

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté : Science et technologie.

Département : Génie civil et Hydraulique.

Laboratoire de domiciliation : Laboratoire de Genie civil et Hydraulique (LGCH).

**THÈSE**  
**En Vue de l'Obtention du Diplôme de**  
**Doctorat en Troisième Cycle**

Domaine : Sciences et technologie Filière : Génie civil  
Spécialité : Géotechnique

**Présentée par**

**DJAAFRI Djamel Eddine**

***Intitulée***

**Analyse expérimentale et modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface sol cohérent-  
matériau solide dans le domaine des grands déplacements**

Soutenue le : 03/07/2025

Devant le Jury composé de :

**Nom et Prénom**

**Grade**

|                                    |                   |                 |              |
|------------------------------------|-------------------|-----------------|--------------|
| <b>Mr LAFIFI Brahim</b>            | <b>Professeur</b> | Univ. de Guelma | Président    |
| <b>Mr NOUAOURIA Mohamed Salah</b>  | <b>Professeur</b> | Univ. de Guelma | Encadreur    |
| <b>Mr BOUTELDJIA Fathe</b>         | <b>Docteur</b>    | Univ. de Guelma | Co-encadreur |
| <b>Mme REHAB BAKHOUCHE Souhila</b> | <b>Professeur</b> | Univ. de Skikda | Examineur    |
| <b>Mme BENCHEIKH Messouda</b>      | <b>Docteur</b>    | Univ. De Guelma | Examineur    |
| <b>Mme FELIGHA Marwa</b>           | <b>Docteur</b>    | Univ. de Skikda | Invitée      |

**Année Universitaire : 2024/2025**

## *Remerciement*

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

*Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de thèse le Professeur **Nouaouria Mohamed Salah** pour ses conseils, ses qualités morales, et son encadrement qui m'ont permis d'aboutir à la finalisation de ce projet de recherche. Je remercie également Docteur **BOUTELDJA Fathe** en tant que co-encadreur pour ses orientations durant la partie expérimentale. Je tiens à remercier l'ensemble **des professeurs** du département de génie civil et hydraulique de l'université Guelma pour leur disponibilité et leur soutien. Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers **mes amis** et l'ensemble de **ma famille** pour leurs encouragements, leurs conseils et leur soutien constant. Enfin, je désire exprimer ma profonde gratitude à **mes parents** pour leur soutien inébranlable, leur patience et leur amour sans fin. Je leur dédie ce travail de recherche*

## Résumé

Le transfert de charge entre le sol et les éléments de l'infrastructure s'effectue à travers une fine couche s'appelle l'interface. Les paramètres de cisaillement de cette interface jouent un rôle important dans les interactions entre le sol et ces sous-structures, ce qui peut influencer la stabilité de ces dernières. Dans le cadre des études visant à analyser la résistance au cisaillement à l'interface sol-structure et les facteurs qui l'affectent, un programme expérimental a été lancé pour étudier les effets de : la teneur en eau, la vitesse de cisaillement, le frottement mural, la rugosité, ainsi que pour proposer une méthode de mesure de la résistance résiduelle drainée.

Pour ce faire, quatre types de sols ont été utilisés : un kaolin pur et un mélange kaolin-sable avec des proportions de 90 %, 80 % et 70 % de kaolin, et 10 %, 20 % et 30 % de sable, respectivement. Les sols obtenus à partir de ces mélanges sont désignés par les noms suivants : 90K+10S, 80K+20S, 70K+30S. Les essais ont été réalisés à l'aide d'une boîte de cisaillement annulaire de Bromhead dans des conditions drainées.

Les résultats ont montré que la teneur en eau a un effet négatif sur la résistance au cisaillement à l'interface, tandis que l'ajout de sable au kaolin a augmenté cette résistance. En ce qui concerne la vitesse de cisaillement, pour les plages de vitesses étudiées, elle n'a pas montré d'effet significatif sur la résistance au cisaillement à l'interface, à une teneur en eau donnée. Le changement de la résistance au cisaillement à l'interface en fonction du frottement mural est également lié à la procédure d'essai utilisée. Concernant l'effet de la rugosité, un phénomène récent a été observé : le colmatage de la surface avec le sol en contact. Les interfaces présentant une surface aléatoire ou nervurée, classées comme surfaces colmatantes, ont mobilisé une résistance au cisaillement proche de celle du sol, tandis que les interfaces avec une surface structurée, classées comme non colmatantes, ont montré une résistance au cisaillement à l'interface supérieure à celle du sol. La procédure d'essai proposée, dénommée « préconsolidée précisaillée Flush », a donné des résultats satisfaisants.

Pour confirmer davantage ces résultats, une modélisation numérique a été réalisée à l'aide de PFC3D, basé sur la méthode des éléments discrets (DEM), qui a fourni des prévisions en accord avec les résultats expérimentaux.

## **Abstract**

The load transfer between the soil and infrastructure components takes place through a thin layer known as the interface. The shear properties of this interface are crucial in governing the interactions between the soil and these substructures, which can impact their stability. As part of studies aimed at analyzing shear resistance at the soil-structure interface and the factors that affect it, an experimental program was set up to investigate the effects of: water content, shear rate, wall friction, surface roughness, as well as to propose a procedure for measuring drained residual strength.

