakihara et Kishida, 1993)

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  $\mu\text{m}$  ( $R_{\text{max}}$  ( $L_a= 0,2 \text{ mm}$ )), le glissement à l'interface et la déformation par cisaillement à l'intérieur du sol ont lieu simultanément.

## 1.7 Influence de différents paramètres sur le comportement de l'interface

Le cisaillement à l'interface sol-structure est influencé par la variation de quelques paramètres dont les plus importants sont la contrainte normale, la rugosité, la vitesse de cisaillement, la minéralogie du sol. Parmi les facteurs qui ont une influence sur la valeur de l'angle de frottement sol-structure  $\delta'$ , Schlosser (1991) cite :

- La rugosité de la structure,
- L'angle de frottement interne du sol  $\phi'$ ,
- Le tassement relatif entre la structure et le sol.

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

La rugosité de surface a depuis longtemps été reconnue 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 réalisées 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 frottements latéraux pouvant atteindre  $10^\circ$  (Yoshimi et Kishida 1981; Uesugi et al. 1988). 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 et Adrawes 1972; Uesugi et Kishida, 1986a, b). Cependant, Brumund et Leonards 1973 ont conclu que quand la surface de la structure a une importante rugosité par rapport aux 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, de la minéralogie et de la rugosité de l'interface. La résistance au cisaillement sol-interface est généralement légèrement plus petite que la résistance sol-sol et tend à diminuer avec des rugosités de surface de plus en plus faibles (Potyondy 1961; Kanji 1974; 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.

Potyondy (1961) a utilisé une boîte de cisaillement direct pour mesurer le frottement superficiel entre un échantillon de sol et des matériaux de construction. Jusqu'à lors, les valeurs employées étaient les valeurs moyennes obtenues à partir d'essais en vraie grandeur, avec une prise en compte qualitative de facteurs tels que le type de matériaux de construction et son état de rugosité.

Le matériau de construction était placé dans la demi-boîte inférieure et le sol dans celle supérieure, la surface de cisaillement étant imposée. Plusieurs centaines d'essais ont été réalisés sur l'acier, le bois et le béton (les matériaux de construction les plus employés) ayant de fortes et faibles rugosités, sur différents types de sols

(cohérents ou granulaires), à différentes densités, différentes teneurs en eau et sous différentes contraintes normales imposées.

Les résultats obtenus donnent le rapport entre l'angle de frottement superficiel et l'angle de frottement interne mais montrent également l'influence, pour les sols fins, de la cohésion sur l'adhérence, les résultats de cette recherche prouvent que dans tous les cas le frottement  $\delta_p'$  était inférieur à la résistance au cisaillement du sol  $\phi_p'$ . Ces résultats sont illustrés sur le tableau 1.2.

**Tableau 1.2** Coefficients de frottement sol - matériaux de construction proposés (d'après Potyondy, 1961)

Construction material			Sand		Cohesionless silt			Cohesive granular soil		Clay		
			0.06 < D < 2.0 mm		0.002 < D < 0.06			50% Clay + 50% Sand		D ≤ 0.06 mm		
	Surface finish of construction material		Dry	Sat.	Dry	Sat.		Consist. I. = 1.0-0.5		Consist. Index: 1.0-0.73		
			Dense		Dense	Loose	Dense					
			$f\phi$	$f\phi$	$f\phi$	$f\phi$	$f\phi$	$f\phi$	$f_c$	$f\phi$	$f_c$	$f_{cmax}$
Steel	Smooth	Polished	0.54	0.64	0.79	0.40	0.68	0.40	—	0.50	0.25	0.50
	Rough	Rusted	0.76	0.80	0.95	0.48	0.75	0.65	0.35	0.50	0.50	0.80
Wood	Parallel to grain		0.76	0.85	0.92	0.55	0.87	0.80	0.20	0.60	0.4	0.85
	At right angles to grain		0.88	0.89	0.98	0.63	0.95	0.90	0.40	0.70	0.50	0.85
Concrete	Smooth	Made in iron form	0.76	0.80	0.92	0.50	0.87	0.84	0.42	0.68	0.40	1.00
	Grained	Made in wood form	0.88	0.88	0.98	0.62	0.96	0.90	0.58	0.80	0.50	1.00
	Rough	Made on adjusted ground	0.98	0.90	1.00	0.79	1.00	0.95	0.80	0.95	0.60	1.00

Mohan et Chandra (1961) ont réalisé des essais "d'adhésion" entre l'argile et du béton avec une technique analogue à celle de Potyondy (1961). Ils ont comparé les résultats obtenus avec des essais d'arrachement de pieux in situ. Ces résultats montrent que la diminution du frottement est due en partie au ramollissement de l'argile adjacente au pieu et à une perte de l'adhésion entre le béton et le sol.

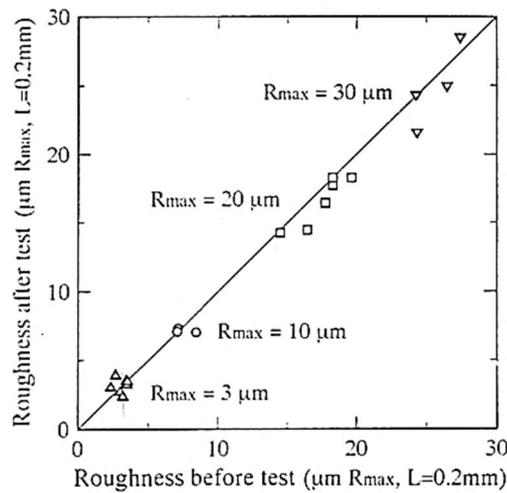
Rouaiguia (1991) a réalisé des essais de cisaillement direct alterné sur des argiles de différente plasticité, à savoir l'argile de Londres, la marne de Keuper, l'argile de Lias ainsi que des échantillons de kaolin d'Algérie, contre une interface lisse (verre) pour laquelle la rugosité arithmétique moyenne  $R_a=0,005\mu\text{m}$  (la définition de  $R_a$  sera donnée dans le chapitre 2) et une interface rugueuse (roche) pour laquelle  $R_a = 10 \mu\text{m}$ , avec une vitesse de cisaillement 0,015873 mm/mn. Il a constaté que la résistance au cisaillement argile-argile est plus grande que celle de l'interface d'argile-matériaux solide (verre et roche). La résistance au cisaillement au pic est atteinte après un déplacement horizontale d'environ 0,1 mm pour le cas du cisaillement argile-roche et argile-verre. Ceci peut être expliqué par le fait que les particules ne se sont pas

suffisamment déplacées par rapport à leurs positions initiales de contact. Les angles de frottement d'interface dépendent de la rugosité d'interface, donnant des valeurs pour le verre plus petites que celle de l'acier. Les résultats obtenus donnent l'intervalle suivant concernant la différence entre l'angle de frottement sol- interface rugueuse et l'angle de frottement sol-interface lisse :

$$1,5^{\circ} \leq \delta_p'(\text{sol-roche}) - \delta_p'(\text{sol-verre}) \geq 5,1^{\circ}$$

$$1,6^{\circ} \leq \delta_r'(\text{sol-roche}) - \delta_r'(\text{sol-verre}) \geq 4,8^{\circ}$$

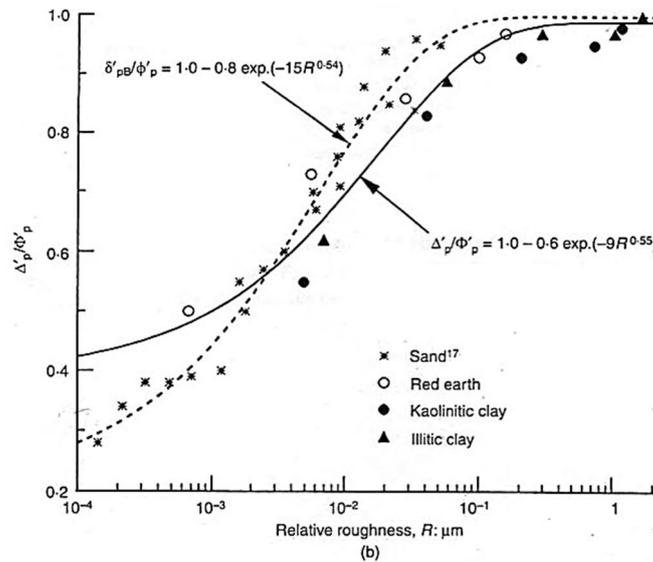
Dans le but d'étudier l'effet de changement de la rugosité, Tsubakihara et al. (1993) ont effectué des mesures sur les paramètres de la rugosité avant et après chaque essai. Ils ont abouti pratiquement aux mêmes valeurs, comme illustre sur la figure 1.18.



**Figure 1.18** Effet du changement de la rugosité sur la résistance au cisaillement

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 à l'interface 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  $R_a$  (voir définition au chapitre 2) sont situées dans le domaine  $0,056 \mu\text{m} - 13,98 \mu\text{m}$ . Les résultats obtenus montrent que  $\delta_p' / \phi_p'$  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 chapitre.2) a été proposée pour la détermination de  $\phi_p'$  (Figure 1.19):

$$\frac{\delta p'}{\varphi p'} = 1.0 - 0.6 \exp(-9R^{0.55}) \quad (1.5)$$



**Figure 1.19** Relation entre l'angle de frottement et la rugosité relative

Hammoud (2006) a étudié le cisaillement à l'interface dans le domaine des petits et grands déplacements, entre différents sols cohérents (limon de Xeuilley, kaolin, bentonite, et le mélange limon de Xeuilley-kaolin) contre des interfaces des matières diverses (acier inoxydable et béton) de rugosités variables, au moyen de l'appareil de cisaillement annulaire. Il ressort des résultats des essais d'interface sol-acier et sol-béton, pour le mélange limon de Xeuilley-kaolin que les valeurs de  $\delta_p' = 15,0^\circ - 27,0^\circ$ . Le mélange limon de Xeuilley-kaolin a comme limite supérieure du coefficient de frottement la valeur correspondant à un cisaillement sol-sol. A l'instar des autres sols, les courbes contrainte-déformation concernant le limon de Xeuilley, indiquent qu'il y a eu un comportement post-pic déplacement-ramollissement comparable à celui observé dans le cas d'un cisaillement sol-sol. En cas de cisaillement du kaolin contre les interfaces d'acier ou de béton, les valeurs de  $\delta_p'$  obtenues sont comprises entre  $14^\circ$  et  $29,1^\circ$  en fonction de la rugosité et le matériau constituant l'interface. Pour l'essai d'interface rugueuse réalisé sur la bentonite, la valeur de  $\delta_p'$  est légèrement supérieure à la valeur de  $\varphi_p'$ . Le point saillant au sujet de la série d'essais sur la bentonite est le fait que la résistance d'interface est susceptible d'être sensiblement supérieure à la résistance sol-sol.

Dans le but d'étudier l'effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement, Tan et al (2008) ont mis à l'essai des échantillons remaniés dans des boîtes de cisaillement direct modifié de (100×100) mm de côté, sur des échantillons de kaolin saturé et des

plaques de différentes rugosités avec une vitesse de cisaillement de 0,6 mm/s. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 1.3. Comme on peut le noter, il y a une indépendance entre la rugosité des surfaces et la cohésion, mais il y a une augmentation de l'angle de frottement à l'interface  $\delta_p'$  avec la rugosité. Les résultats de cette recherche prouvent que dans tous les cas  $\delta_p'$  était inférieur à l'angle de frottement interne du sol  $\Phi_p'$ .

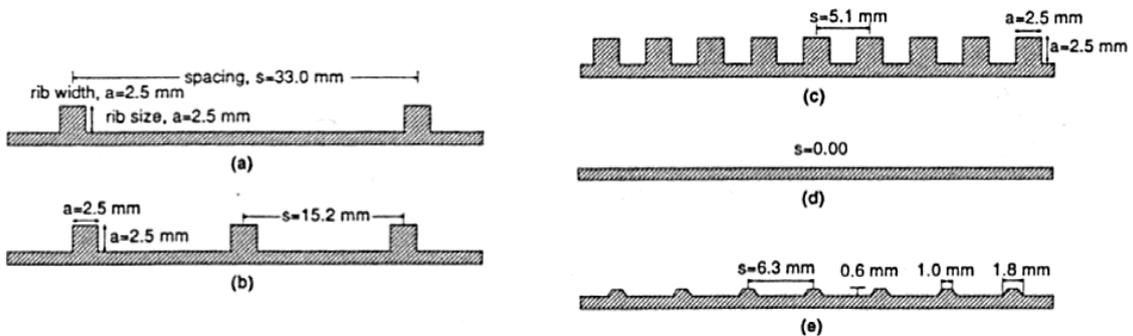
**Tableau 1.3** Résumé des résultats des essais réalisés sur le kaolin (d'après Tan et al, 2008)

	Cohésion (kN/m <sup>2</sup> )	Angle de frottement (°)
kaolin-kaolin	1,22	30,78
kaolin-acier (interface lisse)	1,66	18,57
kaolin-béton (interface lisse)	1,99	22,36
kaolin-acier (interface rugueux)	1,16	27,21

### 1.7.2 Effet de la texture

#### 1.7.2.1 Cas des sols pulvérulents

Hryciw et Irsyam (1993) ont proposé d'étudier l'influence de la géométrie de l'interface par des essais de cisaillement plan mettant en jeu des inclusions présentant des nervures comme illustré sur la figure 1.20 (pour un diamètre moyen des particules de 0,55 mm).



**Figure 1.20** Géométrie des inclusions étudiées d'après Hryciw et Irsyam (1993)

Ils ont ainsi mis en évidence que:

- La présence de nervures sur l'inclusion confère à celle-ci un comportement rugueux. Ainsi, le cisaillement prend place dans le milieu granulaire, alors que le glissement le long de la surface de contact n'a pas eu lieu.

Une zone passive (particules qui suivent le mouvement de l'inclusion en bloc) est susceptible de se développer entre deux nervures, ayant pour conséquence une augmentation de la résistance au cisaillement. Cependant, la création de cette zone

passive est favorisée par un certain type de géométrie (concrètement, des nervures carrées favorisent plus la présence de ces zones que des nervures trapézoïdales).

Dejong et al (2001) ont présenté une série d'essais de cisaillement direct modifié réalisés sur un sable contre des interfaces de différentes textures pour simuler le cisaillement du sol causé durant l'essai de pénétration à cône CPT. Ils ont conduit des essais sur des modèles réduits de pénétromètres aux cônes. Les angles de frottement à l'interface obtenus étaient inférieurs à la valeur de l'angle de frottement interne du sol (Table 1.4). De cette recherche, ils ont constaté que l'angle de frottement  $\delta_p$  au pic et résiduel pour les interfaces de même rugosité et de différentes textures (texture "A", texture "B"), est le même. De ce fait indiquant que l'augmentation de l'espacement des nervures n'affecte pas le frottement à l'interface. Ces textures sont illustrées sur la figure 1.21.

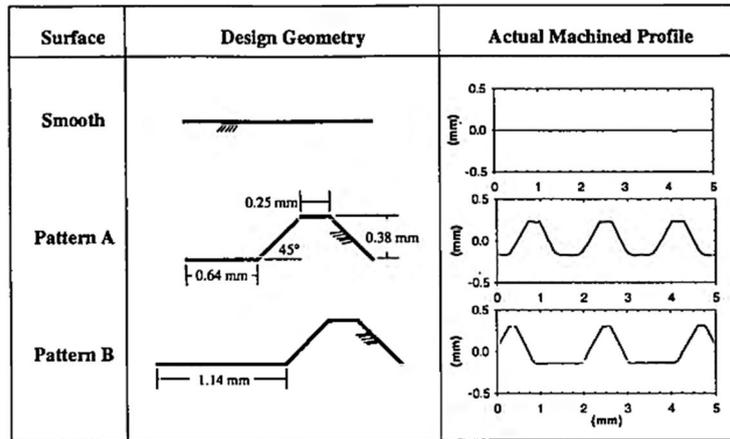


FIG. 3. Plot of Smooth and Ribbed Surface Geometries and Profiles

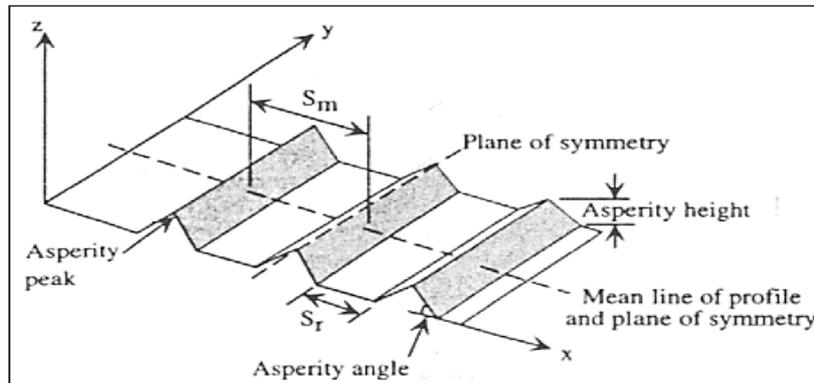
Figure 1.21 Model de textures utilisées par Dejong et al (2001)

Tableau 1.4 Résumé des essais de cisaillement direct et d'interface

Site	L'angle de frottement	Matériaux d'interface			
		Sol-sol	Sol-interface lisse	Sol-Texture A	Sol-Texture B
1	Pic	43°	24°	39°	39°
	Résiduel	36°	24°	31°	31°
2	Pic	39°	24°	38°	37°
	Résiduel	36°	24°	32°	32°

Dove et Jarrett (2002) ont mené des essais de cisaillement direct afin d'étudier l'influence de la géométrie de l'inclusion. Cette étude très poussée considère une

géométrie de la surface de l'inclusion caractérisée par la hauteur, l'angle des nervures, ainsi que l'espace entre elles (Figure 1.22). Ils ont noté cependant que la hauteur des motifs de l'inclusion reste faible en ne dépassant pas la hauteur moyenne des particules considérées.



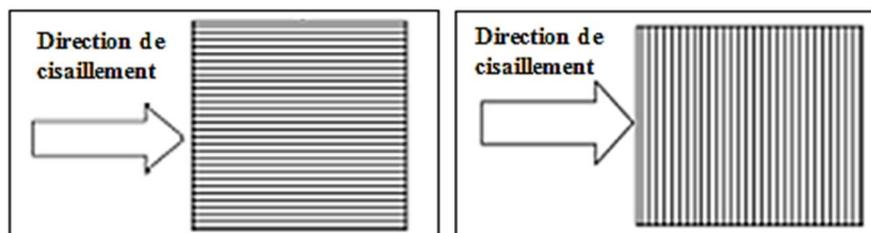
**Figure 1.22** Géométrie des inclusions étudiées par Dove et Jarrett (2002)

Les résultats obtenus montrent que:

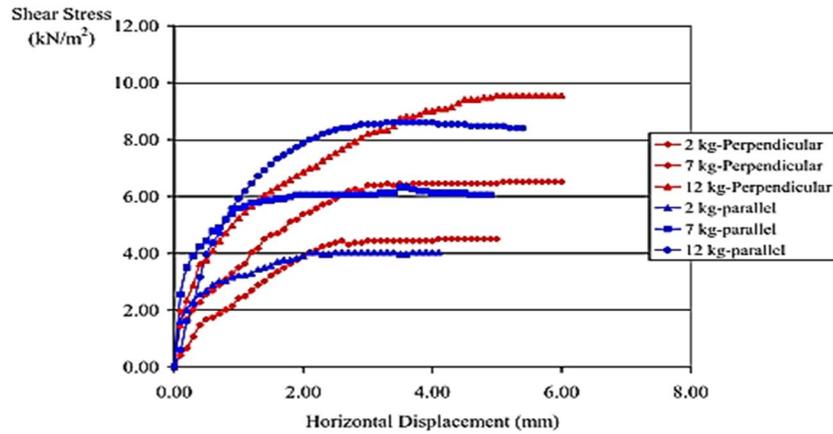
- L'interface est d'autant plus résistante que l'angle de la nervure est important, créant ainsi les zones passives décrites par Hryciw et Irsyam (1993). Il apparaît qu'au-delà d'un certain angle, la résistance maximale est atteinte et ceci quel que soit l'espace entre les nervures.
- Comme déjà montré par Hryciw et Irsyam (1993), plus la hauteur de la nervure est importante plus la résistance au mouvement est importante.
- Plus l'espace entre les nervures est important, plus la résistance au pic est faible.

### 1.7.2.2 Cas des sols cohérents

Tan et al. (2008) ont réalisé une série d'essais de cisaillement direct modifié sur des échantillons de kaolin saturé et deux plaques d'acier de même rugosité avec deux différentes textures pour étudier le mécanisme de rupture, comme illustré sur la figure 1.23. Ils ont constaté que les comportements de cisaillement qui sont caractérisés par les courbes contraintes de cisaillement-déplacement sont légèrement différents comme illustré sur la figure 1.24.



**Figure 1.23** Interfaces utilisées par Tan et al., 2008



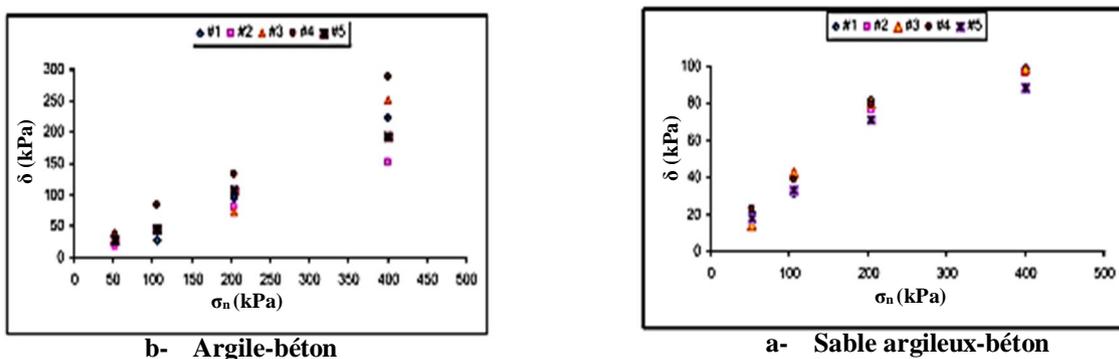
**Figure 1.24** Courbes contrainte de cisaillement - déplacement tangentiel obtenues dans le cas de cisaillement d'interface argile-acier

Par contre, Shakir et Zhu (2009) ont réalisé des essais de cisaillement simple sur des échantillons d'argile compactée et de sable argileux (75% de sable et 25% d'argile). Cinq plaques en béton ont été utilisées pour étudier l'effet de la texture de surface sur le comportement d'interface (Figure 1.25).



**Figure 1.25** Model de textures utilisées par Shakir et Zhu, 2009

Ils ont constaté que la ligne intrinsèque (contrainte de cisaillement-contrainte normal) d'argile-béton est approximativement linéaire alors que les résultats conduits sur les échantillons sable argileux-béton peuvent être représentée par une fonction logarithmique (Figure 1.26). La texture de la surface du béton a un grand effet sur le déplacement de glissement. Ils ont conclu que le déplacement de glissement régit la réponse du cisaillement d'interface argile-béton et la déformation de cisaillement régit le cisaillement à l'interface sable argileux- béton.



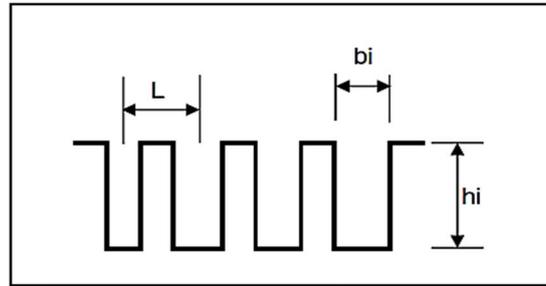
**Figure 1.26** Courbe intrinsèque obtenus par Shakir et Zhu,

Pour étudier l'effet de la texture d'interface sur la résistance au cisaillement à l'interface, Peneda et Colmenares (2011) ont conduit des essais sur des échantillons d'argile surconsolidée de Bogota (Colombie) contre des interfaces de béton (Figure 1.27). Des essais standards sol-sol ont été conduits également sur le même sol pour déterminer la résistance au cisaillement sol-sol. Dans cette étude, la rugosité a été calculée en utilisant le critère proposé par des études antérieures:

$$R = \frac{R_{no}}{L} \quad (1.6)$$

Où ;  $R_{no} = b_i/h_i \quad (1.7)$

Dans le tableau 1.5, les coefficients de rugosité des trois interfaces sont présentés.



**Figure 1.27** Paramètres de quantification de la rugosité de surface

**Tableau 1.5** Valeurs de R pour chaque type d'interface

<i>Interface</i>	<i>b<sub>i</sub> (mm)</i>	<i>h<sub>i</sub> (mm)</i>	<i>L<sub>i</sub> (mm)</i>	<i>R</i>
1	0,5	0,5	0,5	2,0
2	0,5	0,5	1,0	1,67
3	1,5	1,5	4,0	0,25

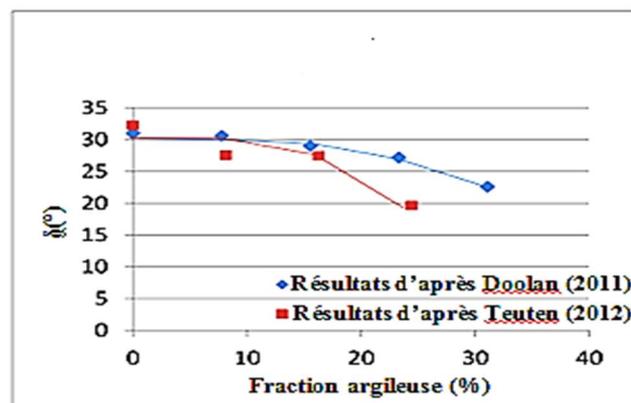
Ils ont montré que pour les échantillons caractérisés par les interfaces 1 et 2 et qui ont la même rugosité  $R_{max}$  ( $h_i = 0,5$ ), la résistance au cisaillement à l'interface est égale approximativement à la résistance au pic du sol et ne dépend pas de la texture de surface. Si la surface d'interface est très lisse et polie, la résistance à l'interface peut être inférieure à celle du sol. Ils ont postulé que le mécanisme d'interaction entre l'argile de Bogota et le béton a influé sur l'adhésion ( $c_i$ ) au lieu de l'angle de frottement dans les conditions drainés. Le tableau 1.6, présente les différentes valeurs obtenues de l'angle de frottement et l'adhésion.

**Tableau 1.6** les résultats obtenus de l'angle de frottement et l'adhésion

<i>Rugosité</i>	<i>Angle de frottement au pic (°)</i>	<i>Adhésion (kPa)</i>
<i>Sol-sol</i>	<i>17,04</i>	<i>0,5</i>
<i>Interface-1</i>	<i>17,6</i>	<i>11</i>
<i>Interface-2</i>	<i>18,3</i>	<i>13</i>
<i>Interface-3</i>	<i>13,3</i>	<i>9</i>

### 1.7.3 Effet de la fraction argileuse

Teuten (2012) a présenté les résultats d'essais de cisaillement annulaire d'interface effectués sur des échantillons, ayant une différence dans la fraction argileuse. Les résultats des essais (Figure 1.28) montrent une suite dans la tendance du pic et que l'angle de frottement d'interface diminue avec l'augmentation de la teneur des fines, ces résultats sont conformes avec les résultats de Doolan (2011) qui a déduit à partir des essais de cisaillement annulaire sur des interfaces acier et des sols de différentes fractions argileuses que l'angle de frottement d'interface diminue avec l'augmentation de la fraction argileuse.

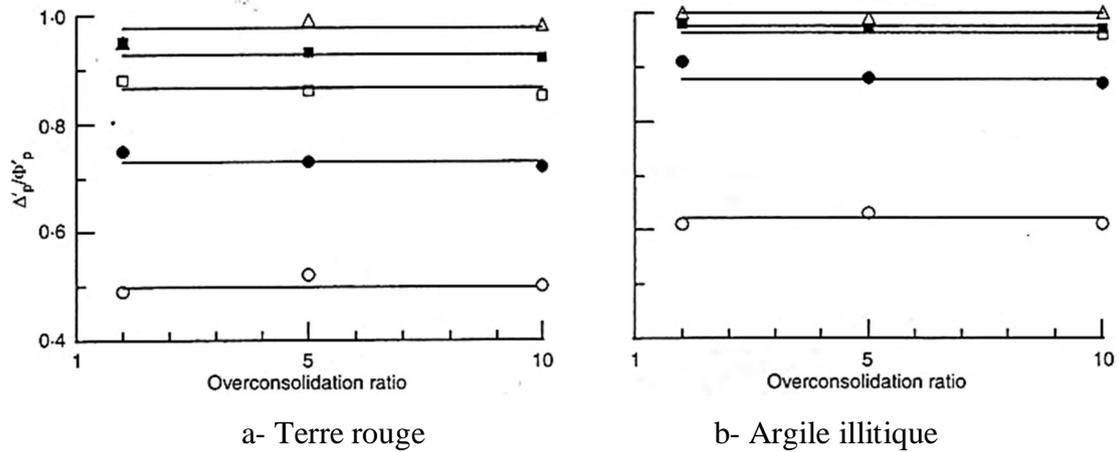


**Figure 1.28** Variation de l'angle de frottement interne en fonction de la fraction argileuse (d'après Doolan, 2011)

### 1.7.4 Effet de l'historique des contraintes

Subba Rao et al (2000) ont utilisés 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 (matériau1 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  $\phi_p'$ , est indépendant de l'indice de surconsolidation du sol (Figure 1.29).

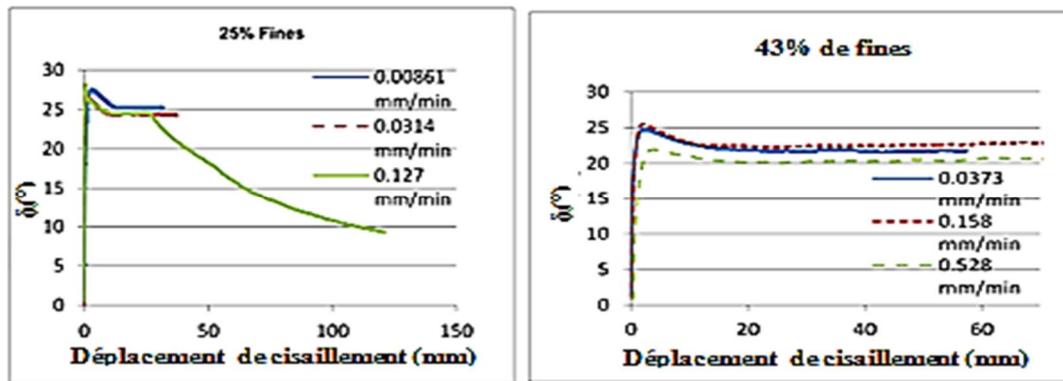


**Figure 1.29** la relation entre l'angle de frottement et l'indice de surconsolidation (d'après Subba Rao et al, 2000)

### 1.7.5 Effet de la vitesse

D'après Gibson et Henkel (1954) et confirmé par Yagi et al. (1991) et Teuten (2012), la rupture (contrainte de cisaillement au pic) se produit après un temps  $t_f$  donné par la relation:  $t_f = 12,7 \times t_{100}$ . Si  $U_t$  (mm) est le déplacement prévu pour atteindre le pic, la vitesse de cisaillement ne devrait pas dépasser  $U_t / 12,7 t_{100}$  mm/mn afin de conserver un comportement drainé.

Teuten (2012) a présenté une étude dans laquelle pour la première fois, les effets de la vitesse étaient systématiquement analysés. Les courbes de comportement illustrées sur la figure 1.30, ont montré que la résistance au cisaillement à l'interface des échantillons constitué de mélanges d'argile et de limon déterminé à la suite d'essais de cisaillement annulaire d'interface, ne semble pas avoir un effet lorsque la vitesse de cisaillement varie dans un domaine allant de  $0,00861 \text{ mm/mn}$  à  $0,127 \text{ mm/mn}$ .

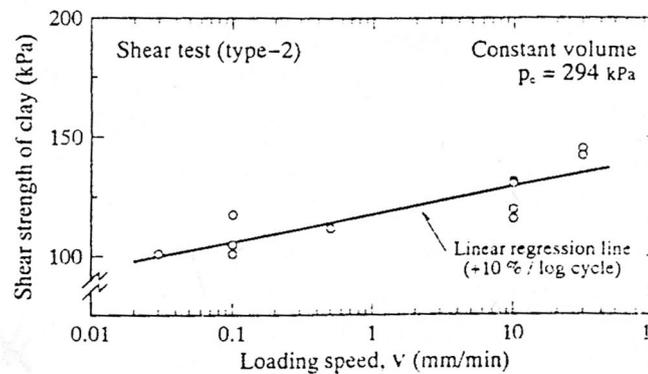


**Figure 1.30** Variation de l'angle de frottement à l'interface en fonction de la vitesse de cisaillement (d'après Teuten 2012)

Tsubakihara et Kishida (1993) ont étudié le frottement entre l'argile de Kawasaki et l'acier en utilisant la boîte de cisaillement direct. A la suite de cette étude, ils ont étudié l'influence de la vitesse de cisaillement sur la résistance au pic. Une corrélation empirique entre  $\delta_p$  et la vitesse de cisaillement a été proposé (Figure 1.31):

$$\delta_p = (10\% \times \log 2) \times v.$$

Par conséquent l'augmentation de la vitesse de cisaillement avait peu d'influence sur la résistance au cisaillement.



**Figure 1.31** Influence de la vitesse sur la résistance au cisaillement

## 1.8 Conclusions

Cette synthèse bibliographique a permis de faire le point sur les connaissances liées à la résistance au cisaillement à l'interface sols cohérents- matériaux solides. Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- 1- La résistance au cisaillement à l'interface sol - surface quelconque d'un matériau solide, est donnée par une loi de type Coulomb proposé par Potyondy (1961) qui s'écrit sous la forme :

$$\tau = c_i + \sigma_n \operatorname{tg}\delta$$

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.

3- Les études expérimentales ont permis de définir la zone d'interface en termes d'épaisseur. La zone d'interface n'existe que si la structure est rugueuse. Dans le cas de la structure lisse, le glissement a lieu au niveau de l'interface ne perturbant quasiment pas le sol.

4- Les études d'interface concernant les sols cohérents sont relativement peu nombreuses par rapport aux études traitant le comportement des sables. La résistance au cisaillement sol-matériau solide en petits déplacement est influencée par la rugosité de surface. Dans ce cas, 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, des mécanismes régissant le cisaillement à l'interface 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.

Pendant les limites définissant chaque mode ne sont pas clairement définies.

5- Les principaux facteurs influençant le comportement d'interface sont:

- La rugosité de la structure. Sous le vocable « rugosité », il faut distinguer deux notions différentes. D'une part, une rugosité partielle qui peut se comprendre comme la caractéristique de frottement de la surface, elle est due à des aspérités de la surface de matériau solide de dimension très inférieure à celle des particules.

- D'autre part une rugosité induite par une géométrie propre de la structure (texture de surface).

Le domaine de rugosité partielle a été pleinement étudié dans le passé. Mais, nous ne pouvons que constater que, hormis toutes ces dernières années, peu de travaux ont pris en compte la texture de surface et les modes de cisaillement.

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

## **CHAPITRE II Interfaces utilisées et quantification de la rugosité de surface**

### **2.1 Introduction**

La tribologie est la science des frottements. Un 'frottement' intervient lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement. La plupart de ces phénomènes peuvent se comprendre sur la base des lois du frottement énoncées dès le 18<sup>ème</sup> siècle par Amontons et Coulomb (mais déjà mises en évidence par Léonard de Vinci 200 ans auparavant), à partir de la notion de coefficient de frottement.

Il existe différentes situations dans les ouvrages de génie civil où le sol se trouve en contact avec les matériaux de construction utilisés. On a d'un côté un matériau rigide, caractérisé par sa surface et d'autre part le sol, susceptible d'avoir des comportements variés selon les sollicitations. Si le comportement du sol peut être considéré comme connu, le comportement de la zone d'interface, couche d'épaisseur variable selon la géométrie et la rugosité des interfaces, est beaucoup moins bien connue.

Une surface rugueuse est une surface qui présente des aspérités (irrégularités) à caractère micrographique et macrographique. Cette dernière comprend la rugosité qui est étymologiquement l'état d'une surface rugueuse. 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.

## 2.2 Paramètres de mesure de la rugosité

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 profil 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 calculé en prenant une moyenne arithmétique des paramètres obtenus pour chaque profil.

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.

### 2.2.1 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 :

$$R_a = \frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} |y(x)| dx \quad (2.1)$$

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 soit égale à la somme des surfaces formées en dessous. La figure 2.1, illustre la définition de ce paramètre.

$R_a$  s'écrit sous forme discrète :

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \quad (2.2)$$

Où

$N$  : Nombre de mesures de l'amplitude

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

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.

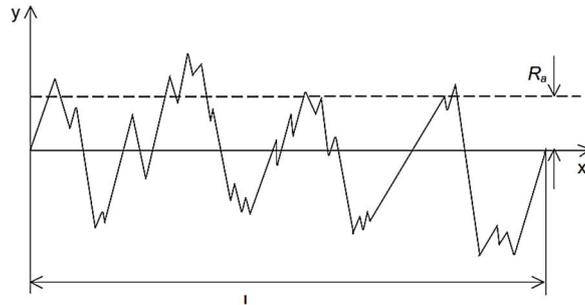


Figure 2.1 Définition du paramètre de rugosité  $R_a$

### 2.2.2 Hauteur maximal entre pic et creux ( $R_{max}$ )

Yoshimi and Kishida (1981), définirent  $R_{max}$  comme étant la différence de hauteur entre le plus haut pic et le creux le plus profond mesuré sur une longueur de  $L=2.5$  mm (Figure 2.2).

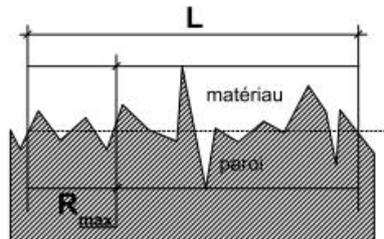


Figure 2.2 Définition du paramètre de rugosité  $R_{max}$

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

Le pic maximal mesure la distance verticale entre le plus haut pic et la ligne centrale du profil. Le creux minimal est la distance verticale entre la ligne moyenne du profil et le creux le plus bas. Comme on peut le noter :  $R_{max} = R_e + R_f$  (Figure 2.3).

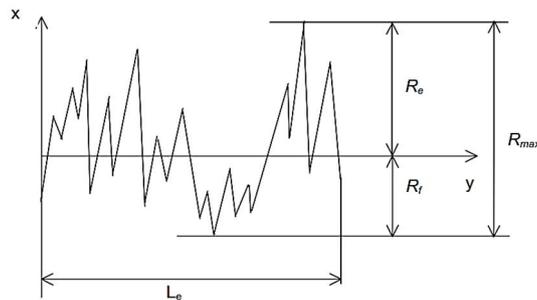


Figure 2.3 Définition des paramètres de  $R_e$ ,  $R_f$

### 2.2.4 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:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} y^2 dx} \quad (2.3)$$

Dans une forme discrète, il s'écrit :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2} \quad (2.4)$$

### 2.2.5 Valeur quadratique moyenne ou Mean Square Value (MSV)

Une autre variation du RMS est la valeur du MSV :

$$MSV = \frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} y^2 dx \quad (2.5)$$

Sous forme discrète le MSV s'écrit :

$$MSV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2 \quad (2.6)$$

### 2.2.6 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 :

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx} \quad (2.7)$$

Sous forme discrète le  $Z_2$  s'écrit :

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{(N-1)\Delta x^2} \sum_{i=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (2.8)$$

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

### 2.2.7 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  $L$ :

$$R_p = \frac{l}{L} \quad (2.9)$$

## 2.3 Quantification de la rugosité dans le cas d'interface sol-matériau solide

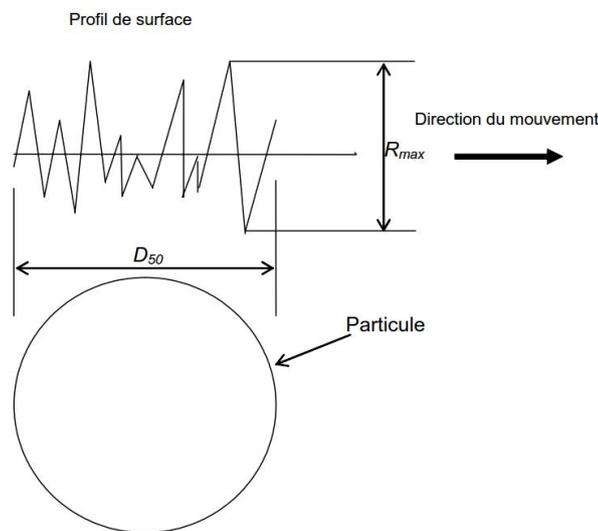
Les paramètres cités ci-dessus sont des paramètres de rugosité relative qui représentent différents aspects de la distribution spatiale des caractéristiques de surfaces.

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. À cause de cette interaction, la rugosité de surface devrait être caractérisée 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 :

### 2.3.1 Rugosité normalisée $R_n$

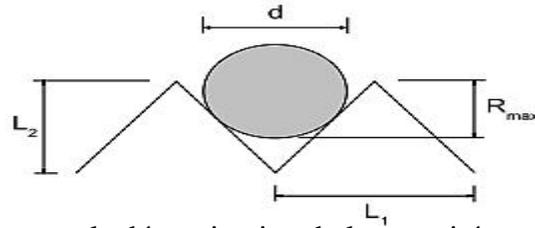
Uesugi et Kishida (1986) et Kishida et Uesugi (1987) ont observé que pour des surfaces ondulées une longueur de mesure trop grande, comme illustré sur la figure 2.4, conduit à des valeurs incohérentes de rugosité. En prenant en compte la taille des grains (pour les sables), la longueur de mesure est donc définie comme étant le diamètre moyen des particules ( $L = D_{50}$ ). Ils ont alors proposé une rugosité normalisée  $R_n$ , donnée par la relation suivante :

$$R_n = \frac{R_{max}}{D_{50}} \quad (2.10)$$



**Figure 2.4** Définition de la rugosité normalisée  $R_n$

Georg (2008) a présenté le schéma de contact entre les grains (cas du sable) et une surface selon leurs dimensions caractéristiques, diamètre  $d$  pour les grains,  $L_1$  et  $L_2$  pour la surface (Figure 2.5). Il a observé une situation limite qui distingue deux types de contacts entre les particules et la surface: le contact sur une facette et le contact sur une arête comme illustré sur la figure 2.6.



**Figure 2.5** Schéma pour la détermination de la rugosité maximale  $R_{max}$  dans la configuration expérimentale utilisée.

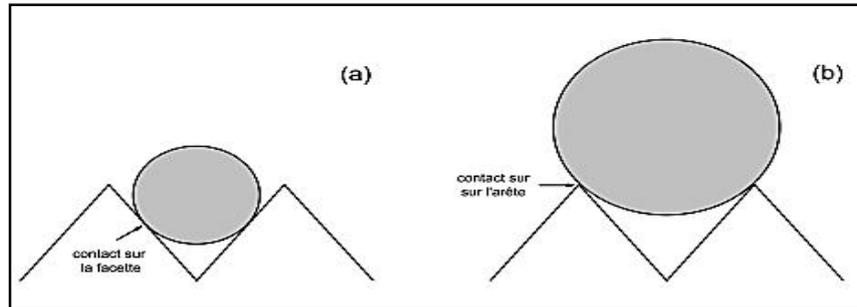
Par un raisonnement géométrique simple, il a vérifié que cette limite est atteinte

pour un diamètre qui vaut : 
$$d_{lim} = \frac{L_1}{L_2} \sqrt{\left(\frac{L_1}{2}\right)^2 + (L_2)^2} \quad (2.11)$$

Donc, la rugosité normalisée  $R_n = \frac{R_{max}}{d}$  vaut pour le système étudié .

$$R_n = \frac{L_2}{d} - \frac{1}{L_1} \sqrt{\left(\frac{L_1}{2}\right)^2 + (L_2)^2} - \frac{1}{2} \quad \text{si } d \leq d_{lim} \quad (2.12)$$

$$R_n = \frac{1}{2} - \frac{1}{d} \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_1}{2}\right)^2} \quad \text{si } d > d_{lim} \quad (2.13)$$



**Figure 2.6** Type de contacts, (a) : contact sur une facette ( $d \leq d_{lim}$ ) et (b) : contact sur une arête ( $d > d_{lim}$ )

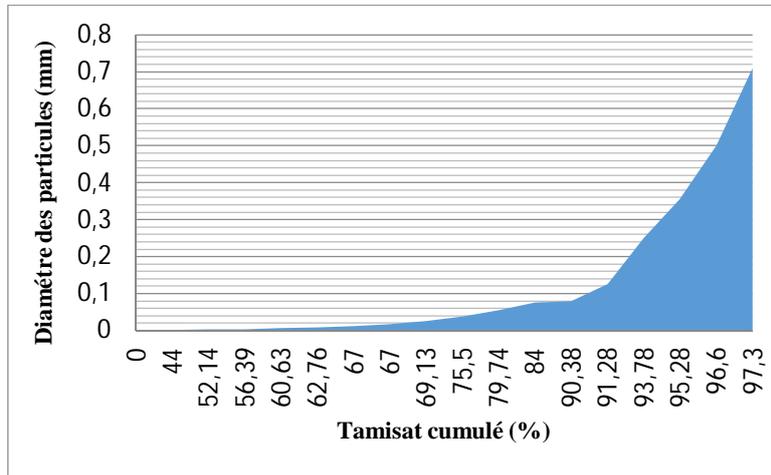
### 2.3.2 Rugosité relative R

La rugosité relative  $R$ , pouvant être adoptée pour les données relatives aux interfaces sols cohérents ou pulvérulents-matériaux solides en conditions drainées, a été reportée par Subba Rao et al. (1998; 2000). Elle 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 :

$$R = \frac{R_a}{D_{moy}} \quad (2.14)$$

Un exemple de détermination de  $D_{moy}$  est représenté ci-dessous. En se référant à la figure 2.7  $D_{moy}$  pour le sol utilisé (i.e. Argile de Guelma) est obtenu en divisant la surface située au-dessous de la courbe granulométrique par 100.

$$D_{moy} = \frac{0,3405}{100} = 0,003405 \text{ mm} = 3,4\mu\text{m}$$



**Figure 2.7** Détermination de  $D_{moy}$  pour l'argile de Guelma (CG)

## 2.4 Techniques de caractérisation morphologique

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

- Profilomètre à stylet
- Technique optique

### 2.4.1 Profilomètre à stylet

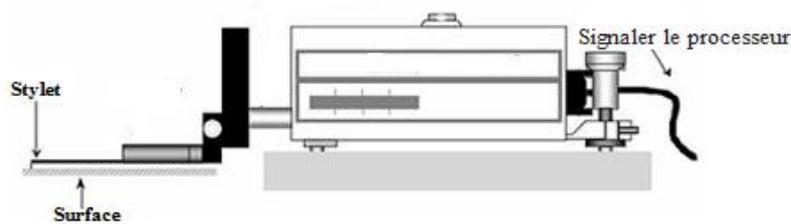
Le palpeur à base de stylet est la technique classiquement utilisée pour mesurer le relief 2D d'une surface (Figure 2.8). La plupart des stylets sont de simples diamants façonnés de manière à présenter un angle de cône et un rayon de courbure bien définis. Cette technique est généralement utilisée sur les substrats durs. La surface de l'échantillon est explorée par une pointe en diamant de forme sphérique. Chaque déplacement vertical de la pointe est amplifié puis restitué sur un enregistrement sur papier. Suite aux progrès technologiques récents dans plusieurs domaines (le micro-positionnement, l'informatique, ...), il est possible d'enregistrer les données du profil de la surface sous forme d'un fichier numérique pour les traiter ultérieurement grâce à des logiciels spécifiques. 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.

Parmi les inconvénients de cette technique, on peut citer :

- Le profil de rugosité mesurée ne constitue pas une représentation parfaite du profil réel de la surface, il représente la convolution de la forme de la pointe et celle du relief. L'erreur commise dans les creux liée au rayon de courbure de la pointe et les problèmes rencontrés quand on travaille sur des surfaces réentrantes montrent bien cette limitation,
- La force d'appui de la pointe peut influencer le résultat d'une mesure de rugosité car, si cette force est insuffisante, le stylet peut difficilement suivre le profil superficiel tout en rebondissant sur des aspérités rapprochées. Si la force d'appui est trop grande, le stylet peut endommager la surface étudiée et dans certains cas on risque de casser la pointe.

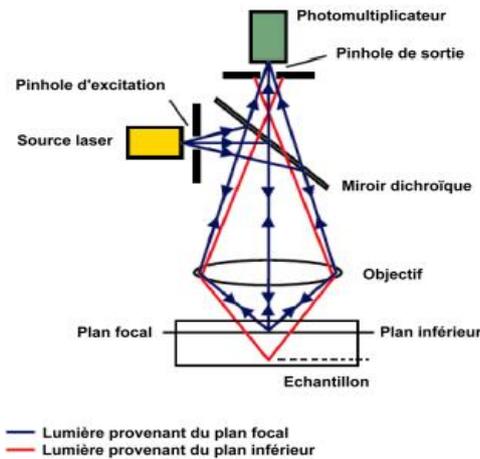
Malgré les différents inconvénients, le palpeur à base de stylet reste une technique de référence qui a montré son utilité depuis des dizaines d'années.



**Figure 2.8** Schéma d'un profilomètre classique à stylet

#### 2.4.2 Techniques optiques

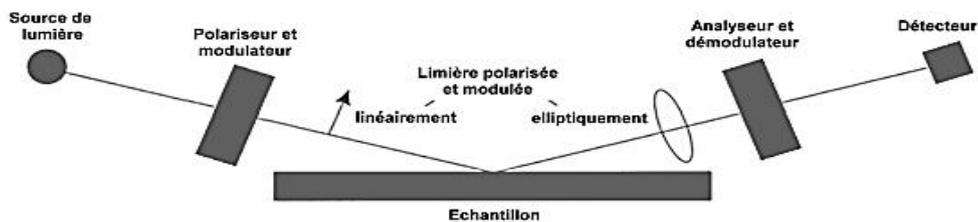
Dans la microscopie optique classique, l'image est "plate", donnant des informations dimensionnelles latérales (X et Y) mais pas axiales (Z). Le contraste de l'image provient en général des variations de la réflectivité de surface. En limitant la profondeur de champ d'un microscope optique avec un système d'éclairage et d'imagerie optimisé, la microscopie confocale permet d'obtenir des informations quantitatives sur l'axe optique (Z). Le principe du microscope confocal consiste à focaliser, par l'intermédiaire d'un objectif, un faisceau laser qui va éclairer un point de l'échantillon, puis à récupérer, sur un photomultiplicateur (Figure 2.9).



**Figure 2.9** Principe de la microscopie confocale

Un diaphragme (pinhole) placé devant le photomultiplicateur (Figure 2.10) arrête tout signal ne provenant pas du plan focal. Le signal reçu est amplifié dans le photomultiplicateur, traité afin d'améliorer le rapport signal sur bruit, puis numérisé. L'image est construite point par point grâce à un balayage (X, Y) du champ analysé à l'aide de miroirs de déflexion de la source lumineuse. Une platine motorisée déplace l'échantillon suivant l'axe Z permettant la saisie de différents plans optiques dans l'épaisseur de l'objet.

L'ellipsométrie spectroscopique est une technique optique d'analyse de surface permettant de caractériser les propriétés optiques des matériaux et/ou l'épaisseur des couches minces. Elle est fondée sur la mesure du changement de l'état de la polarisation d'un faisceau de lumière après réflexion sur une surface plane d'un échantillon.



**Figure 2.10** Principe de l'ellipsomètre à modulation de phase.

Les profilomètres à capteur laser comme illustré sur figure 2.11. 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. Le profilomètre laser est principalement constitué d'un capteur optique intégré vidéolaser équipé d'une caméra de résolution et d'un laser. 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 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. Un système d'acquisition de données, permettant de donner les coordonnées sous forme de fichiers de données (x, y, z). Ce système s'interface avec un logiciel 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

Nous avons utilisé ce type de profilomètre dans le cadre de ce travail.



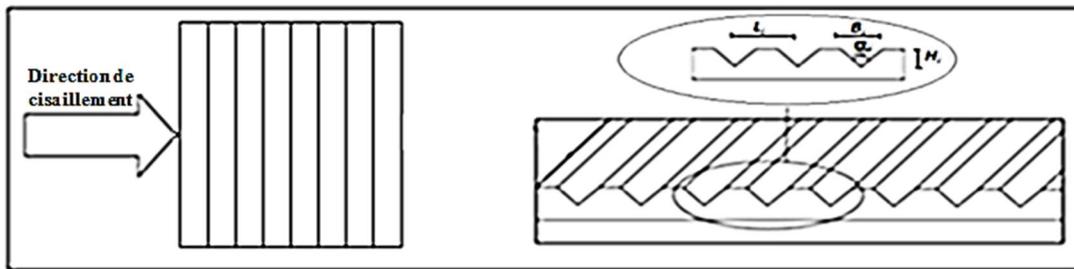
**Figure 2.11** Schéma du profilomètre 3D vidéo laser à capteur optique

## 2.5 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 et 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).

### 2.5.1 Plaque d'acier

Une série d'essais de cisaillement d'interface en utilisant des interfaces en acier doux lisse et rugueuse ont été conduits dans le but d'étudier l'effet de l'interface sol-acier sur la résistance au cisaillement. Dans cette étude, la rugosité de la surface de chaque plaque a été obtenue par fraisage, la profondeur d'impression peut être pré-réglée, en fonction des pressions exercées par les fraiseuses, pour obtenir différentes rugosités. La figure 2.12 et le tableau 2.1, donnent des détails sur les interfaces utilisées. L'interface lisse a été obtenue par rectification de plan.



**Figure 2.12** Topographie des plaques d'acier

**Table 2.1** Caractéristiques de rugosité

Interface	$B_i$ (mm)	$H_i$ (mm)	$L_i$ (mm)	$\alpha_i$
SI1	0	0	0	0
SI2	0.41	0.5	1.41	45°
SI3	0.23	0.2	2.23	60°
SI4	0.16	0.2	2.16	45°

Pour obtenir des interfaces ayant la même rugosité avec différentes textures, des fraiseuses permettant des topographies bien formées et précises ont été utilisées. Les plaques obtenues sont montrées dans les figures 2.13 et 2.14.

### 2.5.2 Plaque avec papier abrasif

Les interfaces en papier abrasif pour leur part, ont été collées sur la plaque d'acier en utilisant une couche de silicone et laissé sécher pendant 48 h environ sous une charge de 10 kg, avant d'être utilisé. Ceci renforcera le collage et empêchera tout mouvement vertical durant l'expérimentation.

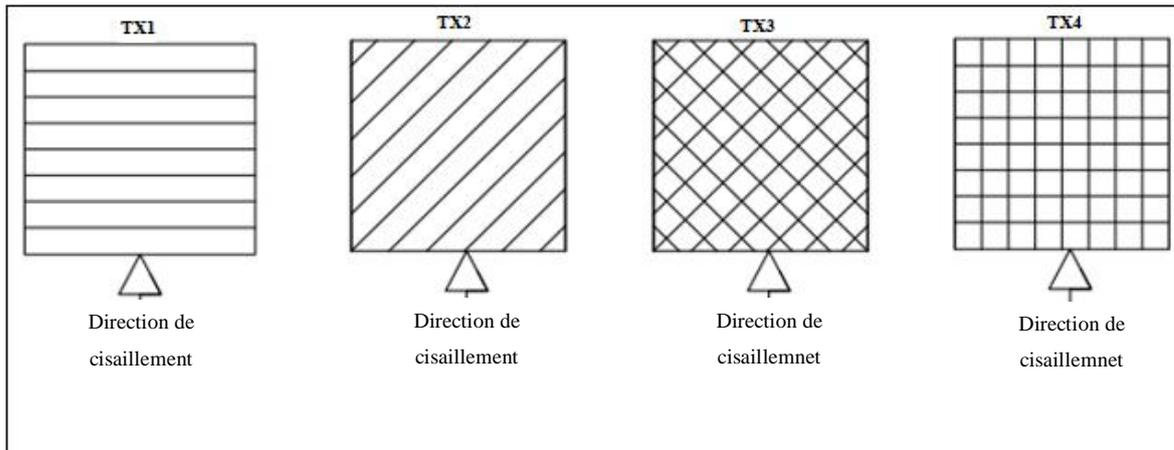


Figure 2.13 Modèles de texture d'interfaces utilisées en 2D

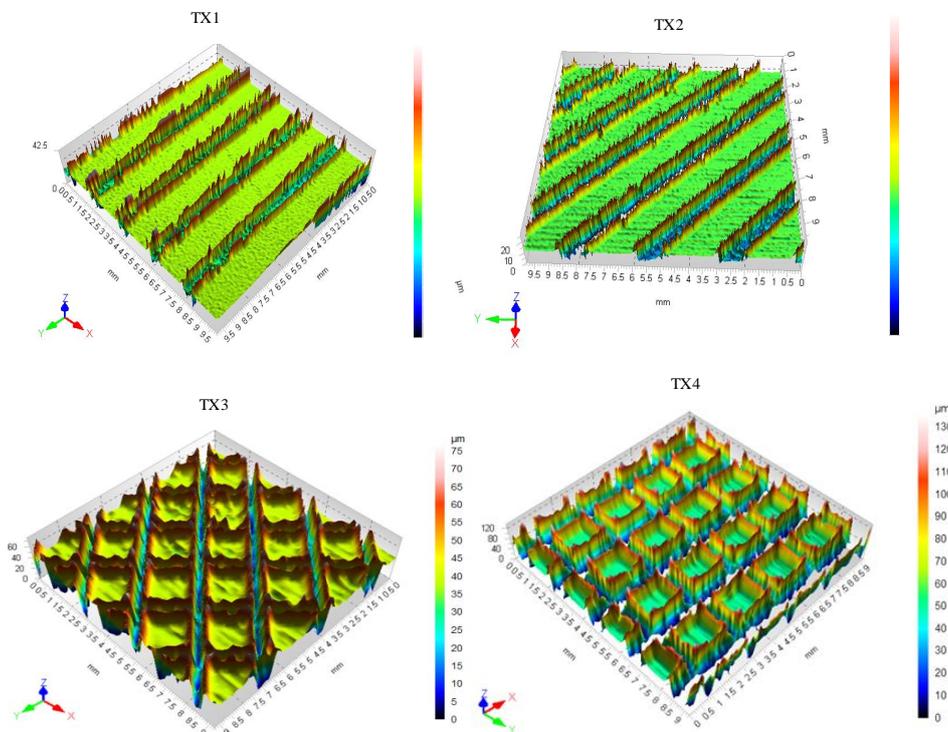


Figure 2.14 Modèles de texture d'interfaces en 3D obtenus à partir du profilomètre laser

## 2.6 Echantillonnage

Une surface d'acier ou en papier abrasif, 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 profile 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 d'acier et de papier abrasif sont supposées plus ou moins homogènes et isotropes. Ainsi différents échantillons en des endroits différents mais avec la même orientation 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 plaque est représentée par la moyenne de plusieurs valeurs de  $R_a$ .

## 2.7 Résultats des mesures de rugosité

Le tableau 2.2 donne les valeurs de la rugosité arithmétique,  $R_a$  pour les plaques utilisés. Le tableau 2.3 donne les valeurs de la rugosité relative,  $R$ . Dans ces tableaux, SI1, SI2, SI3, SI4 et TX1, TX2, TX3, TX4 représentent les interfaces d'acier et, AI1, AI2, AI3, AI4 les interfaces en papier abrasif. Pour l'ensemble des interfaces les valeurs de la rugosité moyenne sont comprises entre 0.21 et 64.94  $\mu\text{m}$ . D'autre part, la hauteur maximale entre le plus haut pic et le plus bas creux ( $R_{\text{max}}$ ) varie entre 1.37 $\mu\text{m}$  et 500  $\mu\text{m}$ . La relation entre la rugosité relative et le diamètre moyen, pour l'ensemble des interfaces utilisées et les sols mis à l'essai (qui seront présentés dans le chapitre suivant), est illustré sur la figure 2.15. 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.

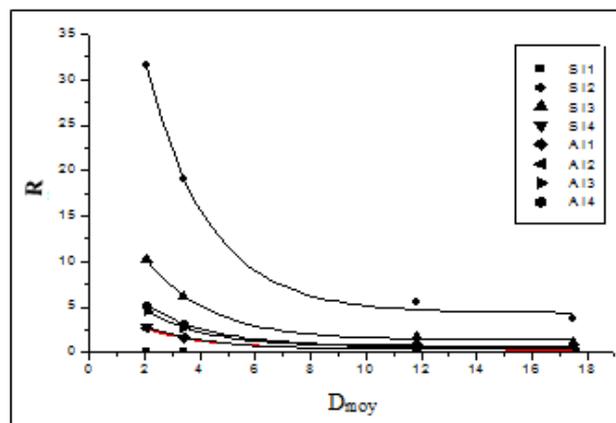
La figure 2.16 montre les profils de rugosité des surfaces typique obtenue pour l'acier. Pour permettre une bonne représentation de la forme des aspérités, l'échelle des amplitudes (distance verticale) a été exagérée par rapport à celle des distances horizontales, particulièrement pour l'interface lisse (SI1). Ces profils illustrent la différence dans la microtopographie entre les interfaces d'acier.

**Tableau 2.2** Valeurs de Ra ( $\mu\text{m}$ ) des plaques utilisés

<i>Interface en acier</i>				<i>Interface en papier abrasif</i>			
<i>SI1</i>	<i>SI2</i>	<i>SI3</i>	<i>SI4</i>	<i>AI1</i>	<i>AI2</i>	<i>AI3</i>	<i>AI4</i>
0,21	5,69	21,04	64,94	5,49	5,66	9,44	10,66

**Tableau 2.3** Valeurs de R

<b>Interfaces</b>	Kaolin1	Kaolin2	Argile de Guelma	Argile de Guelma- kaolin
<i>SI1</i>	0,012	0,102	0,062	0,018
<i>SI2</i>	3,702	31,524	19, 100	5,480
<i>SI3</i>	1,200	10,214	6,188	1,776
<i>SI4</i>	0,324	2,762	1,674	0,480
<i>AI1</i>	0,313	2,665	1,615	0,463
<i>AI2</i>	0,323	2,748	1,665	0,478
<i>AI3</i>	0,538	4,583	2,776	0,797
<i>AI4</i>	0,608	5,175	3,135	0,900



**Figure 2.15** Relation entre R et  $D_{moy}$

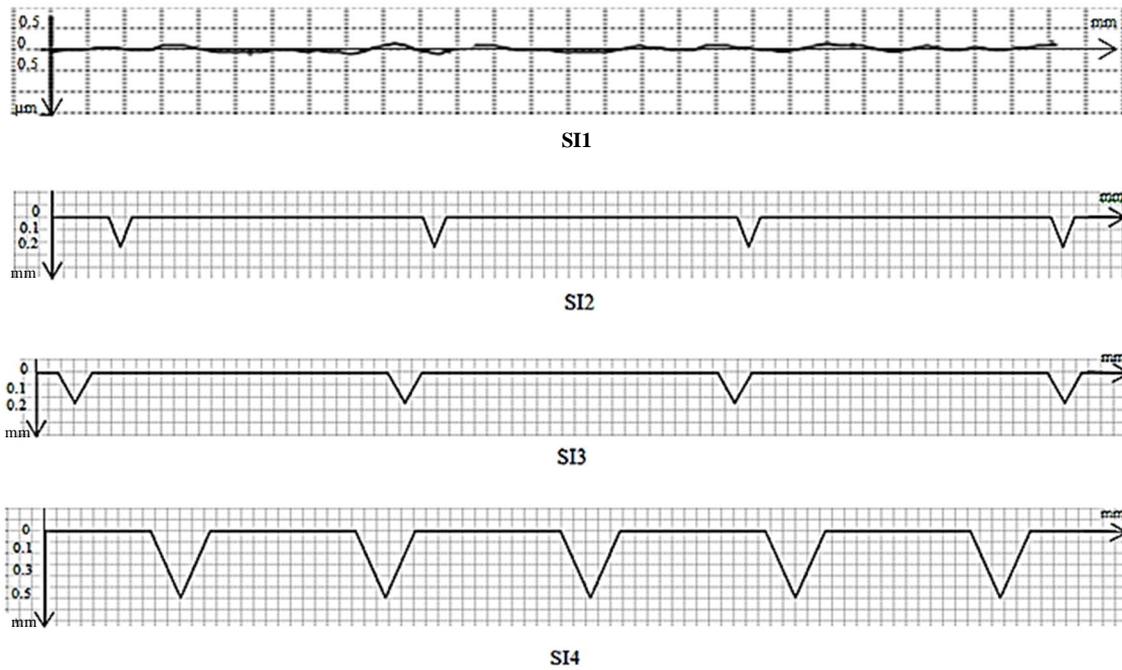


Figure 2.16 Profils de surfaces d'acier

## 2.8 Conclusions

Dans ce chapitre, on a pu fournir une synthèse des caractéristiques générales des différents paramètres de quantification de la rugosité de surface et les moyens permettant leur mesure, en particulier le profilomètre optique utilisé dans cette étude, qui a permis de mesurer avec précision les profils de rugosité obtenus pour les plaques d'acier et les plaques avec du papier abrasif utilisés dans le programme expérimental. De même les techniques d'obtention de ces plaques sont décrites. Les résultats des mesures de rugosités sont donnés, particulièrement les valeurs de  $R_a$  et  $R_z$ . Ces paramètres représentent les données qui seront utilisées lors de l'analyse des courbes de comportement.

## CHAPITRE III Modélisation du comportement d'interface

### 3.1 Introduction

La compréhension de l'aspect complexe de l'interaction sol-structure et des déformations du sol, qui en résultent permet de bien maîtriser les techniques de modélisation numérique du problème d'interaction qui se pose très souvent. La modélisation du comportement d'interface sols-structures pose beaucoup de difficultés, ceci est dû à la complexité de ce comportement et aux limites des dispositifs expérimentaux qui permettent son étude. Deux types de simulations numériques sont classiquement mises en œuvre pour l'étude du comportement d'interface. D'une part la méthode des éléments finis (FEM) et d'autre part, la méthode des différences finies (FDM), basées sur une approche de milieu continu qui permet de considérer des ouvrages dans leur globalité.

Dans ce chapitre, une étude bibliographique de modélisation de l'interface sol-structure est présentée. Elle concerne de vastes sujets abordés depuis relativement longtemps. Dans la suite une analyse numérique bidimensionnelle de cisaillement à l'interface est effectuée par la méthode des éléments finis (FEM) et la méthode des différences finies (FDM).

### 3.2 Loi d'interface et conditions aux limites

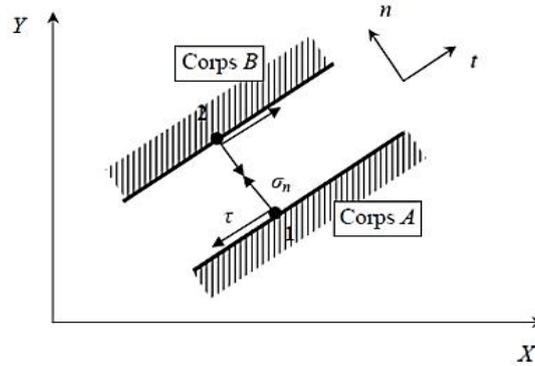
Le contact entre deux solides peut être modélisé à l'aide du modèle de contact entre deux corps. Afin de proposer une modélisation du contact, une discrétisation de la surface du contact a été effectuée. En M, on considère les deux points 1 et 2 appartenant respectivement à A et B. dans le repère local  $(\bar{t}, \bar{n})$  (Figure 3.1), les déplacements et les contraintes de liaison sont donnés:

$$\bar{U}_1 = \begin{Bmatrix} U_t^1 \\ U_n^1 \end{Bmatrix}, \bar{U}_2 = \begin{Bmatrix} U_t^2 \\ U_n^2 \end{Bmatrix}, \bar{\sigma} = \begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma_n \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

La modélisation du contact se caractérise par la vérification de certaines conditions sur la contrainte normale  $\sigma_n$  et la contrainte tangentielle  $\tau$  s'exerçant sur l'élément de contact. De cet état de contrainte  $(\sigma_n, \tau)$  résulte un état de déplacements

relatifs tangentiel et normal ( $\Delta U_t$ ,  $\Delta U_n$ ) caractérisant la cinématique de l'élément d'interface.

$$\Delta U = \begin{cases} U_t = U_t^1 - U_t^2 \\ U_n = U_n^1 - U_n^2 \end{cases} \quad (3.2)$$



**Figure 3.1** Modélisation du contact

Au cours du chargement, le contact entre les corps A et B peut évoluer (Figure 3.2). Il suit l'un des trois modes suivants:

- On appelle désormais mode adhésion; un mode qui applique un déplacement relatif nul entre les nœuds 1 et 2, et les contraintes de contact sont alors régies par les conditions (la contrainte normale est de compression et la contrainte de cisaillement est inférieure au seuil de cisaillement), les équations de compatibilité sont:

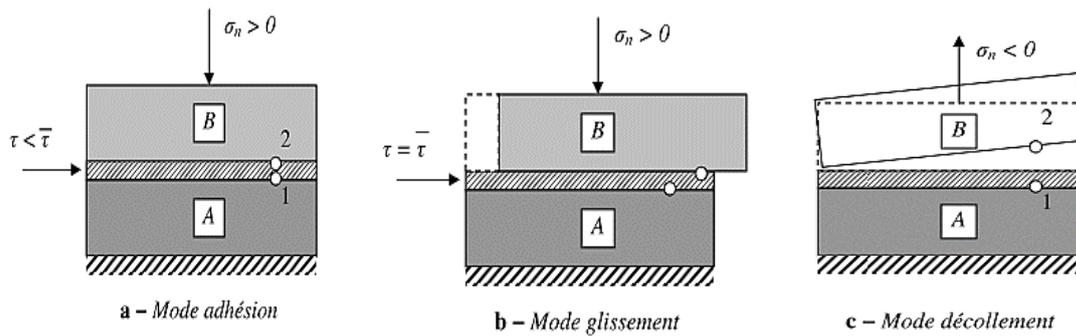
$$(1) \quad \begin{cases} \Delta U_n = 0 \\ \Delta U_t = 0 \end{cases} \quad ; \quad \begin{cases} \sigma_n > 0 \\ \tau < \bar{\tau} \end{cases} \quad (3.3)$$

- On appelle mode glissement, quand la contrainte normale est de compression et la contrainte tangentielle atteint le seuil  $\bar{\tau}$ , il y a un glissement relatif entre les nœuds 1 et 2; dans ce cas, les conditions sont présentés ci-dessous:

$$(2) \quad \begin{cases} \Delta U_n = 0 \\ \Delta U_t \neq 0 \end{cases} \quad ; \quad \begin{cases} \sigma_n > 0 \\ \tau = \bar{\tau} \end{cases} \quad (3.4)$$

- On appelle mode décollement, dans le cas où la composante  $\sigma_n$  devient négative, il y a un décollement (séparation des corps A et B), on a alors les conditions suivantes:

$$(3) \quad \begin{cases} \Delta U_n > 0 \\ \sigma_n < 0 \\ \tau = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$



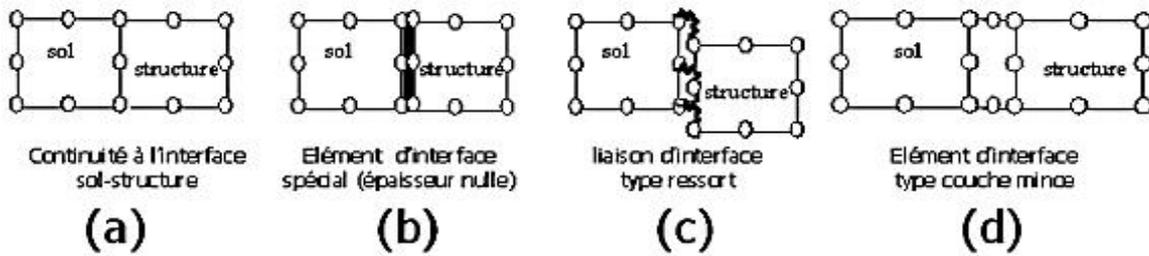
**Figure 3.2** Modes de déformation de l'interface : a) mode d'adhésion, b) mode glissement, c) mode décollement

### 3.3 Modélisation du comportement d'interface par la méthode des éléments finis

Pour les ouvrages géotechniques, la modélisation des contacts par éléments finis est une opération délicate, à cause des grandes dimensions que présentent les surfaces de contact et de la dilatance de l'interface au cours du cisaillement. Même dans le cas où on négligerait la dilatance, la programmation des algorithmes de résolution des éléments de contact demeure difficile (Zheng et al. 2004). Une étape importante dans la simulation du comportement de l'interface concerne la représentation de l'élément d'interface souvent sous forme d'éléments spéciaux par la méthode des éléments finis. Dans une interaction sol-structure, le mouvement relatif entre le sol et la structure peut se produire. L'utilisation d'éléments continus habituels, avec compatibilité des déplacements, empêche le mouvement relatif entre le sol et la structure. La compatibilité nodale de la méthode des éléments finis oblige le sol et la structure à se déplacer ensemble. C'est pour cela que des éléments d'interface spéciaux sont utilisés. Les avantages principaux de l'utilisation des éléments d'interface sont la possibilité de faire varier le comportement constitutif de l'interface et de permettre le mouvement relatif entre le sol et la structure. Dans ce cadre, beaucoup de méthodes ont été utilisées pour modéliser le comportement de l'interface sol-structure sous forme d'éléments spéciaux par éléments finis. Les travaux proposés par différents auteurs appartiennent à l'une des deux approches (Figure 3.3):

1. Approche de type contact: L'interface n'a pas d'épaisseur, elle doit seulement reproduire les propriétés des surfaces de discontinuité.
2. Approche de type couche mince: Dans ce cas l'interface a une certaine épaisseur. On est alors conduit à définir une déformation pour l'interface dans cette partie.

Nous allons dans ce qui suit, procéder à la présentation de ces deux approches. Les différentes lois de comportement proposées et les techniques numériques employées seront également présentées.

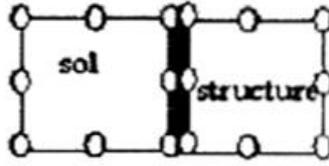


**Figure 3.3** Discretisation numérique du problème de contact sol-structure (Potts et Zdravkovic 1999 ; Potts et al. 2002)

### 3.3.1 Approche de type contact

Cette approche a fait l'objet de nombreux travaux qui sont essentiellement basés sur l'élément joint. Les éléments sans épaisseur sont aussi appelés éléments joints ou "zero thickness éléments (Figure 3.4). Ils ont été initialement développés par Goodman et al. (1968) et présentent 4 nœuds et 8 degrés de liberté. Ces éléments ont subi plusieurs améliorations. Pour ces éléments, les déplacements relatifs entre les nœuds sont les principales variables de déformation. Certains défauts associés aux éléments sans épaisseur ont été signalés, notamment en termes d'effort normal à l'interface (Sharma et Desai 1992). Le problème des points plastiques singuliers a également été abordé (Van Langen et Vermeer 1991). D'autres auteurs qui ont utilisé des éléments d'interface sans épaisseur (Day et Potts 1994, 1998), ont noté des problèmes de conditionnement numérique lorsque  $K_n$  et  $K_t$  dépassent 100 E. De plus, lorsqu'il y a un grand changement dans la matrice de rigidité dû à l'utilisation d'une interface non dilatante, des problèmes dans la convergence peuvent subvenir dans le cas d'une solution de type Newton-Raphson pour laquelle la matrice de rigidité élastique est considérée constante; dans ce cas, les auteurs préconisent l'utilisation d'une rigidité élastoplastique tangente à chaque étape de l'analyse, ce qui accélérerait la convergence. Enfin, l'utilisation des points d'intégration de Gauss peut aussi causer des problèmes numériques liés au fait que le déplacement relatif des nœuds affecte la contrainte en chaque point d'intégration qui est différent des nœuds; ce problème peut être évité avec la méthode d'intégration de Newton Cotes où les points d'intégrations coïncident avec les nœuds. D'autre part, l'épaisseur nulle peut entraîner des singularités

numériques dans le comportement de l'élément; ceci peut être évité en lui attribuant, pour le calcul, une épaisseur très faible (Mestat 2001).



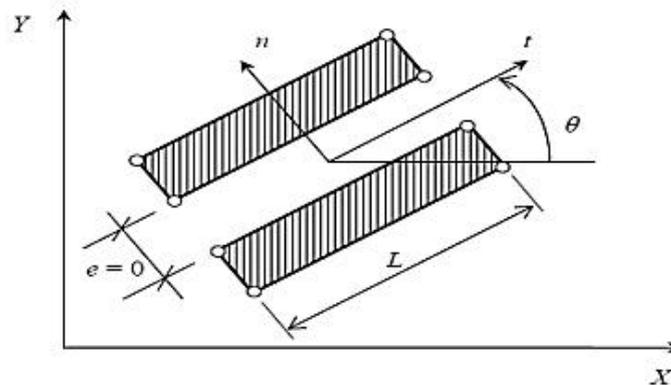
**Figure 3.4** Éléments d'interface sans épaisseur

Selon le type de loi de comportement et le type d'approche numérique utilisé, les études proposées dans ce cadre appartiennent à l'une des catégories suivantes:

- adaptation de la rigidité
- loi élasto-plastique
- loi incrémentale
- contact avec des conditions supplémentaires

### 3.3.1.1 Adaptation de la rigidité

Goodman et al (1968) ont proposé pour la simulation des fissures dans les roches un élément spécial de longueur  $L$  et d'épaisseur nul (Figure 3.5).



**Figure 3.5** Élément joint de type Goodman

Dans ce cas, l'élément joint est constitué de deux doubles nœuds, sa matrice de rigidité est formulée à partir de la minimisation de l'énergie potentielle, en substituant les déformations à l'intérieur de l'élément par les déplacements relatifs à l'interface. Le vecteur de force de liaison  $[F]$  par unité de longueur de l'élément est donné par loi de type :  $[F] = [K] \times [\Delta U]$

$$\text{Avec: } [F] = \begin{Bmatrix} F_t \\ F_n \end{Bmatrix} \text{ et } [\Delta U] = \begin{Bmatrix} \Delta U_t \\ \Delta U_n \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

$[K]$  : est la matrice de rigidité donné par:  $[K]=\begin{Bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_t \end{Bmatrix}$

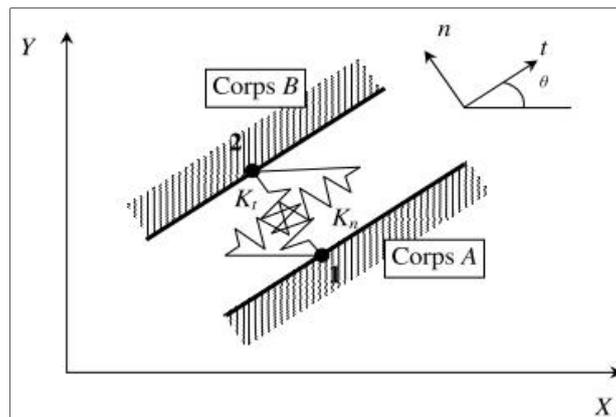
$K_n$  et  $K_t$ : sont respectivement la rigidité normale et tangentielle qui peut être déterminées à partir des équations suivant:

$$K_n = \frac{\sigma_n}{\Delta U_n} \quad (3.7)$$

$$K_t = \frac{\sigma_t}{\Delta U_t} \quad (3.8)$$

La matrice de rigidité globale du système est obtenue par l'assemblage des termes correspondant aux éléments rocheux et d'interface. Après la résolution du système d'équations régissant le problème, les contraintes de liaison sont calculées et la méthode d'adaptation de la rigidité est appliquée.

Herrmann et Wolfskill (1966) ont proposé des éléments de type ressort pour la modélisation du comportement de l'interface acier-béton. Ils ont dédoublé les points de contact entre les deux milieux, et ont muni chaque doublet de nœuds de deux ressorts fictifs, un tangentiel et un normal à la surface de contact (Figure 3.6). Ces ressorts de rigidités appropriées contrôlent le glissement et le découlement entre les corps en contact. Le glissement est défini à l'aide du critère de rupture de Mohr-Coulomb, et la méthode d'adaptation de la rigidité est employée pour décrire le comportement de cet élément.



**Figure 3.6** Élément joint de type ressort

### 3.3.1.2 Lois élastoplastique

Des chercheurs ont utilisé, pour le calcul des fondations des plateformes pétrolières, des éléments joints à 6 nœuds. Le comportement à l'interface, dans le sens tangentiel, est décrit par une loi élastoplastique non associée du type Mohr-Coulomb.

Le glissement ou la plastification dans l'élément joint est gouverné par une fonction de charge  $F$  et un potentiel plastique  $g$ :

$$F(\sigma_n, \tau) = |\tau| - \sigma_n \operatorname{tg}\varphi - c \quad (3.9)$$

$$g(\sigma_n, \tau) = |\tau| - \sigma_n \operatorname{tg}\psi \quad (3.10)$$

Où :  $\varphi$ ,  $c$  et  $\psi$  sont respectivement l'angle de frottement, la cohésion et l'angle de dilataance

Ce modèle peut être représenté par une courbe de rupture, de cisaillement élastique parfaitement plastique, une courbe de compression- non traction et une courbe de dilataance, comme le montre la figure 3.7.

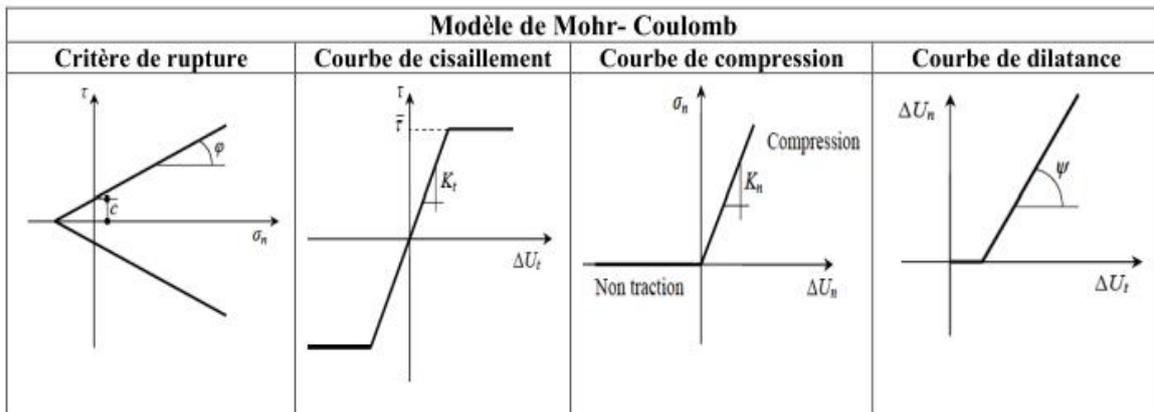


Figure 3.7 Critère de Modèle de Mohr Coulomb

### 3.3.1.3 Loi incrémentale

Les principes des travaux développés dans le cadre de cette approche sont ceux de l'équipe de MASTEC de l'institut de mécanique de grenoble, les auteurs ont développé une loi vectorielle bidimensionnelle indépendance directionnelle pour le comportement de l'interface. Leur modèle a été identifié sur des essais de cisaillement direct modifié.

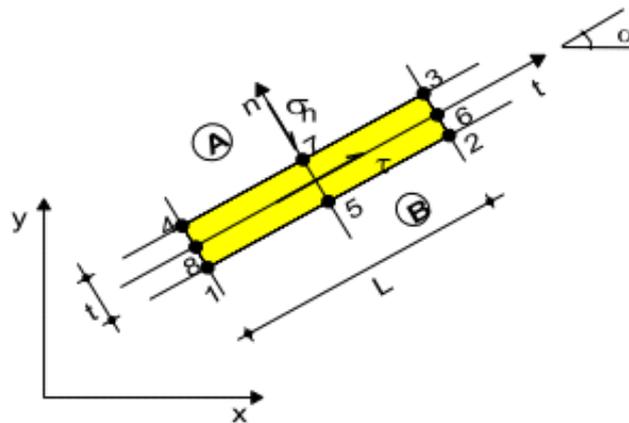
### 3.3.1.4 Contact avec des conditions supplémentaires

Ce type d'approche est fondé sur l'introduction des différentes conditions de contact dans la formulation des éléments joints

- Approche par la méthode de sous structure;
- Approche à l'aide de multiplicateur de Lagrange

### 3.3.2 Approche de type couche mince

Le concept de couche mince ou "thin layer element" a été abordé par Desai et al. (1984), qui ont considéré que la réponse de l'interface devrait être traitée par un modèle constitutif approprié. La formulation de l'élément type couche mince est basée sur l'hypothèse que l'interface peut être remplacée par un élément de massif équivalent avec une petite épaisseur et une loi constitutive spéciale. L'utilisation de l'élément couche mince est longuement traité dans la littérature (Pande et Sharma 1979; Zaman 1985; Desai et Ma 1992; Sharma et Desai 1992 ; De Gennaro 1999 ; Karabatakis et Hatzigogos 2001 ; De Gennaro et Frank 2005). Dans cette approche, l'interface est constituée d'une zone de faible épaisseur. Ainsi, on adopte des lois de comportement rhéologique propres à ces zones.



**Figure 3.8** Élément d'interface isoparamétrique à 8 nœuds (De Gennaro et Frank 2005)

Pour adapter les éléments finis type couche mince à la description du comportement mécanique de l'interface, l'élément doit permettre de simuler le mécanisme de cisaillement en considérant les contraintes normales et tangentielles à l'interface. D'autre part, la loi de comportement associée à l'élément doit permettre de relier ces contraintes à l'interface aux déplacements associés. L'avantage des éléments couche mince est de pouvoir utiliser des éléments finis massif isoparamétriques. Cependant, des considérations particulières doivent être accordées à ces éléments, notamment en ce qui concerne les valeurs du rapport de forme (rapport de la plus grande dimension de l'élément sur sa plus petite dimension,  $L/t$ ) (Figure 3.8).

### 3.3.3 L'outil de simulation numérique PLAXIS2D

Le logiciel PLAXIS est l'un des programmes d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves).

Conçu par des géotechniciens numériques, le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique dans l'analyse pseudostatique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard, avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangle à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc). Du point de vue pratique le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple et agréable, car l'opérateur ne s'encombre pas l'esprit outre mesure. L'ensemble des options par défaut (conditions aux limites) rend la mise en données aisée et rapide. Enfin, les options simplifiées (initiation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller droit au but (prévoir le comportement d'un ouvrage), quitte à réaliser ultérieurement, avec le même code et les mêmes données, un calcul affiné.

#### 3.3.3.1 Les options par défaut et les solutions approchées

Le système d'option par défaut et de solutions approchées spécifiques, qui est un des fers de lance de l'outil de projet pour la géotechnique, est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassants, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel. Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent. Chaque branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.

Les options par défaut commencent dès le maillage: L'opérateur peut bien entendu spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci

important, le détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds clé, avec contrôle permanent à l'écran.

De même en ce qui concerne les conditions aux limites en déplacements: si celles-ci sont complexes, l'ingénieur devra en spécifier les subtilités d'une manière précise, face de bloc par face de bloc. Par contre, si elles ont un caractère standard (vecteur déplacement nul à la base du domaine étudié et vecteur déplacement horizontal nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec contrôle immédiat du résultat à l'écran.

L'application des contraintes initiales dues au poids des terres peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre. Par contre, si comme bien souvent en géotechnique on connaît ou on sait estimer un état  $K_0$  donné, celui-ci peut être spécifié directement. Dans ce cas, le massif est souvent en léger déséquilibre (incompatibilité entre  $K_0$  et les autres caractéristiques mécaniques). Le menu permet alors, par un chargement fictif nul, de rééquilibrer le massif, puis de réinitialiser à zéro le champ de déplacement de manière à prendre comme nouvelle origine l'état du matériau après application de la gravité. L'option  $K_0$  est particulièrement intéressante (et réaliste) dans le cas d'un modèle hétérogène de surface libre presque horizontale.

Les pressions interstitielles ont été l'objet d'un soin particulier dans PLAXIS: Pour qui souhaite faire un calcul précis du champ de pressions interstitielles en régimes permanent ou transitoire, c'est possible grâce au module d'écoulements en milieu poreux. Mais bien sûr, cette opération demande du temps (d'opérateur et de machine). Si la nappe phréatique n'est pas trop éloignée de l'horizontale, dans ses états initial et final, on sait que la pression diffère peu de la pression hydrostatique ; si l'on adopte ces champs de pression approchée, les calculs deviennent très simples puisqu'il s'agit seulement de manier les variations de la poussée d'Archimède; PLAXIS offre cette possibilité qui est souvent très appréciable.

La conduite des calculs non linéaires constitue un autre exemple de la souplesse d'utilisation que procure ce logiciel: L'opérateur peut évidemment faire lui-même ses choix de taille d'étape de chargement, de nombre d'étapes, de rigidité d'interface, de méthode de résolution, ... etc. ; s'il ne désire pas assumer ces choix, le logiciel peut les décider à sa place, compte tenu de l'expérience des numériciens en la matière. Pour les calculs de consolidation, réalisés en différences finies explicites sur le

temps, le choix du pas de temps peut également être décidé par l'utilisateur, ou bien calculé dans l'option par défaut, selon les critères numériques connus.

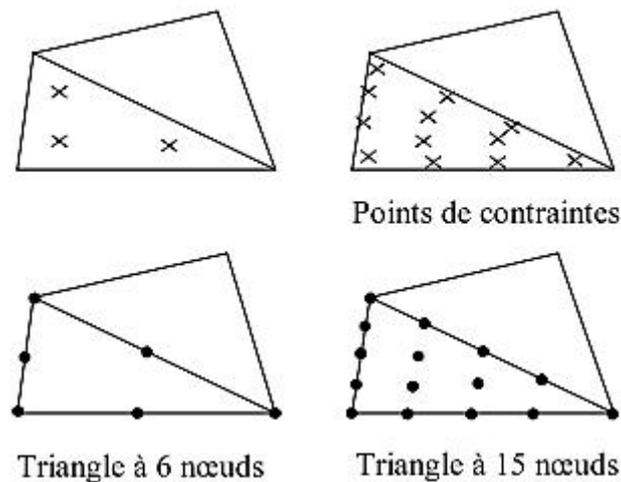
Le coefficient de sécurité est une notation peu magique en géotechnique, puisqu'il résume en une seule information une quantité considérable de données. L'approche classique évalue généralement ce nombre selon la théorie de l'équilibre limite, supposant une réduction proportionnelle généralisée de la résistance mécanique des matériaux impliqués, ce qui ne constitue manifestement pas un scénario réel de rupture. C'est la même approche, adaptée aux éléments finis élasto-plastique, qui préside à l'évaluation du coefficient de sécurité dans PLAXIS. Le critère de rupture est ici qualitatif, et laissé à l'appréciation de l'observateur ; en tout état de cause, il est fondé sur le niveau de déplacement d'un point de contrôle lié à l'ouvrage étudié. Le champ de déplacement obtenu est évidemment tout à fait fictif.

Un calcul par éléments finis fournit une masse imposante de résultats: Des résultats directement utiles au projeteur: déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et des résultats plus mathématique concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit. L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on est intéressé par l'un ou l'autre aspect ; c'est également un système de menu arborescent qui permet de sélectionner les informations souhaitées.

### **3.3.3.2 Influence du maillage**

L'utilisateur du PLAXIS doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou à 15 nœuds pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume (Figure 3.9). L'élément par défaut de PLAXIS est le triangle à 6 nœuds. Il fournit des interpolations du second ordre pour les déplacements. La matrice de rigidité des éléments est évoluée par intégration numérique en utilisant au total trois points de Gauss (point de contrainte). Le triangle à 6 nœuds est un élément relativement précis donnant de bons résultats pour les analyses standard en déformation, à condition d'utiliser un nombre suffisant d'éléments. Cependant, il faut être prudent dans le cas de modèles axisymétrique où une rupture (possible) est à prendre en compte, comme un calcul de capacité portante ou le calcul de coefficient de sécurité selon la méthode de phi-C reduction. Les charges à la rupture et les coefficients de sécurité sont généralement surévalués avec des éléments à 6 nœuds.

Pour le triangle à 15 nœuds, l'interpolation est d'ordre quatre, et l'intégration nécessite douze points de contrainte. Le triangle à 15 nœuds est un élément très précis qui a produit des résultats en contraintes de haute qualité sur différents problèmes, comme par exemple le calcul de la rupture de sols incompressibles. L'utilisation des triangles à 15 nœuds implique une consommation de mémoire assez élevée, et les calculs et la manipulation sont donc un peu ralentis.



**FIGURE 3.9** Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol

### 3.3.3.3 *Modèle de comportement*

Les modèles de comportement de sols sont très nombreux: depuis le modèle élastique-plastique de Mohr-Coulomb jusqu'aux lois de comportement les plus sophistiquées permettant de décrire presque tous les aspects du comportement élasto-visco-plastique des sols, aussi bien sous sollicitation monotone que cyclique. Ces modèles ont été développés dans le but d'être intégrés dans des calculs par éléments finis.

#### 3.3.3.3.1 *Modèle élastique linéaire*

Ce modèle représente la loi de Hooke pour l'élasticité linéaire et isotrope. Le modèle comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'Young,  $E$ , et le coefficient de Poisson  $\nu$ . Le modèle linéaire élastique peut être utilisé surtout pour modéliser des éléments de structure en béton ou en métal en interaction avec le sol et pour certains problèmes de mécanique des roches.