To do this, four types of soils were used: pure kaolin and a kaolin-sand mixture with proportions of 90%, 80%, and 70% kaolin, and 10%, 20%, and 30% sand, respectively. The soils obtained from these mixtures were named as follows: 90K+10S, 80K+20S, 70K+30S. The tests were conducted using a Bromhead ring shear apparatus under drained conditions.

The results showed that water content negatively affects interface shear resistance, while adding sand to kaolin increased this resistance. Regarding shear rate, within the studied range of shear rates, it did not show a significant effect on interface shear resistance for a given water content. The change in shear resistance at the interface due to wall friction is also linked to the testing procedure used. Concerning the effect of roughness, a recent phenomenon was studied: clogging of the surface with the contact soil. Interfaces with a random or ribbed surface, classified as clogging surfaces, mobilized an interface shear resistance close to that of the soil, while interfaces with a structured surface, classified as non-clogging, showed an interface shear resistance higher than that of the soil. The proposed testing procedure, called "preconsolidated pre-sheared Flush," gave satisfactory results.

To further confirm these findings, numerical modeling was carried out using PFC3D, based on the discrete element method (DEM), which provided predictions in good agreement with the experimental results.

## ملخص

يتم انتقال الحمل بين التربة وعناصر البنية التحتية من خلال طبقة رقيقة تُسمى "الواجهة". تلعب معاملات القص لهذه الواجهة دورًا مهمًا في التفاعلات بين التربة والبنى التحتية، مما قد يؤثر على استقرار هذه الأخيرة. في إطار الدراسات التي تهدف إلى تحليل مقاومة القص عند واجهة التربة-الهيكل والعوامل التي تؤثر عليها، تم تنفيذ برنامج تجريبي لدراسة تأثيرات: الرطوبة، سرعة القص، احتكاك الجدران، الخشونة، بالإضافة إلى اقتراح طريقة لقياس مقاومة القص المتبقية. تم استخدام أربعة أنواع من التربة : 90K+10S, 80K+20S, 70K+30S. تم إجراء التجارب باستخدام آلة القص الحلقي من نوع 'Bromhead'.

زيادة هذه أظهرت النتائج أن نسبة الماء لها تأثير سلبي على مقاومة القص عند الواجهة، بينما أدى إضافة الرمل إلى الكاولين إلى المقاومة. فيما يتعلق بسرعة القص، فإن النطاقات السرعة التي تم دراستها لم تُظهر تأثيرًا كبيرًا على مقاومة القص عند الواجهة في حال كان محتوى الماء ثابتًا. كما أن تغير مقاومة القص عند الواجهة نتيجة لاحتكاك الجدران يرتبط أيضًا بالإجراء المستخدم في الاختبار. بشأن تأثير الخشونة، تم ملاحظة ظاهرة حديثة: انسداد السطح بالتربة الملامسة. الواجهات التي تحتوي على سطح عشوائي أو مُنفوش، والتي تم تصنيفها كأسطح قابلة للانسداد بالتربة، قد حشدت مقاومة قص قريبة من مقاومة التربة، بينما الواجهات ذات السطح المُنظم، التي تم تصنيفها كأسطح غير قابلة للانسداد بالتربة، أظهرت مقاومة قص أعلى عند الواجهة مقارنةً بمقاومة التربة. الإجراء التجريبي المقترح، أعطى نتائج مرضية

تم إجراء نمذجة عددية باستخدام برنامج يعتمد على طريقة العناصر المنفصلة PFC3D لتأكيد هذه النتائج بشكل أكبر،

والتي قدمت تنبؤات تتوافق بشكل جيد مع النتائج التجريبية.

---

## LISTES DES FIGURES

---

**Fig. 1.1** Schéma d'une couche d'interface dans le système d'interaction sol-structure

**Fig. 1.2** Schéma de l'essai de cisaillement direct modifié

**Fig. 1.3** Schéma de l'essai de cisaillement simple conventionnel (d'après Uesugi et Kishida)

**Fig. 1.4** Schéma du dispositif de cisaillement par torsion annulaire (d'après Yoshimi et Kishida)

**Fig. 1.5** Schéma du dispositif de cisaillement annulaire (D'après Fakharian)

**Fig. 1.6** Vue schématique des différentes conditions aux limites dans l'étude expérimentale de l'interface : a) Charge Normale Constante (CNC) b) Volume Constant (VC) c) Rigidité Normale Constante

**Fig. 1.7** Schéma représentatif des lignes de glissements générées dans un sol

**Fig. 1.8** La relation (Contrainte de cisaillement- Déformations (Déplacement), Contrainte de cisaillement- Contrainte Normale pour les argiles Surconsolidées et Normalement Consolidées.