### 3.3.3.3.2 Modèle de Mohr - Coulomb (MC)

Le modèle de Mohr-Coulomb représente le comportement élastique parfaitement plastique sans écoulement, il est généralement utilisé comme première approximation du comportement du sol. C'est un modèle à 5 paramètres, dont 2 paramètres élastiques:  $E$  et  $\nu$  et 3 paramètres de rupture ( $c$ ,  $\phi$  et  $\psi$ ), qui sont des paramètres classiques de la géotechnique, souvent fournis par des essais de laboratoires. Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque (Figure 3.10) est représentée par :

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \quad (3.11)$$

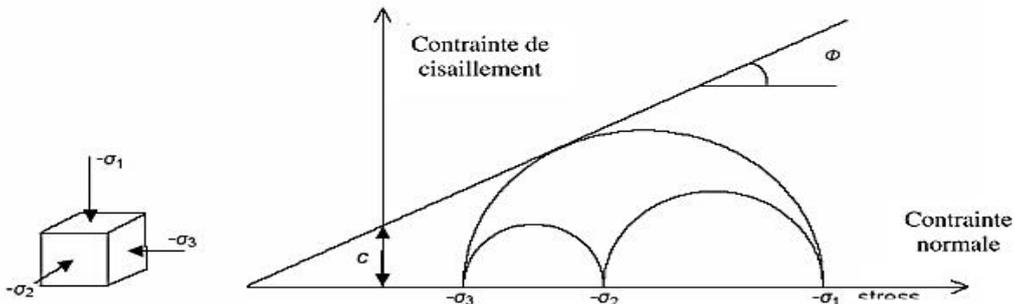


Figure 3.10 Courbe intrinsèque de Mohr-Coulomb

Le critère de Mohr-Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice (Figure 3.11), sur l'hexagone de Mohr-Coulomb.

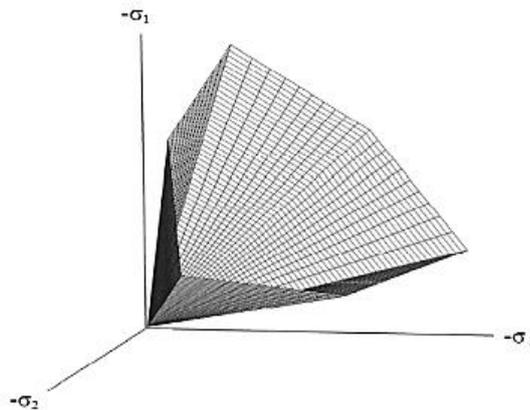


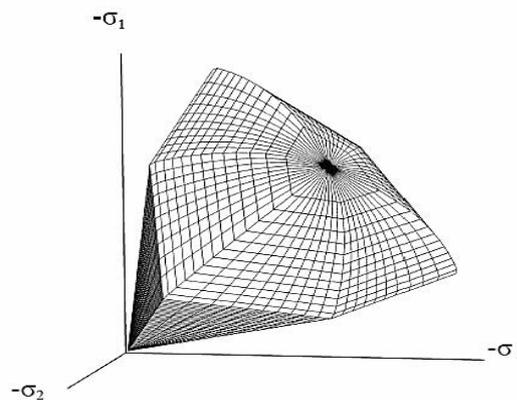
Figure 3.11 Surface de rupture du modèle de Mohr-Coulomb pour un sol sans cohésion

### 3.3.3.3.3 Modèle de sol avec écoulement (Hardening Soil Model HSM)

Le HSM est un modèle avancé pour simuler le comportement des différents types de sol, les sols mous, et les sols rigides. Lorsque les sols sont soumis au

chargement déviatorique primaire, ils présentent une rigidité décroissante et simultanément, il se développe des contraintes plastiques irréversibles. Le HSM cependant remplace de loin le modèle hyperbolique, premièrement en employant la théorie d'élasticité, deuxièmement en incluant la dilatance du sol et troisièmement en introduisant une limite d'écoulement. Ce modèle du deuxième ordre permet de simuler le comportement des sables, des graves, mais aussi de sols plus mous comme les argiles et les limons. Les paramètres du HSM sont: paramètres de Mohr Coulomb ( $c$ ,  $\varphi$  et  $\psi$ ) et paramètres de rigidité ( $E_{50}^{ref}$ : Module sécant dans un essai triaxial,  $E_{oed}^{ref}$ : Module tangent dans un essai œdométrique, et  $m$ : puissance, environs 0.58 pour les sables et 1 pour les argiles molles. D'après Von Soos ( $0.5 < m < 1.0$ )).

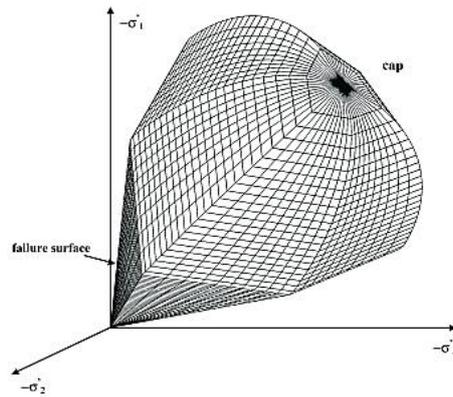
La surface de rupture est présentée sur la figure 3.12 pour un sol non cohérent.



**Figure 3.12** Surface de rupture du modèle de HSM pour un sol sans cohésion

#### 3.3.3.3.4 *Modèle pour sols mous (Soft Soil Model SSM)*

Ce modèle est dérivé du modèle de Cam Clay qui a été développé à Cambridge par Roscoe et al (1965). L'idée de base de ce modèle est de prendre en compte l'effet d'écrouissage que provoque sur les argiles la pression moyenne. Sous l'effet d'une pression moyenne, la teneur en eau diminue et l'argile devient plus résistante. Il s'agit d'un modèle élasto-plastique avec une surface de charge. Sous la surface de charge le matériau reste élastique, tandis que le point représentatif de l'état de contrainte effectif atteint une valeur non réversible. Une surface de plasticité, associée, limite l'espace entre les espaces admissibles et non admissibles. Les paramètres nécessaires au SSM sont: paramètres de Mohr Coulomb ( $c$ ,  $\varphi$  et  $\psi$ ), l'indice de compression  $\lambda^*$ , et l'indice de gonflement  $k^*$ . La surface de rupture est présentée sur la figure 3.13.



**Figure 3.13** Surface de rupture du modèle de SSM

#### 3.3.3.3.5 *Modèle pour sols mous avec effet du temps (Soft Soil Creep Model SSCM)*

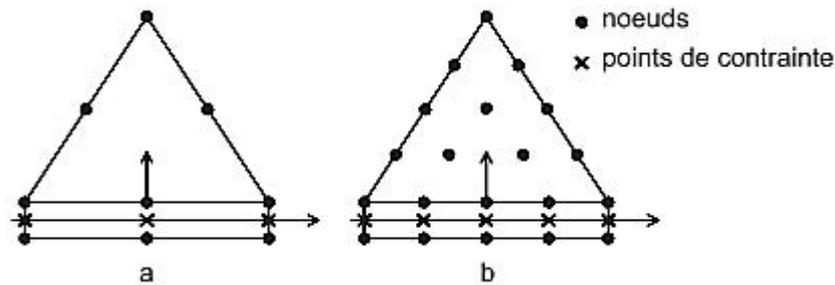
Le SSCM permet de prendre en compte l'écroutissement des argiles molles mais pas la consolidation secondaire: celles-ci se traduisent par une évolution de la déformation axiale dans un essai œdométrique en fonction du temps, après la fin de la consolidation primaire. Cette déformation évolue en fonction du logarithme du temps (au moins pour les échelles de temps observables). Elle génère ce qui est appelé la quasi-préconsolidation dans des sols déposés depuis longtemps. Les paramètres nécessaires au SSCM sont: paramètres de Mohr Coulomb ( $c$ ,  $\phi$  et  $\psi$ ), et les paramètres de consolidation (l'indice de compression  $\lambda^*$ , et l'indice de gonflement  $k^*$ , et indice de fluage  $\mu^*$ ).

#### 3.3.3.4 *Modèle de comportement de l'interface dans PLAXIS*

Les interfaces sont utilisées pour modéliser les interactions entre les structures et le sol. Les interfaces sont composées d'éléments « Interface ». La figure 3.14 montre comment les éléments d'interface sont connectés aux éléments du sol. Si les éléments de sol à 6 nœuds sont utilisés, les éléments d'interface correspondant sont définis par trois paires de nœuds, alors que pour les éléments de sols à 15 nœuds, les éléments d'interface sont définis par cinq paires de nœuds. Sur la figure, les éléments d'interface sont montrés avec une épaisseur finie, mais dans la formulation des éléments finis, les coordonnées de chaque paire de nœuds sont identiques, ce qui signifie que les éléments ont une épaisseur nulle.

Chaque interface a une « épaisseur virtuelle » qui lui est assignée ; c'est une dimension imaginaire utilisée pour obtenir les propriétés du matériau de l'interface. Cette épaisseur virtuelle est définie comme le produit du facteur d'épaisseur virtuelle

(virtual thickness factor) par la taille moyenne de l'élément. La taille moyenne de l'élément est déterminée par le réglage de la précision du maillage. La valeur par défaut du facteur d'épaisseur virtuelle est de 0,1. Cette valeur peut être changée en double cliquant sur la ligne géométrique et en sélectionnant l'interface dans la boîte de dialogue. Toutefois, des précautions doivent être prises en changeant le facteur par défaut. Cependant, si des éléments d'interface sont sujets à des contraintes très importantes, il peut être nécessaire de réduire l'épaisseur virtuelle.



**Figure 3.14** Distribution des nœuds et des points de contrainte dans les éléments d'interface et jonction avec les éléments du sol

### 3.3.3.4.1 Facteur réducteur de l'interface ( $R_{inter}$ )

Un modèle élasto-plastique permet de décrire le comportement des interfaces dans la modélisation des interfaces sol-structures. Le critère de Coulomb est utilisé pour distinguer le comportement élastique, ou de petits déplacements peuvent apparaître aux interfaces, et le comportement élastique, pour lequel des glissements permanents peuvent se produire.

Pour les interfaces ayant un comportement plastique, la contrainte tangentielle  $\tau$  est donnée par :

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \delta + c_i \quad (3.12)$$

Les caractéristiques de résistance de l'interface sont liées aux propriétés de résistance de la couche de sol. Chaque jeu de données inclut un facteur de réduction de la résistance pour les interfaces ( $R_{inter}$ ). Les caractéristiques de l'interface sont calculées à partir des propriétés du sol associé et du facteur de réduction de la résistance, en

$$\text{suivant les règles suivantes : } \begin{cases} c_i = R_{inter} \times c & (3.13) \\ \operatorname{tg} \delta = R_{inter} \times \operatorname{tg} \varphi & (3.14) \\ \delta = R_{inter} \times \varphi & (3.15) \end{cases}$$

Avec:  $0,01 \leq R_{inter} \leq 1$

L'angle de dilatance est donné par la relation suivante :

$$\psi_i = \begin{cases} 0 & R_{inter} < 1 \\ \psi_{sol} & R_{inter} = 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Dans PLAXIS, la résistance de l'interface peut être définie par deux types :

- **Rigide**

Dans ce cas, l'interface n'influence pas la résistance du sol avoisinant et ne doit donc pas subir de réduction de ses caractéristiques. Ces interfaces doivent être déclarées et on considère une valeur  $R_{inter} = 1$ . Ainsi, les propriétés de l'interface, y compris l'angle de dilatance  $\psi_i$ , sont identiques aux propriétés du sol excepté le coefficient de Poisson  $\nu$ .

- **Manuelle**

En général, pour des interactions réelles entre le sol et un élément de structure, l'interface est plus faible et plus déformable que la couche de sol associée, ce qui signifie que la valeur de  $R_{inter}$  est inférieure à 1 (l'approche de type contact est utilisé). Des valeurs représentatives de  $R_{inter}$  dans le cas d'interactions entre différents types de sols et de structures peuvent être trouvées dans la littérature. En l'absence d'informations plus détaillées, il est classique de prendre pour le coefficient  $R_{inter}$  la valeur (2/3) pour un contact sable-acier et la valeur (1/2) pour des contacts argile-acier ; les interactions avec du béton donnent des valeurs légèrement supérieures. Des valeurs de  $R_{inter}$  supérieures à 1 ne devraient normalement pas être utilisées.

### 3.4 Modélisation du comportement d'interface par la méthode des différences finies

La méthode des différences finies est l'une des plus anciennes méthodes de résolution numérique d'un système d'équations différentielles. Pour des conditions initiales et des conditions aux limites données, la solution est unique. La plupart des méthodes utilisant les différences finies adoptent une discrétisation du milieu en mailles rectangulaires exclusivement. L'approche retenue par Itasca est basée sur la méthode de Wilkins (1964), qui permet de formuler les équations des différences finies pour des éléments quelconques. On peut leur donner n'importe quelle forme aux limites et, faire varier les propriétés d'un élément à l'autre. Dans la méthode des différences finies, toute dérivée est directement remplacée par une expression algébrique décrite en termes de variations en des lieux discrets de l'espace.

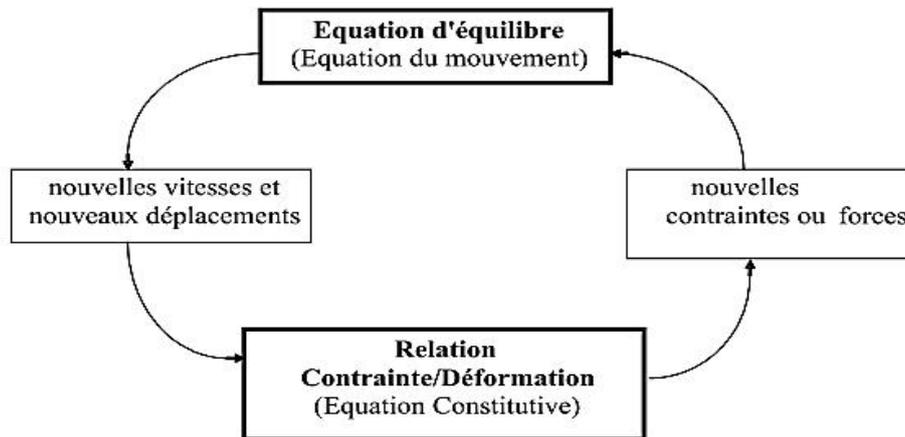
### 3.4.1 L'outil de simulation numérique FLAC

Le logiciel FLAC est un code de calcul aux différences finies explicites basé sur une formulation numérique appelée «méthode des éléments lagrangiens» (Billaux et Cundall, 1993). Il permet la résolution de problème en contrainte-déformation dans un milieu continu. En tout point du massif, le tenseur des contraintes et des déformations est connu, ce qui permet de visualiser les phénomènes en jeu. Le programme est basé sur la méthode des différences finies: les variables sont connues en des lieux discrets de l'espace et il n'est pas nécessaire de stocker une matrice de rigidité globale de grande taille. Les équations sont reformulées à chaque pas.

#### 3.4.1.1 Schéma de résolution explicite

La méthode de résolution adoptée par FLAC consiste en une application non traditionnelle de la méthode des différences finies explicites, contrairement aux schémas de résolution implicites généralement adoptés. L'objectif de cette méthode est de traiter un problème statique par l'intermédiaire de la dynamique. Dans la réalité, une partie de l'énergie de déformation accumulée par le système est convertie en énergie cinétique qui va se propager et se dissiper dans le matériau environnant. Le schéma de résolution explicite intègre ce phénomène en prenant en compte les équations dynamiques du mouvement. Le déséquilibre induit en une zone va se propager dans l'ensemble du massif. De plus, le mode incrémental de résolution du système assure la stabilité du schéma numérique puisque même si le système est instable à certains instants, les chemins de contrainte et de déformations sont respectés à chaque pas. La figure 3.15 précise la séquence de calcul utilisée pour un pas de temps  $\Delta t$ .

Dans chaque boîte, toutes les variables à traiter sont remises à jour à partir de valeurs connues qui doivent, elles, rester fixes durant la période de calcul  $\Delta t$ . C'est le principe fondamental de la résolution explicite. Ainsi, le calcul de nouvelles contraintes n'affecte pas les vitesses calculées dans la boîte précédente. Cette hypothèse est justifiée par Itasca Consulting Group (2005) en relativisant le problème: en effet, si un pas de temps  $\Delta t$  d'une durée assez petite est choisi, de manière à ce que l'information ne puisse pas passer d'un élément à l'autre au cours de cet intervalle de temps, des éléments voisins ne pourront pas s'influencer pendant une période de calcul. Tout ceci se base sur l'idée que la vitesse de l'onde de calcul est toujours supérieure à celle des ondes physiques, ce qui permet de figer les valeurs connues et utilisées pendant la durée  $\Delta t$ .



**Figure 3.15** Séquence de calcul Flac, d'après Itasca (2005)

Les équations du mouvement sont utilisées pour calculer de nouvelles vitesses et donc de nouveaux déplacements à partir des contraintes et des forces en jeu. Cette méthode, possède plusieurs avantages importants et un grand inconvénient, surtout qu'aucune itération n'est nécessaire pour calculer les contraintes à partir des déformations dans l'élément, même si la loi de comportement est fortement non linéaire d'où des grandes déformations et de grands déplacements peuvent être pris en compte avec quasiment aucun calcul supplémentaire. Dans le cas des méthodes implicites (M.E.F.), chaque élément communique avec tous les éléments durant une étape de solution, beaucoup d'itérations sont nécessaires avant d'avoir la compatibilité et l'équilibre. On peut voir que le désavantage des méthodes explicites est la condition sur le pas de temps. Avec un pas de temps imposé très petit, il peut être nécessaire d'effectuer un grand nombre de pas avant d'arriver à la solution statique. De ce fait, la méthode explicite est bonne pour le comportement des systèmes non linéaires, les grandes déformations et les instabilités physiques, elle est mauvaise pour les problèmes de modélisation linéaire et de petites déformations.

### **3.4.1.2 Formulation numérique en différences finies: passage du problème continu à la discrétisation**

En deux dimensions, le milieu continu est discrétisé en quadrilatères, chacun d'eux étant divisé en deux paires d'éléments triangulaires (a, b, c et d) à déformation uniforme comme indiqué sur la figure 3.16. La force exercée sur un nœud est la moyenne des forces pour les deux paires de triangles, ce qui permet d'assurer une réponse symétrique à un chargement symétrique.

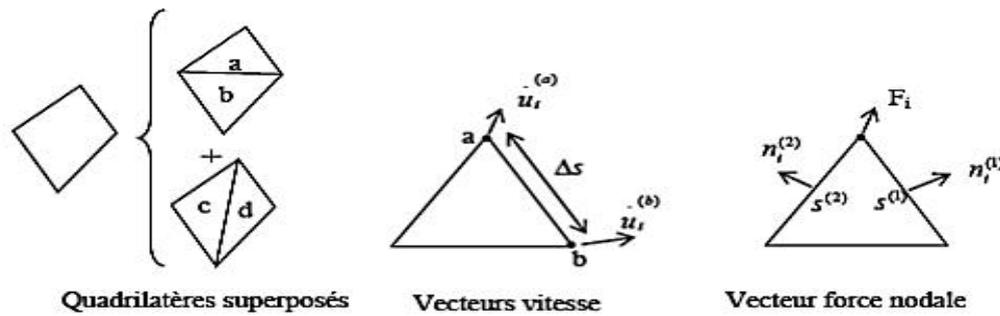


Figure 3.16 Discretisation mixte

L'utilisation d'éléments triangulaires élimine le problème de déformation non restreintes qui se pose avec les éléments quadrilatères à déformation uniforme. Ce problème, pour les polygones à plus de trois sommets, tient au fait qu'il existe des combinaisons de déplacements nodaux qui ne produisent aucune déformation, et donc ne sont restreints par aucune force. Un autre problème de la modélisation des matériaux en plasticité n'est pas résolu par utilisation d'éléments triangulaires. Il s'agit de la formulation de la condition d'incompressibilité lors de l'écoulement plastique. En effet, pour les problèmes axisymétriques ou en déformation planes, cette condition introduit une restriction cinématique dans la direction perpendiculaire au plan d'étude. Les éléments sont alors «surcontraints» (nombre d'équation supérieur au nombre d'inconnues), ce qui donne lieu à des prédictions erronées et optimistes des chargements de rupture. Ce problème est résolu en utilisant la discrétisation mixte.

La discrétisation mixte consiste à adopter des discrétisations différentes pour les parties isotropes et déviatoriques des tenseurs de contraintes et de déformation. Les parties isotropes des tenseurs de contraintes et de déformation, sur lesquelles s'applique la condition d'incompressibilité, sont supposés constantes sur l'ensemble d'un quadrilatère, alors que les deux parties déviatoriques sont traitées séparément dans les deux triangles.

### 3.4.1.3 Analyse Lagrangienne

Dans la méthode proposée, les coordonnées des nœuds peuvent être facilement réactualisées à chaque pas de temps, et le maillage se déforme avec le matériau qu'il représente. La formulation est donc «Lagrangienne», par opposition à la formulation «Eulérienne», pour laquelle le maillage reste fixe. L'intérêt de la méthode Lagrangienne est qu'elle permet de traiter facilement des problèmes en grandes déformations.

### 3.4.1.4 Formulation numérique

La conception de formulation de FLAC est similaire à la relaxation dynamique proposée par Otter et al. (1966) avec adaptation à des maillages arbitraires en suivant l'approche de Wilkins (1964).

#### 3.4.1.4.1 Equation du mouvement

A chaque nœud, on additionne les forces dues à tous les quadrilatères dont il fait partie, le vecteur force résultant  $\Sigma F_i$  inclut également les chargements éventuels (conditions aux limites et forces de volumes) et les forces de gravité. Les forces de gravité  $F_i^{(g)}$  sont calculées par:

$$F_i^{(g)} = g_i \cdot m_g \quad (3.17)$$

Avec:  $m_g$  est la masse gravitationnelle au nœud, définie par le 1/3 de la somme des masses des triangles connectés au nœud.  $\Sigma F_i$  étant la force nette non équilibrée au nœud.

Si le système est en équilibre, ou en état d'écoulement (plastique), la résultante des forces nodales  $\Sigma F_i$  doit être égale à zéro. En plus le nœud doit être accéléré en accord avec la forme des différences finies de la 2<sup>ème</sup> loi de Newton de mouvement.

$$U_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = U_i^{t-\Delta t/2} + \Sigma F_i^t \frac{\Delta t}{m} \quad (3.18)$$

Où les indices supérieurs indiquent l'instant où la variation est évaluée.

En grandes déformations, l'équation 3.18 est de nouveau intégrée pour calculer les nouvelles coordonnées du nœud.

$$X_i^{(t+\Delta t)} = X_i^{(t)} + U_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} \Delta t \quad (3.19)$$

#### 3.4.1.4.2 Amortissement

L'équation de mouvement doit être amortie pour donner des solutions statiques ou quasi-statiques (sans inertie). L'objectif de FLAC est d'arriver à un état stationnaire (équilibre ou écoulement permanent) dans un schéma numérique stable avec le minimum de cycles. A chaque nœud, est imposée une force d'amortissement dont le module est proportionnel au module de la force nette non équilibrée, et dont la direction est telle qu'elle produit toujours un travail négatif.

### 3.4.2 Méthodologie de simulation avec FLAC

Afin d'installer un modèle pour réaliser une simulation avec Flac, il faut suivre les étapes logiques suivantes:

- Définir la géométrie;
- Introduire les modèles de comportement;
- Introduire les éléments de structure, s'il y a lieu;
- Préciser les conditions aux frontières;
- Application du poids propre, s'il y a lieu;
- Résoudre pour calculer les contraintes initiales au repos;
- Remettre à zéro les déplacements;
- Introduire le chargement;
- Résoudre ou appliquer le nombre de cycles requis;
- Examiner de la réponse du modèle;
- Puis, introduire les modifications requises etc.

Quoique FLAC soit originalement développé pour les ouvrages en géotechnique et les constructions de mines, il offre une large gamme de possibilités de résoudre des problèmes complexes en mécanique. Plusieurs modèles sont disponibles permettant la simulation de force non-linéaire et de réponse irréversible. En plus, FLAC est enrichi par:

- Des éléments d'interface permettant la simulation des surfaces pour lesquelles un glissement et/ou un décollement peut se produire;
- Déformation plane, contrainte plane et axisymétrie géométrique;
- Des modèles d'écoulement souterrain et de consolidation (couplés ou non);
- Des modèles des éléments de structures pour la simulation des supports de structures: le revêtement des tunnels, les clous de terre ou de roches et les tirants;
- Option pour les analyses en dynamiques;
- Option de modèles de fluage;
- Option thermique (couplage thermique-contrainte..).

### 3.4.3 Modèles de comportement

Les modèles de comportement utilisés par le logiciel FLAC sont nombreux (modèle nul, élasticité linéaire et non linéaire, Mohr-Coulomb, Hoek Brown, Dracker-

Prager, écoulement positif/négatif, modèle à deux surfaces d'écoulement « Double Yield » et Cam-Clay modifié).

### 3.4.3.1 *Modèle nul (matériau excavé)*

Le modèle de matériau nul est utilisé pour représenter les zones de sol excavées, les contraintes dans un matériau nul sont automatiquement prises égales à zéro ( $\sigma_{ij}^N = 0$ ).

### 3.4.3.2 *Modèle élastique*

Le modèle élastique fournit la plus simple représentation du comportement du matériau. Ce modèle est valide pour des matériaux homogènes, isotropes et continus et qui présentent un comportement linéaire en contrainte - déformation, sans hystérésis au déchargement.

Dans ce modèle élastique, les incréments de déformation engendrent les contraintes selon la loi linéaire inverse de Hooke :

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G\Delta\varepsilon_{ij} + \alpha_2\Delta\varepsilon_{kk}\delta_{ij} \quad (3.20)$$

Où est appliquée la sommation d'Einstein,  $\delta_{ij}$  est le symbole delta Kronecker, et  $\alpha_2$  est une constante du matériau liée au module de compressibilité  $K$ , et au module de cisaillement  $G$  par :

$$\alpha_2 = K - \frac{2}{3}G \quad (3.21)$$

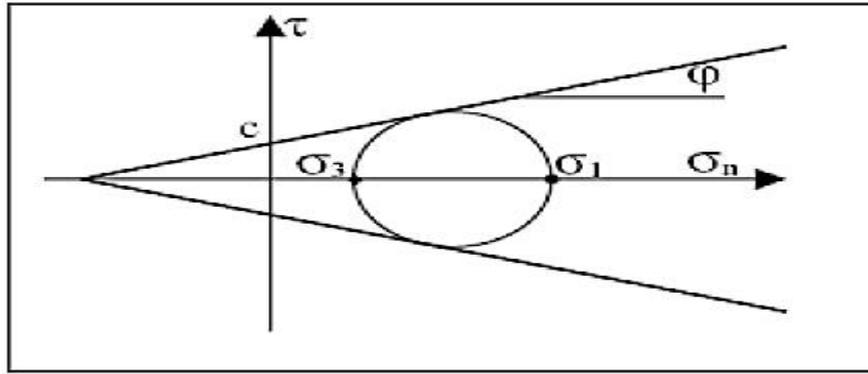
### 3.4.3.3 *Modèle de Mohr Coulomb*

Le modèle de Mohr-Coulomb est le modèle conventionnel utilisé pour représenter la rupture par cisaillement dans les sols et les roches. Cette loi de comportement se caractérise par une élasticité linéaire isotrope de Hooke ( $E$ ,  $\nu$ ), une surface de charge  $F(\sigma_{ij})$  et un potentiel plastique  $g(\sigma_{ij})$ . C'est un modèle à 5 paramètres. Dont 2 paramètres élastiques ( $E$  et  $\nu$ ) et 3 paramètres de rupture ( $c$ ,  $\varphi$  et  $\psi$ ).

Dans le plan de Mohr, la forme de la courbe enveloppe de ce critère est une droite appelée droite de Coulomb d'équation :

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan\varphi \quad (3.22)$$

La représentation de ce critère dans le plan de Mohr est donnée par la figure 3.17. La contrainte intermédiaire  $\sigma_2$  n'intervient pas dans sa formulation. Dans le cas d'un matériau purement cohérent ( $\varphi = 0$ ), on dit qu'il s'agit du critère de Tresca.

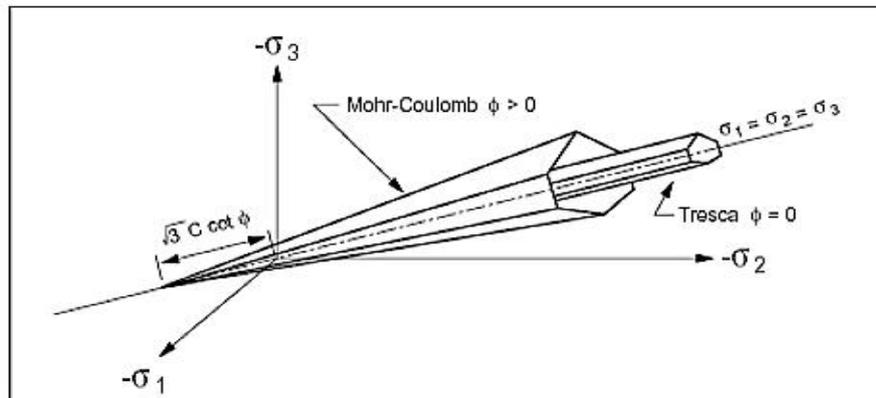


**Figure 3.17** Représentation du critère de Mohr-Coulomb dans le plan de Mohr

Dans l'espace des contraintes principales, la surface définie par la fonction de charge est une pyramide dont l'axe est la trisectrice, comme illustré sur la figure 3.18. Sa section dans le plan déviatoire est un hexagone irrégulier, comparable à celui du critère de Tresca (qui est un cas particulier de Mohr Coulomb lorsque  $\phi = 0$ ).

L'expression analytique d'un des plans de la pyramide, en fonction des contraintes principales, est donnée par :

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_1 - \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \sigma_3 - \frac{2c\cos\phi}{1-\sin\phi} \quad (3.23)$$



**Figure 3.18** Comparaison des critères de Mohr-Coulomb et Tresca dans l'espace des contraintes principales d'après Itasca (2000)

Le potentiel plastique de cisaillement correspond à une loi d'écoulement non associée décrite par l'équation :

$$g(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_1 - \frac{1+\sin\Psi}{1-\sin\Psi} \sigma_3 \quad (3.24)$$

### 3.4.3.4 Modèle de Drucker-Prager

Le modèle élasto-plastique de Drucker-Prager est utile pour modéliser les argiles molles avec des valeurs basses de l'angle de frottement. Cependant ce modèle

n'est généralement pas recommandé pour des applications à des matériaux géologiques. Il est essentiellement inclus ici pour permettre d'effectuer la comparaison avec les résultats d'autres programmes numériques.

#### **3.4.3.5 *Modèle radoucissant- durcissant***

Le modèle radoucissant-durcissant permet la représentation du comportement non linéaire radoucissant et durcissant basé sur des variations prévues des propriétés du modèle de Mohr-Coulomb (cohésion, angle de frottement, dilatance...) comme fonction de la déformation plastique déviatorique.

#### **3.4.3.6 *Modèle modifié de Cam Clay***

Le modèle modifié de Cam Clay peut être utilisé pour représenter les matériaux tels que les argiles molles, quand l'influence des changements de volume sur la plus part des propriétés et sur la résistance au cisaillement doivent être pris en considération.

#### **3.4.3.7 *Modèle de Hoek-Brown***

Le critère de rupture de Hoek-Brown caractérise l'état de contrainte qui conduit à la rupture dans les roches et les masses rocheuses intactes. La surface de rupture est non-linéaire et est basée sur la relation entre la plus grande et la plus petite contrainte principale. Le modèle inclut une loi d'écoulement plastique qui varie comme une fonction du niveau de contrainte limité.

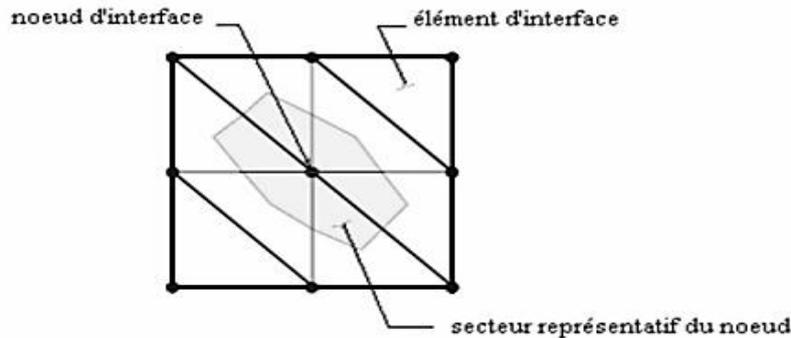
### **3.4.4 *Modèle de comportement de l'interface dans FLAC***

Les éléments d'interface sont utilisés pour représenter de manière simplifiée le comportement des joints ou les couches minces, et les liaisons entre éléments de structure et éléments sol-roche.

FLAC<sup>2D</sup> représente des interfaces d'éléments triangulaires (éléments d'interface), dont chacun est défini par trois nœuds (nœuds d'interface). Des éléments d'interface peuvent être créés à n'importe quel emplacement dans l'espace. Généralement, des éléments d'interface sont fixés à une face de la surface d'une zone; deux éléments triangulaires d'interface sont définis pour chaque face quadrilatérale de zone. Des nœuds d'interface sont alors créés automatiquement à chaque sommet d'élément d'interface. Quand une autre surface de modèle entre en contact avec un élément d'interface, le contact est détecté au nœud d'interface, et est caractérisé par des rigidités normales et de cisaillement, et des propriétés de glissement. Chaque élément

d'interface distribue son secteur à ses nœuds. Chaque nœud d'interface a un secteur représentatif associé. L'interface entière est ainsi divisée en nœuds actifs d'interface représentant la surface totale de l'interface.

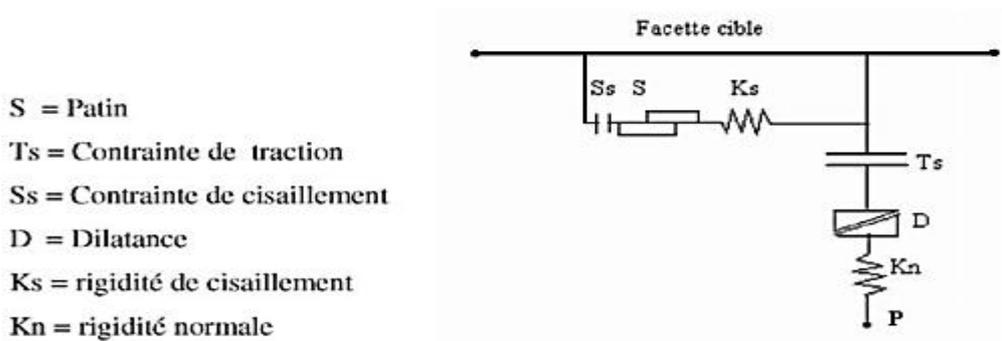
La figure 3.19 illustre la relation entre les éléments d'interface et les nœuds d'interface et le secteur représentatif lié à un nœud individuel.



**Figure 3.19** Distribution de secteurs représentatifs à nœuds d'interface

La relation fondamentale de contact est définie entre le nœud d'interface et une face de surface de zone, également connu sous le nom de face de cible. La direction normale de la force d'interface est déterminée par l'orientation de la force de cible.

Le modèle constitutif est défini par un critère de résistance au cisaillement de Coulomb qui limite la force de cisaillement agissante à un nœud d'interface, des rigidités normale et de cisaillement, des contraintes de traction et de cisaillement, et un angle de dilatance qui cause une augmentation de la force normale effective sur la facette cible après que la limite de résistance de cisaillement soit atteinte. La figure 3.20 illustre les composants du modèle constitutif agissant au nœud d'interface (P).



**Figure 3.20** Détail des composants d'un élément d'interface

Trois options sont disponibles pour spécifier le comportement de l'interface :

1- Interfaces collées: l'interface reste élastique si les contraintes restent au-dessous des contraintes limites. Il y a une force de lien de cisaillement aussi bien qu'une force de résistance en traction. Si la limite de traction ou cisaillement est dépassée le long de l'interface, alors l'interface cisailée et les forces normales et tangentielle sont ramenées à une valeur nulle. La valeur de la force limite de cisaillement est donnée en fonction de la valeur de traction. La valeur par défaut de la résistance à la traction est zéro.

2- Résistance au cisaillement: le comportement du segment d'interface est déterminé par le frottement et la cohésion (et bien sur la rigidité). Le critère de résistance au cisaillement de Mohr-Coulomb limite les forces de cisaillement par la relation suivante :

$$f_{s \max} = c_i \times A + \tan \delta \times f_n \quad (3.25)$$

Ou

$c_i$  : adhésion le long de l'interface;

$A$  : secteur représentatif associé au nœud d'interface;

$\delta$  : angle de frottement à l'interface ;

$f_{s \max}$  : force de cisaillement ;

$f_n$  : force normale ;

Si le critère est satisfait, c'est-à-dire si  $|f_s| \geq f_{s \max}$  alors  $f_s = f_{s \max}$

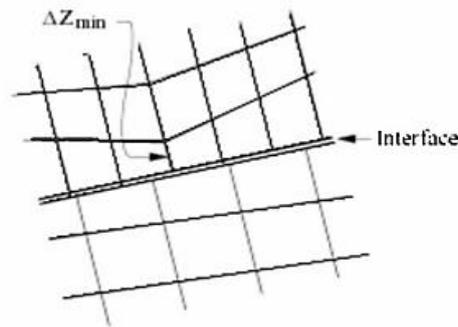
3- Glissement: un lien intact, par défaut, empêche tout comportement de glissement ou séparation. Il y a une propriété facultative qui cause la séparation des liens intacts.

L'attribution des propriétés mécaniques (en particulier les rigidités) à une interface dépend de la manière avec laquelle l'interface est employée. D'une manière générale les valeurs recommandées par les auteurs de FLAC consistent à prendre  $K_n$ , et  $K_s$  dix fois plus élevés que la raideur équivalente de la zone voisine la plus raide. La rigidité apparente d'une zone dans la direction normale est:

$$K_n = K_s = \text{Max} \left[ \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{\min}} \right] \quad (3.26)$$

$K$  et  $G$ : modules volumique et de cisaillement respectivement;

$\Delta Z_{\min}$ : la plus petite dimension dans la direction normale



**Figure 3.21** Dimension de la zone utilisée pour le calcul de la raideur

Cette recommandation permet de ne pas pénaliser les temps de calcul lors de la prise en compte d'une interface.

Les propriétés mécaniques des joints sont conventionnellement dérivées de tests en laboratoire (c'est-à-dire de cisaillement direct et tests triaxiaux). Ces essais peuvent fournir des propriétés physiques pour l'angle de frottement, la cohésion, l'angle de dilatance et la traction limite, aussi bien que les rigidités normaux et de cisaillement.

### 3.5 Comparaison avec d'autres méthodes numériques

La méthode des différences finies et la méthode des éléments finis donnent des équations différentielles sous forme d'équations matricielles pour chaque élément, reliant les forces nodales aux déplacements nodaux. Bien que les équations de FLAC soient dérivées de la méthode des différences finies, les matrices élémentaires résultant pour un matériau élastique sont identiques à ceux de la méthode des éléments finis (M.E.F) (pour un triangle à déformation constante). Pourtant FLAC diffère dans les points suivants:

1. Les équations de mouvement dynamique sont utilisées, même pour la modélisation des systèmes statiques. Ceci permet au FLAC de suivre les processus d'instabilité physique sans difficulté;
2. Une formulation explicite est utilisée (au contraire de la formulation implicite couramment utilisée en E.F.). Les formulations explicites peuvent suivre arbitrairement la non-linéarité des lois contraintes-déformations presque avec le même temps de calcul que les lois élastiques, où les solutions implicites peuvent prendre significativement un temps de calcul plus long. En outre, il n'est pas nécessaire de stocker des matrices, ce qui signifie que:
  - a) Un grand nombre d'éléments peut être modélisé avec une modeste mémoire,

b) La simulation en grande déformation nécessite à peine plus de temps de calcul que le calcul en petite déformation.

Ces différences sont en faveur du FLAC, mais elles souffrent de deux inconvénients:

1. Le calcul des simulations linéaires est plus long avec FLAC qu'avec les codes numériques en E.F. FLAC est efficace pour les problèmes non-linéaires ou en grande-déformation, ou à des situations dans lesquelles l'instabilité physique peut se produire;

2. Le pas de calcul de FLAC est déterminé par le rapport entre la plus grande période et la plus petite période propre du système. Avec un pas de temps de calcul imposé très petit, il est nécessaire d'effectuer un grand nombre de pas avant d'arriver à la solution statique.

De ce fait, ce code n'est pas compétitif pour la résolution des problèmes statiques linéaires en petites déformations surtout avec la méthode des éléments finis, par contre, il l'est pour les systèmes complexes présentant une forte non-linéarité, de grandes déformations ou des instabilités physiques.

### 3.6 Propriétés d'interface équivalentes par FLAC et PLAXIS

Les valeurs des propriétés d'interface (l'angle de frottement à l'interface, la cohésion, l'angle de dilatation, et la force de traction) utilisées dans FLAC sont les mêmes que ceux dans le PLAXIS.

Si la valeur de  $K_n = 11K_s$  pour le logiciel FLAC, les propriétés d'interface équivalents dans PLAXIS peuvent être trouvés en utilisant les équations suivantes:

$$E_i = \frac{(3K_n - 4K_s)K_s \cdot t_i}{K_n - K_s}, \quad \nu_i = 0.45 \quad (3.27)$$

$$E_{oed,i} = K_n \cdot t_i \quad (3.28)$$

$$G_i = K_s \cdot t_i \quad (3.29)$$

Où  $t_i$ : est l'épaisseur virtuelle de l'interface qui est liée à la taille de l'élément moyen et le facteur d'épaisseur virtuelle dans PLAXIS.

Dans les cas où :  $k_n \neq 11k_s$ , les propriétés d'interface trouvées pour FLAC et PLAXIS sont différents.

Si le module d'Young et le coefficient de Poisson ( $\nu = 0,45$ ) (le module d'Young œdométrique et le module de cisaillement) à l'interface avec  $R_{inter} = 1,0$  sont

fournis à partir de PLAXIS, les équations suivantes peuvent être utilisées pour calculer les propriétés d'interface équivalentes FLAC:

$$K_n = \frac{E_i(1-\nu_i)}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)t_i} = \frac{E_{oed,i}}{t_i} \quad (3.30)$$

$$K_s = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)t_i} = \frac{G_i}{t_i} \quad (3.31)$$

Si le coefficient de Poisson  $\nu \neq 0,45$  et le facteur réducteur d'interface  $R_{inter} < 1$ , sont supposés pour les interfaces, (le module d'Young, le coefficient de Poisson, le coefficient d'Young oedométrique et le module de cisaillement) pour les équations (3.30, 3.31) sont calculés en utilisant les équations suivantes dans les simulations PLAXIS.

$$G_i = R_i^2 G_{sol} \quad (3.32)$$

$$E_i = 2 \cdot G_i (1 + \nu_i) \quad (3.33)$$

$$E_{oed,i} = 2 \cdot G_i \frac{1-\nu_i}{1-2\nu_i} \quad (3.34)$$

### 3.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de donner un aperçu sur les connaissances bibliographiques concernant la modélisation numérique du comportement d'interface liées à la résistance au cisaillement à l'interface et de vérifier la cohérence entre l'approche expérimentale et l'approche numérique pour l'étude des problèmes d'interface. La définition des mécanismes caractéristiques de l'interface a fourni des éléments indispensables pour une modélisation correcte de son comportement. Les procédures qui permettent de générer un modèle par la méthode des éléments finis (PLAXIS) et la méthode des différences finies (FLAC) ont été présentées. Ainsi il s'avère que la modélisation numérique aux éléments finis et aux différences finies du comportement d'interface nécessite la prise en compte de l'effet des paramètres géotechniques, la formulation d'un modèle de comportement d'interface approprié et la définition d'éléments de contact. La validation se fait à partir de résultats d'essais expérimentaux, en s'appuyant sur des données de laboratoire relatives à la caractérisation du sol et de l'interface sol-structure. Nous détaillerons les étapes de cette démarche dans les prochains chapitres.

## **Chapitre IV Matériel d'essai et procédure expérimentale**

### **4.1 Introduction**

Ce chapitre est consacré à la présentation et à la description des dispositifs expérimentaux utilisés (la boîte de cisaillement direct) ainsi que les matériaux mis à l'essai pour mesurer la résistance au cisaillement dans le domaine des petits déplacements.

L'appareil de cisaillement direct a également été utilisé pour conduire des essais d'interface sol - matériau solide. Les matériaux solides considérés sont l'acier et le papier abrasif. La caractérisation de la rugosité des interfaces étudiées a été abordée au chapitre 2. La méthode de préparation des échantillons ainsi que la procédure expérimentale sont également exposées dans ce chapitre.

### **4.2 Appareil d'essai**

#### **4.2.1 Description de l'appareil de cisaillement direct et principe de fonctionnement**

L'étude de la résistance au cisaillement des sols requiert l'utilisation de dispositifs expérimentaux permettant de mesurer la résistance au pic. C'est le cas de l'appareil de cisaillement direct, pour lequel une description détaillée est présentée par Gasagrande. Le principe de base de l'appareil consiste à appliquer une force normale centrée maintenue constante sur la demi-boîte supérieure pendant toute la durée de l'essai. Après consolidation, l'échantillon de sol est ensuite soumis à une contrainte de cisaillement selon le plan horizontal de glissement des deux demi-boîtes, l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif à vitesse constante. L'essai réalisé est à contrainte normale constante.

Les principales caractéristiques de l'appareil sont schématisées dans les figures 4.1, 4.2, et 4.3. Un échantillon de 25 mm d'épaisseur, de 60 mm de largeur est drainé à travers deux plaques poreuses 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 :10. La charge maximale pouvant être appliquée est de 82kg et une marge de vitesse entre 0,00001 et 9,99 mm/min.

L'essai de cisaillement direct destiné à déterminer la résistance au cisaillement sol-sol est réalisé de la manière décrite ci-dessous.

La boîte de cisaillement contenant l'éprouvette est placée dans le châssis étanche fixé sur le bâti. Tout en maintenant la consolidation des deux demi-boîtes, on place le piston muni de sa plaque drainante sur le sommet de l'éprouvette après fixation du system de mesure. La demi-boîte supérieure reste immobile munie de comparateurs ainsi que de capteurs de déplacements. Alors que le sol en contact avec la demi-boîte inférieure est forcé de subir un mouvement horizontal avec le conteneur d'échantillon, la partie supérieure de l'échantillon s'oppose à tout mouvement horizontal jusqu'à ce que, éventuellement, les contraintes à l'intérieur de la masse de sol provoquent une rupture par cisaillement. 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 à vitesse constante. La force de cisaillement subit par l'échantillon est mesurée par l'anneau dynamométrique. 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 4.1 Appareil de Casadrande utilisé dans cette étude

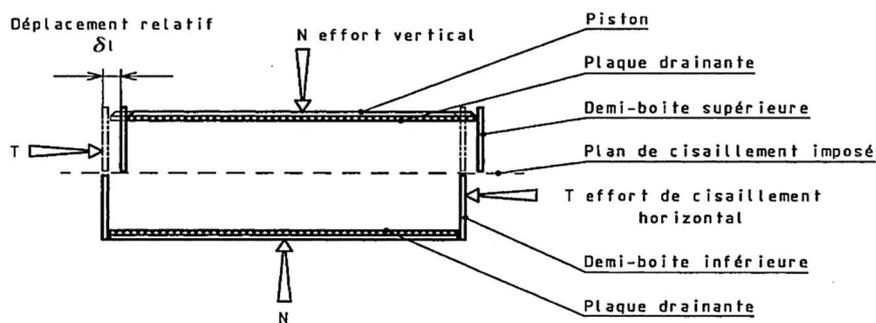
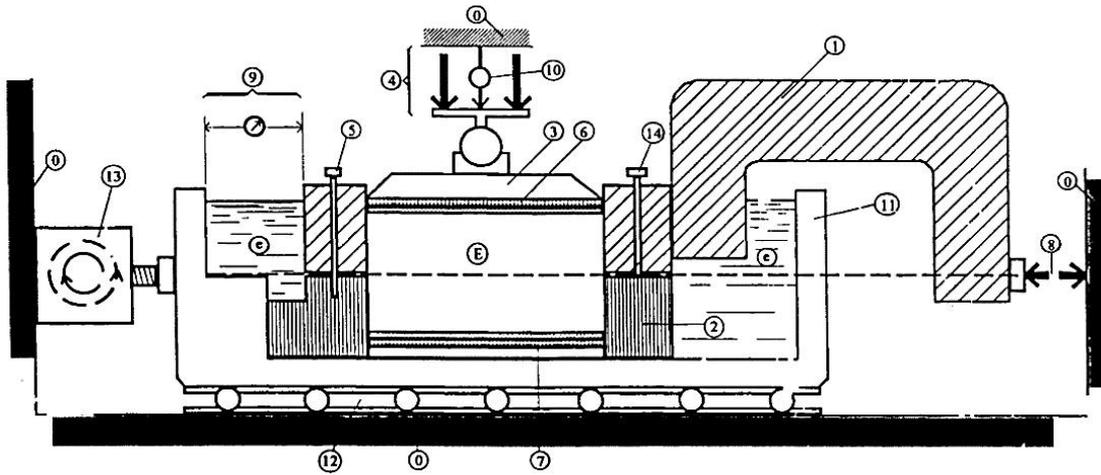


Figure 4.2 Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boîte



**Figure 4.3** Vue de côté de l'appareil de cisaillement direct

Légende :

- |   |   |
|---|---|
| 0) Bâti   | 9) Dispositif de mesure du déplacement relatif horizontal |
| 1) Demi-boîte supérieure  | 10) Dispositif de mesure du déplacement relatif vertical  |
| 2) Demi-boîte inférieure  | 11) Châssis étanche                                       |
| 3) Piston rigide  | 12) Glissière sans frottement                             |
| 4) Dispositif d'application de l'effort vertical centré sur le piston | 13) Système de déplacement à vitesse constante            |
| 5) Solidarisation des demi-boîtes                                     | 14) Vis de soulèvement de la demi-boîte                   |
| 6) Plaque drainante supérieure  | 15) matériaux solides                                     |
| 7) Plaque drainante inférieure  | e) Eau déminéralisée                                      |
| 8) Dispositif de mesure de l'effort horizontal                        | E) Eprouvette de sol                                      |

#### 4.2.2 Essai de cisaillement d'interface

La même boîte de cisaillement direct (60×60) mm qui a servi pour les essais de cisaillement sol-sol a été modifiée en remplaçant la partie inférieure par un bloc en acier doux de dimension (128×128×14) mm et des essais d'interface sol-matériau solide ont été réalisés (Figure 4.4). Il était convenable de fixer les plaques en acier à l'aide des vis de fixation à partir de la face inférieure. Les interfaces d'acier, pour leur part, ont été appliquées à la plaque en utilisant une mince couche de graisse de silicone pour minimiser le frottement entre la demi-boîte supérieure et les plaques d'acier. Les essais de cisaillement d'interface ont été conduits dans le but d'étudier l'effet de l'interface

sol-matériau solide sur la résistance au cisaillement. Pour cela la demi-boîte inférieure a été remplacée successivement par des plaques avec papier abrasif de différentes rugosités ayant les mêmes dimensions que les plaques d'acier avec une épaisseur suffisante pour distribuer la charge verticale uniformément.

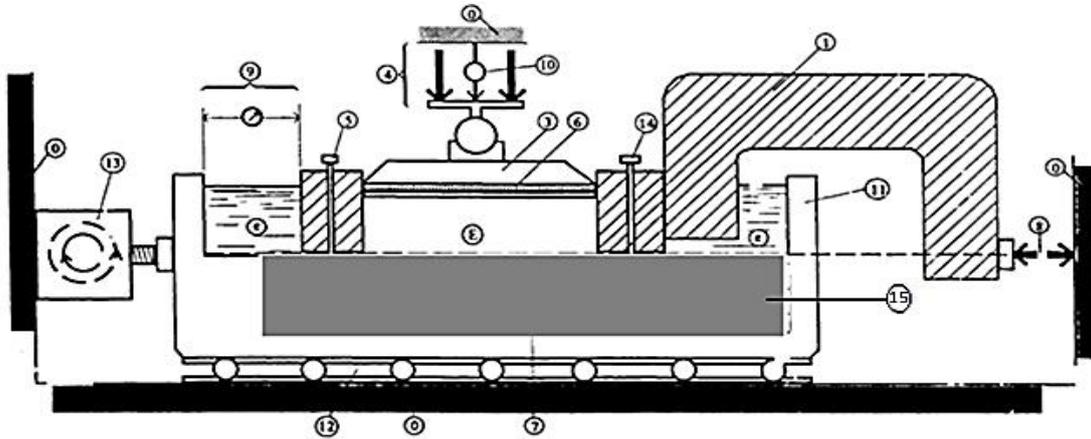
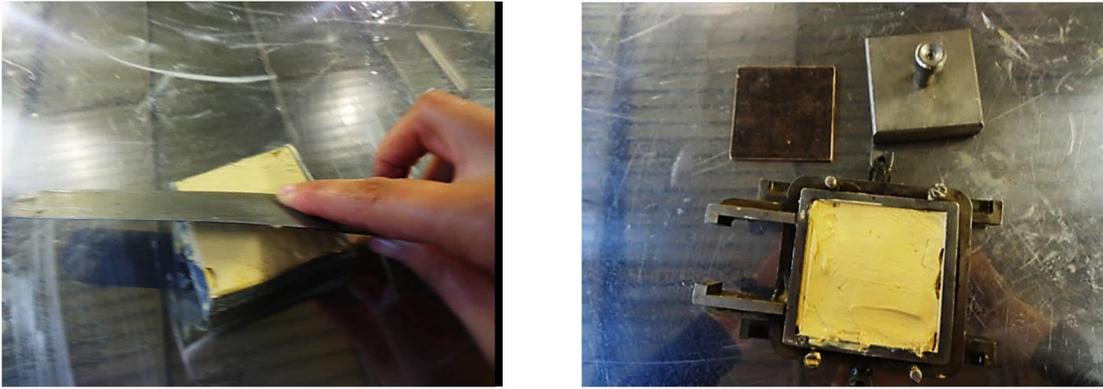


Figure 4.4 Vue de côté de l'appareil de cisaillement modifié

### 4.3 Préparation de l'échantillon

La préparation de l'échantillon d'un sol cohérent pour les essais de cisaillement direct réalisés au moyen de l'appareil de Gasdrande 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. 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 étudié (argile de Guelma). 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  $1 \sim 1,5 W_p$ . 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. Il est ensuite pétri uniformément en utilisant une spatule flexible en acier et ensuite arasé de niveau, tout en s'assurant qu'il n'y a pas d'air piégé, comme le montre la figure 4.5.



**Figure 4.5** Placement du sol à l'intérieur du volume

Il est nécessaire également de parfaire l'angle de  $90^\circ$  entre le dispositif d'application de l'effort vertical centré sur le piston et le bras de levier comme indiqué sur la figure 4.6.



**Figure 4.6** Position du dispositif d'application de l'effort normal par rapport au bras de levier

Les poids appropriés sont placés sur le support qui est mis en position horizontale. Le capteur de déplacement est alors placé sur le haut du contre-écrou de blocage du bras de mise en charge. Pour garder l'échantillon saturé, la chambre en châssis étanche est remplie d'eau distillée. La consolidation peut être alors initiée.

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,...etc) de telle manière que les déformations axiales soient empêchées. Dans la présente étude, l'essai de consolidation est réalisé sur des échantillons carrés placés dans le conteneur d'échantillon. La charge est appliquée progressivement pour des contraintes normales importantes pour prévenir une fuite intempestive de l'échantillon à hauteur du bord supérieur de la boîte. Pour chaque

charge appliquée il est nécessaire d'attendre une stabilisation de l'échantillon. A partir des courbes de consolidation (tassement-temps) obtenues pour l'ensemble des sols étudiés, on a noté qu'une durée de chargement inférieur à 24h était adéquate pour une dissipation complète de la pression interstitielle.

D'après Gibson et Henkel (1954), la rupture (contrainte de cisaillement au pic) se produit après un temps  $t_f$  donné par la relation  $t_f = 12,7 \times t_{100}$ . Si  $\Delta_h$  (mm) est le déplacement prévu pour atteindre le pic, la vitesse de cisaillement ne devrait pas dépasser  $\Delta_h / 12,7 t_{100}$  mm/min pour que l'échantillon soit en conditions drainées.

Pour assurer la dissipation de la pression interstitielle une vitesse de cisaillement assez faible de 0,02 mm/min est utilisée pour atteindre les conditions au pic en condition drainée.

#### **4.4 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 est mesurée. Le cisaillement est conduit jusqu'à ce que la résistance au cisaillement atteigne le pic.

Les essais réalisés de type sol-sol et sol-matériaux solides sont à contrainte normale constante. Une épaisseur de 25 mm d'échantillon a été adopté pour les essais réalisés de type sol-sol et  $15 \pm 1$  mm a été utilisée pour les essais d'interface sol-matériaux solides. Les épaisseurs des échantillons ont été adaptées selon les recommandations de Jardine et Chow (1996) et Subba Rao et al (2000). Après avoir préparé l'échantillon. Il est mis en consolidation dans la boîte de cisaillement. Pour cela on applique sur la face supérieure de l'échantillon un effort vertical, résultant des poids placés sur le plateau, engendrant ainsi une contrainte normale de  $\sigma_n = 109, 150$  et  $204$  kPa, maintenue constante tout au long de l'essai. On règle ensuite la vitesse de la machine, de façon à imposer un déplacement horizontal relatif constant entre les deux demi-boîtes (0,02mm/min dans notre cas). Après démarrage de l'essai, on prend les lectures sur les trois capteurs (déplacement horizontal, déplacement vertical et force) simultanément par le système d'acquisition à des intervalles de temps réguliers. La rupture est caractérisée par l'apparition du pic. Trois variables sont mesurées lors d'un

essai de cisaillement direct réalisé sur un échantillon donné, sous une contrainte normale et une vitesse de cisaillement préalablement fixés :

- le déplacement horizontal (ou déplacement relatif tangentiel),  $U_t$
- le déplacement vertical (ou déplacement relatif normal),  $U_n$
- la contrainte de cisaillement,  $\tau$

Le déplacement horizontal à tout instant est donné par le logiciel par 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. Ce dernier, fixé sur un support, est en contact d'un contre-écrou de blocage. La contrainte de cisaillement est déterminée à partir de la force  $F$  qui est mesurée par un capteur de forces fixé à l'anneau dynamométrique. Les capteurs de déplacement, ainsi que le capteur de force ont été préalablement étalonnés.

Un système d'acquisition de données, dénommé DS6, commercialisé par ELE International Instrumentation, permettant de mesurer et surveiller les grandeurs électriques a été utilisé pour mener l'expérimentation. Ce système 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 4.7 représente le dispositif expérimental.



**Figure 4.7** Dispositif expérimental

## 4.5 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 de cisaillement, nous avons jugé d'étudier des sols dont la fraction argileuse est différente. De ce fait le choix des matériaux à mettre à l'essai s'est porté sur trois types de sols cohérents: deux types de kaolin (K1, K2) et une argile extraite près de Guelma, dénommée argile de Guelma (CG), ainsi qu'un mélange constitué de 50% d'argile de Guelma et 50% kaolin (K1G).

Le kaolin est une argile blanche, friable et réfractaire. Découvert à l'origine en Chine, il est à la base de la fabrication de la porcelaine, mais sont aussi utilisés dans l'industrie du papier et la médecine. C'est un matériau plastique composé principalement de kaolinite, soit des silicates d'aluminium associé à d'autres minéraux tels que feldspath, mica et quartz,

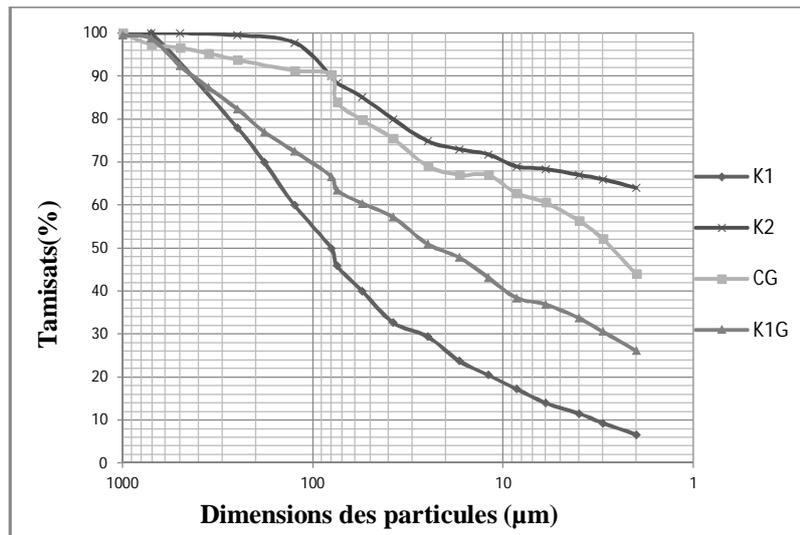
D'après l'abaque de plasticité de Casagrande, le kaolin K1 est un limon très plastique alors que le kaolin(K2) est une argile très plastique.

L'argile de Guelma est une argile très plastique. Ce matériau de couleur marron 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 1000 $\mu$ m, après avoir été passé à l'étuve et pulvérisé.

Les propriétés physiques des sols utilisés sont indiquées au tableau 4.1. Les courbes granulométriques sont représentés sur la figure 4.8.

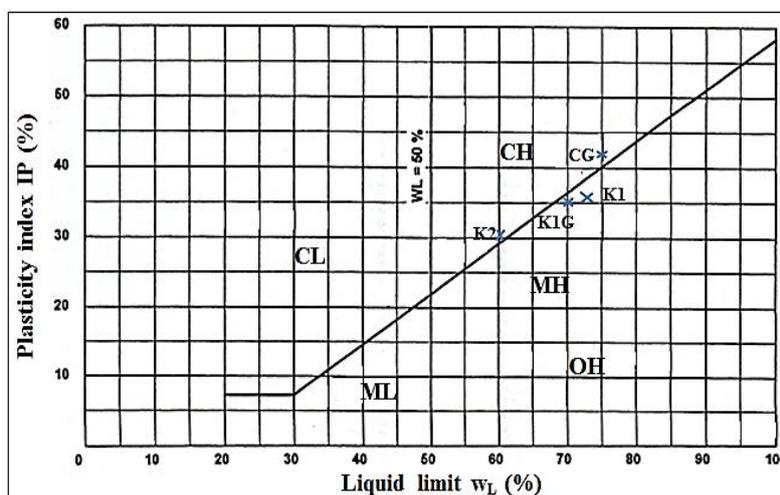
**Tableau 4.1** Caractéristiques physiques des sols utilisés

<b>Propriétés</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>CG</b>	<b>K1G</b>
Limite de liquidité, $W_L$ (%)	73	60	75,5	70,5
Limite de plasticité, $W_p$ (%)	36,7	30	34,2	35,44
Indice de plasticité, $I_p$	36,3	30	41,3	35,06
Fraction argileuse, (% <2 $\mu$ m)	6,6	64	44	26,17
Diamètre moyen, $D_{moy}$ ( $\mu$ m)	17,5	2,06	3,4	11,85
Densité des particules solides	2,6	2,6	2,78	2,6



**Figure 4.8** Courbes granulométriques des sols étudiés

Les matériaux utilisés ont été également classés, selon l'abaque de Gasagrande. Ainsi, le kaolin (K1), correspond au groupe MH (limon très plastique) et le kaolin (K2) est classé comme une argile très plastique CH. L'argile de Guelma (CG) est classée dans le groupe de CH (argile très plastique). Tandis que le mélange de 50% argile de Guelma et 50% de kaolin K1 (K1G) est classé comme un limon très plastique. La figure 4.9 représente l'abaque de Gasadrande.



**Figure 4.9** Abaque de plasticité de Gasagrande et position 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 4.2.

**Tableau 4.2** Valeurs de bleu de méthylène des sols étudiés

<b>Sol étudié</b>	<b>VBS (g de bleu/100g de sol sec)</b>
K1	1,3
K2	7
CG	4,16
K1G	5,83

#### **4.6 Programme d'essai**

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.

Un résumé des essais de cisaillement direct conduits est montré dans les tableaux 4.3 à 4.6, ci-dessous. Chaque essai est décrit à l'aide des grandeurs suivantes: le déplacement relatif horizontal ( $U_t$ ), la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) et le déplacement vertical ( $U_n$ ).

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, papier abrasif), le mécanisme de cisaillement à l'interface et l'effet des textures à l'interface sur la résistance au cisaillement et l'effet du type de matériau solide étudié (acier et papier abrasif).

<b>Tableau 4.3</b> Résumé des essais conduits sur le Kaolin, (K1)			
<b>Essai</b>	<b>Type d'interface</b>	<b>Contrainte</b>	<b>Objectif</b>
		<b>(kPa)</b>	
K1S	sol - sol	109	Cet essai est destiné à déterminer la résistance au cisaillement du sol est ainsi comparer la valeur obtenue avec celles obtenues dans le cas d'un cisaillement d'interface.
		150	
		204	
K1SI1	Acier/SI1	109	Ces essais sont destinés à étudier particulièrement l'effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement à l'interface ainsi que le mécanisme de cisaillement à l'interface et l'effet du type de matériau solide étudié (acier et papier abrasif).
		150	
		204	
K1SI2	Acier/SI2	109	
		150	
		204	
K1SI3	Acier/SI3	109	
		150	
		204	
K1SI4	Acier/SI4	109	
		150	
		204	
K1AI1	Papier abrasif/AI1	109	
		150	
		204	
K1AI2	Papier abrasif/AI2	109	
		150	
		204	
K1AI3	Papier abrasif/AI3	109	
		150	
		204	
K1AI4	Papier abrasif/AI4	109	
		150	
		204	
K1TX1	Acier/ TX1	109	Ces essais sont destinés à étudier particulièrement l'effet de la texture sur la résistance au cisaillement à l'interface entre le kaolin et l'acier;
		150	
		204	
K1TX2	Acier/ TX2	109	
		150	
		204	
K1TX3	Acier/ TX3	109	
		150	
		204	
K1TX4	Acier/ TX4	109	
		150	
		204	

**Tableau 4.4** Résumé des essais conduits sur le Kaolin(K2)

Essai	Type d'interface	Contrainte (kPa)	Objectif
K2S	sol-sol	109	Cet essai est destiné à déterminer la résistance au cisaillement du sol est ainsi comparer la valeur obtenue avec celles obtenues dans le cas d'un cisaillement d'interface.
		150	
		204	
K2SI1	Acier/SI1	109	Ces essais sont destinés à étudier l'effet de la texture sur la résistance au cisaillement à l'interface entre le kaolin et l'acier;
		150	
		204	
K2TX1	Acier/ TX1	109	
		150	
		204	
K2TX2	Acier/ TX2	109	
		150	
		204	
K2TX3	Acier/ TX3	109	
		150	
		204	
K2TX4	Acier/ TX4	109	
		150	
		204	

**Tableau 4.5** Résumé des essais conduits sur l'argile de Guelma (CG)

Essai	Type d'interface	Contrainte (kPa)	Objectif
CGS	sol-sol	109	Cet essai est destiné à déterminer la résistance au cisaillement du sol et ainsi comparer la valeur obtenue avec celles obtenues dans le cas d'un cisaillement d'interface.
		150	
		204	
CGSI1	Acier/SI1	109	Ces essais sont destinés à étudier particulièrement l'effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement à l'interface ainsi que le mécanisme de cisaillement à l'interface.
		150	
		204	
CGSI2	Acier/SI2	109	
		150	
		204	
CGSI3	Acier/SI3	109	
		150	
		204	
CGSI4	Acier/SI4	109	
		150	
		204	

CGTX1	Acier/ TX1	109	Ces essais sont destinés à étudier particulièrement l'effet de la texture sur la résistance au cisaillement à l'interface entre l'argile de Guelma et un matériau solide (acier) ;
		150	
		204	
CGTX2	Acier/ TX2	109	
		150	
		204	
CGTX3	Acier/ TX3	109	
		150	
		204	
CGTX4	Acier/ TX4	109	
		150	
		204	

**Tableau 4.6** Résumé des essais conduits sur le mélange l'argile de Guelma kaolin(K1G)

Essai	Type d'interface	Contrainte (kPa)	Objectif
K1GS	sol-sol	109	Cet essai est destiné à déterminer la résistance au cisaillement du sol est ainsi comparer la valeur obtenue avec celles obtenues dans le cas d'un cisaillement d'interface.
		150	
		204	
K1GSI1	Acier/SI1	109	Ces essais sont destinés à étudier particulièrement l'effet de la rugosité sur la résistance au cisaillement à l'interface entre l'argile de Guelma-kaolin et un matériau solide (acier) ainsi que le mécanisme de cisaillement à l'interface ;
		150	
		204	
K1GSI2	Acier/SI2	109	
		150	
		204	
K1GSI3	Acier/SI3	109	
		150	
		204	
K1GSI4	Acier/SI4	109	
		150	
		204	
K1GTX1	Acier/ TX1	109	Ces essais sont destinés à étudier particulièrement l'effet de la texture sur la résistance au cisaillement à l'interface entre l'argile de Guelma-kaolin (K1G) et un matériau solide (acier);
		150	
		204	
K1GTX2	Acier/ TX2	109	
		150	
		204	
K1GTX3	Acier/ TX3	109	
		150	
		204	
K1GTX4	Acier/ TX4	109	
		150	
		204	

## **4.7 Conclusion**

Dans cette partie, les caractéristiques des sols étudiées 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.

## **CHAPITRE V Présentation des résultats expérimentaux et interprétation**

### **5.1 Introduction**

L'objectif fondamental de ce travail consiste à étudier le comportement de la résistance au cisaillement sol-sol et la résistance à l'interface sol-matériau solide au moyen de l'appareil de cisaillement direct. Pour cette raison, des essais d'interface impliquant le cisaillement de quatre types de sols cohérents contre des interfaces de différentes rugosités et de différentes textures, ont été conduits. Des essais de cisaillement direct, ont été effectués sur les mêmes types de sol pour déterminer la résistance au cisaillement sol-sol et sol-matériau solide (acier, papier abrasive). Un total de 96 essais de cisaillement ont été conduits représentant les différents types d'interface et les différents états de cisaillement pour chaque type de sol.

Dans ce chapitre, une revue de tous les résultats obtenus est présentée ainsi que leur interprétation. Mais avant toute chose, il nous semble utile de rappeler quelques-unes des principales questions qui ont motivé cette étude :

Quelle est l'influence de la rugosité sur le comportement de cisaillement à l'interface ?

Quelle est l'influence de la texture de surface sur la résistance de cisaillement sol cohérent-acier ?

Quelles sont les modes de cisaillement à l'interface ?

Les résultats obtenus permettent ainsi une meilleure compréhension des problèmes d'interface.

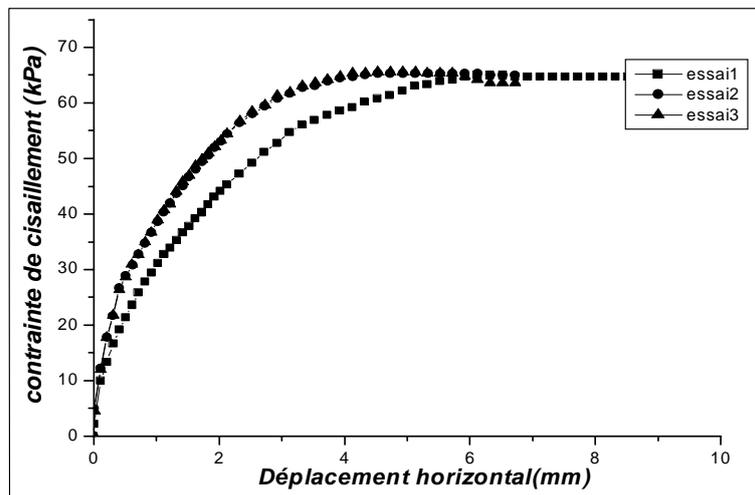
### **5.2 Résultats des essais**

Les échantillons ont été préparés et les essais conduits selon les procédures décrites au chapitre 4. Les interfaces ont été caractérisées au chapitre 2.

#### **5.2.1 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 d'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 des sols naturels, température, 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 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 5.1, à titre d'exemple, l'évolution de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) en fonction de la déformation horizontale pour trois essais réalisés sur le kaolin (K1) avec une vitesse de 0,02mm/min et une contrainte normal de 109 kPa durant un cisaillement sol-sol.



**Figure 5.1** Comparaison des courbes obtenues pour trois essais en cisaillement sol-sol

Quand nous superposons les courbes des trois essais, nous constatons qu'elles ont toutes plus ou moins la même allure. Les courbes des essais 2 et 3 sont pratiquement identiques. Les valeurs de  $\tau$  ont pratiquement la même valeur. La figure 5.1 montre tout d'abord que le seuil de résistance est pratiquement identique, les courbes coïncident entre elles jusqu'au seuil d'élasticité. Au-delà, il y a un décalage d'une courbe par rapport au deux autres. L'allure d'une des deux courbes est alors quelques peu différente jusqu'à une distance de 5,51mm. Pour des déformations supérieures à 5,71mm, des valeurs moyennes de la contrainte de cisaillement maximum de 62,50 kPa, 60,00 kPa et 61,01 kPa ont été enregistrées. Ces variations bien que faibles représentent

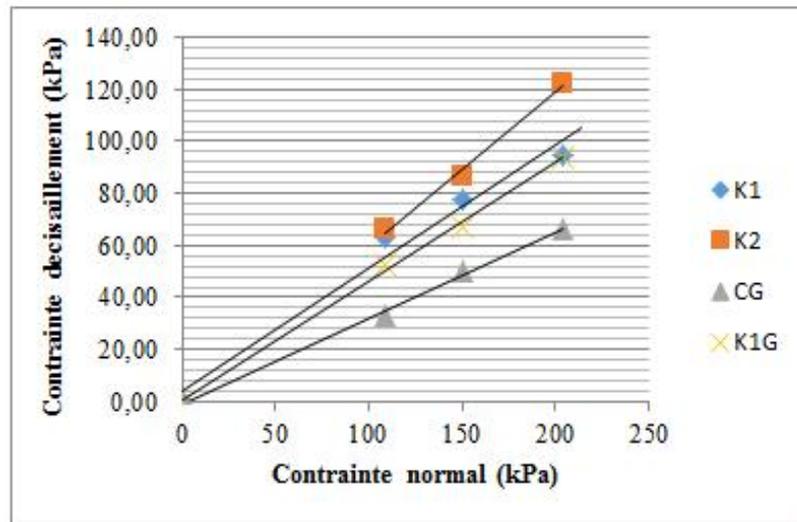
un facteur pour lequel on ne peut pas intervenir. De ce fait on peut juger que la répétitivité des essais en cisaillement est considérée comme acceptable.

### 5.2.2 Cisaillement sol - sol

Les résultats obtenus sont regroupés au tableau 5.1. Les courbes intrinsèques pour leur part sont représentées dans la figure 5.2. Les courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal obtenues pour les essais de cisaillement sol-sol pour les quatre sols étudiés sont présentées dans la figure 5.3.

**Tableau 5.1** Résumé des résultats des essais de cisaillement sol-sol

Essai	$\varphi$ (°)	$U_t$ (mm)
<b>K1</b>	25,39	6,12
<b>K2</b>	30,71	5,31
<b>CG</b>	18,16	4,51
<b>K1G</b>	24,56	5,71

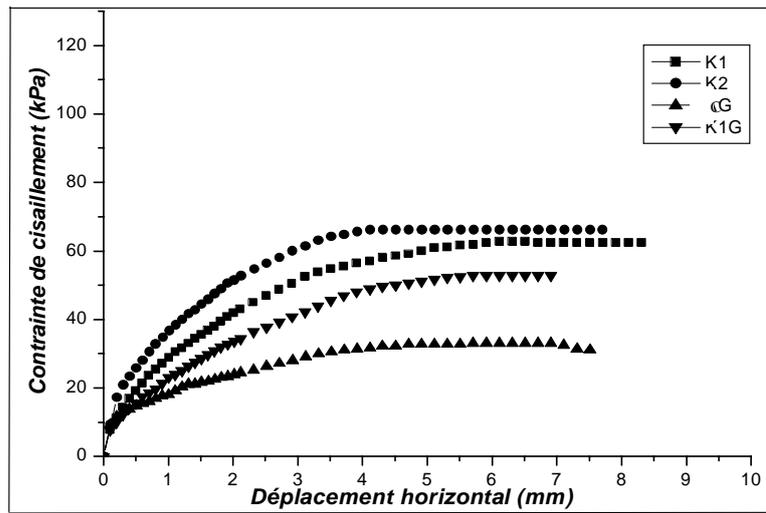


**Figure 5.2** Courbes intrinsèques déduites

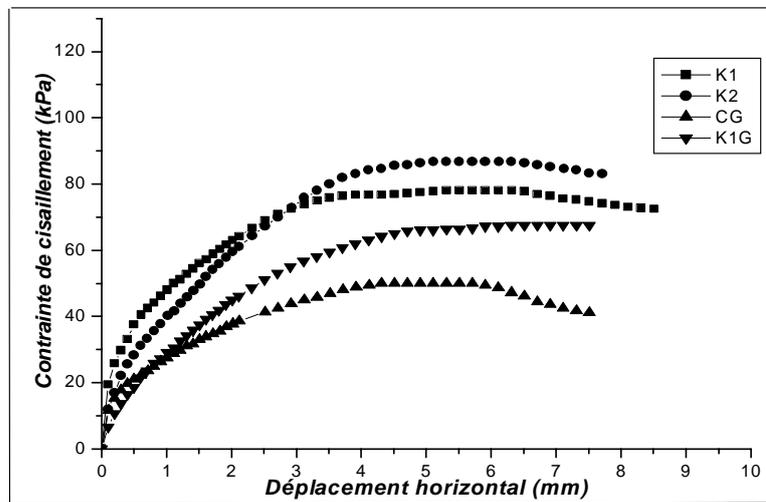
Lors d'essais de cisaillement direct pour lesquels un cisaillement sol - sol a lieu, la contrainte de cisaillement est mobilisée progressivement en fonction du déplacement horizontal. Toutefois chaque essai a montré tout d'abord un seuil d'élasticité caractérisé par le module d'Young, un domaine de plasticité et une résistance au pic caractérisée par une valeur bien définie dans les courbes contraintes

tangentielle - déplacement horizontal. Les angles de frottement interne au pic  $\varphi_p'$  sont reportés dans le tableau 5.1. Les valeurs de  $\varphi_p'$  obtenues ont pour valeurs 25,39° pour K1, 30,71° pour K2, 18,16° pour CG et 24,56° pour K1G. 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. En général, la résistance est d'autant plus importante que le sol contient des particules massives empêchant l'orientation complète des plaquettes argileuses ce qui provoque des résistances relativement élevées, alors que les sols fins présentent des valeurs inférieures.

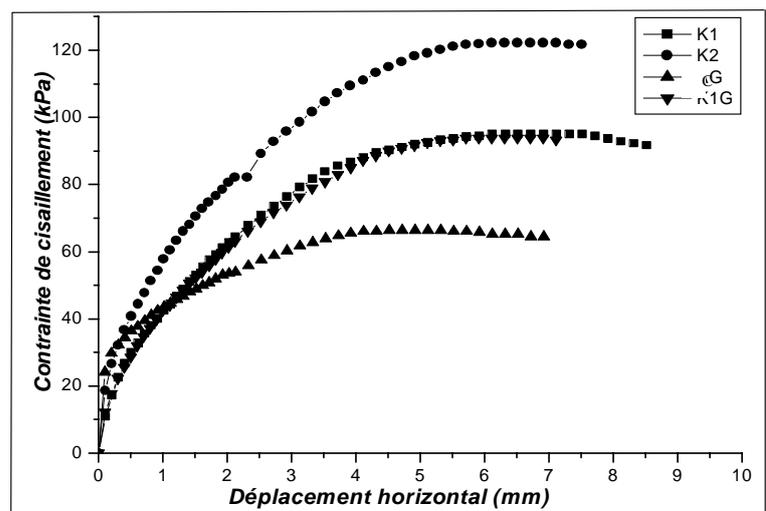
Dans cette étude le kaolin (K1), qui est un limon très plastique, présente une valeur de 25,39°. D'après Smith et Reitsma (2002), pour les argiles kaoliniques, les angles de frottement interne typiques sont situés dans le domaine 20°- 25°. En outre d'après Hammoud (2006), il ressort de résultats d'essai de cisaillement annulaire que la valeur de l'angle de frottement pour une argile pure, constituée essentiellement de kaolinite est de 19,3°. L'angle de frottement interne correspondant au kaolin (K2) a montré une valeur supérieure par rapport aux trois autres sols bien qu'il contient une fraction argileuse de 64%. Tan et al (2008) ont obtenu une valeur de 30,78° dans un essai de cisaillement direct réalisé sur un kaolin très plastique. Ainsi l'addition de 50% de kaolin (K1) à l'argile de Guelma (CG) semble avoir un effet sur la résistance au pic qui a pratiquement augmenté la valeur de  $\varphi_p'$ , soient de 18,16° pour l'argile de Guelma à 24,56° pour le mélange 50% kaolin (K1) - 50% argile de Guelma (K1G). La résistance au pic obtenue à partir de ces essais est une résistance remaniée car l'échantillon utilisé est dans un état remanié. Les contraintes au pic sont obtenues pour des déplacements horizontaux d'environ 6,12 mm pour K1 et K2, 4,51 mm pour CG et 5,71 mm pour K1G. De ce fait indiquant que le déplacement nécessaire pour atteindre le pic diminue avec le pourcentage de fraction argileuse (sauf pour K2).



a) Pour  $\sigma_n = 109$  kPa



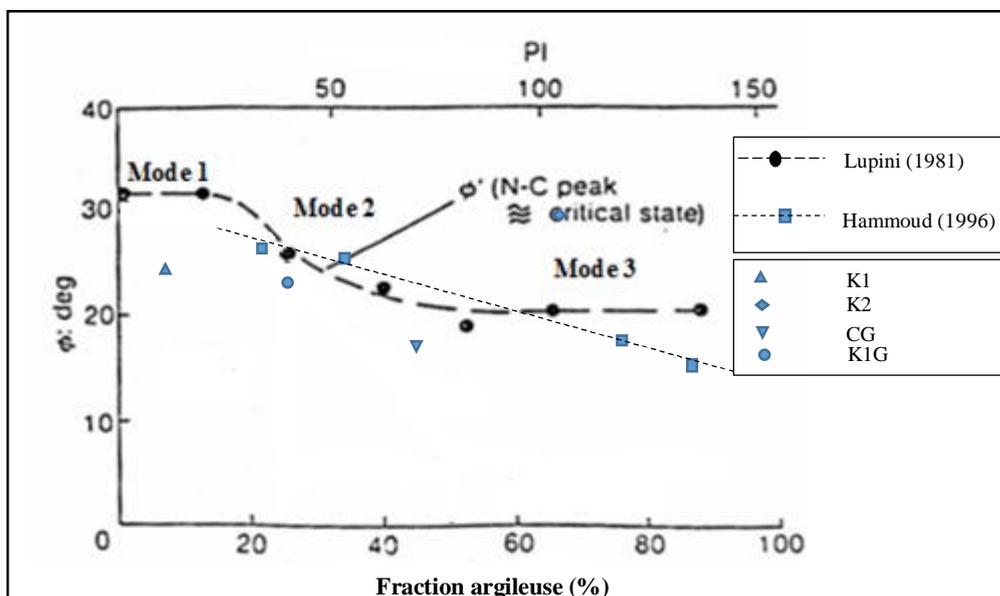
b) Pour  $\sigma_n = 150$  kPa



c) Pour  $\sigma_n = 204$  kPa

Figure 5.3 Courbes contrainte de cisaillement-déplacement horizontal pour les essais sol - sol

La figure 5.4 compare les valeurs de  $\phi'$ , obtenues dans le cadre de ce travail, en fonction du pourcentage en argile et les résultats obtenus par différents auteurs. Il ressort de cette figure qu'à l'exception de la Kaolin (K2), les points correspondant aux trois autres sols sont situés en dessous de la ligne de corrélation produite par Hammoud (1996). Alors que les limites données par Lupini (1981) ne conviennent pas pour l'ensemble des sols étudiés dont les points correspondant sont situés au-dessus de la limite (sauf pour K2). 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. D'autre part, la résistance au pic semble diminuer avec l'augmentation de la fraction argileuse (sauf pour le kaolin, K2).



**Figure 5.4** Corrélation entre le pourcentage d'argile et l'angle de frottement

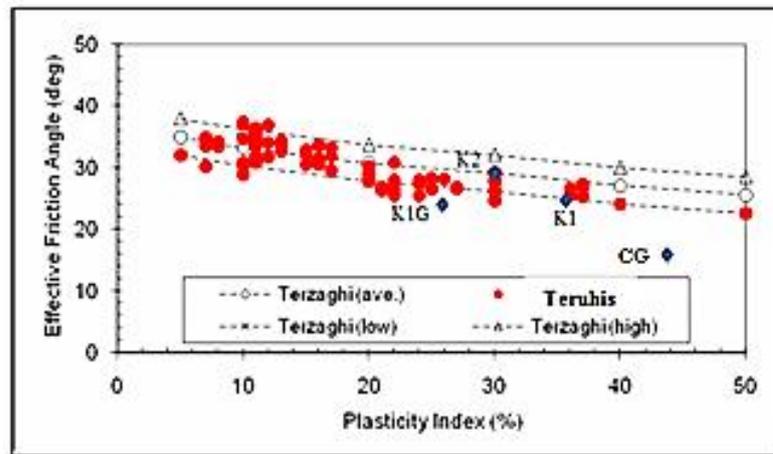
Le tableau 5.2, représente les valeurs de l'angle de frottement interne en fonction de l'indice de plasticité, établies par Terzaghi et al. (1987).

Sur la figure 5.5, l'angle de frottement interne  $\phi'$  est représenté en fonction de l'indice de plasticité  $I_p$ . Les relations entre  $\phi'$  et  $I_p$  ont été établies par Terzaghi et al. (1987) et Teruhisa (2009) et montrent une dispersion considérable. Cependant, on remarque que plus  $I_p$  croît plus l'angle de frottement interne décroît, (à l'exception de K2). Pour les sols étudiés les valeurs de  $\phi'$  pour K1 et K2 sont situées dans le domaine établi par Terzaghi et al. (1987). Les valeurs établies par Teruhisa (2009) semblent plus ou moins convenir également. Il est aussi intéressant de noter que la relation  $\phi' - I_p$  pour les deux types de sols CG et K1G ne semblent pas convenir.

**Tableau 5.2** Corrélation entre  $I_p$  et  $\phi$  par Terzaghi et al. (1987)

$I_p$ (%)	$\phi$ (°)
10	33,3
20	30,8
30	29,2
40	27,1
50	25,6
60	24,6
70	23,8
80	23,1

[Note]: la valeur de  $\phi'$  peut varier de  $\pm 3^\circ$

**Figure 5.5** Corrélation entre l'indice de plasticité et l'angle de frottement

### 5.2.3 Effet de la rugosité sur le cisaillement à l'interface sol - matériau solide

Le but de cette section est d'indiquer une vue réaliste du mécanisme de cisaillement à l'interface sols cohérents - surface solide dans le domaine des petites déformations. En plus, l'angle de frottement à l'interface approprié opérant, sera clarifié sur la base des résultats obtenus à partir des essais de cisaillement d'interface dans lesquels le cisaillement des sols contre des interfaces d'acier et papier abrasif a été opéré, tout en mettant l'accent sur l'effet de la rugosité.

Pour dégager une synthèse générale des essais de cisaillement sol - sol et d'interface en conditions drainées, pour un sol donné, les courbes donnant la contrainte

de cisaillement, en fonction du déplacement horizontal pour chaque type d'interface étudiée ont été regroupées ensemble sur le même graphe. Dans cette partie, les figures montrent les courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal, ainsi que les courbes intrinsèques, (contrainte tangentielle - contraintes normale).

### 5.2.3.1 Essais sur le kaolin, K1

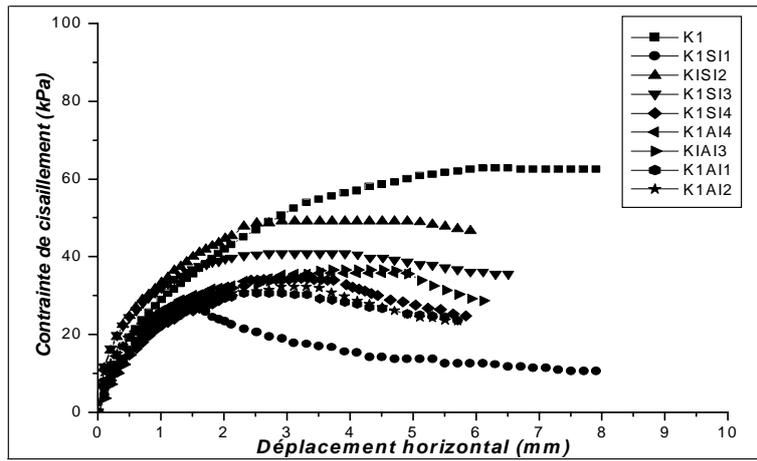
L'objectif de la série d'essais sur le kaolin (K1) est d'observer le comportement d'un limon très plastique. Vingt-quatre essais ont été conduits pour contribuer à établir un modèle de comportement des interfaces d'acier et de papier abrasif de différentes rugosités. Afin d'étudier l'influence de la contrainte normale, nous avons effectué des essais à trois valeurs de la contrainte normale initiale ( $\sigma_n = 109$  kPa, 150 kPa et 204 kPa) pour pouvoir déterminer la courbe intrinsèque du matériau. Les résultats obtenus sont illustrés dans la courbe 5.6.

Les résultats concernant le cisaillement à une contrainte normale de 109 kPa et une vitesse de 0,02 mm/min sont résumés sur la figure 5.6 qui présente les courbes donnant la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour les essais sol - sol et d'interface avec différentes rugosités de surfaces. Les essais d'interface présentent un pic pour des déplacements compris entre 1,31 mm et 4,91 mm. Cette distance tend à augmenter avec la rugosité. Les courbes obtenues indiquent que les valeurs de  $\tau$  varient entre 26,94 kPa et 49,17 kPa en fonction de la rugosité et le matériau constituant l'interface. Pour l'essai de cisaillement sol-sol, le pic de résistance a une valeur de 62,78 kPa, approximativement et un déplacement de l'ordre de 6,11 mm est nécessaire pour établir la résistance au pic. Une stabilisation de la résistance est atteinte après un déplacement d'environ 8,71 mm.

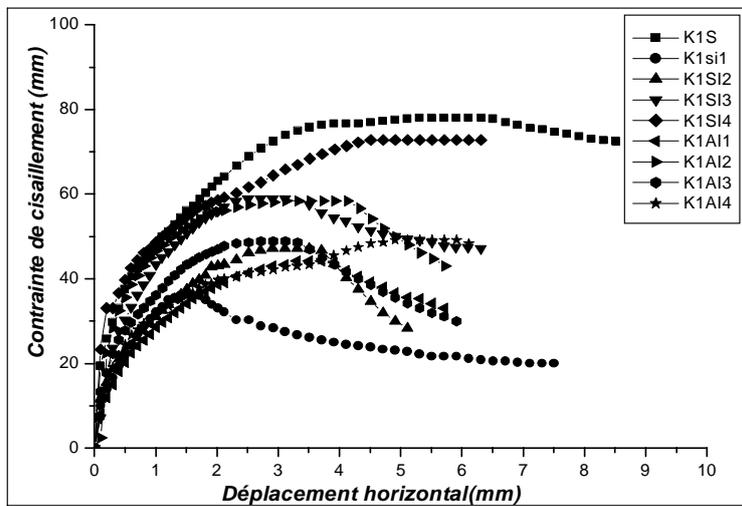
L'allure des courbes contrainte - déformation obtenues à partir des essais d'interface est similaire à celle obtenue dans le cas d'essai sol-sol, particulièrement pour les essais d'interface à rugosité importante (SI2, SI3, SI4, AI1, AI2, AI3 et AI4). On constate que la contrainte de cisaillement augmente rapidement au début du cisaillement jusqu'à un déplacement horizontal de l'ordre de 0,3 mm, puis qu'elle continue à augmenter faiblement et atteint un pic pour un déplacement horizontal de l'ordre de 2,33 mm. Alors que la courbe correspondant à l'interface SI1 (interface lisse) a une allure différente. La contrainte de cisaillement pour l'interface lisse ( $R_a = 0,21\mu\text{m}$ ) augmente rapidement au début du chargement, elle atteint un pic pour un déplacement horizontal

de l'ordre de 1 mm, puis elle chute brusquement pour se stabiliser à partir d'un déplacement horizontal plus important. Un coefficient de frottement ( $\tau/\sigma_n'$ ) de l'ordre de 0,265 a été obtenu pour une contrainte normale de 204 kPa. Il est à noter que Lemos and Vaughan (2000) ont obtenu une valeur de 0,345 dans un essai de cisaillement modifié, réalisé sur un kaolin contre une interface d'acier lisse ( $R_a = 0,215 \mu\text{m}$ ), pour une contrainte normale de 200 kPa et une vitesse de cisaillement de 0,0337 mm/min. La dispersion des résultats peut être due au fait que les échantillons mis à l'essai ont différentes propriétés physiques et minéralogiques. Une analyse des résultats obtenus pour les interfaces rugueuses  $R_a$  comprises entre 5,49 et 64,94  $\mu\text{m}$ , montre que la contrainte de cisaillement croît progressivement jusqu'à un pic de résistance qui varie entre 44,17 et 72,78 kPa pour une contrainte normale de 150 kPa et entre 65 et 93,61 kPa pour  $\sigma_n$  égale à 204 kPa. Le pic correspond à l'effort de cisaillement appliqué pour provoquer le désenchevêtrement des grains dans le plan d'interface, puis elle continue à diminuer faiblement sans atteindre de palier (état résiduel).