**Fig. 1.9** Essais de cisaillement annulaires sur des mélanges sable – bentonite (d'après Lupini et al, 1981)

**Fig. 1.10** Schéma représentatif de la relation : (vitesse de cisaillement-résistance résiduelle)

**Fig. 1.11** Relation entre la résistance résiduelle et la contrainte normale (Eid et al. 2016)

**Fig. 1.12** Résistance résiduelle à différents indices de surconsolidation

**Fig. 2.1** Définition du paramètre de rugosité  $R_a$

**Fig. 2.2** Définition du paramètre de rugosité  $R_{max}$

**Fig. 2.3** Définition des paramètres de  $R_e$ ,  $R_f$

**Fig. 2.4** Définition de la rugosité normalisée  $R_n$

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

**Fig. 2.6** Schéma représentatif du mode de contact : (a) sur la facette (b) : sur une arête

**Fig. 2.7** Mesure de rugosité de surface à l'aide d'un stylet

**Fig. 2.8** Mesure basée sur un stylet

**Fig. 2.9** Représentation de l'interférométrie optique

**Fig. 2.10** Vue générale de profilomètre, rugosimètre 3D **AltiSurf520**

**Fig. 2.11** Relation entre la rugosité relative  $R_n$  et le diamètre moyen  $D_{moy}$

**Fig. 2.12** Modèles d'interfaces utilisées

**Fig. 2.13** Profil de l'interface d'acier S0

**Fig. 2.14** Profil de l'interface d'acier S1

**Fig. 2.15** Profil de surfaces d'acier S2

**Fig. 2.16** Profil de surface d'acier S3

**Fig. 2.17** Profil de la pierre poreuse S4

**Fig. 3.1** (a) Schéma représentant les anneaux fixes ou solides (b) schéma représentant les anneaux divisées (Sadrekarimi et Olson, 2009)

**Fig. 3.2** Schéma de l'appareil Harvard (LaGatta, 1970)

**Fig. 3.3** Schéma général de l'appareil NGI (Bishop et al. 1971)

**Fig. 3.4** (a) Photo prise de l'appareil de Bodset (UBC) (b) Une vue frontal de l'appareil de Bodset (UBC) (Bosdet, 1980)

**Fig. 3.5** (a) Vue d'ensemble de l'appareil de Bromhead, avec les anneaux de confinement (b) Plateau supérieur et plateau inférieur + conteneur

**Fig. 3.6** Vue de dessus de l'appareil

**Fig. 3.7** Vue latérale de l'appareil

**Fig. 3.8** Courbes granulométriques du kaolin et de mélange kaolin-sable.

**Fig. 3.9** : Courbe granulométrique du sable normalisé

**Fig. 4.1** Effet de la teneur en eau à 20%, 25%, 30% à des vitesses de cisaillement de : 0,5 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min, 20 mm/min pour le kaolin

**Fig. 4.2** Effet de la teneur en eau à 20%, 25%, 30% à des vitesses de cisaillement de 0,5 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min, 20 mm/min pour le mélange 90K+10S

**Fig. 4.3** Effet de la teneur en eau à 20%, 25%, 30% à des vitesses de cisaillement de : 0,5 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min, 20 mm/min pour le mélange 80K+20S.

**Fig. 4.4** Effet de la teneur en eau à 20%, 25%, 30% à des vitesses de cisaillement de : 0,5 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min, 20 mm/min pour le mélange 70K+30S.

**Fig. 4.5** Diagrammes représentant la relation contrainte de cisaillement-teneurs en eau pour des domaines de vitesse de cisaillement de 0.5 à 20 mm/min pour les sols étudiés

**Fig. 4.6** Mécanisme de développement du frottement mural.

**Fig. 4.7** La pierre poreuse modifiée par Anay et al. (1989)

**Fig. 4.8** (a) plateau supérieur de l'appareil (b) plateau supérieur modifié  
Meehan et al. (2007)

**Fig. 4.9** Courbe de cisaillement-déplacement en fonction du temps consolidation pour la procédure d'essai Multistage : a)  $\sigma_1=32$  kPa, b)  $\sigma_2=101,66$  kPa, c)  $\sigma_3=202,64$  kPa

**Fig. 4.10** Courbe de contrainte cisaillement- contrainte normal en fonction du temps de consolidation pour la procédure d'essai Multistage

**Fig. 4.11** Courbe de cisaillement-déplacement en fonction du temps de consolidation pour la procédure d'essai single stage : a)  $\sigma_1=32$  kPa, b)  $\sigma_2=101,66$  kPa, c)  $\sigma_3=202,64$  kPa

**Fig. 4.12** Courbe de contrainte cisaillement- contrainte normal en fonction du temps consolidation

pour la procédure d'essai single stage

**Fig. 4.13** Courbe de cisaillement-déplacement en fonction du temps consolidation pour la procédure d'essai precisaillement : a)  $\sigma_1=52,32$  kPa, b)  $\sigma_2=101,66$  kPa, c)  $\sigma_3=202,64$  kPa

**Fig. 4.14** Courbe de contrainte cisaillement- contrainte normal en fonction du temps consolidation pour la procédure d'essai précisaillement

**Fig. 4.15** Formes de rugosité de surfaces

**Fig. 4.16** Mode de cisaillement à l'interface

**Fig. 4.17** Courbe de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal en fonction de différentes formes et rugosité pour a)  $\sigma_1=32$ kPa, b)  $\sigma_2=101,66$ kPa, c)  $\sigma_3=202,64$ kPa

**Fig. 4.18** Vue générale du colmatage par le sol en contact qui se manifeste au niveau des rainures et la surface lisse entre elles pour S3.

**Fig. 4.19** Vue générale du colmatage complet par le sol en contact pour S4

**Fig. 4.20** Vue générale des bords tranchants S1

**Fig. 4.21** Vue de l'un des surfaces polies créés sur le haut des échantillons de kaolin

**Fig. 4.22** Courbe de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal en fonction des différentes formes rugosité pour a)  $\sigma_1=32$ kPa, b)  $\sigma_2=101,66$ kPa, c)  $\sigma_3=202,64$ kPa pour le mélange 90K+10S

**Fig. 4.23** Courbe de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal en fonction de différentes formes et rugosité pour a)  $\sigma_1=32$ kPa, b)  $\sigma_2=101,66$ kPa, c)  $\sigma_3=202,64$ kPa pour le mélange 80K+20S

**Fig. 4.24** Courbe de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal en fonction de différentes formes et rugosité pour a)  $\sigma_1=32$ kPa, b)  $\sigma_2=101,66$ kPa, c)  $\sigma_3=202,64$ kPa pour le mélange 70K+30S.

**Fig. 4.25** Vue générale du haut de l'échantillon 80K+20S après cisaillement

**Fig. 4.26** : Coefficient de frottement- déplacement horizontal pour le sable d'Ottawa 20-30 (Martinez et Frost) et contrainte de cisaillement-déplacement horizontal pour le kaolin (Djaafri et Nouaouria) types de sables et les différentes formes de rugosité surface.

**Fig. 4.27** Vue Générale de l'échantillon préparé.

**Fig. 4.28** Procédure d'essai preconsolidated presheared Flush testing procedure (P.P.F)

**Fig. 4.29** Courbe de consolidation typique pour la procedure (P.P.F) pour  $\sigma_N = 50$  kPa

**Fig. 4.30** Courbes de contrainte de cisaillement et déplacement vertical- déplacement horizontal pour la procedures d’essai Flush

**Fig. 4.31** Courbes de contrainte de cisaillement et déplacement vertical- déplacement horizontal pour la procedures d’essai (P.P.F)

**Fig. 4.32** Comparaison des résultats de la procedure Flush et (P.P.F) pour  $\sigma_N : 50$  kPa

**Fig. 4.33** Comparaison entre la procedure d’essai proposée (P.P.F), la procédure Flush, la), procedure presheard Flush (précisaillée), le plateau modifié de Meehan et al. 2007

**Fig. 5.1** Diagramme schématique des éléments solides minces conventionnels : a) élément 4 nœuds en deux dimensions et b) élément 8 nœuds en trois dimensions

**Fig. 5.2** Ligne d’état critique et la definition du paramètre d’état dans la formulation d’interface

**Fig. 5.3** Effet de la prise en compte de la rupture des particules sur la performance de la modélisation constitutive des interfaces dans le plan du déplacement normal - nombre de cycles, a) chemin de contrainte CNL, et b) chemin de contrainte CNS.

**Fig. 5.4** Comparaison entre les prévisions du modèle et les essais au laboratoire : a) déplacement vertical- déplacement horizontal sous le chemin de contrainte CNL (données de Hou (2008)), et b) contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) - contrainte normale ( $\sigma_n$ ) sous le chemin de contrainte CNS (données de Zhang et Zhang (2006, 2009)).

**Fig. 5.5** Schéma Représentatif de modèle de résistance au roulement

**Fig. 5.6** Vue de la partie inferieur de la boite de cisaillement annulaire simulée

**Fig. 5.7** Vue de la partie inferieure et supérieure de la boite de cisaillement annulaire simulée

**Fig. 5.8** Secteurs radiaux introduits au niveau demi -boite supérieur

**Fig. 5.9** Vue des sphères simulées dans la cavité annulaire

**Fig. 5.10** Exemple des résultats de contraintes de cisaillement obtenues de la simulation numérique pour la procédure d’essai multistage et précisaillement

**Fig. 5.11** Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour la procédure d’essai single stage

**Fig. 5.12** Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour la procédure d’essai précisaillement

**Fig. 5.13** comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour la procédure d’essai multistage

## **LISTE des tableaux**

**Tableau. 1.1** Paramètres typiques des appareils de cisaillement annulaire représentatifs

**Tableau. 2.1** Valeurs de  $Ra$

**Tableau. 2.2** Valeurs de  $Rn$

**Tableau. 3.1** Caractéristiques physiques des sols utilisés

**Tableau. 3.2** Programme expérimental des essais

**Tableau. 4.1** Tassement vertical initial et final en fonction de temps de consolidation pour les différentes procédures d'essai