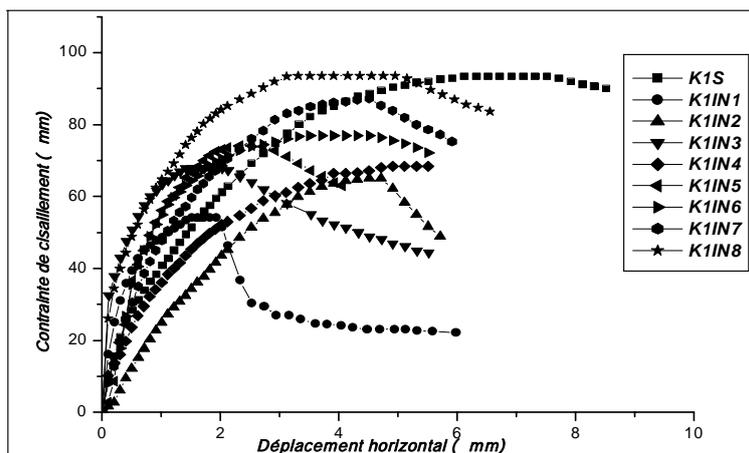
Pour les essais de cisaillement à l'interface entre le kaolin et l'acier ou le papier abrasif, les valeurs de  $\delta$  (Tableau 5.3) varient entre 17,45° et 24,87°, pour les interfaces rugueuses (c'est à dire SI2, SI3, SI4, AI1, AI2, AI3 et AI4). Ce qui est inférieure à la valeur sol - sol qui est de 25,39°. Comme prévu, l'interface d'acier lisse (SI1) donne une valeur nettement inférieure, de 14,2°. On a aussi pu remarquer que les chutes des angles de frottement à l'interface par rapport à l'angle de frottement interne du sol varient entre 10,77° et 0,52°. Ce résultat confirme les observations précédentes d'autres chercheurs. Cette conclusion a été tirée également à la suite d'essais d'interface kaolin - acier ou béton avec différente rugosité par Hammoud (1996). D'après Suba et al. (2000) la valeur maximum limite de  $\delta$  est celle du sol pour des surfaces très rugueuses. Le déplacement horizontal nécessaire pour atteindre la valeur maximale pour l'ensemble des sols étudiés, 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.



$\sigma_n' = 109 \text{ kPa}$ .



$\sigma_n' = 150 \text{ kPa}$



$\sigma_n' = 204 \text{ kPa}$

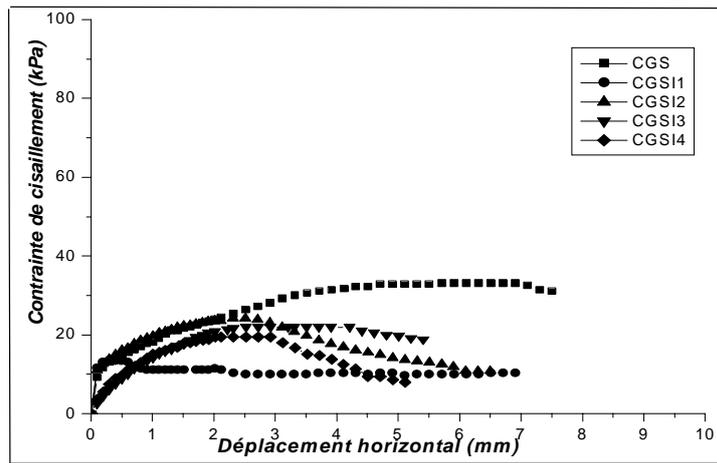
Figure 5.6 Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal pour K1

**Tableau 5.3** Résumé des résultats des essais d'interface réalisés sur K1

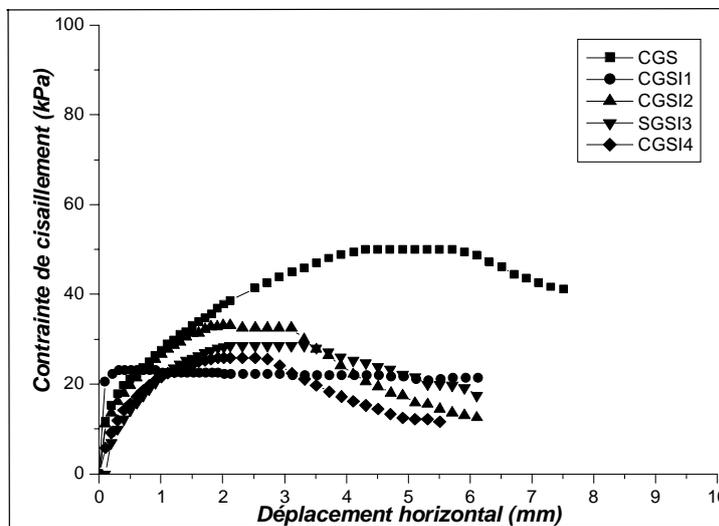
Essai	$\delta$ (°)	$U_t$ (mm)
<b>K1SI1</b>	14,2	1,52
<b>K1SI2</b>	18,84	4,51
<b>K1SI3</b>	23,40	4,31
<b>K1SI4</b>	24,87	3,31
<b>K1AI1</b>	17,45	3,31
<b>K1AI2</b>	18,66	2,91
<b>K1AI3</b>	19,58	2,72

### 5.2.3.2 Essais sur l'argile de Guelma (CG)

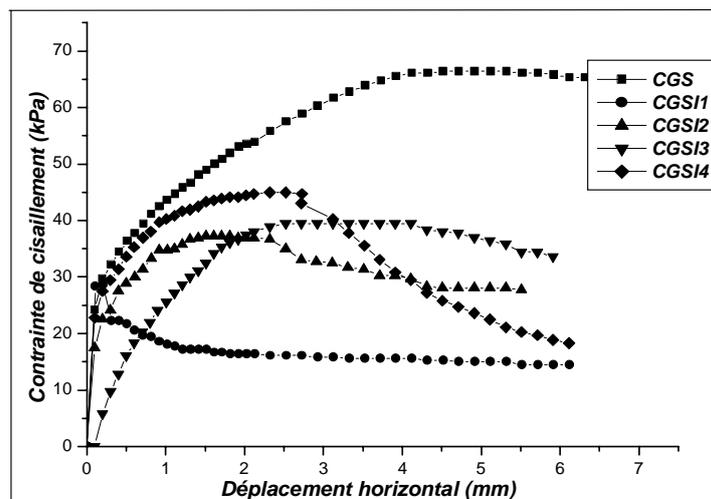
Les essais sol - sol et d'interface sur l'argile de Guelma, qui sont également au nombre de douze, ont été conduits pour étudier le comportement d'interface. Les données obtenues à partir des essais sont présentées sur la figure 5.7 et résumées dans le tableau 5.4. On peut observer concernant l'essai sol - sol dont la courbe contrainte de cisaillement - déplacement horizontal, pour les conditions expérimentales retenues, que la contrainte de cisaillement augmente régulièrement pour atteindre un maximum pour un déplacement de l'ordre de 5,71 mm. L'angle de frottement interne au pic  $\phi_p'$  est alors 18,16°, puis une décroissance de la résistance se produit. 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 (SI2, SI3, SI4). Les courbes correspondant aux interfaces SI1 (interface lisse) ont des allures différentes. On constate que la contrainte de cisaillement pour l'interface lisse pour laquelle  $R_a = 0,21\mu\text{m}$  augmente rapidement au début du chargement, elle atteint un pic pour un déplacement horizontal de l'ordre de 0,3 mm, puis elle chute brusquement pour se stabiliser à partir d'un déplacement horizontal plus important. Une analyse des résultats pour les interfaces rugueuses correspondant à  $R_a$  compris entre 5,49 et 64,94 $\mu\text{m}$ , montre que la contrainte de cisaillement croît progressivement jusqu'à un pic de résistance qui varie entre 25,83 kPa et 33,06 kPa pour une contrainte normale de 150kPa et entre 37,22 kPa et 45 kPa pour  $\sigma_n$  égale à 204kPa.



$\sigma'_n = 109 \text{ kPa}$



$\sigma'_n = 150 \text{ kPa}$



$\sigma'_n = 204 \text{ kPa}$

Figure 5.7 Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal pour CG

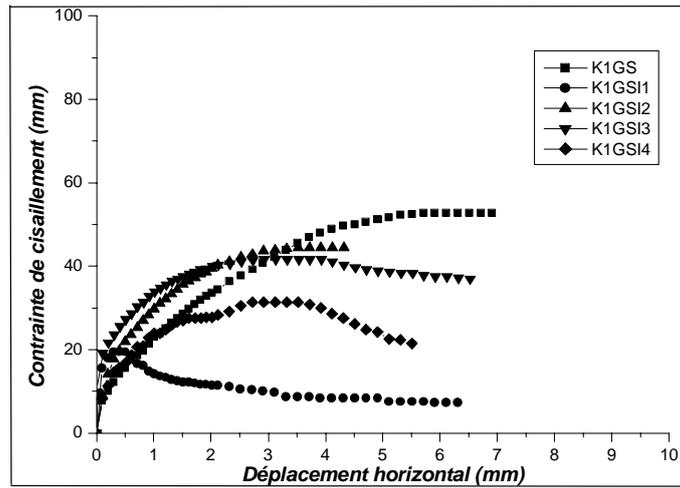
**Tableau 5.4** Résumé des résultats des essais réalisés sur l'argile de Guelma

Essai	$\delta$ (°)	$U_t$ (mm)
<b>CGSI1</b>	8,18	0,3
<b>CGSI2</b>	10,21	1,91
<b>CGSI3</b>	10,90	2,52
<b>CGSI4</b>	12,43	2,31

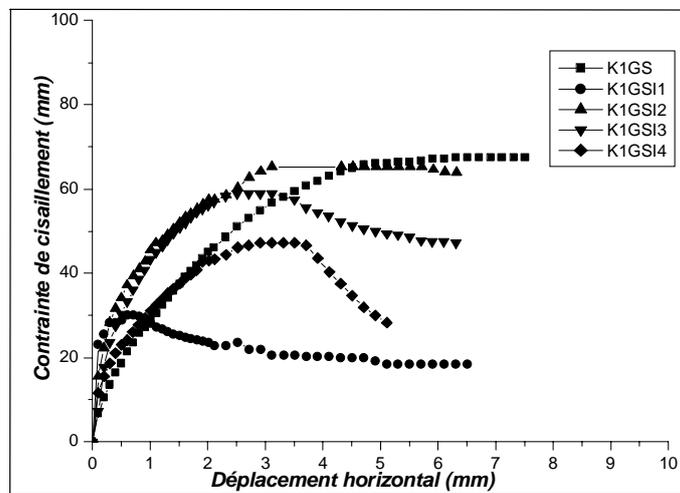
Pour les essais de cisaillement à l'interface entre l'argile de Guelma et l'acier, les valeurs de  $\delta$  (Tableau 5.5) varient entre  $10,21^\circ$  et  $12,43^\circ$ , pour les interfaces rugueuses. Ce qui est inférieure à la valeur sol-sol qui est de  $18,16^\circ$ . Comme prévu, l'interface d'acier lisse (SI1) donne une valeur nettement inférieure de  $8,18^\circ$ . On a aussi pu remarquer que les chutes des angles de frottement à l'interface par rapport à l'angle de frottement interne du sol varient entre  $5,73^\circ$  et  $9,98^\circ$ . Pour l'ensemble des résultats, la tendance observée est que la résistance au pic augmente avec la rugosité et à une valeur limite qui est celle du sol pour les surfaces très rugueuses.

### 5.2.3.3 Essais sur le mélange argile de Guelma - kaolin (K1G)

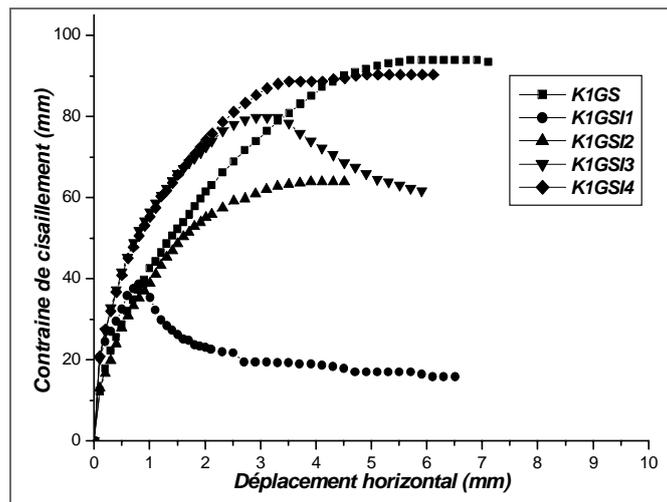
Les résultats des douze essais conduits sur le mélange argile de Guelma-kaolin (K1G) ont été regroupés sur la figure 5.8. Les valeurs des angles de frottement au pic sont résumées au tableau 5.5. Les courbes obtenues confirment en général les tendances observées dans le cas du kaolin (K1). Les courbes représentent les résultats des essais de cisaillement réalisés sur un échantillon saturé du mélange K1G, pour des contraintes normales de 109 kPa, 150kPa et 204 kPa, respectivement. La contrainte de cisaillement d'interface lisse augmente régulièrement pour atteindre un maximum pour un déplacement de l'ordre de 0,3 mm à 0,8 mm, puis décroît pour des déplacements de plus de 6 mm et sans atteindre de palier. On peut remarquer que pour l'essai K1GSI1,  $\tau_{\max}$  a une valeur de 19,44 kPa à 38,61 kPa. Une analyse des résultats pour les interfaces rugueuses obtenus, montre que le comportement ressemble qualitativement à celui observé lors des essais correspond au kaolin K1. En outre, il ressort des résultats des essais d'interface sol - acier rugueux que les valeurs de  $\tau_{\max}$  se situent entre 31,37 kPa et 90,28 kPa et l'établissement des conditions au pic a lieu pour des déplacements horizontaux compris entre 2,73 mm et 4,92 mm.



$\sigma'_n = 109 \text{ kPa}$



$\sigma'_n = 150 \text{ kPa}$



$\sigma'_n = 204 \text{ kPa}$

**Figure 5.8** Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal pour K1G

Pour les essais de cisaillement à l'interface, les valeurs de  $\delta$  (Tableau 5.5) varient entre  $10,87^\circ$  et  $23,84^\circ$ , ce qui est inférieure à la valeur sol - sol qui est de  $24,56^\circ$ . On a aussi pu remarquer que les chutes des angles de frottement à l'interface par rapport à l'angle de frottement interne du sol varient entre  $0,7^\circ$  et  $13,6^\circ$ . Les résultats obtenus indiquent que le rapport entre l'angle de frottement de pic à l'interface  $\delta$  et l'angle de frottement interne du sol  $\phi$  augmente avec la rugosité et sa valeur limite maximum pour des surfaces très rugueuse est inférieure à l'unité.

**Tableau 5.5** Résumé des résultats des essais réalisés sur K1G

Essai	$\delta$ ( $^\circ$ )	$U_t$ (mm)
<b>K1GSI1</b>	10,96	0,81
<b>K1GSI2</b>	17,45	2,71
<b>K1GSI3</b>	21,53	2,92
<b>K1GSI4</b>	23,84	492

## 5.2.4 Analyse des résultats et interprétation

### 5.2.4.1 Effet de $R_a$ , $D_{av}$ et $R$ sur le cisaillement à l'interface

Le paramètre  $R_a$  indique que la hauteur de l'aspérité contrôle directement la résistance à l'interface. Les variations de  $\delta/\phi$  en fonction de  $R_a$ , qui sont représentées sur la figure 5.9 et le tableau 5.6, 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 type de sol. On a plus ou moins la même tendance pour le kaolin (K1) et le mélange kaolin - argile de Guelma (K1G), cependant pour l'argile de Guelma (CG), dont les courbes ont la même allure, elle est différente.

La représentation graphique montre également que la corrélation entre  $\delta/\phi$  et  $R_a$  est pratiquement unique pour le kaolin étudié (K1), quel que soit le type de matériau constituant l'interface (acier ou papier abrasive). 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 et Han (1999) pour l'acier et un composite de polymère renforcé de fibre. De plus Hammoud (2006) a représenté la corrélation entre le coefficient de frottement et  $R_a$  pour des argiles pures (kaolin et bentonite), il a trouvé plus ou moins la même tendance pour deux type



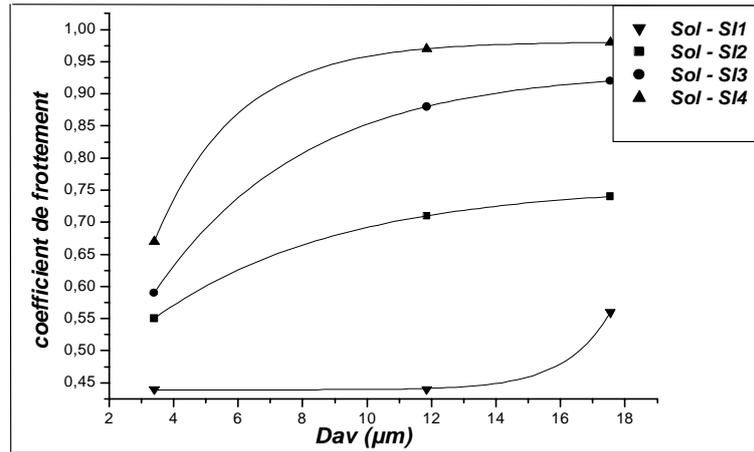


Figure 5.10 Relation entre  $\delta/\varphi$  et  $D_{av}$

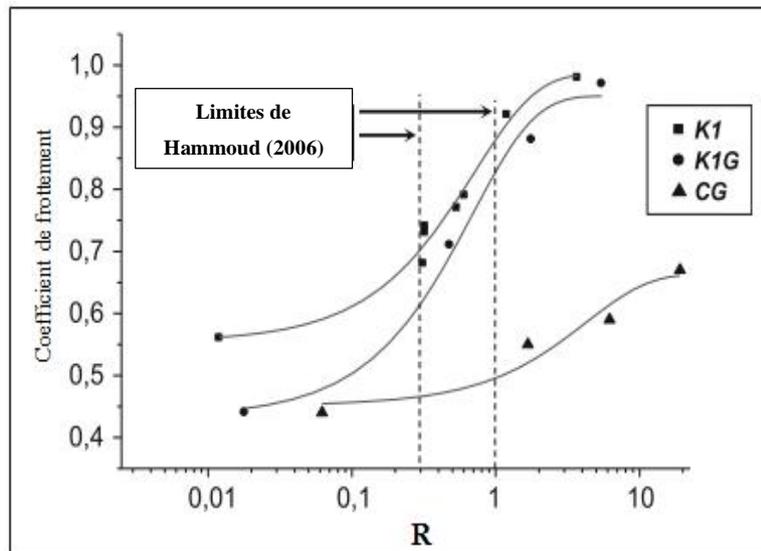


Figure 5.11 Relation entre  $\delta/\varphi$  et R

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 5.11 dans laquelle les valeurs de  $\delta/\varphi$  sont représentées graphiquement par rapport à R, qui combine l'influence de  $R_a$  et  $D_{moy}$  en même temps. Comme illustré, les coefficients de frottement augmentent avec la rugosité relative, R. Le rapport  $\delta/\varphi$  semble avoir comme limite supérieure l'unité ( $0,98 \approx 1$ ). Toutefois, la tendance à l'augmentation est différente selon le type de sol. On a plus ou moins la même tendance pour le kaolin (K1) et le mélange kaolin - argile de Guelma (K1G), et dont la limite supérieure est l'unité. Cependant pour l'argile de Guelma (CG), dont l'allure de la courbe est similaire, elle présente des valeurs inférieures, dont la limite supérieure est 0,7 approximativement.

#### 5.2.4.2 Mécanismes de cisaillement d'interface

D'après les résultats expérimentaux obtenus et en se référant aux figures 5.9 et 5.11, trois modes de cisaillement peuvent être recensés, 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.

Pour les interfaces lisses la rupture se produit par glissement des particules sur l'interface. C'est le **mode interfacial**. Le coefficient de frottement est alors nettement inférieur 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 réarrangement 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 telles que K1 et K1G qui sont considérés comme des limons très plastiques, 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 matériau solide-sol tant que la rugosité est inférieure à une certaine rugosité arithmétique  $R_a$  et une rugosité relative  $R$  critique égales à environ 1 et 0,1 respectivement pour K1 et K1G (i.e.  $R_a = 0,1D_{\text{moy}}$ ), par contre CG présente pour ce mode des valeurs limites de  $R_a \approx 3 \mu\text{m}$  ou  $R \approx 1$  (i.e.  $R_a \leq D_{\text{mov}}$ ). 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  $\delta = (0,44 - 0,56) \varphi$ . A partir des figures 5,9 et 5,11, on peut déduire que les valeurs de  $\delta/\varphi$  ne tendent pas vers zéro lorsque  $R$  tend vers zéro. Les interfaces lisses peuvent promouvoir un cisaillement glissant complet même pour des sols ne contenant pas une forte proportion des particules plates. Les surfaces rencontrées en pratique sont rarement plus lisses que  $R_a = 0,21\mu\text{m}$  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.

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 alors au sein du sol. C'est le **mode interne**. Enfin, si les rugosités  $R_a$  et  $R$  sont supérieures à des valeurs approximatives de 11 et 2 respectivement, pour K1 et K1G (i.e.  $R_a \geq 2D_{av}$ ). La rugosité n'a alors pratiquement pas d'effet sur le frottement mobilisé. Comme précisé auparavant, la résistance à l'interface est proche de la résistance sol-sol  $\delta = (0,97 - 0,98) \phi$ . Pour ce mode, la limite supérieure  $\delta/\phi$  est l'unité. Toutefois, pour CG lors d'un frottement sol-acier, ce mode ne semble pas exister pour la gamme des interfaces testées.

Le **mode intermédiaire** qui correspond à un comportement mixte a lieu par des rugosités dans les gammes  $R_a = 1-11$  ou  $R = 0,1-2$  pour autant que K1 et K1G sont concernés. Dans ce mode a lieu une nette augmentation du frottement d'interface avec la rugosité comme indiqué dans la figure 5.11. 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. Pour CG ce mode a lieu lorsque  $R_a \geq 3$  ou  $R \geq 1$ , il y a une faible augmentation du frottement à l'interface avec la rugosité comparable à celle de K1 et K1G.

Les modes de cisaillement d'interface suggérées ci-dessus ont également été postulées par Tsubikihara et al. (1993) qui ont testés des sols cohérents contre des interfaces d'acier doux, en utilisant l'appareil de cisaillement simple de cisaillement, pour des déplacements de 15mm. Ils ont conclu que le comportement lors d'un frottement à l'interface peut être classé en trois modes de rupture :

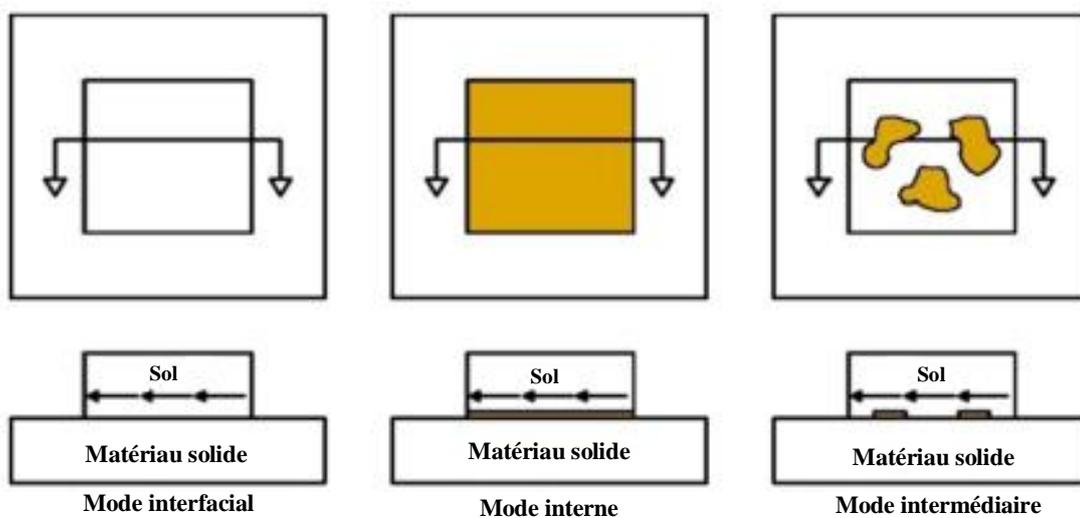
- un glissement total à l'interface.
- une rupture par cisaillement au sein du sol.
- un comportement mixte impliquant un glissement à l'interface et une rupture par cisaillement du sol.

Pour un cisaillement à l'interface sol-matériau solide avec des valeurs de  $R_{\max}$  ( $L = 0,2$  mm) de 20 et 30 $\mu$ m, le glissement d'interface et la déformation par cisaillement se déroulent simultanément.

Il est à noter que des résultats similaires de cisaillement à l'interface obtenues par Hammoud (2006) en ce qui concerne des essais effectués par l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead sur quatre types de sols cohérents et deux matériaux d'interface (acier et béton) avec différentes rugosités. Pour les valeurs de pic a été obtenue, cependant, une courbe de tendance unique pour la variation de  $\delta/\phi$  avec  $R$ . En conséquence, il a conclu que le comportement de friction peut être classé en trois modes de rupture:

- glissement des particules sur l'interface lorsque  $R$ , est inférieur à 0,3;
- rupture par cisaillement au sein du sol lorsque  $R$  est supérieur à 1;
- un comportement mixte où le glissement à l'interface et la déformation par cisaillement dans le sol se produiraient simultanément, pour des valeurs de  $R$  dans la gamme de 0,3 à 1.

Comme on peut le remarquer les délimitations entre les trois modes de cisaillement interfaciale sont différentes et elles semblent dépendre du type de sol. La figure 5.12, illustre les trois modes de cisaillement à interface sol – matériau solide.



**Figure 5.12** Mode de cisaillement à l'interface

## 5.2.5 Effet de la texture de surface sur le cisaillement à l'interface sol - matériau solide

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 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 fraisage. Il est suggéré d'étudier l'effet de quatre types d'interface de différentes textures (topographie) TX1, TX2, TX3 et TX4, avec une même valeur de la rugosité  $R_a = 5.69 \mu\text{m}$ , sur la résistance au cisaillement à l'interface. Le mode de cisaillement est dans ce cas le mode intermédiaire. Le but de cette section est d'indiquer une vue réaliste de l'effet des textures sur le mécanisme de cisaillement à l'interface sols cohérents - surface solide dans le domaine de déformation allant du pré - pic au post - pic.

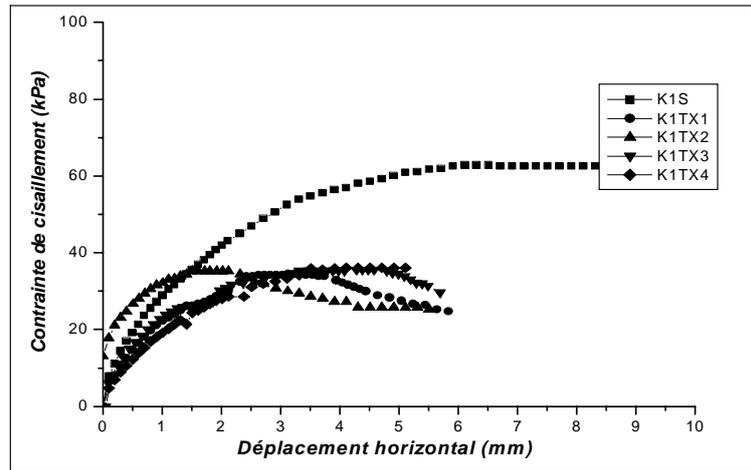
Les courbes obtenues à partir des essais de cisaillement à l'interface sol - acier de différentes textures ont été regroupées pour chaque type de sol dans les figures 5.13 à 5.16. On peut être également noté que les courbes obtenues à l'issue des essais correspondant aux l'interfaces TX1, TX2, TX3 et TX4 ont des tendances similaires.

### 5.2.5.1 Résultats des essais

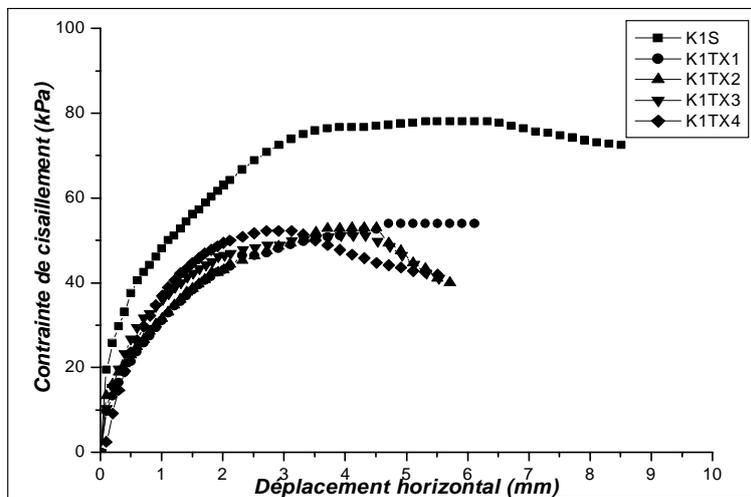
#### 5.2.5.1.1 Essais sur le kaolin, K1

Les courbes obtenues pour les trois contraintes normales utilisés 109, 150, et 204 kPa montrent que la relation entre la contrainte de cisaillement et le déplacement horizontal est plus ou moins hyperbolique avec un comportement ductile lorsque un cisaillement sol - sol est impliqué.

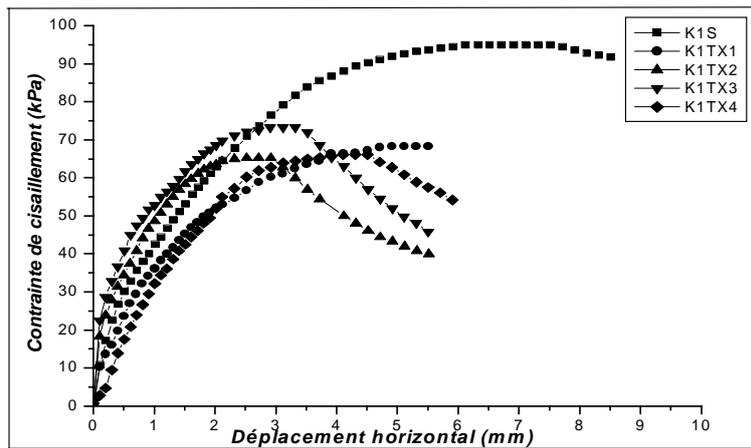
Les courbes obtenues (Figure 5.13) pour K1, dans le cas de  $\sigma_n = 109 \text{ kPa}$  présentent la même allure pour les trois textures TX1, TX3, TX4 alors que la résistance au cisaillement correspondant à TX2 atteint le pic pour un déplacement plus petit. Pour  $\sigma_n = 150 \text{ kPa}$ , il y'a une tendance identique à l'augmentation de la résistance au cisaillement, avec la même valeur de  $\tau_{\text{max}}$ . On note également que les valeurs de  $\tau_{\text{max}}$  sont légèrement différentes pour les textures utilisés pour  $\sigma_n = 204 \text{ kPa}$ .



a- Pour  $\sigma_n = 109$  kPa



b- Pour  $\sigma_n = 150$  kPa

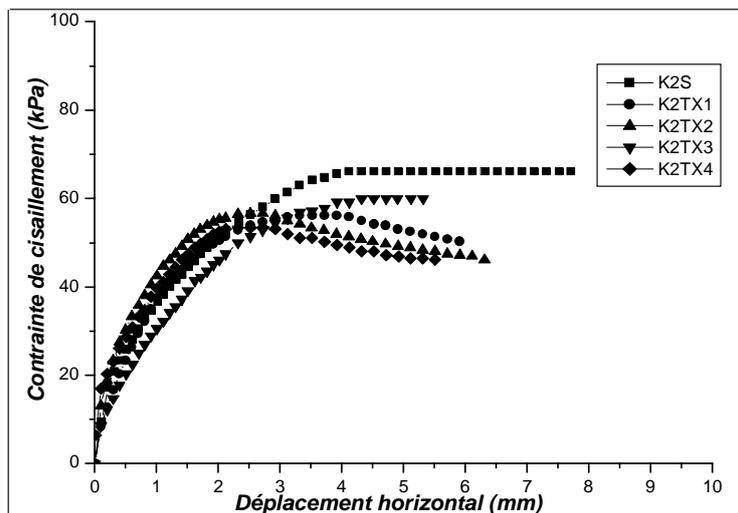
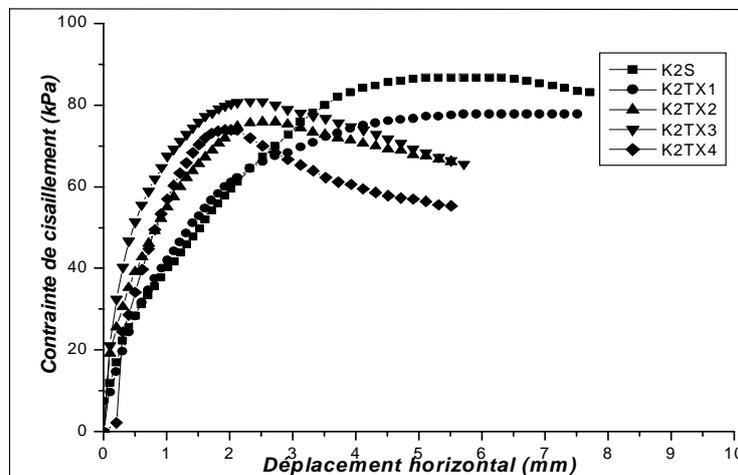


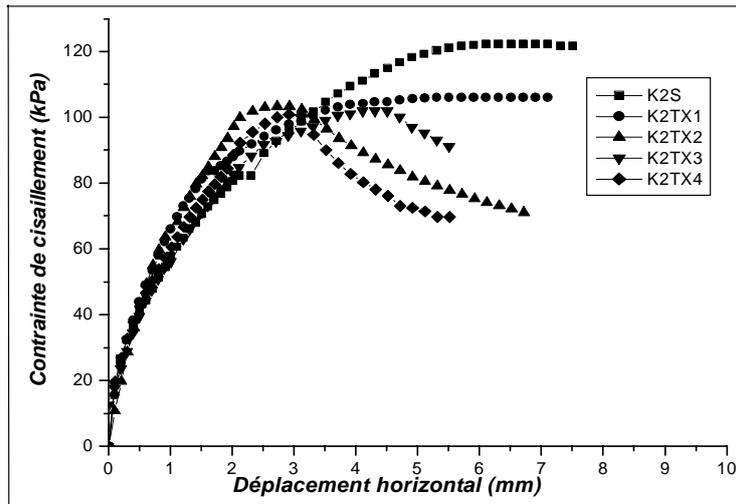
c- Pour  $\sigma_n = 204$  kPa

**Figure 5.13** Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal obtenues dans le cas de K1

### 5.2.5.1.2 Essais sur le kaolin, K2

Concernant l'influence des textures de surface sur une argile très plastique (K2), les tendances observées (Figure 5.19) en cisaillement montrent que l'allure des courbes pour  $\sigma_n = 109$  kPa donnent la même allure pour l'ensemble des interfaces TX1, TX2, TX4 et présentent les mêmes valeurs de  $\tau_{max}$ , à l'exception pour TX3, la valeur de  $\tau_{max}$  est modérément différente. Ainsi pour  $\sigma_n = 150$  kPa, l'interface TX1 présente un comportement similaire à celui de l'essai de cisaillement sol-sol, pour un déplacement horizontal de l'ordre de 3 mm, puis se stabilise à partir d'un déplacement horizontal de l'ordre de 5mm. On note également que les valeurs de  $\tau_{max}$  sont quasiment identiques pour les interfaces TX2, TX3, TX4. En ce qui concerne  $\sigma_n = 204$  kPa le comportement des courbes des interfaces TX1, TX2, TX3, TX4 est similaire à celui de l'essai de cisaillement sol-sol, pour un déplacement horizontal de l'ordre de 1,8 mm. Les valeurs de  $\tau_{max}$  pour l'ensemble des modèles de texture sont légèrement différentes.

a- Pour  $\sigma_n = 109$  kPab- Pour  $\sigma_n = 150$  kPa

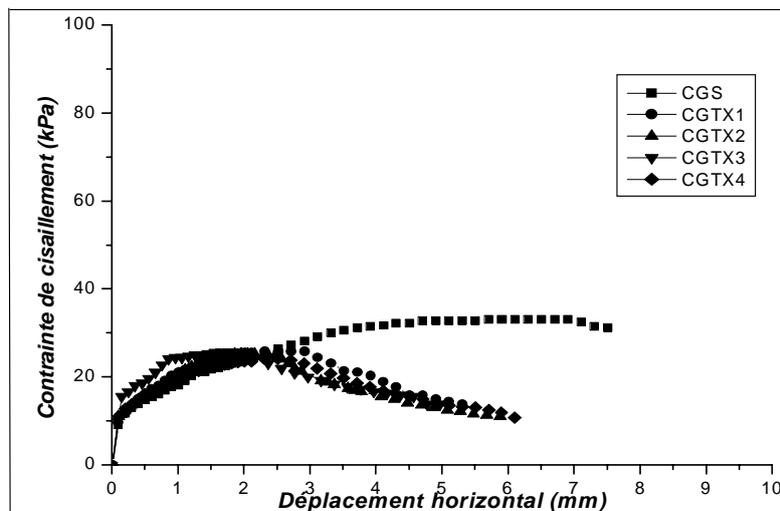


c- Pour  $\sigma_n = 204$  kPa

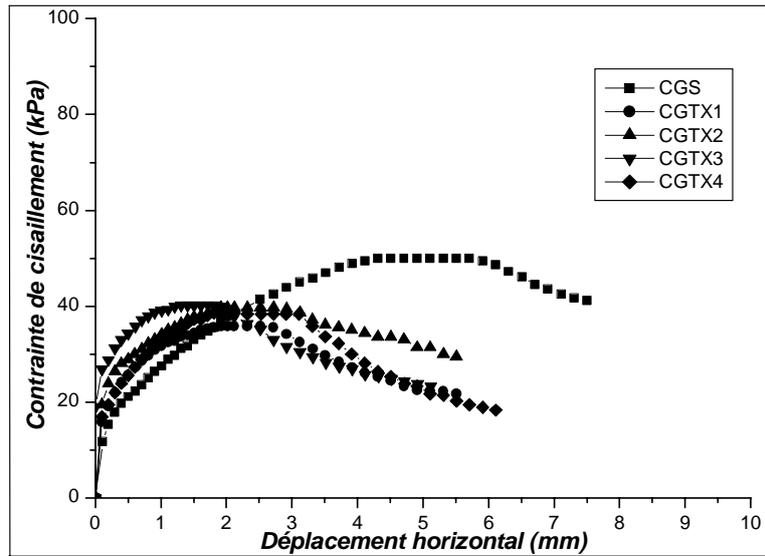
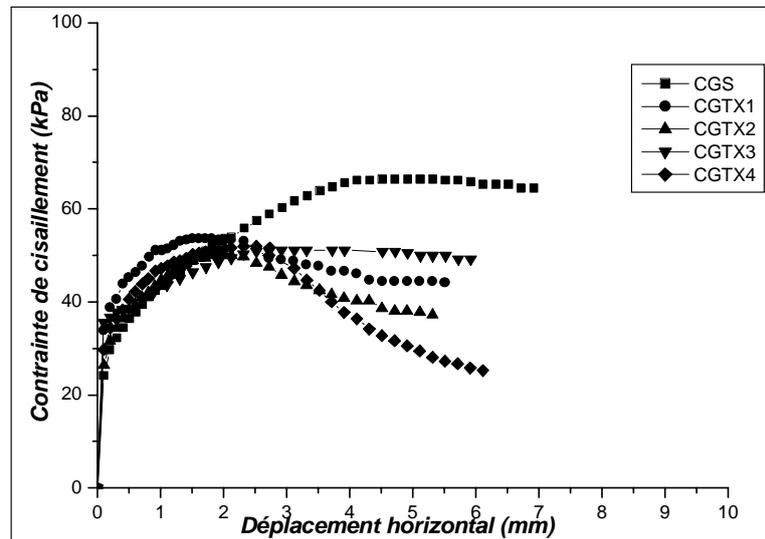
**Figure 5.14** Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal obtenues dans le cas de K2

### 5.2.5.1.3 Essais sur l'argile de Guelma, CG

Des essais ont été réalisés sur l'argile de Guelma pour étudier l'effet du modèle de texture sur la résistance au cisaillement. La figure 5.15, donne les courbes de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal, pour les trois contraintes normales utilisées. Un comportement fragile a été mis en évidence en particulier pour l'argile de Guelma (CG). Les valeurs de  $\tau_{\max}$  sont pratiquement identiques.



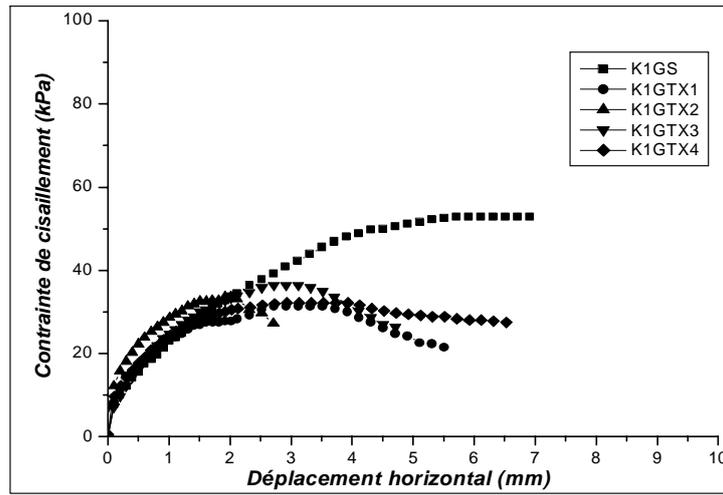
a- Pour  $\sigma_n = 109$  kPa

b- Pour  $\sigma_n = 150$  kPac- Pour  $\sigma_n = 204$  kPa

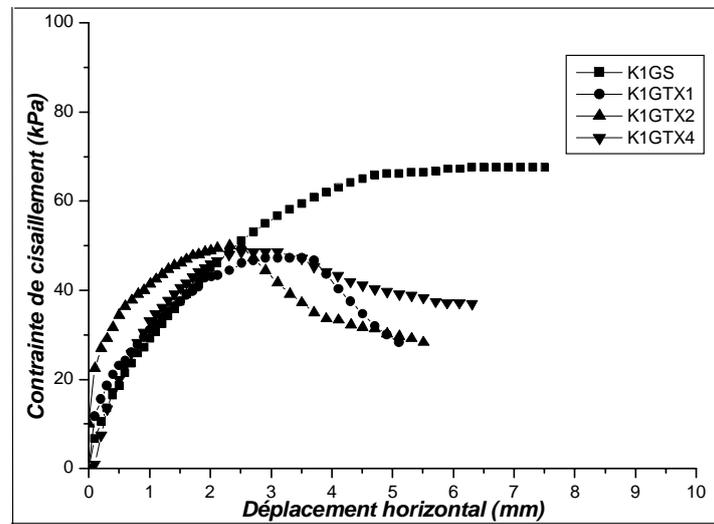
**Figure 5.15** Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal obtenues dans le cas CG

#### 5.2.5.1.4 Essais sur le mélange kaolin-argile de Guelma, KIG

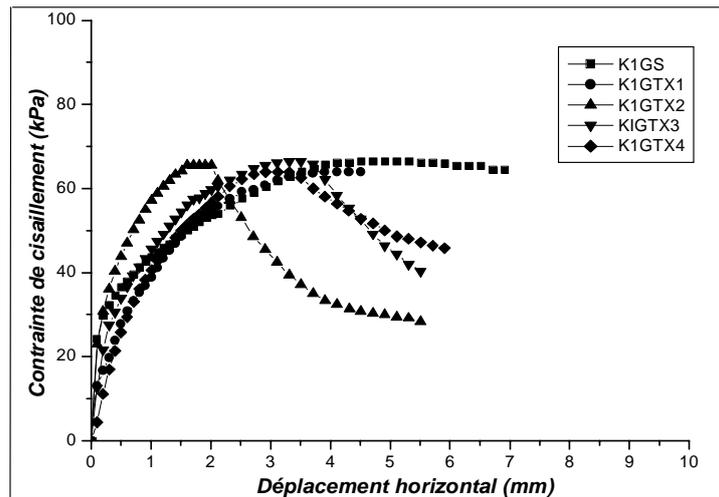
Les résultats des essais réalisés sur le mélange kaolin-argile de Guelma (Figure 5.16), montrent que le comportement de cisaillement à l'interface ainsi que les valeurs de  $\tau_{\max}$  sont pratiquement identiques pour les modèles de texture des interfaces utilisées.



a) Pour  $\sigma_n = 109$  kPa



b) Pour  $\sigma_n = 150$  kPa

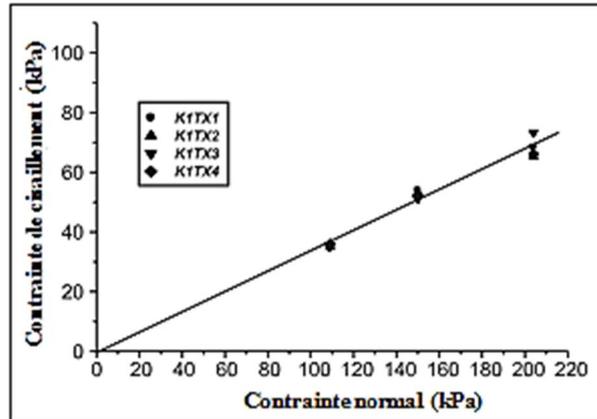


c) Pour  $\sigma_n = 204$  kPa

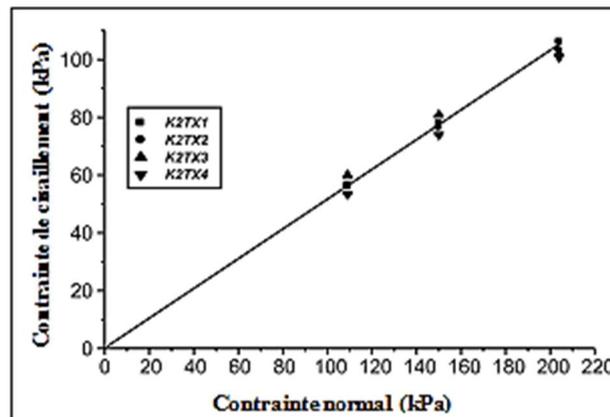
**Figure 5.16** Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal obtenues dans le cas de K1G

### 5.2.5.2 Analyse et interprétation

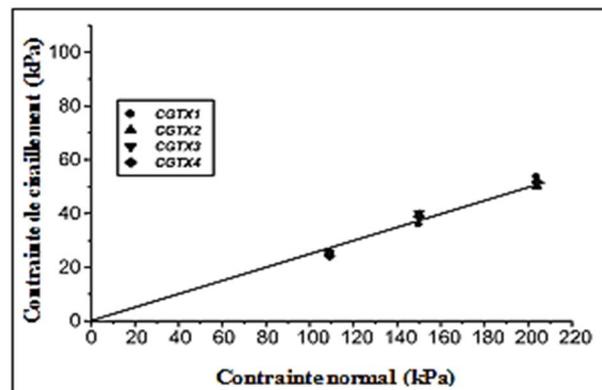
Afin d'évaluer l'effet du modèle de texture de surface sur la résistance au cisaillement de pic, les résultats sont présentés sur la figure 5.17. On constate que les relations sont à peu près linéaires pour la gamme des contraintes normales utilisées. En outre, on peut observer qu'il n'y a pratiquement aucune influence des modèles de texture sur les résistances de cisaillement mesurées.



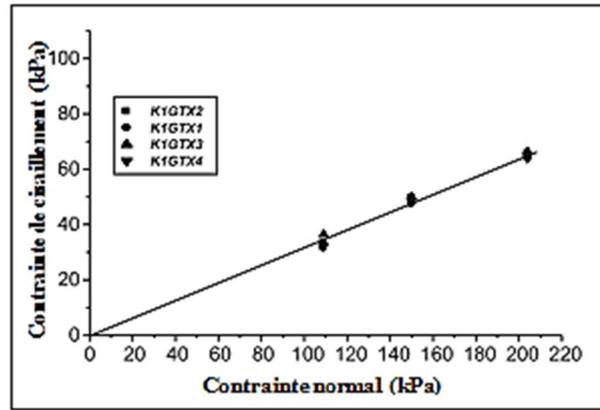
a) K1



b) K2



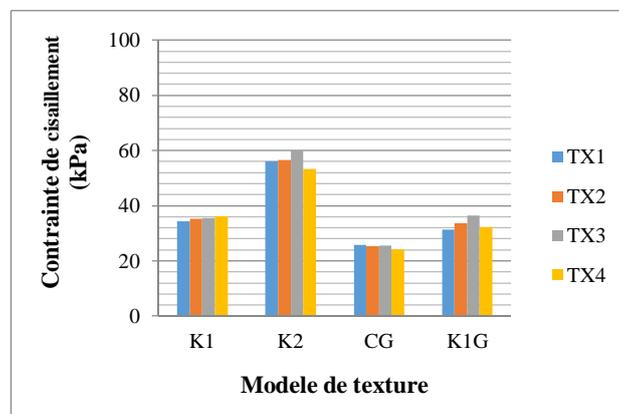
c) CG

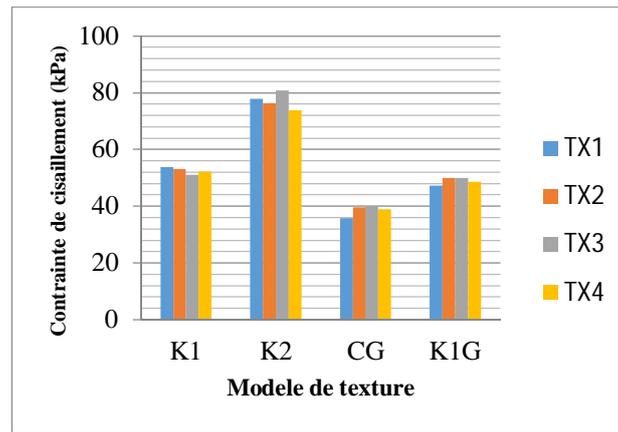


d) K1G

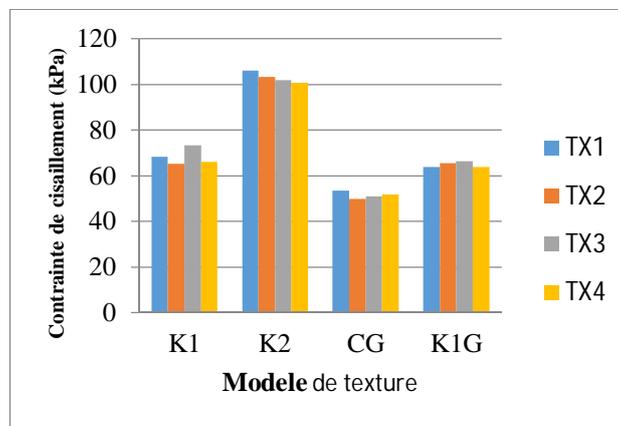
**Figure 5.17** Contrainte normal - contrainte de cisaillement pour l'ensemble des sols étudiés

Les résultats sont également présentés sous forme d'histogrammes. Les figures 5.18, 5.19 et 5.20, montrent la contrainte de cisaillement de quatre surfaces de texture à des contraintes normales de 109, 150 et 204 kPa, respectivement. Comme conclu auparavant, aucune tendance n'a été observée en ce qui concerne les valeurs de  $\tau_{\max}$  qui ne semblent pas être influencés par le modèle de texture. Il est à noter que des résultats similaires ont été rapportés par Dejong et al. (2001) qui ont étudié une série d'essais de cisaillement direct modifié réalisés sur un sable contre des interfaces de différentes textures pour simuler le cisaillement du sol causé durant l'essai de pénétration à cône CPT. Ils ont constaté que l'angle de frottement au pic  $\delta_p$  pour les interfaces de même rugosité et de différentes textures, est constant. De même, Tan et al. (2008) ont effectué des essais d'interface au moyen d'un appareil de cisaillement direct modifié sur des échantillons de kaolin saturé et deux plaques d'acier de même rugosité avec deux différentes textures pour étudier le mécanisme de rupture. Ils ont constaté que les comportements de cisaillement caractérisés par les courbes contraintes de cisaillement-déplacement sont légèrement différents.

**Figure 5.18** Contrainte de cisaillement d'interface pour différents modèles de texture,  $\sigma_n=109$  kPa



**Figure 5.19** Contrainte de cisaillement d'interface pour différents modèles de texture,  $\sigma_n=150$  kPa



**Figure 5.20** Contrainte de cisaillement d'interface pour différents modèles de texture,  $\sigma_n=204$  kPa

### 5.3 Limitations de l'appareil de cisaillement direct modifié

Plusieurs facteurs peuvent avoir des effets sur les résultats des essais de cisaillement direct modifié. La facilité et la simplicité de cet appareil font qu'il est souvent utilisé pour déterminer des caractéristiques de frottement le long d'une surface imposée (Potyondy, 196; Wemick, 1979; Plytas, 1985; Desai, 1985; Subba Rao et al, 2000; Shakir et Zhu, 2009; Suriyavut, 2013).

Le principal défaut majeur de cet appareil réside dans les conditions aux limites imposées. En effet, ces conditions ne permettent pas à l'échantillon de se déformer librement et uniformément avec une indépendance complète des rotations des axes principaux des contraintes et des déformations.

La contrainte et la déformation appliquées à l'échantillon dans la boîte de cisaillement manquent d'uniformité à cause des extrémités rigides de la boîte.

Cependant tout effet peut être également réduit en graissant légèrement le pourtour de la plaque d'acier et la demi-boîte supérieure.

La perte d'échantillon à partir des limites périphériques de l'échantillon semble être un problème majeur pour l'ensemble des essais d'interfaces, Cette perte varie en fonction de la plasticité du matériau, plus le matériau est plastique plus elle est importante. Généralement, on utilise pour la structure des plaques de dimensions plus grandes que celles de la boîte de type Casagrande. Dans ce cas, l'aire de l'interface au cours de l'essai reste constante et le risque de perte de matériau est faible. Jewel et Worth (1987) ont placé l'échantillon de sol et le matériau de solide dans une membrane en caoutchouc ce qui a permis de limiter la perte de matériau et de réaliser des essais cycliques.

Les anneaux dynamométriques commercialisés peuvent manquer de précision pour un grand nombre utilisation de la machine ou pour des anneaux non étalonné. Dans ce travail des anneaux dynamométriques de grandes précisions, équipés de capteurs de forces permettant des mesures avec une bonne précision ont été utilisés.

## **5.4 Conclusions**

Ce chapitre a été consacré aux résultats des essais réalisés et les interprétations concernant le comportement d'interface des matériaux cohérents, et particulièrement l'effet de la rugosité d'interface, l'effet de type de texture de surface, ainsi que l'étude du mécanisme de cisaillement à l'interface.

Concernant la fiabilité, la répétitivité des résultats d'essais effectués a été vérifiée et a été jugée satisfaisante.

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. 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.

Dans le domaine des petits déplacements, il semble également que le type de matériau d'interface (acier ou papier abrasif) utilisé n'a pas une influence majeure sur la résistance au cisaillement mobilisé.

L'analyse des résultats montre que trois modes, dont l'existence semble très liée à la rugosité de surface au comportement différent. Les délimitations entre les trois modes de cisaillement interfaciale semblent varier en fonction du type de sol. Dans ce

travail le paramètre de quantification de la rugosité,  $R$ , a été utilisé pour délimiter les trois modes contrairement aux études précédentes.

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 des particules fines. 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 orientées se développe et la contribution due à la structure de l'ensemble de l'échantillon est négligeable. 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 0,1. On peut également déduire que les valeurs de  $\delta/\varphi$  tendent vers une valeur minimale d'environ 0,56 pour K1, 0,44 pour CG et K1G, lorsque  $R$  tend vers zéro.

Quand la rugosité de l'interface augmente, 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. 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.

Dans le mode intermédiaire qui se produit pour des valeurs de  $R$  dans le domaine 0,1 à 2, 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.

D'autre part concernant, l'effet du modèle de texture de surface sur la résistance au cisaillement au pic, les résultats des essais montrent que les relations sont

à peu près linéaires pour la gamme de contraintes normales utilisées. En outre, on peut observer qu'il n'y a pratiquement aucune influence des modèles de texture sur les résistances de cisaillement mesurées.

## CHAPITRE VI Modélisation numérique de l'essai de cisaillement à l'interface par la méthode des éléments finis

### 6.1 Introduction

Les études expérimentales présentent l'inconvénient du coût, du temps de conception et de réalisation. Elles sont généralement axées sur la définition de nouveaux paramètres de modélisation. Afin d'étudier le comportement d'interface entre le sol et la structure présentant une rugosité géométrique et de compléter les études expérimentales (chapitre 5), une analyse numérique bidimensionnelle est effectuée avec le code de calcul aux éléments finis PLAXIS. Trois sols ont fait l'objet d'une simulation numérique, à savoir: K1, CG et K1G. Les paramètres déduits pour modéliser le comportement d'interface lors des essais expérimentaux sont utilisés dans cette étude numérique. Le modèle constitutif choisi est le plus simple, Mohr-Coulomb à 5 paramètres ( $E$ ,  $\nu$ ,  $c$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ). Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais au laboratoire, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité. Le critère de Mohr-Coulomb est généralement admis comme critère de rupture pour caractériser l'état d'équilibre limite du comportement d'interface et on peut distinguer:

Pour la partie élastique, la contrainte de cisaillement est donnée par la relation :

$$\tau < \sigma_n \operatorname{tg} \delta + c \quad (6.1)$$

Pour la partie plastique (avec une occurrence de déplacement permanent),  $\tau$  est alors donnée par :

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \delta + c \quad (6.2)$$

La figure 6.1 représente une courbe correspondant aux deux parties.

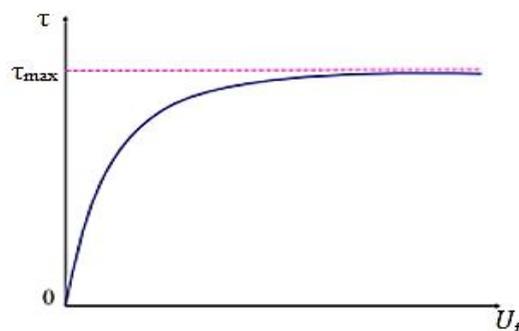


Figure 6.1 Essai de cisaillement modifié post pic

L'angle de frottement à l'interface  $\delta$  dépend principalement de la surface de rugosité et l'angle de frottement du sol adjacent à l'interface. Il est déduit à partir du facteur de réduction pour le frottement à l'interface ( $R_{inter}$ ):

$$c_i = R_{inter} \times c \quad (6.3)$$

$$\text{tg}\delta = R_{inter} \times \text{tg}\varphi \quad (6.4)$$

En ce qui nous concerne, un des intérêts originaux du modèle géotechnique PLAXIS est le traitement efficace des interfaces entre matériaux, en particulier des interfaces sol-solide.

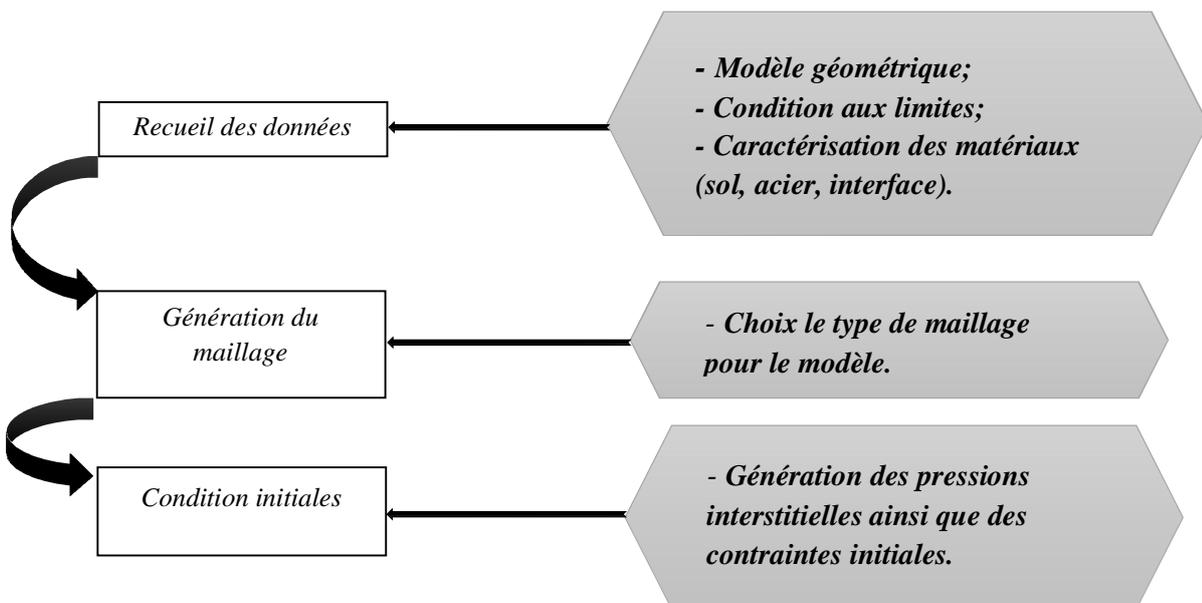
## 6.2 Modélisation 2-D de l'essai de cisaillement direct modifié sous charge monotone

Les aspects et les mécanismes présents lors du cisaillement direct sont, dans l'ordre hiérarchique:

- le frottement sol-plaque rugueuse et sol-boîte;
- le chemin de cisaillement direct;
- le frottement piston-boîte.

### 6.2.1 Conception du modèle numérique et procédure de simulation

La méthodologie proposée est divisée en trois étapes à savoir: le recueil des données expérimentales et géométriques, la génération du maillage, et la définition des conditions initiales.

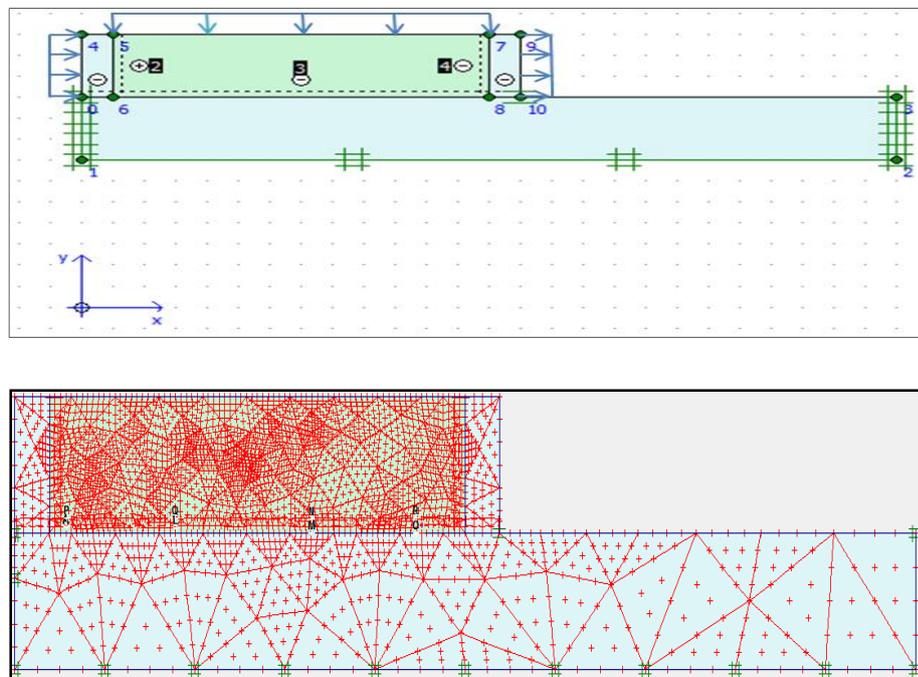


**Figure 6.2** Méthodologie proposée pour la modélisation numérique d'un essai de cisaillement modifié

### 6.2.1.1 Recueil des données

Cette étape consiste en la description des données géométriques ainsi que la caractérisation géotechnique des sols utilisés. L'essai en déformation plane (2D) a été simulé en utilisant des éléments à 15 nœuds, avec des éléments de volume, et des éléments d'interface. Le modèle géométrique reproduit les dimensions réelles de la boîte de cisaillement modifiée de (60x60x15) mm pour les dimensions de la demi-boîte supérieure, et (128x128x15) mm pour la plaque d'acier. Les interfaces sont créées entre la boîte de cisaillement et le sol, la plaque d'acier et le sol et la boîte de cisaillement et la plaque. Les conditions aux limites du modèle sont déterminées en suivant la méthode expérimentale, pour la demi-boîte supérieure on permet les déplacements horizontaux et verticaux alors que pour la demi-boîte inférieure on bloque tous les déplacements (total fixities). La condition de charge normale constante est recrée en appliquant une contrainte normale uniformément répartie au sommet et un déplacement de cisaillement tout le long de l'interface.

Les points de calcul sont situés à proximité de l'interface (des points sont positionnés au-dessus de la ligne d'interface et le reste sont positionnés à l'intérieur de la zone d'interface). La géométrie du modèle et les conditions aux limites sont présentées sur la figure 6.3.



**Figure 6.3** Modèle géométrique de la boîte de cisaillement modifiée

La procédure et les résultats des essais de cisaillement direct expérimentaux ont fait l'objet des chapitres 4 et 5. Ils ont permis de déterminer les paramètres nécessaires aux modèles de comportement utilisés. Les sols sont représentés par le critère de Mohr-Coulomb alors que la plaque d'acier est représentée par un modèle élastique linéaire. Les caractéristiques géotechniques des sols utilisées dans la modélisation sont présentées au tableau 6.1.

**Tableau 6.1.** Caractéristiques mécaniques des sols

Paramètres	K1	CG	K1G
Modèle	Mohr-Coloumb	Mohr-Coloumb	Mohr-Coloumb
Type de comportement	Drainé	Drainé	Drainé
$K_x$ (m/j)	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
$K_y$ (m/j)	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
$E_{ref}$ (kPa)	1595, 5381, 2257	1321, 1853, 5679	1210, 1880, 2288
$\gamma$	0,36	0,4	0,36
$c$ (kPa)	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
$\varphi$ (°)	25,39	18,6	24,56
$\psi$ (°)	00	00	00
$\sigma_n$ (kPa)	109, 150, 204	109, 150, 204	109, 150, 204
$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,86	24,85	23,29
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,73	18,83	16,87
$R_{int}$	Rigide	Rigide	Rigide

Des interfaces sont utilisées pour produire les effets d'interaction aux contacts sol-plaque, sol-boîte, et boîte-plaque. Les paramètres du modèle d'interface sont déterminés en suivant le modèle donné par Suriyavut (2013) qui a été validé sur des essais de cisaillement d'interface. Les caractéristiques de la plaque, de la demi-boîte supérieure et d'interfaces sont indiquées au tableau 6.2. L'interface boîte-plaque d'acier n'a pas d'influence sur les résultats du modèle. Il est à noter que l'épaisseur de l'interface n'a jamais été définie dans Plaxis, un facteur d'épaisseur virtuelle est alors

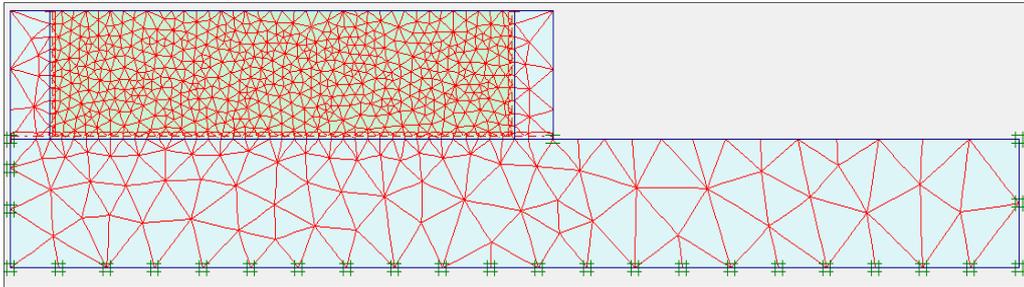
défini. Ceci est une valeur purement numérique (0,10 par défaut). Pour optimiser les performances numériques sur l'interface, la valeur du facteur d'épaisseur virtuelle égale à 0,010 est alors définie.

**Tableau 6.2** Caractéristiques mécaniques des interfaces

Paramètres	Plaque d'acier	Boite-plaque interface
Modèle	Elastique linéaire	Elastique linéaire
$\gamma_{\text{dry}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	60	-
$E_{\text{ref}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$2,1 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^8$
$\nu$	0,15	0,15

### 6.2.1.2 Génération du maillage

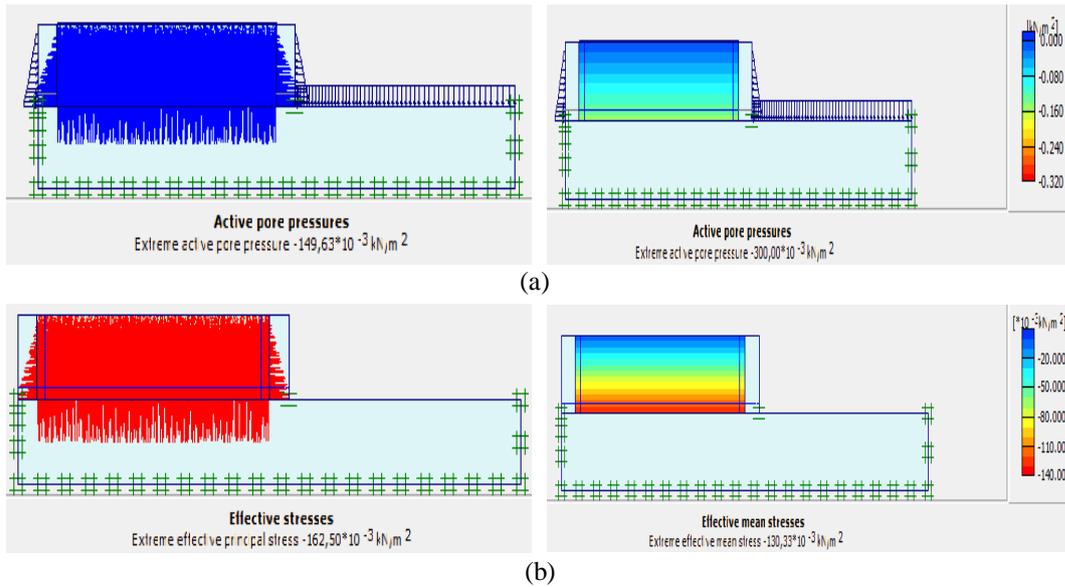
Le maillage du modèle consiste en 1295 éléments en déformation plane à 15 nœuds, dont le nombre des nœuds est de 10782 nœuds. Le type d'éléments du maillage (global Coarseness) a été réglé sur « medium » puis raffiné localement au niveau de l'échantillon de sol comme indiqué sur la figure 6.4.



**Figure 6.4** Maillage du modèle

### 6.2.1.3 Définition des conditions initiales

Cette étape est primordiale dans toutes les modélisations, car les conditions initiales conditionnent la solution finale. Elle s'effectue d'abord par la génération des pressions interstitielles pour les conditions de saturation (dans notre cas) et de la contrainte initiale (effet  $K_0$ ) (Figure 6.5). La valeur de  $K_0$  est proposée automatiquement d'après la formule de Jaky. Le poids du sol a été pris en entier égal à 1, ce qui correspond à une application totale de la gravité. Numériquement, dans le logiciel aux éléments finis Plaxis, utilisé dans cette étude, le poids propre du sol et le coefficient de pression des terres au repos ( $K_0$ ) définissent l'état de contrainte géostatique initial.



**Figure 6.5** Génération des conditions initiales: a) pressions interstitielles; b) contraintes initiales

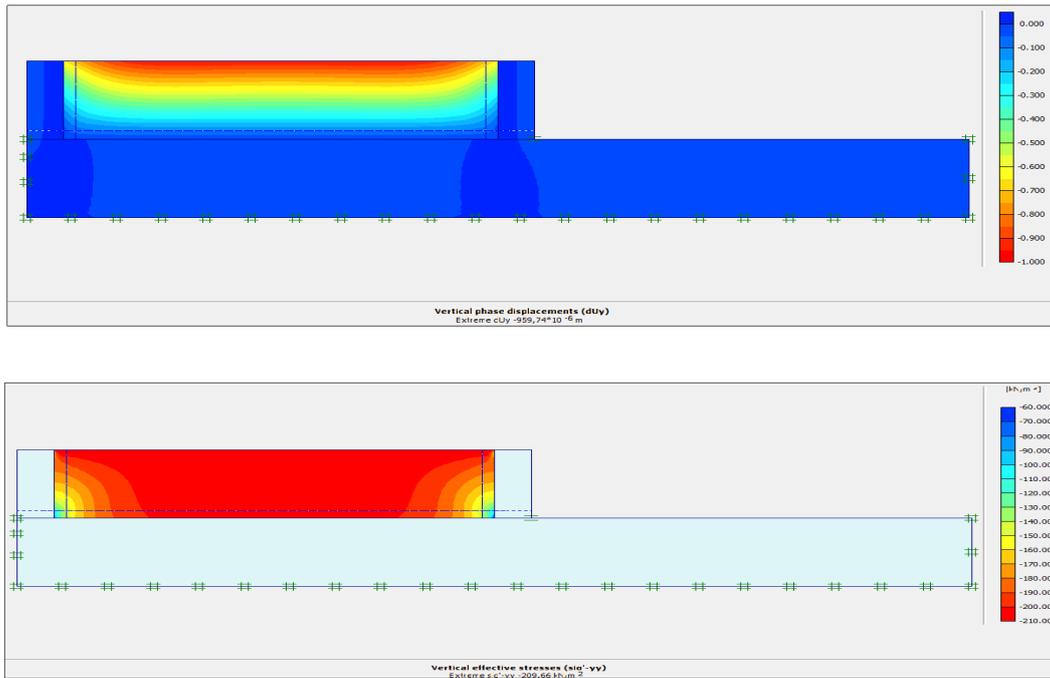
### 6.2.2 Phases de calcul pour la modélisation de l'essai de cisaillement d'interface

La valeur des contraintes normales appliquées et les déplacements horizontaux prescrits peuvent être spécifiés dans le programme d'entrée (input). Ces procédures peuvent être activés ou désactivés dans le programme de calcul au moyen de l'option de « staged construction ». Le calcul de l'ensemble des phases peut être effectué au moyen du processus de « staged construction ». Pour tous les essais de cisaillement direct modifiés, le déplacement de cisaillement prescrit est fixé à 10 mm. Les procédures de calcul sont typiquement énumérées dans la figure 6.6.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input
Initial phase	0	0	N/A	N/A
✓ <Phase 1>	1	0	Plastic	Staged construction
✓ <Phase 2>	2	1	Plastic	Staged construction

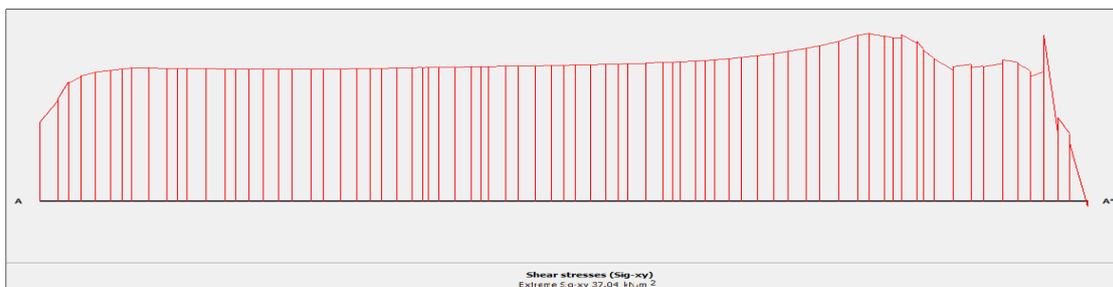
**Figure 6.6** Procédures de chargement pour essai de cisaillement d'interface

La figure 6.7 montre également la distribution du déplacement vertical due à une application de la contrainte normale sur l'échantillon. Il est également constaté que la distribution de la contrainte normale est moins prononcée dans les coins inférieurs.



**Figure 6.7** Distribution du déplacement vertical dû à l'application de  $\sigma_n$

L'hétérogénéité en termes de contrainte de cisaillement se manifeste sur la figure 6.8. Le déplacement vertical durant le cisaillement est presque nul le long de la ligne d'interface (Figure 6.9). On constate une absence de pic de cisaillement et un déplacement vertical sous-estimé (C'est le plus grave défaut que l'on peut reprocher à cette modélisation).



**Figure 6.8** Distribution de la contrainte de cisaillement le long de la zone d'interface



**FIGURE 6.9** DISTRIBUTION DE DEPLACEMENT VERTICAL A LA ZONE D'INTERFACE

### 6.2.3 Effet du maillage

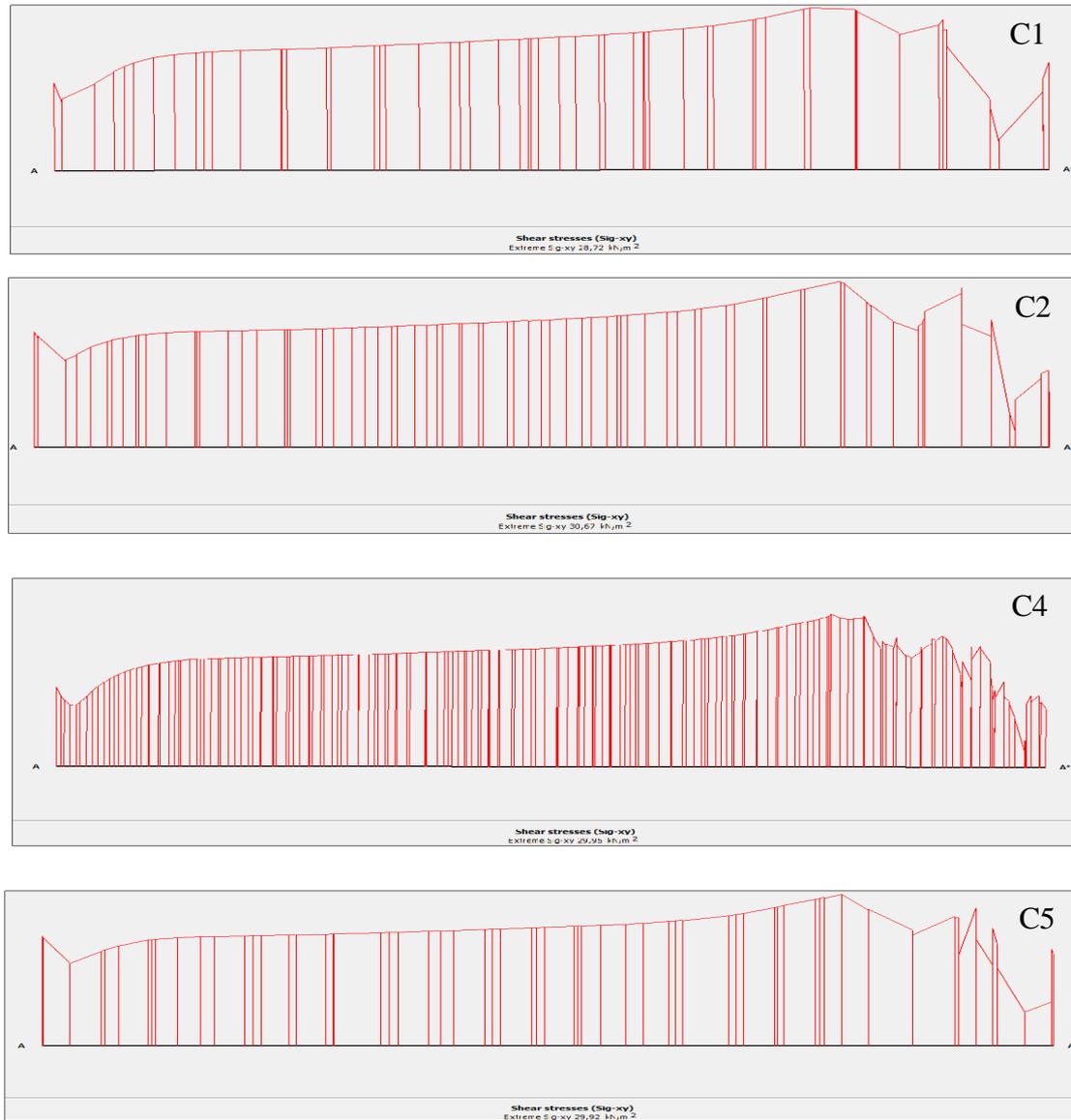
Le but de cette section est d'évaluer l'effet du maillage (i.e. nature et taille des éléments) sur les résultats. Le logiciel PLAXIS2D permet à l'utilisateur de choisir le maillage via le menu arborescent. Il peut être un maillage individuel ou combiné, de type: Coarse - Medium - Fine. Pour notre cas, nous avons opté pour les maillages détaillés suivant le tableau ci-dessous:

**Tableau 6.3** Types de maillages testés pour les calculs

	Ordre de maillage		Type de maillage	Nombre d'éléments	Nombre nœuds
Cluster	<b>C1</b>	Maillage01	Coarse	668	5652
	<b>C2</b>	Maillage02	Medium	1295	10782
	<b>C3</b>	Maillage03	Fine	-	-
Line	<b>C4</b>	Maillage04	Coarse	1014	8556
	<b>C5</b>	Maillage05	Medium	2553	21390
	<b>C6</b>	Maillage06	Fine	-	-

Quatre maillages ont été utilisés. Les maillages des cas C1 et C4 comprennent 668 et 1014 éléments triangulaires, respectivement. Les maillages C2 et C5 sont constitués de 1295 et 2553 éléments triangulaires, respectivement. Les maillages C3 et C6 pour le type fin la procédure de simulation n'ont pu être effectuées. Les conditions initiales et les conditions aux limites sont identiques pour les 4 cas de simulation (C1, C2, C4, C5). Le temps de calcul requis pour résoudre le problème dépend de la finesse du maillage. Par exemple, pour le maillage le plus grossier (maillage C1, C4), la simulation se fait en quelques secondes approximativement. Cette durée est d'environ quelques minutes pour un maillage relativement medium (maillage C2, C5). La figure 6.10 montre le profil des contraintes de cisaillement effectif le long de la ligne d'interface à la fin du calcul. On constate que les maillages de C1, C2, C4, et C5 donnent presque les mêmes résultats.

Dans la suite, le maillage choisi pour effectuer les modélisations est celui de type C2 soit un maillage Medium. Ce maillage a été adopté parce qu'il produit de bons résultats pour un temps de simulation acceptable.



**Figure 6.10** Distribution de la contrainte de cisaillement le long de la zone d'interface pour les cas de maillage dans le cas de K1

### 6.3 Validation du modèle: Comparaison entre les prévisions du modèle et les résultats expérimentaux

Pour mettre en évidence l'influence du modèle d'interface sur les résultats, la modélisation numérique de l'essai de cisaillement d'interface a été reprise, en considérant le critère de Mohr-Coulomb. On a procédé aux simulations numériques en se basant sur les mêmes propriétés du sol et de la plaque d'acier, avec le même maillage sauf que le seul paramètre qui change est le facteur réducteur de l'interface  $R_{inter}$ . L'influence de la rugosité de surface peut être représentée par ce facteur. Cependant, le

concept de ce facteur est différent des paramètres de quantification discutés précédemment.

Les résultats des calculs correspondant aux trois types de sol K1, CG et K1G ont été présentées ci-après. La comparaison des résultats des calculs avec les résultats expérimentaux, en termes de courbes contrainte de cisaillement-déplacement, est présentée ci-dessous.

### 6.3.1 Cas de K1

Les comparaisons suivantes correspondent au cas d'un sol cohérent (K1) et huit interfaces de différentes valeurs du facteur réducteur  $R_{inter}$ . Les valeurs correspondent aux valeurs du rapport  $\delta/\varphi$  obtenus à partir des essais de cisaillement sol-sol et d'interface et les valeurs de  $R_{inter}$  correspondent à chaque essai sont présentées sur le tableau 6.4. On constate qu'il y a une faible différence de valeurs entre  $R_{inter}$  et  $\delta/\varphi$ .

**Tableau 6.4** Résumé des valeurs de  $R_{inter}$  et  $\delta/\varphi$  dans le cas de K1

Essai	$R_{inter} = \frac{tg\delta}{tg\varphi}$	$\delta/\varphi$
<b>K1SI1</b>	0,53	0,56
<b>K1SI2</b>	0,72	0,74
<b>K1SI3</b>	0,91	0,92
<b>K1SI4</b>	0,97	0,98
<b>K1AI1</b>	0,66	0,68
<b>K1AI2</b>	0,71	0,73
<b>K1AI3</b>	0,75	0,77
<b>K1AI4</b>	0,77	0,79

Les variations des valeurs de  $\tau_{max}$  obtenus par les simulations numériques par rapport aux valeurs expérimentales sont données dans le tableau 6.5. Ces dernières sont incluses dans un intervalle de -1,03% à 29,1% pour  $\sigma_n = 109\text{kPa}$ , de -1,3% à 28,55% pour  $\sigma_n = 150\text{kPa}$ , et de -3,4% à 32% pour  $\sigma_n = 204\text{kPa}$ , de la valeur expérimentale.

Sur les figures 6.11 à 6.18, les résultats des simulations en termes de courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal sont présentés. L'allure générale de ces derniers montre qu'on a généralement un comportement sans ramollissement. On n'a ainsi plus un comportement fragile. Après avoir atteint la contrainte de cisaillement de pic, le niveau de contrainte reste ensuite constant.

**Tableau 6.5** Variation des résultats numériques et expérimentaux pour K1

Essai	<i>Plaxis</i>		
	$\Delta\tau$ (%)		
	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)
<b>K1SI1</b>	+29,1	+28,5	+32,0
<b>K1SI2</b>	+3,0	+13,3	+9,4
<b>K1SI3</b>	2,03	-0,9	-3,4
<b>K1SI4</b>	5,02	-1,3	-3,0
<b>K1AI1</b>	7,06	+8,4	+20,7
<b>K1AI2</b>	5,0	+14,6	+9,0
<b>K1AI3</b>	1,0	-0,4	+7,8
<b>K1AI4</b>	-1,03	+0,9	+3,3

Pour un contact rigide ou encore frottant ( $R_{inter}>0,71$ ) pour les interfaces « SI3, SI4, AI3, AI4 » (Figure 6.13, 6.14, 6.17, 6.18), on constate que les valeurs de la résistance au cisaillement recensées sont plus proches de la valeur expérimentale. On remarque également que le modèle prédit bien la première phase de l'essai (phase élastique), mais par la suite, il y a un décalage entre les deux courbes. On constate que les prédictions du modèle sont sensibles au module de Young qui varie d'un essai à un autre, ce qui induit un écart entre les courbes expérimentales et de simulation. Par ailleurs plus le coefficient réducteur de l'interface est dense plus les valeurs calculées sont proches aux valeurs expérimentaux.

Pour un contact glissant avec  $R_{inter}\leq 0,71$  pour les interfaces SI1, SI2, AI1, AI2 (Figure 6.11, 6.12, 6.15, 6.16), les variations des valeurs de  $\tau$  sont situées dans un intervalle de -1% à 29,1%, pour  $\sigma_n= 109\text{kPa}$ , de -0,43% à 28,5% pour  $\sigma_n= 150\text{kPa}$ , et de 9,0% à 32,1% pour  $\sigma_n= 204\text{kPa}$ . En ce qui concerne l'évolution de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ), on remarque que les prédictions du modèle sont sensibles au coefficient réducteur de l'interaction  $R_{inter}$ , ce qui induit également un écart entre les courbes expérimentales et de simulation.

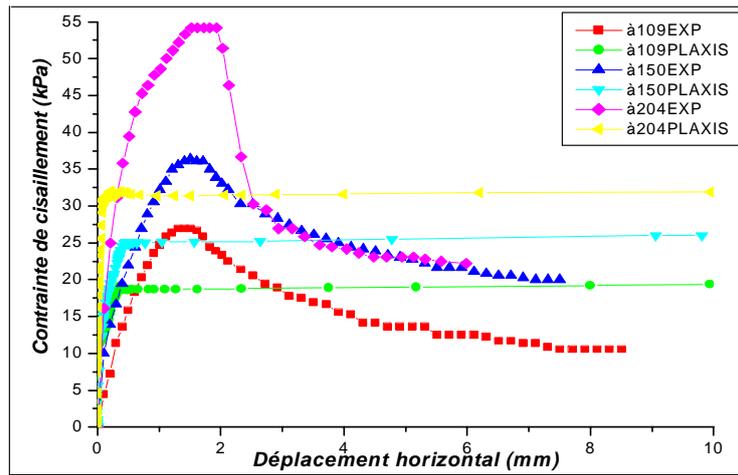


Figure 6.11 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI1

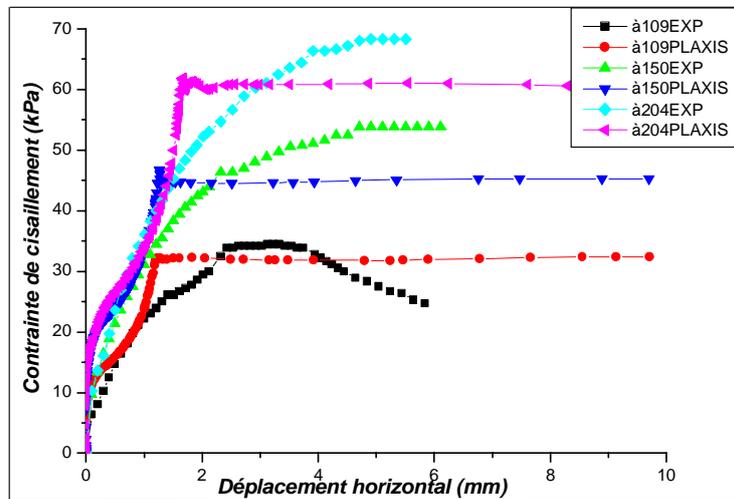


Figure 6.12 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI2

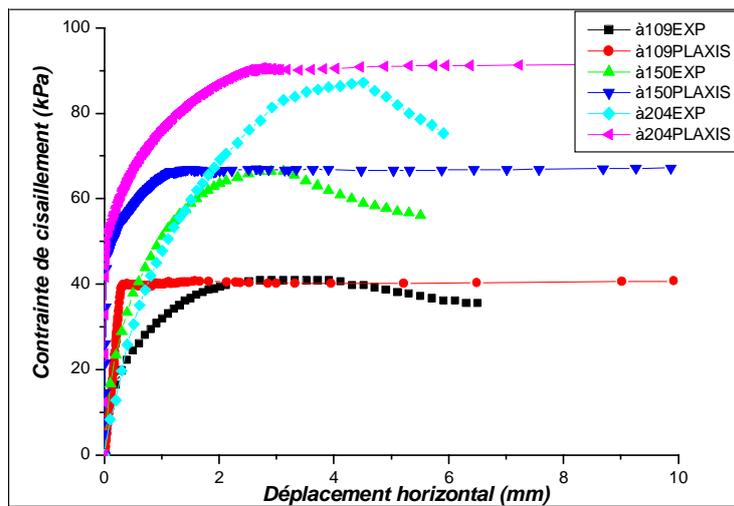


Figure 6.13 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI3

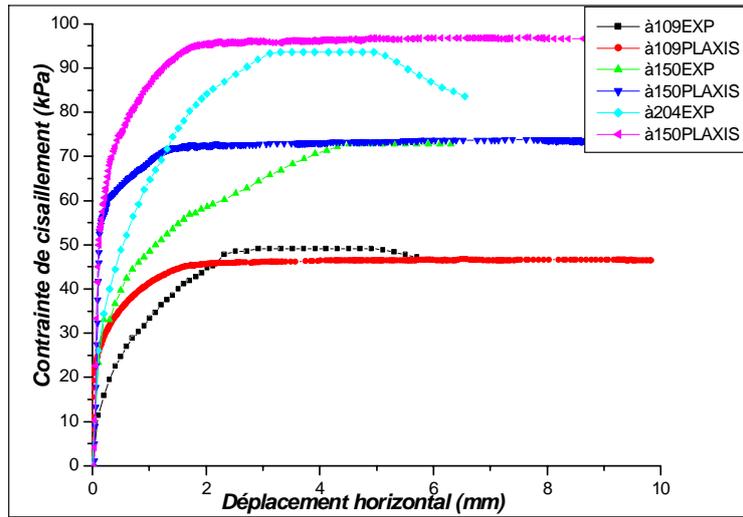


Figure 6.14 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI4

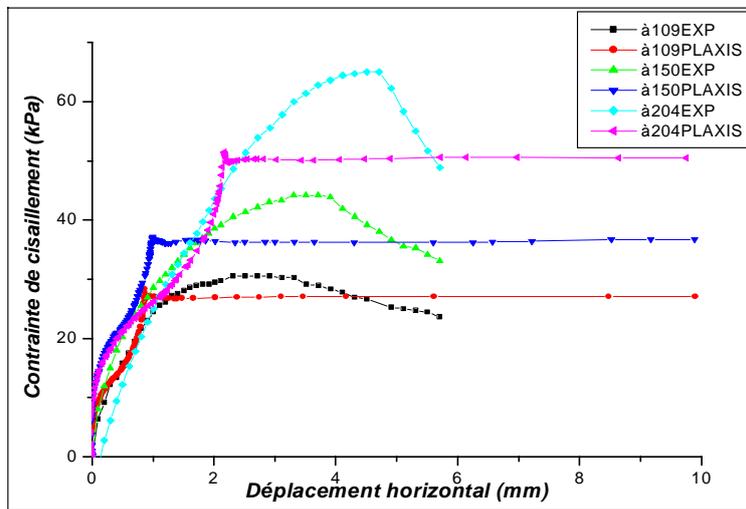


Figure 6.15 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI1

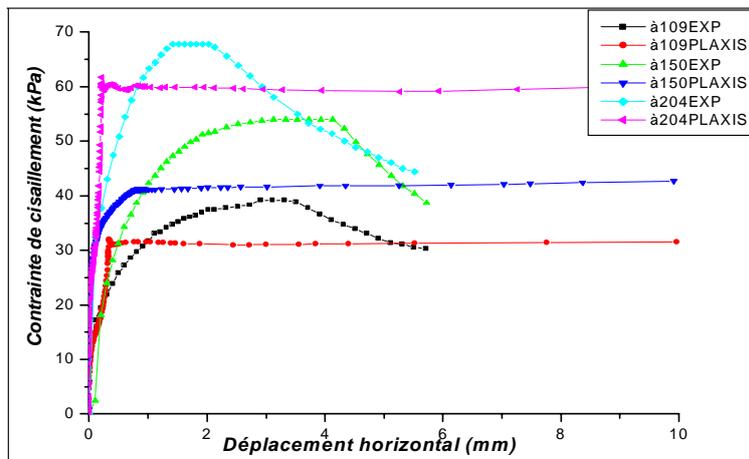


Figure 6.16 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI2

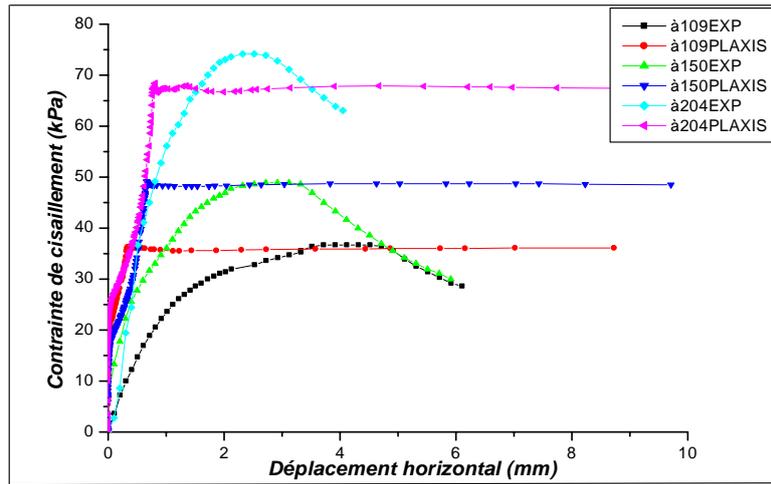


Figure 6.17 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI3

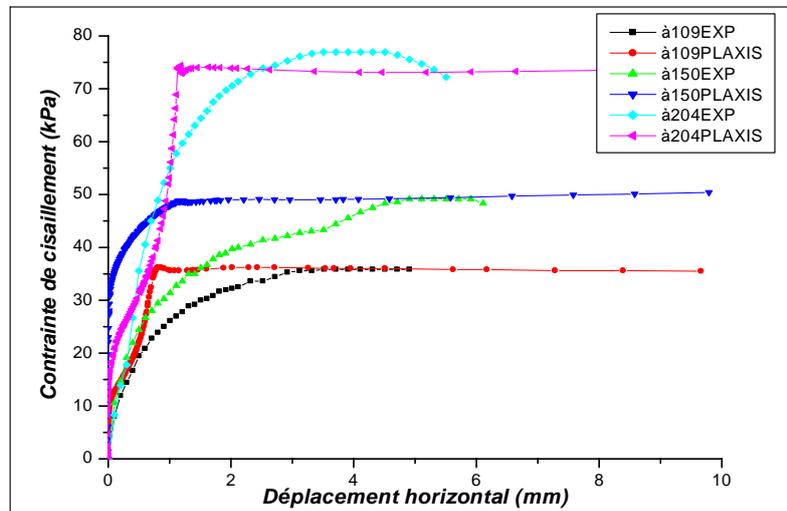


Figure 6.18 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI4

### 6.3.2 Cas de CG

Les résultats des simulations sont donnés dans les figures 6.19 à 6.22. Le tableau 6.6 donne les valeurs de  $R_{inter}$  et  $\delta/\varphi$  correspondant à chaque essai d'interface.