**Tableau. 4.2** Valeurs de  $\frac{\delta}{\emptyset}$  pour le kaolin et le mélange en fonction des interfaces

**Tableau. 4.3** Comparaison des résultats des deux procédures (procédures: PPF et Flush)

**Tableau. 5.1** Modèles adoptés dans le logiciel PFC3d

**Tableau. 5.2** Paramètres microscopiques du modèle

## Notations principales

---

|                        |                                                            |
|------------------------|------------------------------------------------------------|
| $\tau$                 | Résistance au cisaillement                                 |
| $\sigma_n$             | Contrainte normale                                         |
| Ci                     | Adhérence                                                  |
| $\Delta\sigma$         | Incrément de contrainte normale                            |
| <b>K</b>               | Raideur normal                                             |
| $U_n$                  | Déplacement normal                                         |
| $\Delta U_n$           | Incrément de déplacement normal                            |
| $\varphi^p, \varphi^r$ | Angle de frottement au pic et résiduel                     |
| $\tau_p, \tau_r$       | Résistance au cisaillement au pic et résiduelle            |
| $R_a$                  | Rugosité arithmétique moyenne                              |
| $R_{max}$              | Rugosité maximale entre pic et creux minimal               |
| $R_q$                  | Rugosité quadratique moyenne                               |
| MSV                    | Valeur quadratique moyenne                                 |
| $Z_e$                  | Racine carré de la première dérivée du profil              |
| $R_p$                  | Indice de rugosité de profile                              |
| $R_n$                  | Rugosité normalisée                                        |
| $R$                    | Rugosité relative                                          |
| $\delta$               | Angle de frottement de l'interface                         |
| $\varphi$              | Angle de frottement interne du sol                         |
| <b>L</b>               | Longueur de l'élément d'interface bidimensionnel modélisé  |
| <b>t</b>               | Epaisseur de l'élément d'interface bidimensionnel modélisé |
| <b>U</b>               | Déplacement selon l'axe X-X                                |
| <b>V</b>               | Déplacement selon l'axe Y-Y                                |

|                                       |                                                                                           |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ | Déformations selon la direction x, y et la distorsion due à la contrainte de cisaillement |
| <b>K</b>                              | Matrice de rigidité                                                                       |
| <b>B</b>                              | Matrice de transformation déformation-déplacement                                         |
| <b><math>\Psi</math></b>              | Paramètre d'état                                                                          |
| $e_{cs}$                              | Indice des vides à l'état critique                                                        |
| $P_{atm}$                             | Pression atmosphérique                                                                    |
| <b>Br</b>                             | Paramètre pour quantifier le degré de cassure des particules                              |
| <b>F<sup>l</sup></b>                  | Force linéaire                                                                            |
| <b>F<sup>c</sup></b>                  | Force d'amortissement                                                                     |
| <b>M<sup>r</sup></b>                  | Moment de résistance au roulement                                                         |
| $\Delta\theta_b$                      | Incrément de rotation                                                                     |
| $\bar{R}$                             | Diamètre effectif                                                                         |
| <b>R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub></b>   | Rayons des particules                                                                     |
| <b>M*</b>                             | Couple limite                                                                             |
| <b>E</b>                              | Module de young                                                                           |
| <b>Kn</b>                             | Rigidité normale                                                                          |
| <b>Ks</b>                             | Rigidité transversale                                                                     |
| $\mu, \mu_r$                          | Coefficient de frottement inter-particules et de resistance au roulement, respectivement  |

# Table des matières

**Remerciement**

**Résumé**

**Abstract**

**Résumé Arabe**

**Listes des Figures..... I**

**Listes des Tableaux..... V**

**Notations générales..... VI**

Introduction générale..... 1

## **Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure**

|       |                                                                       |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure.....        | 5  |
| 1.1   | Introduction .....                                                    | 5  |
| 1.2   | Résistance au cisaillement à l'interface .....                        | 5  |
| 1.2.1 | Notion de la résistance au cisaillement à l'interface .....           | 6  |
| 1.2.2 | Conditions aux limites des essais de cisaillement au laboratoire..... | 9  |
| 1.3   | Résistance au cisaillement des sols cohérents.....                    | 10 |
| 1.3.1 | Résistance au cisaillement résiduelle .....                           | 12 |
| 1.3.2 | Paramètres affectant la résistance résiduelle .....                   | 15 |
| 1.4   | Conclusion.....                                                       | 23 |

## **Chapitre 2: Interfaces utilisées et quantification de la rugosité de surface**

|       |                                                                                 |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2     | Interfaces utilisées et quantification de la rugosité de surface.....           | 25 |
| 2.1   | Introduction .....                                                              | 25 |
| 2.2   | Paramètres de mesure .....                                                      | 25 |
| 2.3   | Quantification de la rugosité dans le cas d'interface sol-matériau solide ..... | 28 |
| 2.4   | Techniques de caractérisation morphologique.....                                | 30 |
| 2.4.1 | Méthodes de mesure.....                                                         | 31 |
| 2.5   | Interfaces utilisées .....                                                      | 33 |
| 2.6   | Conclusion.....                                                                 | 37 |

## **Chapitre 3: Equipements, matériaux et programme expérimental**

|       |                                                       |    |
|-------|-------------------------------------------------------|----|
| 3     | Equipements, matériau et programme expérimental.....  | 38 |
| 3.1   | Introduction .....                                    | 38 |
| 3.2   | Appareil de Bromhead .....                            | 44 |
| 3.2.1 | Description et principe général (selon Bromhead)..... | 44 |

|                                                                                                             |                                                                                                                                                    |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.2                                                                                                       | Préparation de l'échantillon .....                                                                                                                 | 45  |
| 3.3                                                                                                         | Matériaux étudiés : .....                                                                                                                          | 48  |
| 3.4                                                                                                         | Conclusion : .....                                                                                                                                 | 51  |
| <b>Chapitre 4 :Présentation des résultats et discussion</b>                                                 |                                                                                                                                                    |     |
| 4                                                                                                           | Présentation des résultats et discussion .....                                                                                                     | 52  |
| 4.1                                                                                                         | Effet de la teneur en eau et de la vitesse de cisaillement sur la résistance au cisaillement de pic et résiduelle .....                            | 52  |
| 4.1.1                                                                                                       | Introduction .....                                                                                                                                 | 52  |
| 4.1.2                                                                                                       | Procédure expérimentale .....                                                                                                                      | 52  |
| 4.1.3                                                                                                       | Discussion des résultats.....                                                                                                                      | 53  |
| 4.2                                                                                                         | Effet du frottement mural sur la résistance résiduelle.....                                                                                        | 63  |
| 4.2.1                                                                                                       | Introduction .....                                                                                                                                 | 63  |
| 4.2.2                                                                                                       | Procédure expérimentale : .....                                                                                                                    | 66  |
| 4.2.3                                                                                                       | Discussion des résultats.....                                                                                                                      | 67  |
| 4.2.4                                                                                                       | Conclusion .....                                                                                                                                   | 72  |
| 4.3                                                                                                         | Effet de la rugosité sur la résistance résiduelle.....                                                                                             | 73  |
| 4.3.1                                                                                                       | Introduction .....                                                                                                                                 | 73  |
| 4.3.2                                                                                                       | Procédure expérimentale : .....                                                                                                                    | 75  |
| 4.3.3                                                                                                       | Les mécanismes de cisaillement d'interface : .....                                                                                                 | 75  |
| 4.3.4                                                                                                       | Discussion des résultats.....                                                                                                                      | 76  |
| 4.3.5                                                                                                       | Conclusion : .....                                                                                                                                 | 85  |
| 4.4                                                                                                         | Proposition d'une procédure d'essai pour mesurer la résistance résiduelle drainée (Preconsolidated presheared flush testing procédure P.P.F) ..... | 87  |
| 4.4.1                                                                                                       | Procédure d'essai flush .....                                                                                                                      | 87  |
| 4.4.2                                                                                                       | Procedure d'essai preconsolidated presheared flush testing procedure (P.P.F): .....                                                                | 87  |
| 4.4.3                                                                                                       | Conclusion .....                                                                                                                                   | 95  |
| <b>Chapitre 5:Modélisation de la résistance au cisaillement de l'interface et comparaison des résultats</b> |                                                                                                                                                    |     |
| 5                                                                                                           | Modélisation de la résistance au cisaillement de l'interface et comparaison des résultats .....                                                    | 96  |
| 5.1                                                                                                         | Introduction .....                                                                                                                                 | 96  |
| 5.2                                                                                                         | Les types d'approches numériques.....                                                                                                              | 96  |
| 5.2.1                                                                                                       | Méthode d'analyse de contact .....                                                                                                                 | 96  |
| 5.2.2                                                                                                       | Élément d'interface .....                                                                                                                          | 96  |
| 5.2.3                                                                                                       | Méthode des éléments discrètes (DEM) .....                                                                                                         | 104 |
| 5.3                                                                                                         | Modélisation numérique de l'effet du frottement mural dû à la consolidation par la méthode des éléments discrets (DEM) .....                       | 105 |

|                                          |                                                                                             |     |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.1                                    | Méthode des éléments discrets : .....                                                       | 105 |
| 5.3.2                                    | Le modèle de contact de résistance au roulement (rolling resistance contact model<br>RSCM): | 107 |
| 5.3.3                                    | Les étapes de la modélisation :.....                                                        | 108 |
| 5.3.4                                    | Présentation des résultats : .....                                                          | 113 |
| 5.3.5                                    | Conclusion : .....                                                                          | 119 |
| Conclusion générale .....                |                                                                                             | 121 |
| <b>Références bibliographiques</b> ..... |                                                                                             | 124 |

### Introduction générale :

La résistance au cisaillement est l'un des principes fondamentaux dans la conception des sous-structures. Les critères de conception des pieux, Les mur de soutènement, les tunnels, le renforcement des sols, nécessitent une évaluation du frottement à l'interface entre les géomatériaux et les matériaux de renforcement. Potyondy (1961) a été un pionnier dans ce domaine et a postulé que les facteurs significatifs influençant la résistance au cisaillement mobilisée à l'interface sont : la contrainte normale, le taux d'humidité, la rugosité de surface, la composition du sol, le type de matériau de construction et sa finition. La relation en matière du frottement entre différents sols et matériaux de construction, tels que l'acier, le béton et le bois, a été déterminée, et a conduit à des modifications suggérées de l'équation de Coulomb pour la résistance au cisaillement. Tant la cohésion que l'angle de frottement à l'interface augmentent avec la rugosité de la surface. Cependant, le comportement de frottement est susceptible d'être catégorisé en trois modes de rupture : mode interfacial de glissement complet à l'interface, mode interne par cisaillement au sein du sol, et un comportement mixte, selon Feligha et al. (2015). De plus, la résistance au cisaillement à l'interface est indépendante de la texture de surface pour une rugosité donnée.