Tableau 6.6 Résumé des résultats  $R_{inter}$  et  $\delta/\varphi$  de dans le cas CG

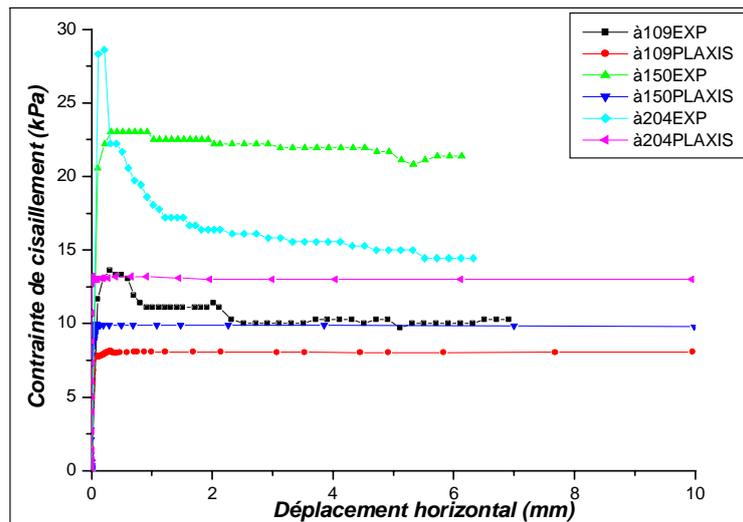
Essai	$R_{inter} = \frac{tg\delta}{tg\varphi}$	$\delta/\varphi$
CGSI1	0,44	0,44
CGSI2	0,55	0,55
CGSI3	0,59	0,59
CGSI4	0,67	0,67

Les variations des valeurs de  $\tau_{\max}$  obtenues par les simulations numériques par rapport aux valeurs expérimentales sont données dans le tableau 6.7. Ces dernières sont incluses dans un intervalle de -2.1% à 32.5% pour  $\sigma_n= 109\text{kPa}$ , de 23.7% à 40.6% pour  $\sigma_n= 150\text{kPa}$ , et de 5.3% à 42.7% pour  $\sigma_n= 204 \text{ kPa}$ , de la valeur expérimentale.

**Tableau 6.7** Variation des résultats numériques et expérimentaux pour CG

Essai	Plaxis		
	$\Delta\tau$ (%)		
	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)
CGSI1	+24,3	+40,6	+21,6
CGSI2	+32,5	+30,7	+42,7
CGSI3	-2,1	+31,1	+31,7
CGSI4	+15,3	+23,7	+5,3

On constate que le modèle prédit bien la première phase de l'essai (phase élastique), mais par la suite, il y a un décalage entre les courbes. Une stabilisation de la contrainte de cisaillement maximale pour la phase de post-pic a été observée. Alors qu'au niveau expérimental, on note une phase de stabilisation après le pic suivie par une diminution de la contrainte de cisaillement. Le module de Young et le coefficient réducteur de l'interaction ont peu d'influence sur les résultats des calculs. Il s'avère que, dans le cas de ce sol et quel que soit le type de contact, les résultats sont fortement sous-estimés.



**Figure 6.19** Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI1

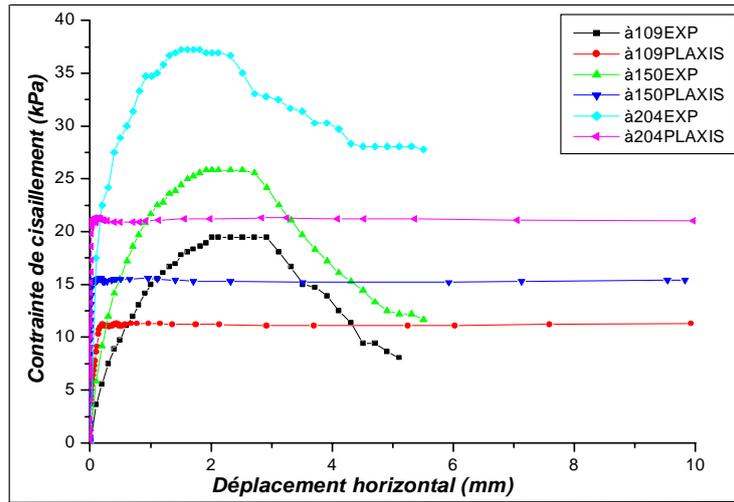


Figure 6.20 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI2

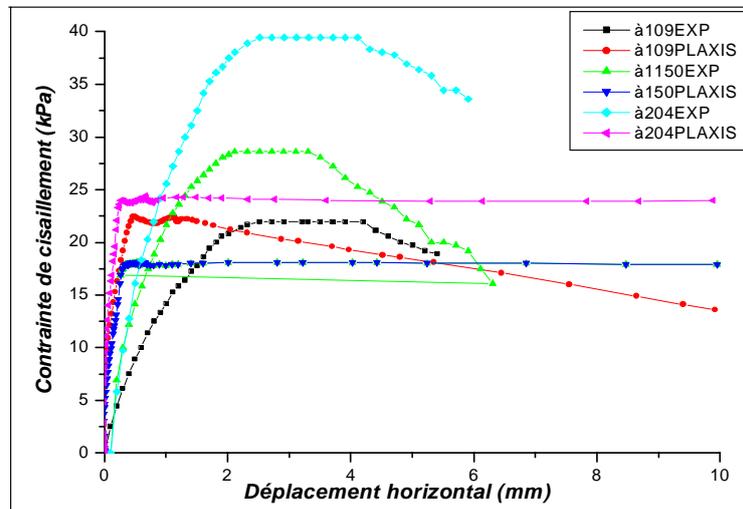


Figure 6.21 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI3

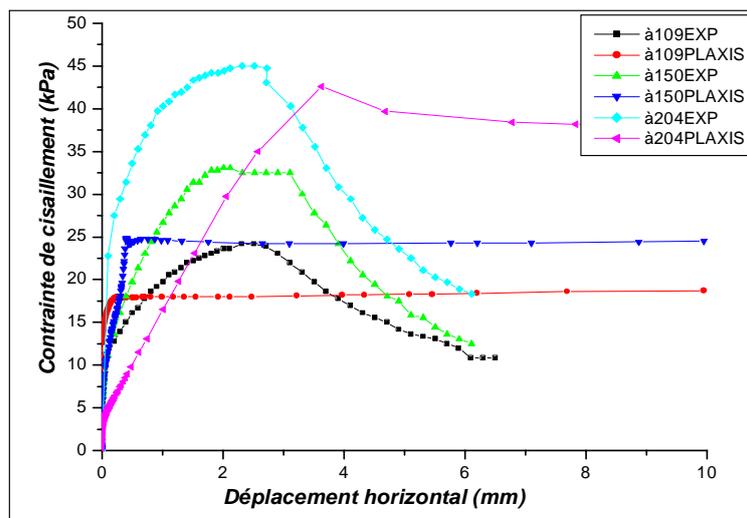


Figure 6.22 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI4

### 6.3.3 Cas de K1G

Les résultats des essais réalisés pour la détermination des paramètres du modèle sont présentés sur les figures 6.23 à 6.26. Les valeurs de  $R_{inter}$  et  $\delta/\varphi$  correspondant à chaque essai sont présentées sur le tableau 6.8.

**Tableau 6.8** Résumé des résultats  $R_{inter}$  et  $\delta/\varphi$  de dans le cas K1G

Essai	$R_{inter} = \frac{tg\delta}{tg\varphi}$	$\delta/\varphi$
<b>K1SI1</b>	0,42	0,44
<b>K1SI2</b>	0,69	0,71
<b>K1SI3</b>	0,86	0,88
<b>K1SI4</b>	0,97	0,98

Les variations des valeurs de  $\tau_{max}$  obtenus par les simulations numériques par rapport aux valeurs expérimentales sont données dans le tableau 6.9. Ces dernières sont incluses dans un intervalle de -15,9% à 31,4% pour  $\sigma_n = 109kPa$ , de -5,8% à 46,6% pour  $\sigma_n = 150kPa$ , et de -0,8% à 53,1% pour  $\sigma_n = 204 kPa$ , de la valeur expérimentale.

**Tableau 6.9** Variation des résultats numériques et expérimentaux pour K1G

Essai	<i>Plaxis</i>		
	$\Delta\tau$ (%)		
	<i>109 (kPa)</i>	<i>150 (kPa)</i>	<i>204 (kPa)</i>
<b>K1GSI1</b>	+31,4	+46,6	+53,1
<b>K1GSI2</b>	+8,1	+16,5	+14,2
<b>K1GSI3</b>	-15,9	-5,8	-0,8
<b>K1GSI4</b>	0	+4,3	-5,1

On constate que le modèle décrit bien l'évolution de la contrainte de cisaillement pour un contact rigide ( $R_{int} > 0,70$ ) pour les interfaces rugueuses (SI3, SI4). En ce qui concerne l'évolution de la contrainte de cisaillement, on note que le modèle reproduit bien la première partie (phase élastique), mais ensuite, il prédit une stabilisation qui n'a pas été observée expérimentalement sauf pour l'essai l'interface SI3. Dans le cas  $\sigma_n=109kP$  et  $\sigma_n=204kPa$ , une augmentation de la contrainte de cisaillement après le post pic a été observé. Les valeurs de la contrainte de cisaillement maximum pour les interfaces SI1 et SI2 varient de 8,1% à 53,1% par rapport à la valeur expérimentale pour les trois contrainte normales utilisées ( $\sigma_n = 109kPa$ ,  $\sigma_n = 150kPa$  et  $\sigma_n = 204$ ). On note aussi que plus le coefficient réducteur de l'interface est faible

( $R_{inter} < 0,70$ ) plus le taux de variations des résultats augmente et ce dernier a alors une influence sur les résultats de calcul.

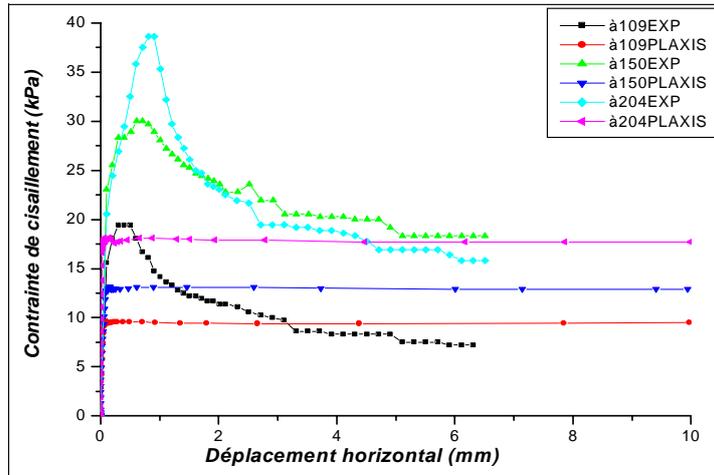


Figure 6.23 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI1

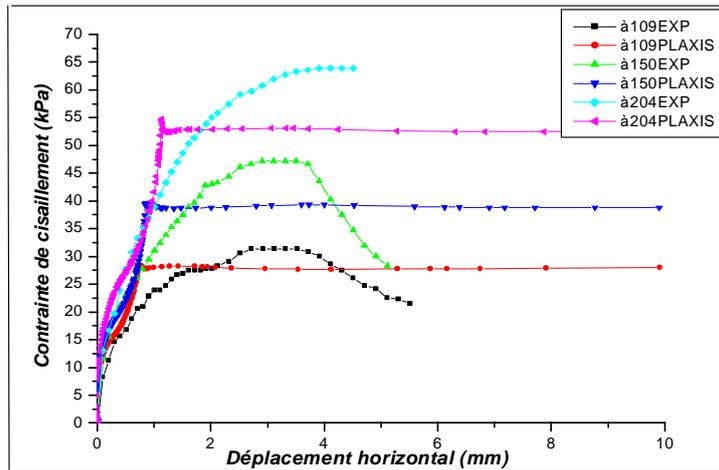


Figure 6.24 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI2

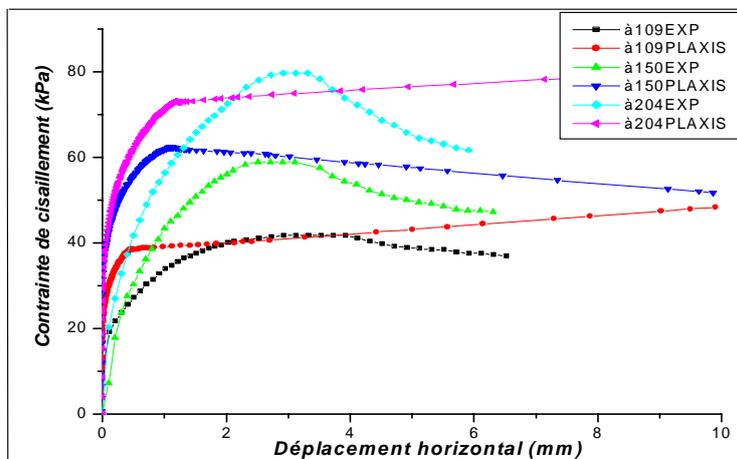


Figure 6.25 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI3

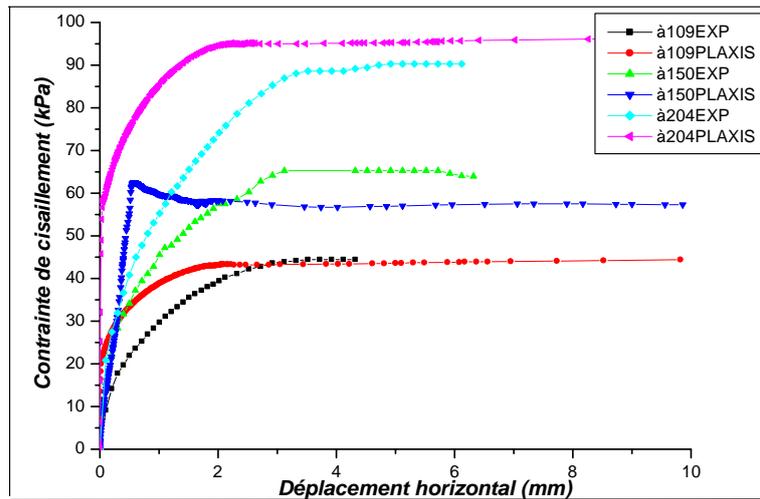


Figure 6.26 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI4

## 6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une méthodologie générale de modélisation par éléments finis d'un essai de cisaillement d'interface est présentée. Cette méthodologie tient compte, d'une part, des effets des paramètres géotechniques (type de sol) en reproduisant les contraintes de cisaillement et, d'autre part, du comportement de l'interface en considérant un modèle de comportement approprié en variant le facteur réducteur de l'interface,  $R_{inter}$ . Les essais sont modélisés en utilisant une géométrie similaire aux essais expérimentaux.

L'objectif était de comparer les prévisions numériques aux données expérimentales. Le frottement dans la zone d'interface est bien reproduit. Il semble que le coefficient réducteur de l'interaction  $R_{inter}$  et le type de sol influent directement sur les résultats numériques.

Pour un contact rigide ou encore frottant, on constate que les valeurs de la contrainte de cisaillement maximale calculées sont conformes aux résultats expérimentaux.

Pour un contact glissant, en ce qui concerne l'évolution de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ), on remarque que les prédictions du modèle sont sensibles au coefficient réducteur de l'interaction  $R_{inter}$ , ce qui induit un écart entre les courbes expérimentales et de simulation.

Le modèle de Mohr-Coulomb donne de bons résultats pour K1 et K1G (limon très plastique), et moins de précision pour le CG (argile très plastique).

## **CHAPITRE VII Modélisation numérique de l'essai de cisaillement à l'interface par la méthode des différences finies**

### **7.1 Introduction**

Ce chapitre est consacré à la pratique de la méthode des différences finies à l'aide du logiciel FLAC pour la modélisation numérique du comportement de l'essai de cisaillement d'interface, en tenant compte de l'effet d'interaction sol - structure.

Dans l'étude présentée dans ce chapitre, on s'intéresse à faire apparaître l'effet de la rugosité d'interface et précisément l'effet de la variation des paramètres d'interface la rigidité de cisaillement  $K_s$ , la rigidité normale  $K_n$  et l'angle de frottement à l'interface  $\delta$  sur les courbes de comportement. Ainsi, après la description du modèle utilisé, les conditions aux limites et la procédure de calcul, les résultats numériques sont présentés sous forme de courbes et de tableaux.

### **7.2 Simulation numérique par FLAC**

La modélisation de l'essai de cisaillement d'interface est un problème à deux dimensions élaboré par un code en différences finies disponible commercialement FLAC «Fast Lagrangian Analysis of Continua».

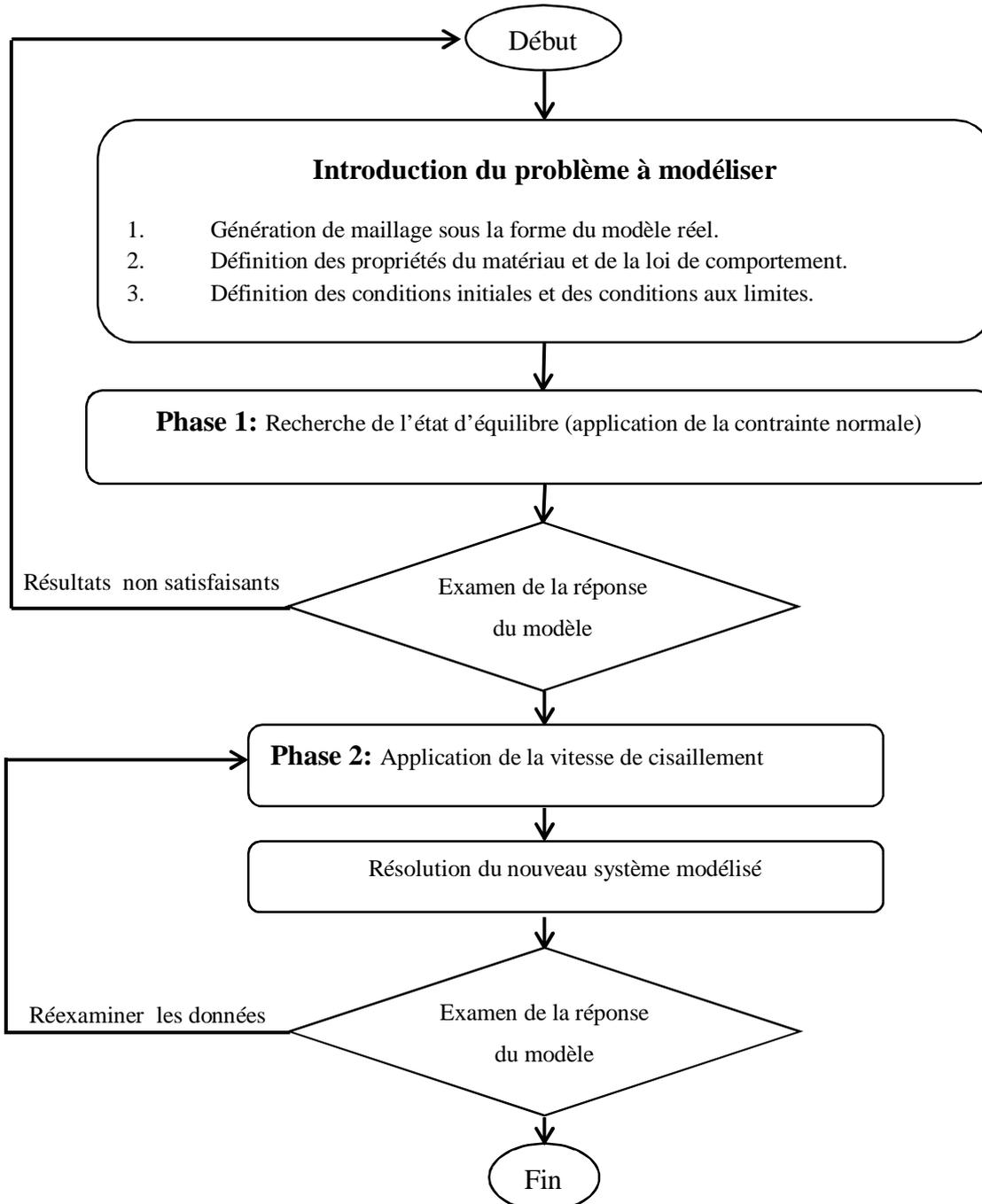
Dans ce code, le corps solide est divisé par l'utilisateur en mailles composées d'éléments quadrilatères en différences finies. Intérieurement, FLAC subdivise chaque élément quadrilatère en deux éléments triangulaires à déformation constante. Afin de surmonter le problème de blocage dans le cas des matériaux incompressibles, les composantes des contraintes et des déformations isotropiques sont prises comme constantes sur tout l'élément quadrilatère, alors que les composantes déviatoriques sont traitées séparément pour chaque élément triangulaire. Cette procédure, connue sous le nom de discrétisation mixte, est décrite par Marti et Cundall (1982).

#### **7.2.1 Conception du modèle numérique**

Afin d'installer le modèle pour réaliser une simulation d'essai de cisaillement d'interface avec FLAC<sup>2D</sup>, trois composants fondamentaux d'un problème doivent être indiqués:

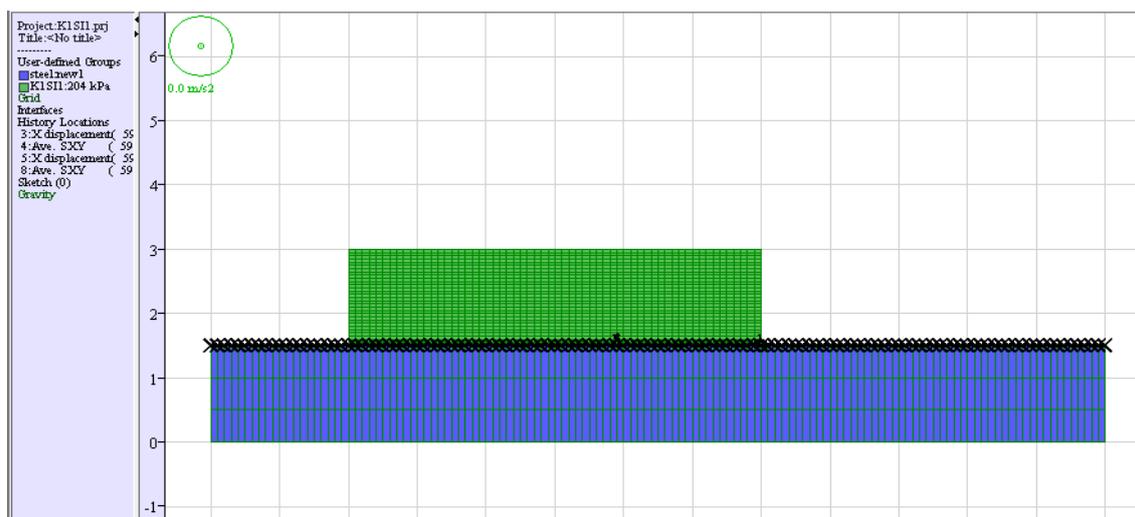
1. Génération du maillage;
2. Définition des paramètres constitutifs;
3. Application des conditions initiales et aux frontières.

La figure 7.1, présente les grandes lignes de la stratégie utilisée pour modéliser l'essai de cisaillement d'interface. La simulation se fait par phases et la réponse du système est systématiquement examinée après chacune des phases de calcul pour s'assurer de la validité des résultats.



**Figure 7.1** Procédé général de résolution proposée pour la modélisation numérique d'un essai de cisaillement d'interface

Dans notre étude, l'essai a été simulé par un modèle géométrique qui reprend les dimensions réelles de la boîte de cisaillement d'interface, à savoir: (60x60x15) mm pour les dimensions de la demi-boîte supérieure et (130x130x15) mm pour la plaque d'acier. L'interface est créée entre le sol et la plaque d'acier. Les paramètres géotechniques du sol et les propriétés des plaques d'acier ont été mise à notre disposition par les essais expérimentaux. La figure 7.2 représente le modèle d'essai.



**Figure 7.2** Modèle de simulation d'essai de cisaillement d'interface

### 7.2.1.1 Sol étudiés

Trois types de sol, dont les caractéristiques figurent dans le Tableau 7.1, sont considérés dans la simulation numérique.

**Tableau 7.1** Caractéristiques géomécaniques des sols

Paramètres	K1	CG	K1G
Modèle de comportement	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Contrainte normal (kPa)	109, 150, 204	109, 150, 204	109, 150, 204
Module d'Young (kPa)	1595, 5381, 2257	1321, 1853, 5679	1210, 1880, 2288
Coefficient de Poisson	0,36	0,4	0,36
Cohésion (kPa)	00	00	00
Angle de frottement (°)	25,39	18,6	24,56
Angle de dilatance (°)	00	00	00
Poids volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2126	2533	2374

Le modèle de comportement utilisé pour simuler les sols étudié est le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb. Ce modèle de comportement est caractérisé par cinq paramètres: les paramètres élastiques (E: le module d'Young,  $\nu$ : le coefficient de Poisson) et les paramètres plastiques ( $\delta$ : l'angle de frottement à l'interface,  $c$ : la cohésion, et  $\psi$ : l'angle de dilatance). Des essais de cisaillement effectués en laboratoire sur les sols ont permis de définir les paramètres de ce modèle de comportement. Les contraintes normales prises en compte sont de: 109 kPa, 150 kPa et 204 kPa.

### 7.2.1.2 Plaques d'acier utilisées

Les plaques d'acier sont modélisées en utilisant des éléments carrés. Les résistances limites en compression sont spécifiées dans le tableau 7.2.

**Tableau 7.2** Caractéristiques des plaques d'acier

<b>Paramètres</b>	
Modèle	Elastique linéaire
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	6120
Module de Young (kPa)	2,1 10 <sup>8</sup>
Coefficient de Poisson	0,15

### 7.2.1.3 Interface sol-acier

Des éléments d'interface ont été modélisés sur les deux côtés du sol et de la plaque d'acier par un modèle de comportement glissant, afin de simuler la raideur et le frottement à l'interaction sol-acier. La rigidité normale et la rigidité de cisaillement à l'interface sont calculées en utilisant les recommandations du code de calcul FLAC, à

$$\text{savoir: } K_n = K_s = \text{Max} \left[ \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{\min}} \right]$$

K: module volumique;

G : module de cisaillement;

$\Delta Z_{\min}$ : la plus petite dimension dans la direction normale (dans notre cas  $5 \cdot 10^{-4}$ m).

Les valeurs obtenues pour chaque essai sont données dans les tableaux ci-dessous.

**Tableau 7.3** Les valeurs de  $K_n$ ,  $K_s$  pour K1

	<b>K1</b>		
	<b><math>K_n=K_s</math> (Pa/m)</b>	<b><math>K_n=K_s</math> (Pa/m)</b>	<b><math>K_n=K_s</math> (Pa/m)</b>
<b><math>\sigma_n</math></b>	<b>109 (kPa)</b>	<b>150 (kPa)</b>	<b>204 (kPa)</b>
<b>SI1</b>	$9,72 \cdot 10^{-9}$	$1,66 \cdot 10^{-10}$	$4,07 \cdot 10^{-10}$
<b>SI2</b>	$1,13 \cdot 10^{-10}$	$1,35 \cdot 10^{-10}$	$1,91 \cdot 10^{-10}$
<b>SI3</b>	$1,40 \cdot 10^{-10}$	$1,95 \cdot 10^{-10}$	$1,10 \cdot 10^{-10}$
<b>SI4</b>	$9,97 \cdot 10^{-9}$	$1,90 \cdot 10^{-10}$	$2,37 \cdot 10^{-10}$
<b>AI1</b>	$8,83 \cdot 10^{-9}$	$1,54 \cdot 10^{-10}$	$1,60 \cdot 10^{-10}$
<b>AI2</b>	$2,60 \cdot 10^{-10}$	$1,51 \cdot 10^{-10}$	$7,90 \cdot 10^{-10}$
<b>AI3</b>	$1,15 \cdot 10^{-10}$	$1,64 \cdot 10^{-10}$	$1,85 \cdot 10^{-10}$
<b>AI4</b>	$1,07 \cdot 10^{-10}$	$1,64 \cdot 10^{-10}$	$2,10 \cdot 10^{-10}$

**Tableau 7.4** Les valeurs de  $K_n$ ,  $K_s$  pour CG

	<b>CG</b>		
	<b><math>K_n=K_s</math></b>	<b><math>K_n=K_s</math></b>	<b><math>K_n=K_s</math></b>
<b><math>\sigma_n</math></b>	<b>109</b>	<b>150</b>	<b>204</b>
<b>SI1</b>	$6,47 \cdot 10^{-10}$	$5,10 \cdot 10^{-10}$	$6,20 \cdot 10^{-10}$
<b>SI2</b>	$1,12 \cdot 10^{-10}$	$2,29 \cdot 10^{-10}$	$7,97 \cdot 10^{-10}$
<b>SI3</b>	$7,16 \cdot 10^{-9}$	$1,54 \cdot 10^{-10}$	$1,25 \cdot 10^{-10}$
<b>SI4</b>	$2,49 \cdot 10^{-10}$	$2,61 \cdot 10^{-10}$	$8,86 \cdot 10^{-10}$

**Tableau 7.5** Les valeurs de  $K_n$ ,  $K_s$  pour K1G

	<b>K1G</b>		
	<b><math>K_n=K_s</math></b>	<b><math>K_n=K_s</math></b>	<b><math>K_n=K_s</math></b>
<b><math>\sigma_n</math></b>	<b>109</b>	<b>150</b>	<b>204</b>
<b>SI1</b>	$3,59 \cdot 10^{-10}$	$1,40 \cdot 10^{-10}$	$2,64 \cdot 10^{-10}$
<b>SI2</b>	$1,35 \cdot 10^{-10}$	$1,39 \cdot 10^{-10}$	$1,75 \cdot 10^{-10}$
<b>SI3</b>	$3,87 \cdot 10^{-10}$	$1,84 \cdot 10^{-10}$	$2,25 \cdot 10^{-10}$
<b>SI4</b>	$3,75 \cdot 10^{-10}$	$2,52 \cdot 10^{-10}$	$2,75 \cdot 10^{-10}$

### 7.2.2 Unité et convention de signe

L'unité choisie est: kg, m, s (kilogramme, mètre, seconde). Le signe négatif qui apparaît sur les courbes signifie que les contraintes et les déplacements sont inverses au repère considéré. La contrainte dans notre cas évolue dans le sens contraire de la gravitation.

### 7.2.3 Maillage

La figure 7.3 montre le maillage retenu pour la simulation dans le cas de la boîte de cisaillement d'interface. Le sol (demi-boîte supérieure) a été discrétisé en 1800

éléments carrés et la plaque d'acier (demi-boite inferieure) a été discrétisé en 390 éléments carrés.

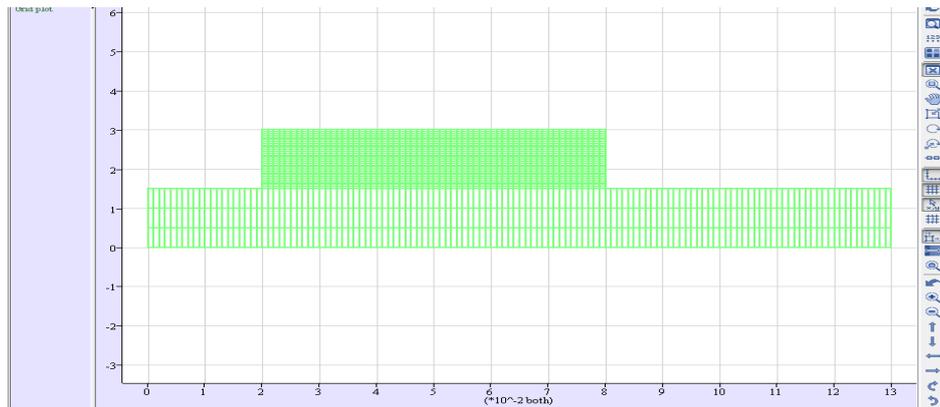


Figure 7.3 Maillage adopté pour la modélisation

### 7.2.4 Condition aux limites et initiales

Les conditions aux limites du modèle sont déterminées en suivant la méthode expérimentale, pour la demi-boite supérieure les deux cotés sont fixés dans la direction horizontale (x) pour la 1<sup>ère</sup> phase, et les nœuds du modèle sont fixés dans la direction verticale (y) pour la 2<sup>ème</sup> phase alors que pour la demi-boite inférieure tous les déplacements (x, y) sont bloqués.

La condition initial appliquées au modèle pour une charge normale constante est recrée en appliquant une contrainte normale au sommet de la grille tout au long du cisaillement (1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> phase). La grille est soumise à une vitesse de déformation appliquée à la frontière des deux côtés du matériau supérieur (2<sup>ème</sup> phase). Les déplacements horizontaux sont d'abord remis à 0.

La géométrie du modèle et les conditions aux limites sont rapportés sur la figure 7.4 pour le chemin de contrainte normale constante.

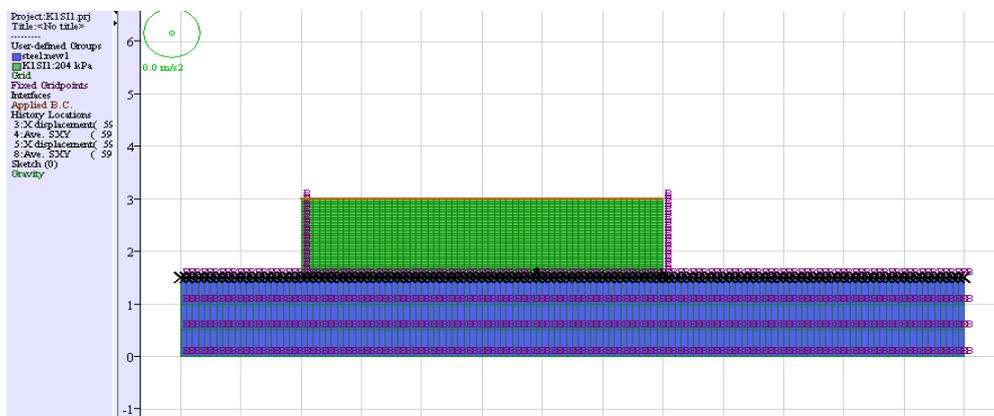


Figure 7.4 Modèle géométrique de la boîte de cisaillement d'interface

## 7.3 Présentation et interprétation des résultats

Après avoir introduit le maillage du sol, les conditions initiales et aux limites, le modèle de comportement ainsi que les propriétés des matériaux à modéliser (sol et plaque d'acier), le code de calcul FLAC procède à la résolution des équations différentielles du système modélisé. Ceci va nous conduire à obtenir les résultats préalablement spécifiés dans le programme de calcul.

### 7.3.1 Effet des paramètres d'interface

L'influence de la prise en compte des paramètres d'interface, la rigidité normale ( $K_n$ ), la rigidité de cisaillement ( $K_s$ ), et l'angle de frottement à l'interface ( $\delta$ ) est considérée dans ce qui suit. Dans la présente modélisation numérique, le comportement en cisaillement à l'interface est défini par une loi de type glissant. Les paramètres déterminés à partir de l'étude expérimentale sont utilisées. En effet, la simulation numérique de ces essais a permis de définir les paramètres de l'interface qui sont nécessaires dans la modélisation de l'essai de cisaillement d'interface. Les résultats numériques obtenus sont ensuite comparés avec les résultats expérimentaux disponibles.

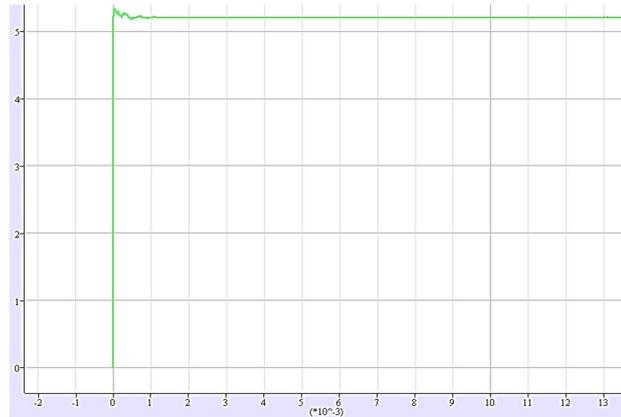
#### 7.3.1.1 Cas de $K1$

Les figures 7.6 à 7.13, présentent la variation de la contrainte au cisaillement  $\tau$  en fonction de la déformation horizontale.

Comme le montre la figure 7.5 qui illustre, un exemple de courbe ( $\tau - U_i$ ), l'allure générale de la courbe de comportement, montre que la condition de rupture est atteinte pour de faibles déplacements de l'ordre de quelques microns. Notamment la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) atteint tout d'abord un seuil puis tend à chuter brusquement pour se stabiliser à une valeur constante. Concernant l'allure des courbes il y a eu un comportement post pic déplacement-ramollissement comparable à celui observé dans le cas des essais expérimentaux. Les variations des valeurs de  $\tau_{\max}$  obtenus par les simulations numériques par rapport aux valeurs expérimentales sont données dans le tableau 7.6.

Les résultats expérimentaux sont comparés aux valeurs obtenues avec le logiciel FLAC. On observe, pour les valeurs au pic, une bonne concordance des valeurs calculées numériquement et mesurées expérimentalement. L'intervalle des valeurs en termes de contrainte de cisaillement  $\tau$  par rapport aux valeurs expérimentales varie au maximum de -22,4% à -0,2% pour  $\sigma_n = 109\text{kPa}$ , de -13,8% à 6,8% pour  $\sigma_n = 150\text{ kPa}$  et

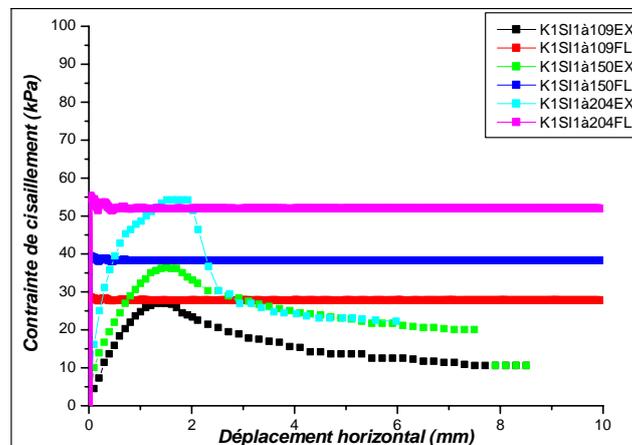
de -4,1% à 4,8% pour  $\sigma_n = 204\text{kPa}$ . Il y'a lieu de remarquer que les essais modélisés ont donnés des résultats satisfaisants par rapport aux résultats des essais expérimentaux en termes des valeurs de la contrainte de cisaillement maximale.



**Figure 7.5** Courbes contrainte de cisaillement - déplacement horizontal obtenues dans le cas K1SI1 pour  $\sigma_n=109\text{kPa}$

**Tableau 7.6** Variation des résultats numériques et expérimentaux pour K1

Essai	$\Delta\tau$ (%)		
	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)
<b>K1SI1</b>	-6,7	-8,8	-2,0
<b>K1SI2</b>	-8,7	+4,6	-2,5
<b>K1SI3</b>	-18,1	-2,1	-0,7
<b>K1SI4</b>	-1,1	+6,8	+2,1
<b>K1AI1</b>	-2,4	-4,1	+1,5
<b>K1AI2</b>	-0,2	+0,4	-4,1
<b>K1AI3</b>	-6,5	-10,0	+4,8
<b>K1AI4</b>	-4,5	-13,8	-2,5



**Figure 7.6** Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI1

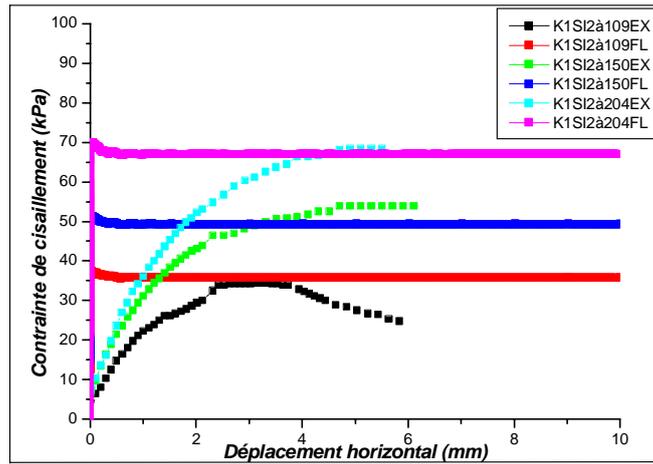


Figure 7.7 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI2

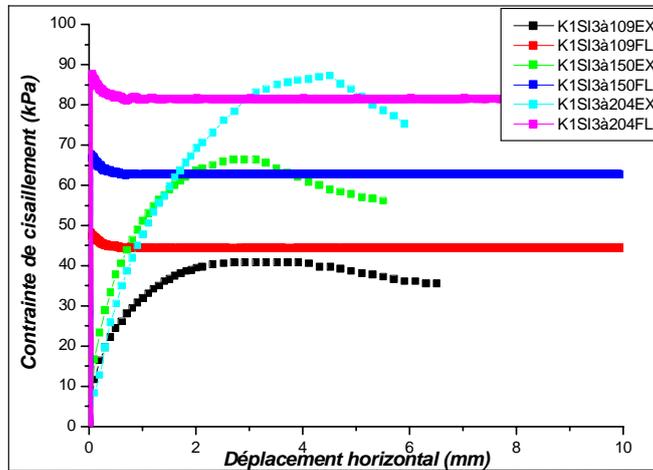


Figure 7.8 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI3

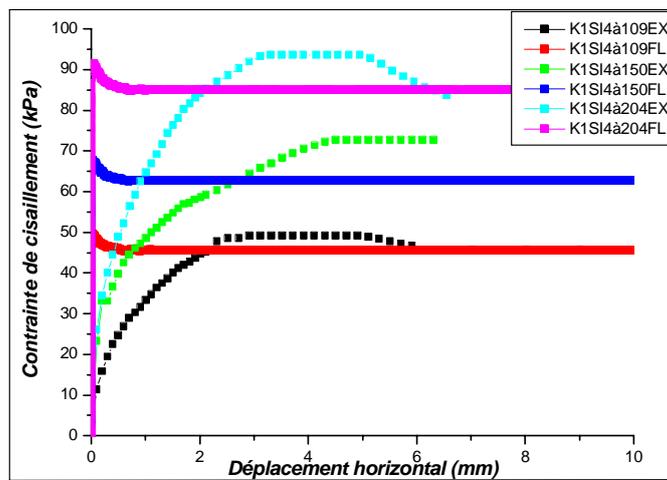


Figure 7.9 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1SI4

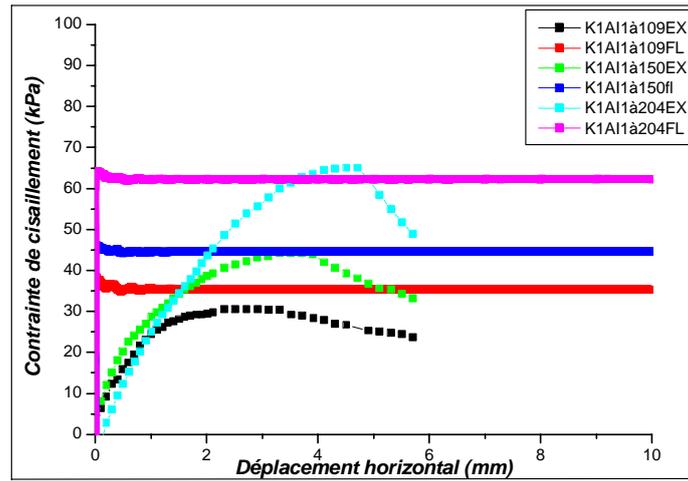


Figure 7.10 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI1

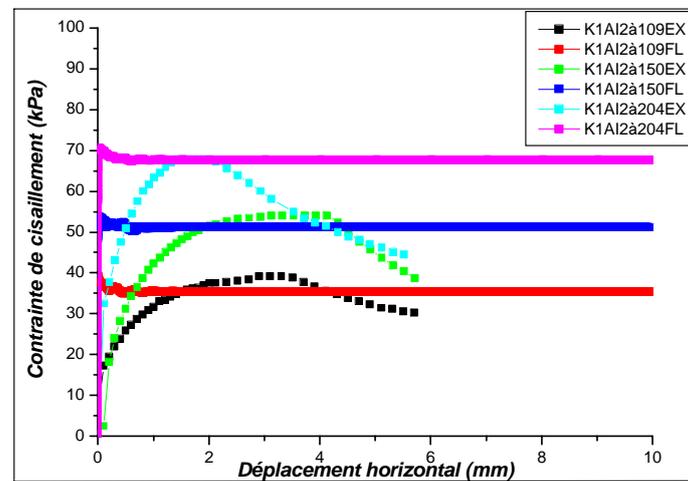


Figure 7.11 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques K1AI2

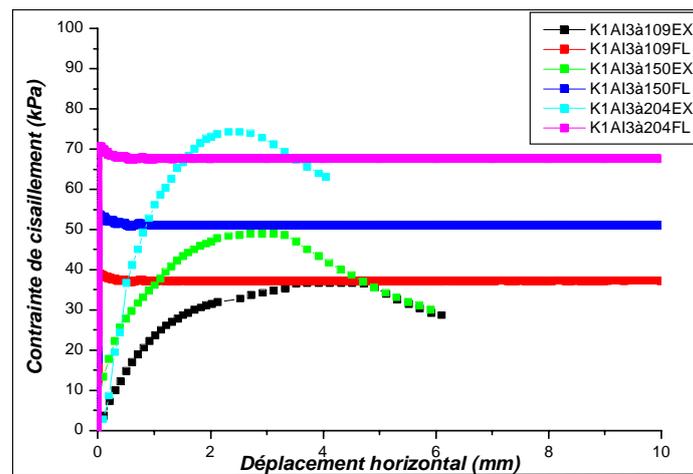
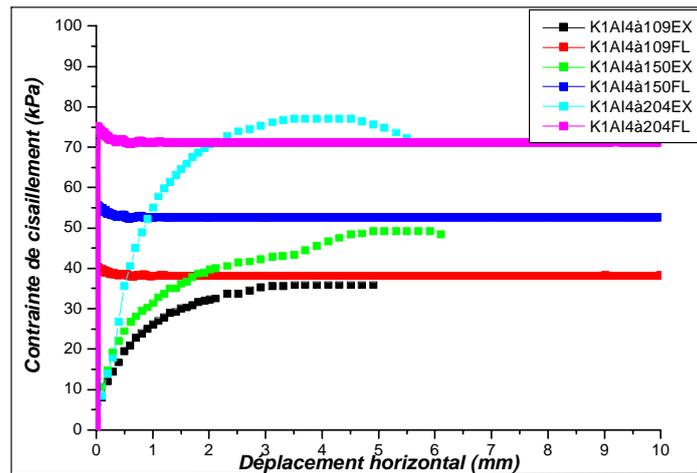


Figure 7.12 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI3



**Figure 7.13** Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1AI4

### 7.3.1.2 Cas de CG

Les résultats des simulations numériques sont donnés dans les figures 7.14 à 7.17. Les variations des valeurs de  $\tau_{\max}$  obtenus par les simulations numériques par rapport aux valeurs expérimentales sont données dans le tableau 7.7.