Potyondy (1961) a suggéré d'exprimer la résistance à l'interface d'une manière similaire à la loi de Coulomb, sous la forme suivante :

$$\tau = C_i + \sigma_n \tan \delta$$

- $C_i$  : représente l'adhésion, généralement négligée ;
- $\delta$  : est l'angle de frottement à l'interface ;
- $\sigma_n$  : désigne la contrainte normale

Ainsi, l'équation pour la résistance au cisaillement prend la forme suivante :

$$\tau = \sigma_n \tan \delta$$

et donc :

$$\tan \delta = \frac{\tau}{\sigma_n}$$

### Objectif de la recherche :

Ces dernières années, la résistance au cisaillement à l'interface sol cohérent-structure et les mécanismes fondamentaux régissant son comportement sous différentes conditions ont été étudiés par divers chercheurs. Contrairement aux premiers travaux, qui se concentraient principalement sur les sols granulaires en contact avec différentes interfaces, ces recherches récentes portent davantage sur les sols cohérents et leurs interactions avec les structures. La résistance au cisaillement à l'interface peut être obtenue par diverses essais au laboratoire, telles que l'essai de cisaillement direct en modifiant la partie inférieure et en y insérant un matériau solide et dans la partie supérieure le sol (Direct shear test), l'essai de cisaillement triaxial (triaxial test), et l'essai de cisaillement annulaire (ring shear test). L'essai de cisaillement annulaire est considéré comme le plus performant pour fournir des résultats optimaux par rapport aux autres méthodes, en raison de sa capacité à maintenir la direction du cisaillement sans modification et à permettre des déplacements illimités (déplacements importants).

Divers facteurs peuvent influencer la résistance au cisaillement à l'interface, notamment la résistance résiduelle (post-pic), tels que la vitesse de cisaillement, la contrainte normale effective, la teneur en eau, la rugosité et le frottement mural. La partie expérimentale de cette recherche a pour objet d'approfondir la compréhension des enjeux encore non élucidés de ces phénomènes (l'effet de la teneur en eau, l'effet du frottement mural, l'effet du colmatage des modèles d'interfaces ayant différents degrés de rugosité, les inconvénients de la procédure d'essai flush).

Pour éclaircir les enjeux qui n'ont pas une explication consistante de ces phénomènes, Des essais de cisaillement annulaire ont été conduits en utilisant quatre types de sols, comprenant du kaolin et des mélanges kaolin-sable avec les proportions suivantes : 90 %, 80 %, et 70 % de kaolin, et 10 %, 20 %, et 30 % de sable, respectivement. Différents modèles d'interface ont été également considérés, incluant quatre types en acier et la pierre poreuse de l'appareil pour représenter le matériau solide. Les résultats de ces essais sont présentés. Une phase qui précède la réalisation des essais, consiste en la caractérisation du sol a été effectuée, comprenant une série d'essais d'identification au laboratoire pour le sol et une quantification de la rugosité à l'aide d'un profilomètre 3D pour le matériau solide. Pour assurer la dissipation de toute surpression d'eau durant l'essai, ce qui pourrait affecter négativement les résultats, les vitesses de cisaillement choisies ont été établies conformément à la norme ASTM D 6467-99

## Introduction générale

---

pour les essais de cisaillement annulaire, ainsi qu'aux recommandations de Skempton (1986) concernant les vitesses de cisaillement appropriées pour les sols cohérents.

Afin de confirmer davantage les résultats obtenus, une simulation numérique a été effectuée pour une partie des essais expérimentaux en utilisant la méthode des éléments discrets (PFC3D).

Globalement, cette étude vise à appréhender les mécanismes régissant l'influence négative des facteurs mentionnés précédemment sur la résistance au cisaillement à l'interface, en particulier la résistance au cisaillement résiduelle, afin d'assurer que les résultats obtenus au laboratoire soient en bon accord avec ceux mobilisés dans la réalité.

### **Plan de la thèse :**

Cette thèse est composée de cinq chapitres. Étant donné que la résistance au cisaillement à l'interface sol-matériau solide est le sujet principal de cette recherche, le chapitre 1 lui est entièrement dédié. Il présente une synthèse bibliographique de l'évolution des connaissances sur la résistance au cisaillement à l'interface et la résistance résiduelle. Dans ce chapitre, une définition de la résistance au cisaillement de l'interface est présentée, ainsi que les méthodes pour la mesurer au laboratoire et les conditions aux limites associées. De plus, la résistance au cisaillement résiduelle est abordée, en décrivant les mécanismes de son développement et les facteurs qui l'influencent.

La rugosité de surface, un facteur important dans l'interaction entre le sol et le matériau solide, a été abordée dans le deuxième chapitre, où les paramètres utilisés pour sa caractérisation ainsi que les méthodes de mesure, tant en contact que sans contact, ont été détaillés.