**Tableau 7.7** Variation des résultats numériques et expérimentaux pour CG

Essai	$\Delta\tau$ (%)		
	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)
CGSI1	-42,5	-2,2	-17,8
CGSI2	-4,1	-11,2	-8,9
CGSI3	+3,2	-2,8	-0,8
CGSI4	-7,4	-2,4	-0,8

L'analyse des courbes contrainte de cisaillement-déplacement horizontal confirme la faible différence entre les résultats obtenus pour les quatre interfaces utilisées. Les valeurs des contraintes de cisaillement maximum sont surestimées pour les interfaces utilisées, dans le cas de  $\sigma_n=109$  kPa de 42,54% à 4,1%, (elles sont supérieures aux résultats expérimentaux). Pour SI3, la valeur de  $\tau_{\text{num}}$  est inférieure à  $\tau_{\text{exp}}$  d'une valeur de 3,2%. En revanche pour  $\sigma_n=150$  kPa et 204kPa, les valeurs des contraintes de cisaillement maximum sont surestimées (de 11,2% à 2,2%, et de 17,8% à 0,8%, respectivement, supérieure par rapport aux résultats expérimentaux). L'analyse des résultats des courbes, montre un comportement similaire à celui observé pour les essais de K1. La valeur au pic est atteinte pour de faibles déplacements contrairement aux essais expérimentaux pour lesquels le pic est atteint pour un déplacement de quelques millimètres.

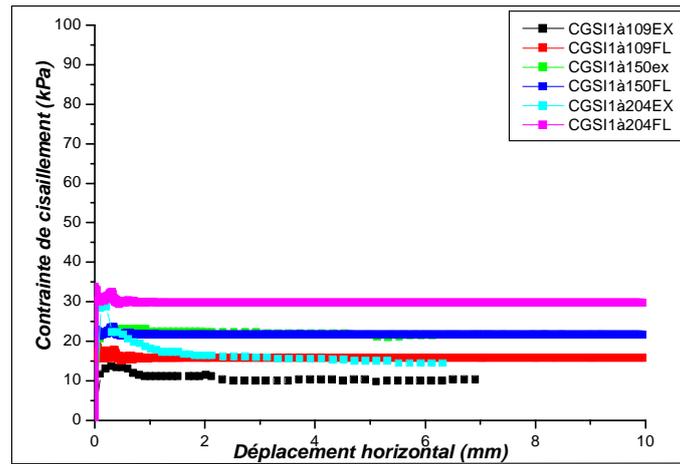


Figure 7.14 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI1

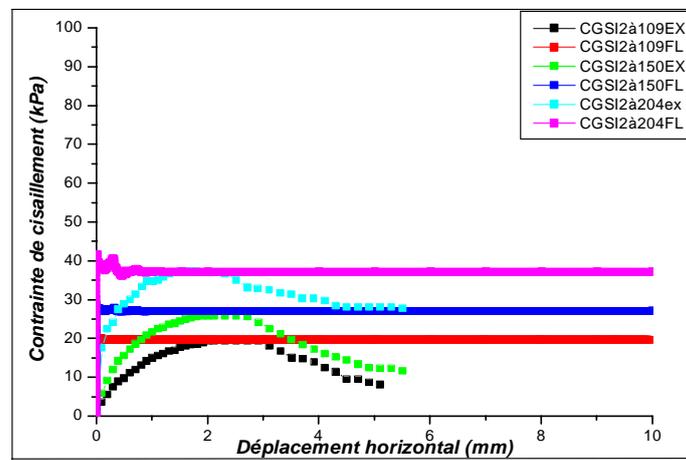


Figure 7.15 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI2

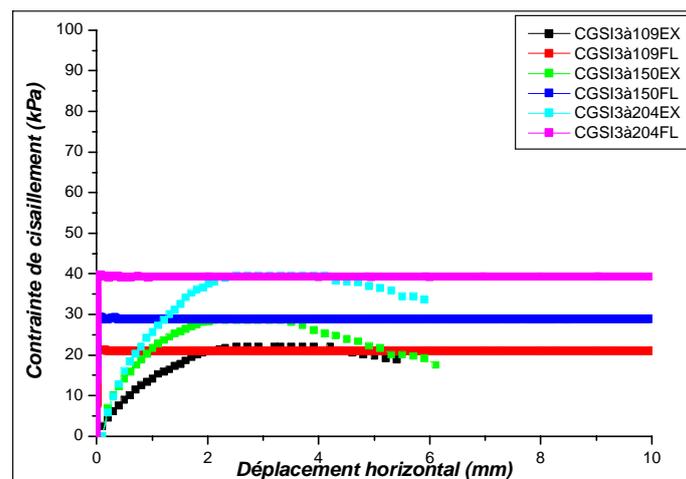
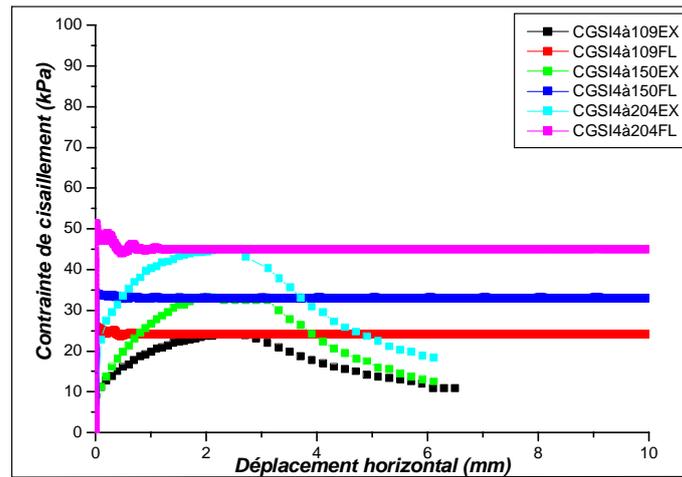


Figure 7.16 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI3



**Figure 7.17** Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour CGSI4

### 7.3.1.3 Cas de K1G

Les figures 7.18 à 7.21 présentent les comportements vis-à-vis au cisaillement pour les quatre interfaces utilisées. Les variations des valeurs de  $\tau_{\max}$  obtenus par les simulations numériques par rapport aux valeurs expérimentales sont données dans le tableau 7.8.

**Tableau 7.8** Variation des résultats numériques et expérimentaux pour CG

Essai	$\Delta\tau$ (%)		
	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)
<b>K1GSI1</b>	-13,4	0,0	-1,0
<b>K1GSI2</b>	-9,0	0,0	-0,1
<b>K1GSI3</b>	-10,1	-1,3	-2,0
<b>K1GSI4</b>	-8,3	+1,4	+2,7

Les valeurs de la résistance au cisaillement  $\tau$ , obtenus sont en bon accord avec les résultats expérimentaux qui montre une légère différence des résultats. Les valeurs des contraintes de cisaillement maximum sont surestimées, pour  $\sigma_n=109\text{kPa}$  (de 13,2% à 8,3% de plus par rapport aux résultats expérimentaux). En revanche pour  $\sigma_n=150\text{kPa}$ , les valeurs de la contrainte de cisaillement maximum est légèrement surestimées (de 1,3% de plus par rapport aux résultats expérimentaux) pour l'interface SI3. Elle est légèrement sous-estimée (de 1,4% de moins par rapport aux résultats expérimentaux) pour l'interface SI4. Toutefois, pour  $\sigma_n=204\text{kPa}$ , les valeurs des contraintes de cisaillement maximum sont légèrement surestimées (de 2,0% à 0,1% supérieure par rapport aux résultats expérimentaux) pour les interfaces SI1, SI2, et SI3. Elle est sous-

estimée (de 2,7% inférieure par rapport aux résultats expérimentaux) pour les interfaces SI4. Les valeurs au pic sont atteintes pour des faibles déplacements également.

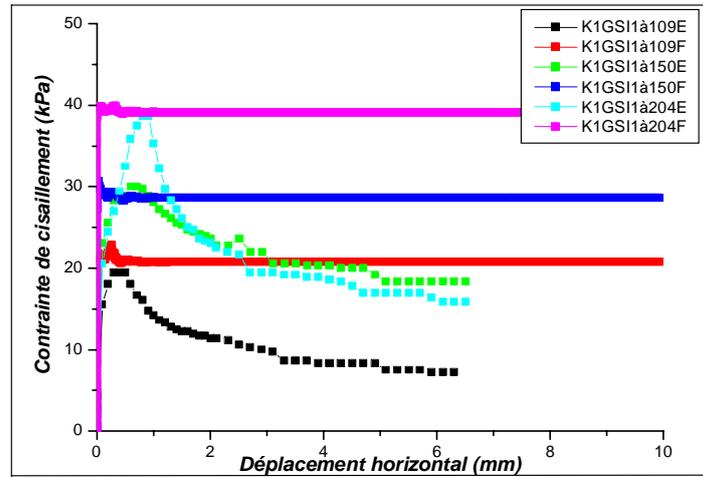


Figure 7.18 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI1

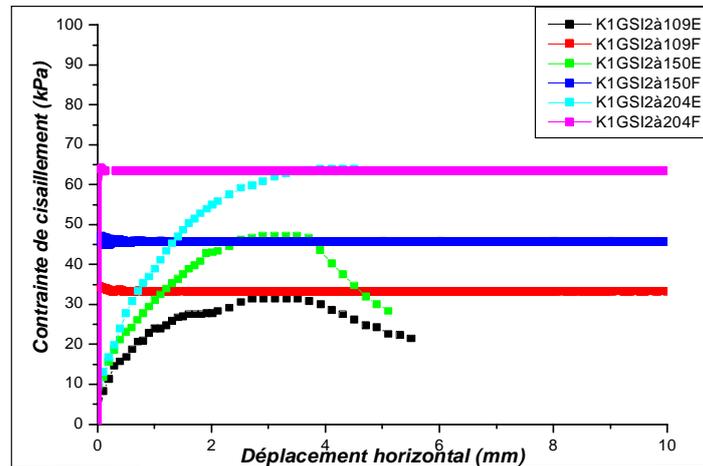


Figure 7.19 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI2

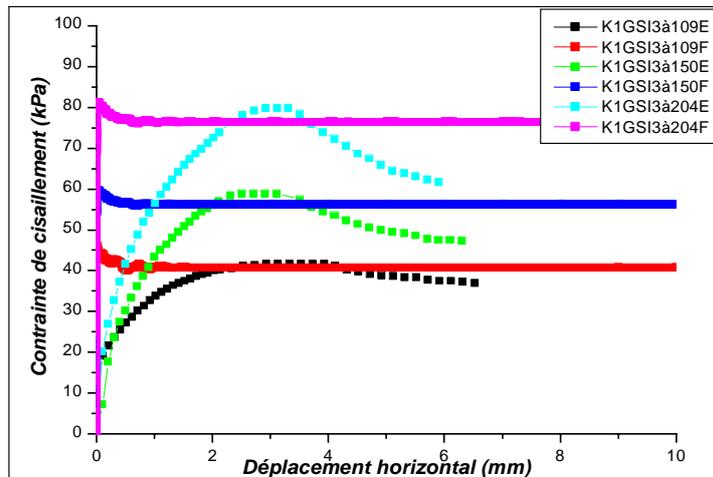
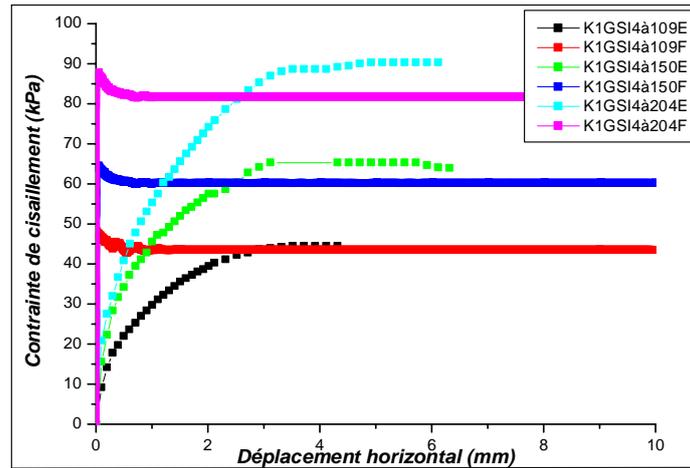


Figure 7.20 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI3



**Figure 7.21** Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour K1GSI4

## 7.4 Comparaison entre les prévisions numériques et les résultats expérimentaux

La confrontation des résultats numériques aux résultats expérimentaux nous a permis de comparer les performances de chacune des deux méthodes numériques, la méthode des différences finies (FLAC) et la méthode des éléments finis (PLAXIS) à partir des différentes courbes de comportement résultant des deux méthodes qui ont été présentées aux chapitres 6 et 7. Les prévisions par rapport aux résultats expérimentaux, à savoir les courbes contraintes de cisaillement-déplacement horizontal, seront examinées. Pour vérifier le fonctionnement du modèle, nous avons comparé trois paramètres: la valeur de la résistance au cisaillement maximale  $\tau$ , le déplacement horizontal correspondant au pic  $U_t$  et l'allure des courbes.

Tous les résultats numériques considérés dans la présente comparaison ont été réalisés avec le même modèle de comportement élasto-plastique du critère de Mohr-Coulomb.

Les prévisions par PLAXIS sont satisfaisantes pour le début du chargement, c'est-à-dire dans la partie élastique des courbes et celles-ci sont en bon accord avec les mesures expérimentales, contrairement aux simulations par FLAC dans le domaine élastique des échantillons ne sont pas reproduit en termes d'amplitude. Pour FLAC les déformations sont micrométrique et largement plus petites. En fin de chargement, les simulations donnent des résultats qui divergent un peu. Parmi les paramètres qui méritent une attention, l'absence de pic de cisaillement dans le cas de la méthode des éléments finis (PLAXIS). En outre pour la complexité de la méthode des différences

finies, l'échantillon subit la rupture pour des déplacements très faibles de l'ordre de quelques microns.

Les tableaux suivants synthétisent les valeurs des variations obtenues par la

$$\text{relation: } \Delta\tau = \frac{\tau_{exp} - \tau_{num}}{\tau_{exp}} \times 100\%$$

**Tableau 7.9** Comparaison des résultats numériques sur K1

Essai	<i>Flac</i>			<i>Plaxis</i>		
	$\Delta\tau$ (%)			$\Delta\tau$ (%)		
	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)
<b>K1SI1</b>	-6,7	-8,8	-2,0	+29,1	+28,5	+32,0
<b>K1SI2</b>	-8,7	+4,6	-2,5	+3,0	+13,3	+9,4
<b>K1SI3</b>	-18,1	-2,1	-0,7	2,03	-0,9	-3,4
<b>K1SI4</b>	-1,1	+6,8	+2,1	5,02	-1,3	-3,0
<b>K1AI1</b>	-2,4	-4,1	+1,5	7,06	+8,4	+20,7
<b>K1AI2</b>	-0,2	+0,4	-4,1	5	+14,6	+9,0
<b>K1AI3</b>	-6,5	-10,0	+4,8	1	-0,4	+7,8
<b>K1AI4</b>	-4,5	-13,8	-2,5	-1,03	+0,9	+3,3

**Tableau 7.10** Comparaison des résultats numériques sur CG

Essai	<i>Flac</i>			<i>Plaxis</i>		
	$\Delta\tau$ (%)			$\Delta\tau$ (%)		
	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)
<b>CGSI1</b>	-42,5	-2,2	-17,8	+24,3	+40,6	+21,6
<b>CGSI2</b>	-4,1	-11,2	-8,9	+32,5	+30,7	+42,7
<b>CGSI3</b>	+3,2	-2,8	-0,8	-2,1	+31,1	+31,7
<b>CGSI4</b>	-7,4	-2,4	-0,8	+15,3	+23,7	+5,3

**Tableau 7.11** comparaison des résultats numériques sur K1G

Essai	<i>Flac</i>			<i>Plaxis</i>		
	$\Delta\tau$ (%)			$\Delta\tau$ (%)		
	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)	109 (kPa)	150 (kPa)	204 (kPa)
<b>K1GSI1</b>	-13,4	0,0	-1,0	+31,4	+46,6	53,1
<b>K1GSI2</b>	-9,0	0,0	-0,1	+8,1	+16,5	14,2
<b>K1GSI3</b>	-10,1	-1,3	-2,0	-15,9	-5,8	-0,8
<b>K1GSI4</b>	-8,3	+1,4	+2,7	0	+4,3	-5,1

En ce qui concerne la valeur de la résistance au cisaillement maximale  $\tau$  la plus précise, a priori, c'est celle calculée par la méthode des différences finies (FLAC) par rapport à celle obtenue par la méthode des éléments finis (PLAXIS). En début, pour un contact glissant (les interfaces lisses), les résistances aux cisaillements prédites par PLAXIS donnent des courbes légèrement plus basses que FLAC, par contre, pour un contact rigide ou encore frottant (interfaces rugueuses), les courbes modélisées par PLAXIS sont systématiquement plus élevés, ce qui tend à indiquer que les simulations par la méthode des éléments finies, utilisée dans le cas présent, sont légèrement plus rigides.

Concernant l'allure des courbes, il a été noté que le paramètre  $R_{inter}$  pour PLAXIS a une influence. Alors que pour FLAC, le changement des valeurs des paramètres d'interface ( $K_n$ ,  $K_s$ ,  $\delta$ ) n'affecte pas la forme des courbes.

## 7.5 Conclusion

Les bases conceptuelles d'un modèle bidimensionnel pour les interfaces pour modéliser l'essai de cisaillement modifié sont données dans ce chapitre. Le modèle basé sur la méthode des différences finies FLAC, est présentée et validé sur des essais d'interface.

Dans ce chapitre, la formulation du modèle a été présentée, suivie de la manière de déterminer les paramètres pour un comportement élastoplastique. Le nombre de paramètres est réduit au minimum indispensable soient: 2 paramètres pour la partie linéaire élastique et les 3 paramètres de la partie plastique qui est relativement facile.

Les simulations réalisées à l'aide de la méthode des différences finies (FLAC), ont donné des prévisions satisfaisantes avec les essais expérimentaux, pour les valeurs de la résistance au cisaillement,  $\tau$  et moins pour l'allure des courbes.

Une comparaison des résultats auquel on a abouti avec des deux méthodes (PLAXIS et FLAC) avec le même modèle de comportement du sol (le modèle élastoplastique de Mohr Coulomb) et les mêmes paramètres numériques a été présentée. Les résultats obtenus montrent que:

- Concernant les valeurs de la résistance au cisaillement maximale  $\tau$ , une prévision convenable est constatée entre les résultats des deux codes par rapport aux résultats des essais expérimentaux, particulièrement les valeurs obtenues par FLAC et celles obtenues par PLAXIS pour le contact rigide (SI3 et SI4).

- Les déplacements horizontaux correspondant au pic obtenus par PLAXIS sont supérieurs à ceux obtenus par FLAC.
- PLAXIS donne une meilleure approximation des résultats concernant l'allure des courbes.
- Les paramètres d'interface ont un effet sur les courbes contraintes-déformations pour PLAXIS mais pas pour FLAC.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté dans cette thèse un travail de recherche expérimental et numérique sur le comportement de cisaillement à interfaces sol cohérent - matériau solide. Il s'agit d'un problème aux limites de l'interaction sol - structure où l'interface joue un rôle essentiel. Plus particulièrement, l'objet du travail est d'étudier le comportement en fonction de la rugosité de surface, la texture d'interface 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 génie civil.

A travers l'étude bibliographique (Chapitres 1,2 et 3), nous avons décrit le comportement de cisaillement à l'interface sol - matériaux solide en décrivant les essais d'interface, les modèles rhéologiques et les traitements numériques. La résistance au cisaillement à l'interface entre quatre types de sols cohérents et deux matériaux solides (acier et papier abrasif) ayant différentes rugosités et différentes textures a été étudiée au moyen d'essais de laboratoire en utilisant l'appareil de cisaillement direct modifié sous un chemin de contrainte normal constante. Cette étude a été complétée par une modélisation numérique de l'essai de cisaillement d'interface. On constate qu'une bonne modélisation nécessite, un bon modèle de comportement basé sur la caractérisation expérimentale de l'interface.

Les principales conclusions qui peuvent être tirées de cette étude sont les suivantes:

1- L'appareil de cisaillement direct, utilisé dans cette étude a été spécialement conçu pour les essais de cisaillement sol-sol afin de déterminer la cohésion et l'angle de frottement interne des sols considérés. Cependant, il n'est pas prévu pour faire des essais d'interface, nous avons donc fait une modification de la machine de cisaillement direct apte à réaliser des essais de cisaillement modifié. A cet effet des plaques d'acier et des plaques avec papier abrasif de différentes rugosités et différentes textures ont été fixées solidement dans le but d'étudier le comportement de cisaillement à l'interface. Les principaux avantages de la boîte de cisaillement modifié sont sa simplicité et son adaptabilité à partir d'une boîte classique.

2- Le développement de la résistance au cisaillement est une manifestation de la destruction des liens de la structure du sol, ce qui développe des résistances élevées après de faibles déplacements. En général, la résistance est d'autant plus importante que le sol contient un pourcentage en fraction argileuse faible. En effet les particules massives empêchent l'orientation complète des plaquettes argileuses ce qui provoque des résistances relativement élevées. Dans cette étude K1, K1G qui sont des limons très plastiques dont la teneur en fraction argileuse est faible (respectivement 6,6% et 26,2%), possèdent des valeurs de l'angle de frottement interne égales à 25,39° et 24,56°, respectivement. Alors que la valeur de  $\phi'$  pour CG qui représente une teneur en fraction argileuse importante (i.e. 44%) possède une faible valeur de 18,16°. Toutefois K2 dont la fraction argileuse est de 64% a donné des résultats non conformes à cette règle.

3- L'ensemble des essais expérimentaux de cette étude démontre la sensibilité des propriétés mécaniques des sols cohérents à toute variation de la rugosité de surface d'interface. Toutefois, 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 interfaces rugueuses (SI2, SI3, SI4, AI1, AI2, AI3 et AI4). Ceci indique qu'il y a eu un comportement similaire à celui observé dans le cas d'un cisaillement sol - sol, alors que les courbes correspondant à l'interface lisse SI1 ont des allures différentes.

4- Les résultats obtenus pour deux types de matériau d'interface (acier et papier abrasif), indique que le matériau utilisé n'a pas une influence majeure sur la résistance au cisaillement mobilisé.

5- La rugosité relative qui combine entre l'effet de la rugosité arithmétique et le diamètre moyen 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.

6- Différentes corrélations ont été obtenues entre R et  $\delta/\phi$ . Des corrélations ont été également obtenues entre  $R_a$  et  $\delta/\phi$  pour chaque type de sol. Ces derniers montrent différentes tendances d'augmentation de  $\delta/\phi$  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.

7- Pour la résistance au cisaillement à l'interface entre les sols cohérents et les matériaux solides, il existerait une rugosité relative critique supérieure et une

rugosité relative inférieure, qui sont susceptibles de dépendre de la plasticité de sol et la rugosité d'interface. 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 (K1) et le mélange argile de Guelma-kaolin (K1G). Toutefois, pour l'argile de Guelma (CG), 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. Ce mode ne semble pas exister pour la gamme d'interfaces testées. 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.

8- Afin d'évaluer l'effet du modèle de texture de surface sur la résistance au cisaillement à l'interface pour les petits déplacements, les résultats des essais montrent que les relations sont à peu près linéaires pour la gamme de contraintes normales utilisées. En outre, on peut observer qu'il n'y a pratiquement aucune influence des modèles de texture sur les résistances de cisaillement mesurées pour les interfaces mises à l'essai qui correspondent à un mode de cisaillement d'interface de type intermédiaire.

9- Une modélisation numérique par éléments finis avec PLAXIS de l'essai de cisaillement d'interface, a été proposée, afin de mettre en évidence une méthodologie générale de simulation. Cette méthodologie tient compte, d'une part, des effets des paramètres géotechniques (type de sol) en reproduisant les contraintes de cisaillement et, d'autre part, du comportement de l'interface en considérant un modèle de comportement approprié en variant le facteur réducteur de l'interface,  $R_{inter}$ . Les essais ont été modélisés en utilisant une géométrie similaire aux essais expérimentaux. L'objectif était de comparer les prévisions numériques aux données expérimentales. Les résultats obtenus indiquent que le coefficient réducteur de l'interaction  $R_{inter}$  et le type de sol influent directement sur les résultats numériques. Le modèle de Mohr-Coulomb donne de bons résultats pour K1 et K1G (limons très plastiques), et moins de précision pour CG (argile très plastique).

Pour un contact rigide ou encore frottant,  $R_{inter} > 0.72$ , on constate que les valeurs de la contrainte de cisaillement maximale déduites de la modélisation numérique sont conformes aux résultats expérimentaux. Pour un contact glissant avec  $R_{inter} < 0.72$ , en ce qui concerne l'évolution de contrainte de cisaillement ( $\tau$ ), on remarque que les

prédictions du modèle sont sensibles au coefficient réducteur de l'interaction  $R_{inter}$ , ce qui induit un écart entre les courbes expérimentales et de simulation.

10- Le modèle basé sur la méthode des différences finies avec FLAC, a été présenté et validé sur des essais d'interface. La formulation du modèle a été présentée, suivie de la manière de déterminer les paramètres pour un comportement élasto-plastique. Les simulations réalisées ont donné des prévisions satisfaisantes par rapport aux essais expérimentaux, concernant les valeurs de la résistance au cisaillement  $\tau$ . Alors que l'allure des courbes de comportement est moins satisfaisante.

11- Une comparaison entre les deux méthodes (PLAXIS et FLAC) utilisées dans la modélisation numérique a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Concernant les valeurs de la résistance au cisaillement de pic mobilisée, FLAC s'approche des valeurs des résultats expérimentaux de manière satisfaisantes. Il est de même dans le cas d'un contact rigide pour PLAXIS;
- L'allure des courbes est meilleure concernant les simulations numériques effectuées au moyen de PLAXIS;
- Le déplacement nécessaire pour atteindre le pic de résistance est plus proche des valeurs données par les essais expérimentaux.

### **Les perspectives ouvertes par ce travail sont les suivantes**

- Les résultats concernant le modèle d'interface proposé restent limités aux cas des chargements monotones. Il serait intéressant d'élargir l'étude au cas des chargements cycliques (l'effet de texture et le mécanisme de cisaillement).

- Dans cette étude un déplacement relativement faible de 8mm a été utilisé. Ce déplacement est nécessaire pour assurer un cisaillement au pic, il est suggéré d'utiliser des déplacements plus importants pour éventuellement voir l'effet de l'état résiduel sur l'interface sol-matériau solide. Pour cela une modification de l'appareil est nécessaire.

- Il est suggéré d'effectuer une analyse au microscope électronique à balayage pour l'étude de la microstructure afin évaluer l'épaisseur de la zone de cisaillement pour chaque mode de cisaillement.

- Dans cette étude, l'effet de la texture de rugosité a été effectué avec des interfaces correspondant au mode intermédiaire, il est suggéré d'effectuer un travail pour voir l'effet de la texture sur les autres modes de cisaillement d'interface.

- Il serait intéressant d'étudier également l'effet de l'indice de plasticité sur le comportement d'interface et ce en préparant des mélanges de sols permettant d'aboutir à une large gamme de valeurs.

- Une modélisation numérique des essais d'interface avec d'autres modèles de comportement est suggérée.

- Une modélisation numérique tridimensionnelle de l'essai d'interface est aussi envisageable par la méthode des éléments finis (PLAXIS3D) et la méthode des différences finies (FLAC3D).

- Dans la modélisation numérique effectuée une approche de type « contact » a été considérée concernant l'interface, il est suggère de faire les simulations avec l'approche de type «couche mince ».

## Référence bibliographique

1. Abderrahim, A., & Tisot, J.P. (1992). Une nouvelle approche et une approche classique pour l'étude de l'interface sol pulvérulent-structures. In Colloque René Houpert: Structure et comportement mécanique des géomatériaux, pages 191-200, Nancy.
2. Acar, Y. B., Durgunoglu, T & Tumay, M. (1982). Interface properties of sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 108(GT4): 648–655.
3. Adjémian, F., & Evesque, P. (2001). Experimental stick-slip behaviour in triaxial test on granular matter. *Poudres et Grains*, 12(7):115–121.
4. Al-Douri, R.H., & Poulos, H.G. (1991). Static and cyclic direct shear test on carbonate sands. *Geotechnical Testing Journal*, 15(2):138–157.
5. Azanza, E., (1998). Ecoulements granulaires bidimensionnels sur plan incliné (thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), volume SI5. Collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris.
6. 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.
7. Bjerrum. L. & A.Landva. (1966). Direct simple shear tests on an norwegian quick clay. *Géotechnique*, 16:1–20.
8. Bouceck, B., (1977). Ring shear tests on clay. Publication N°3. Aachen: Institute for foundation engineering, soil mechanics, rock mechanics & waterways construction, 7-41.
9. Boulon, M., (1988). Contribution à la mécanique des interfaces sol-structures. Application au frottement latéral des pieux. Mémoire pour l'habilitation à diriger les recherches, Université Joseph Fourier-Grenoble I, Grenoble, France.
10. Brinkgereve R.B.J. et Vermeer P.A. « PLAXIS version 8 », DELFT University of Technology and PLAXIS BV, Pays-Bas, 2003.
11. Bromhead, E. N., (1979). A simple ring shear apparatus. *Ground Engineering* 12, N° 5, 40-44.
12. Brumund, W.F., et Leonards, G.A. (1973). Experimental study of static and dynamic friction between sand and typical construction materials. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.1 (2), pp.162-165.

13. Burland, J.B., Hasswell C.K., & Cornfield G.M., (1973). Prediction of load carry capacity of piles, ICE, 54: 753-755.
14. Butterfield, R., & Andrawes, Z. K. (1972). On the angles of friction between sand and plane surfaces. *J.Terramechanics* 8, N° 4, 15-23.
15. Cai, F., & Ugai, K. (2002). An implicit integration algorithm for elastoplasticity of interface element. *Proc.NUMOG VIII, Rome*, pp.279-284
16. Chambon. G., J. Schmittbuhl, & Corfdir. (2002). Laboratory gouge friction: seismic like slip weakening and secondary rate and state-effects. *Geophysical Research Letters*, 29(10):461–464.
17. Chambon. G, J., Schmittbuhl, A. Corfdir, J.-P. Vilotte, & Roux.S. (2003). Shear with comminution of a granular material: Microscopic deformations outside the shear band. *Phys. Rev. E*, 68:011304.
18. Chambon, G., (2003). Caractérisation expérimentale du frottement effectif des zones de failles. Thèse de doctorat de l'université Paris XI Orsay, pp.204.
19. Chambon. G, J., Schmittbuhl, A. Corfdir, N. Orellana, M. Diraison, & Y. Géraud. (2004). Effective fault core thickness : from laboratory experiments to field scale observations. In *European Geosciences Union 1st General Assembly*, volume 6 of *Geophysical research abstracts*, page 04048.
20. Chambon. G, J., Schmittbuhl, & A. Corfdir. (2006). Frictional response of a thick gouge sample: 2. friction law and implications for faults. *J. Geophys. Res.*, 111(B09308, doi: 10.1029/2003JB002731).
21. Coulomb. C, A. (1773). Sur une application des règles de maximis & minimis a quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. *Mémoires de Mathématique et de Physique, présentes à l'Academie Royale des Sciences par divers Savans, & Ius dans ses Assemblies* 7: 343–382
22. Coyle. H.M. & Sulaiman. I.H. (1967). Skin friction for steel piles in sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 93(SM6):261–278, 1967.
23. Day, R.A., & Potts, D.M. (1994). Zero thickness interface elements numerical Stability and application. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.18, pp.689-708.

24. Day, R.A. & Potts, D.M. (1998). The effect of interface properties on retaining wall behaviour. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.22, pp.1021-1033.
25. Dejong, J.T., Frost, D. Cargill, E. (2001). Effect of surface texturing on CPT friction sleeve measurements. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*.Vol.127.No.
26. De gennaro, V., (1999). Etude du comportement mécanique des interfaces sol-structure. Application à l'analyse du comportement des pieux. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, pp.427.
27. De gennaro, V., & Frank, R. (2005). Modélisation de l'interaction sol-pieu par la méthode des éléments finis. *Bull. de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées*, Vol.256-257, pp.107-133.
28. Desai, C.S., & Faruque, M.O. (1984). Constitutive model for (geologic) materials. *J. Engng. Mech. Div. Am. Soc. Civ. Engrs* 110, pp.1391-1408.
29. Desai, C.S., & Ma, Y. (1992). Modelling of joints and interfaces using the disturbed state concept. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.16, pp.623-653.
30. Desai, C.S., & Rigby, B. (1995). Modelling and testing interfaces. *Mech. of Geomat. Interf. Selvadurai AP.S.*,
31. Doolan, S., (2011). Interface shear characteristics of driven piles in sand with a high clay/silt fraction. MSc Thesis, Imperial College London.
32. Dove, J. E., Jarrett, J. B. (2002). Behavior of dilative sand interfaces in a geotribology framework. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 128, n°1, pp. 25-37.
33. Dumitrescu, A., (2005). Etude expérimentale du comportement d'interface sol grenu/structure. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, paris, France, pp.226.
34. Esashi, Y., Kataoka, T. & Yasuda, M. (1966). Uplift Resistance of Piles: Part I. Cohesionless soil. Rep. 66037, Central Research Institute of Electric Power Industry. Tokyo, 1-60.
35. Evgin, E., & Fakharian, K. (1996). Effect of stress paths on the behaviour of sand steel interfaces. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp.853-856.

36. Fakharian, K. et Evgin, E. (1996). An automated apparatus for three-dimensional monotonic and cyclic testing of interfaces. *Geotechnical Testing Journal*. ASTM, Vol. 19(1), pp.22-31
37. Fakharian, K. & Evgin, E. (2000). Elasto-plastic modelling of stress-path-dependent behaviour of interfaces. *International Journal for Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.24, pp.183-199.
38. FLAC (2007). Fast lagrangian analysis of continua. Itasca Consulting Group, Inc.,
39. Frih, N. (2005). Etude de l'interface sol-paroi moulée. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, paris, France, pp.205.
40. 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.
41. Gaba, A. R.; Simpson, B. Powrie, W. & Beadman, D. R. (2003). Embedded retaining walls -guidance for economic design. CIRIA C580, London, pp.390.
42. Georg K, J., (2008). Comportement d'interfacedes matériaux granulaires. Thèse de doctorat. L'école nationale des ponts et chaussées.
43. Ghionna, V.N. & Mortara, G. (2002). An elastoplastic model for sand-structure interface behaviour. *Géotechnique*, Vol.52, pp.41-50.
44. 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.
45. Goodman, R.E., Taylor, R.L. Brekke, T.L. (1968). A model for the mechanics of jointed rock. *Journal of Soils Mech. And Found Div*, Vol.94, pp.637-659.
46. Hammoud, F., (2006). Contribution á l'étude de la résistance au cisaillement á l'interface sol cohérent-matériau solide dans le domaine des grands déplacements, Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie.
47. Hassan, A.H., (1995). Etude expérimentale et numérique du comportement local et global d'une interface sol granulaire-structure. Thèse de Doctorat. Université Joseph Fourier. Grenoble.
48. Hermann, H. G. et Wolfskill, L.A. (1966). Residual shear strength of weak shales. Rapport technique engineering properties of nuclear craters. Report 5.MIT, Cambridge (USA).

49. Hoteit N. (1990). Contribution à l'étude du comportement d'interface sable-inclusion et application au frottement apparent. Thèse de Doctorat de l'institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France.
50. Hryciw, R., Irsyam, M.(1993). Behavior of sand particles around rigid ribbed inclusions during shear. *Soils and foundations*,vol. 33, n°3, pp.1-13.
51. Jardine, R. J., Chow, F.C.,(1996). New design methods for offshore piles. *Marine Technology Directorate*, London,publication 96/103.
52. Jewell R.A. & Wroth C.P. (1987). Direct shear tests on reinforced sand. *Géotechnique* 37, No. 1, pp. 53-68.
53. Kanji, M. A., (1974a). Unconventional laboratory tests for the determination of the shear strength of soil-rock contacts. *Proc. 3 rd Congr. Int. Conf. Rock Mech.*, Denver 2A, 241-247.
54. Kanji, M. A., (1974b). The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils. *Géotechnique* 24, N° 4, 671-674.
55. Karabatakis, D.A. et Hatzigogos, T.N. (2001). Analysis of creeping response of interface elements. *Computers and Geotechnics*, Vol. 29(4), pp.257-277.
56. Kishida, H & Uesugi, M.(1987). Tests of interface between sand and steel in the simple shear apparatus. *Géotechnique* 37, N° 1, 45-52.
57. 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).
58. Lemos, L. J. L. & Vaughan, P. R. (2000). Clay-interface shear resistance. *Géotechnique* 50, N° 1, 55-64.
59. Lerat, P., (1995). Étude expérimentale du comportement des interfaces sol granulaire-structure. *GEO*, 2<sup>ème</sup> réunion annuelle.
60. Lerat, P., (1996) .Etude de l'interface sol-structure dans les milieux granulaires à l'aide d'un nouvel appareil de cisaillement annulaire. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées, Paris, France.
61. Leon, J., Resendiz, D. (1989). Un método para el cálculo de asentamientos de sistemas placa-pilotes, UNAM. Publicación especial de la Facultad de Ingenieria (In spanish).
62. Lupini. J. F., Skinner, A. E. & Vaughan. P. R. (1981).The drained residual strength of cohesive soils. *Géotechnique* 31, N° 2, 181-213.

63. Martins, J. P., (1983). Shaft resistance of axially loaded piles in clay. Thèse de PhD, Université de Londres (Angleterre).
64. Mestat, P., (2001). Interaction sol-structures en statique. Applications de la méthode des éléments finis. Polycopié de DEA. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp.301.
65. Minneapolis Marti J, Cundall PA (1982) Mixed discretisation procedure for accurate solution of plasticity problems. *Int J Num Methods Anal Methods Geomech* 6:129–139
66. Mitchell, J.K., & Soga, K., (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd ed., Wiley, New York, NY, USA
67. Mohan, D., & Chandra, S. (1961). Frictional resistance of bored piles in expansive clays. *Géotechnique*, 11 (4), p. 294-301.
68. 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.
69. Pande, G.N. & Sharma, K.G. (1979). On joint/interface elements and associated problems of numerical ill conditioning. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech*, Vol.3, pp.293-300.
70. Pineda J. A. & J. E. Colmenares. (2011). Peak and residual shear strength parameters of soft clay-concrete interfaces. *Geotechnical conference. Pan-Am CGS 2011*
71. Plytas, C., (1985). Contribution à l'étude expérimentale et numérique des interfaces sol granulaire-structure. Application à la prévision du frottement latéral des pieux. Thèse de docteur ingénieur. Institut National Polytechnique de Grenoble.
72. Potts, D.M., & Zdraovkovic, L. (1999). *Finite element analysis in geotechnical engineering – theory* London, Thomas Telford, pp.427
73. Potts, D.M., Axelsson, K. Grande, L. Schweiger, H. Long, M. (2002). *Guidelines for the use of advanced numerical analyses*. COST, London, Thomas Telford, pp.136.
74. Potyondy, J. G., (1961). Skin friction between soils and construction materials. *Géotechnique* 11, N° 4, 339-353.
75. Rouaiguia, A., (1990). Strength of soil-structure interfaces. Thèse de PhD, Université de la technologie de Loughborough (Angleterre).
76. Roscoe, K.H., Schofield, A.N, Thurairajah, A (1965), Correspondence, *Geotechnique*. Vol. 15, pp. 127-130.

77. Sharma, K.G. et Desai, C.S. (1992). Analysis and implementation of thin-layer element for interfaces and joints', *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.118 (12), pp.2442-2462.
78. Santamarina, J.C., Klein, K., Fan, M. (2001). *Soils and Waves*. 1<sup>st</sup>ed. Wiley, New York, NY, USA.
79. Schlosser, F., Guilloux, A (1981). Le frottement dans le renforcement des sols. *Revue française de géotechnique*. n° 16, pp. 65-77.
80. Schlosser, F., (1991). *Ouvrages de soutènement, Poussée et butée*. Recueil/ Techniques de l'ingénieur, traité de construction, mécanique des sols, C242, pp.1-16.
81. Shakir, R. R., Zhu, J.G., (2009). Behavior of compacted clay-concrete interface. *Front. Archit. Civ. Eng. China* 3 (1), 85–92.
82. Smith, D. W., & Reitsma, M. G. (2002). Towards an explanation for the residual friction angle in montmorillonite clay soil. *Environmental geomechanics*, EPFL Press.
83. 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.
84. Subba Rao, K. S., Allam, M. M. & Robinson, R. G. (2000). Drained shear strength of fine-grained soil-solid surface interfaces. *Geotechnical Engineering, Proc. Instn Civ. Engrs*, N° 143, 75-81.
85. Suriyavut, P., (2013). Behaviour of soil-structure interfaces subjected to a large number of cycles. Application to piles. Thesis, University of Grenoble. France
86. Tan, W. H., Lee, C. Y., Sivadas, T., (2008). Behaviour of Clay-Steel Interfaces. *International conference on construction and building technology, 2008-E-(02)*-pp11-20
87. Teruhisa, M., (2009). Résistance au cisaillement des Remblais d'argile et de limon, Ph.D thèse (en anglais). L'université d'Ohio. Columbus
88. Terzaghi, K. & Peck, R.B. (1987). *Soil mechanics in engineering practice*, 2<sup>nd</sup> edition, McGraw Hill, New York, NY, USA.
89. Teuten. J.M., (2012). Shear Characteristics of Soils with Varying Silt/Clay Fractions. 1<sup>st</sup> Civil and Environmental Engineering Student Conference. Imperial College London.
90. 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.

91. Tsubakihara, Y., Kishida, H. & Nishiyima, T. (1993). Friction between cohesive soils and steel. *Soils Found.* 33, N°2, 145-146
92. Tubacanon, J.T., Airey, D.W, & Poulos,H.G.(1995). Pile skin friction in sands from constant normal stiffness tests. *Geotechnical Testing Journal*, 18(3):350–364.
93. Uesugi, M., & Kishida, H. (1986a). Influence factors of friction between steel and dry sands. *Soils Found.* 26, N°2, 29-42.
94. Uesugi, M., & Kishida, H. (1986b). Frictional resistance at yield between steel and dry sands. *Soils Found.* 26, N°4, 139-149.
95. Uesugi, M., Kishida, H., Tsubakihara, Y (1988). Behavior of sand particles in sand-steel friction. *Soils and foundations*, Vol. 28, n°1, pp. 107-118.
96. Unterreiner., (1994). Contribution à l'étude et à la modélisation numérique des sols cloués : application au calcul en déformation des ouvrages de soutènement. Thèse Ph, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
97. Van langen, H., & Vermeer, P.A. (1991). Interface elements for singular plasticity points. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.15, pp.310-315.
98. Ward, H. C., (1982). Profile characterization, Rough surfaces, Thomas, T. R., Ed., Longman, London, 261 p.
99. Wernick. E, (1978). Stress and strains on the surface of anchors. *Revue Française de Géotechnique*, (3):113–119.
100. Wernick.E. (1979). A true direct shear apparatus to mesure soil parameters of shear bands. In *Design parameters in geotechnical engineering*, volume 2, pages 175–182. VII ECSMFE Brighton.
101. Yagi, N., Yatabe, R. & Enoki, M. (1991). Stability analyses for landslides using ring shear results. *Landslides*, Bell (ed.) Rotterdam, Balkema
102. 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.
103. Zaman, M., (1985). Evaluation of thin layer element and modelling of interface behaviour in soil-structure interaction. *Proc of 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Num. Meth. In Geomech.* Nagoya, 1-5 April, pp.1797-1803.
104. Zheng, H., Liu, D.F. Lee, C.F. Yue, Z.Q. (2004). A sophisticated mode pair model for interface problems. *Computers and Geotechnics*, Vol.31, pp.137-153.