Avant d'entamer la réalisation des essais, les matériaux, ainsi que les matériels utilisés dans le cadre du programme expérimental ont été minutieusement présentés dans le troisième chapitre. En particulier, l'appareil de Bromhead utilisé pour les essais de cisaillement annulaire fait l'objet d'une description détaillée, accompagnée d'une exploration approfondie de l'historique des dispositifs annulaires et de leur évolution au fil du temps.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus. Il décrit d'abord la procédure adoptée pour chaque essai, puis présente les résultats et se termine par une discussion de ces résultats.

## **Introduction générale**

---

Le cinquième chapitre présente une modélisation numérique de l'effet du frottement mural sur la résistance résiduelle de la partie expérimentale en utilisant le logiciel PFC3D qui se base sur la méthode des éléments discrets (DEM)

## **Chapitre 1 :**

### **La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure**

## 1 La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

### 1.1 Introduction

La résistance au cisaillement des sols constitue un élément fondamental dans le domaine de génie civil et géotechnique. Elle se réfère à la capacité intrinsèque d'un sol à résister aux forces de déformation résultant d'une contrainte de cisaillement. Cette notion revêt une importance capitale dans la conception des ouvrages de construction, stables et durables, et qui nécessite la compréhension des mécanismes qui contrôlent l'interaction de l'infrastructure de ces constructions avec le sol.

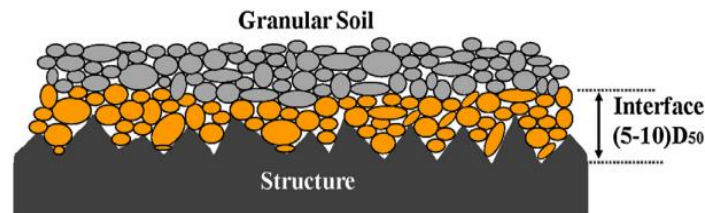
Quand un corps est en mouvement sur une surface, une force s'oppose au sens de mouvement est générée. Cette force est appelée force de frottement. Ce concept a été mis en évidence suite à des observations expérimentales et a été introduit pour la première fois par Coulomb en 1773. Elle est couramment utilisée pour décrire le cisaillement des sols. Santamarina et al. (2001) ont proposé un modèle basé sur les interactions à l'échelle des particules, selon lequel la résistance ultime des sols est atteinte lorsque les particules subissent des déplacements permanents. Bien que principalement applicable aux matériaux granulaires, certains auteurs, comme Burland et al. (1973) et Leon-Resendiz (1989), évoquent également son utilisation pour les argiles normalement consolidées. Selon Das (2002), la résistance au cisaillement d'un sol est définie comme "la résistance interne à l'unité de surface" que ce dernier oppose à la rupture et au glissement le long d'un plan quelconque. Par ailleurs, la résistance au cisaillement c'est la résistance maximale mobilisée dans le squelette minéral du sol avant que des déformations permanentes n'apparaissent le long du plan de rupture (Mitchell et Soga, 2005). Cette résistance maximale provient principalement du frottement entre les particules des sols fins, bien que des forces additionnelles, telles que la cohésion entre les particules joue également un rôle.

### 1.2 Résistance au cisaillement à l'interface

Les structures de soutènement, les barrages en remblai avec parement en béton, les pipelines enterrés, ainsi que les fondations superficielles et profondes sont des géo-structures dont leur réponse peut être influencée par l'interaction entre les matériaux structuraux et les sols adjacents. Cette interaction crée une fine couche dans la région de contact entre le sol et la structure appelée interface. Selon des études expérimentales menées par Uesugi et al. (1986), et Martinez et al. (2015), utilisant des essais de cisaillement d'interface, la zone d'interface entre les sols granulaires et les structures est définie par une épaisseur ( $t$ ) d'environ (5–10) fois la taille moyenne des grains ( $D_{50}$ ) des sols granulaires (Fig. 1.1). Plusieurs chercheurs ont tenté

# Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

d'étudier le comportement des interfaces à savoir Frost et al. (2002), DeJong et al. (2006), et Martinez et Frost (2017) en menant des essais au laboratoire. Les expériences ont mis en évidence des comportements complexes à l'interface sol-structure, influencés par le type de chargement. Ces comportements incluent la dégradation des contraintes, la rupture des particules, la localisation des déformations, ainsi que des phénomènes tels que le glissement, la séparation, la contraction cumulative, et l'adoucissement des contraintes.



**Fig. 1.1** Schéma d'une couche d'interface dans le système d'interaction Sol-structure

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

A la surface de contact entre deux corps, les paramètres gouvernant leur comportement de cisaillement implique à la fois le frottement et l'adhérence. Le frottement désigne la force de frottement qui dépend de la rugosité de surface. L'adhérence désigne la force qui maintient ces deux corps joints. D'après (Santamarina, 2001), l'adhérence désigne la propriété d'un matériau à unir deux surfaces lorsqu'elles entre en contact, grâce aux forces intermoléculaires qui les relient.

Cette résistance peut s'écrire :

$$\tau = C_i + \sigma_n \tan \delta \quad (1.1)$$

Cette équation se compose de trois termes :

le premier représente l'adhérence :  $C_i$

Le deuxième terme correspond à la contrainte normale appliquée :  $\sigma_n$

Le troisième terme, associé à la tangente, représente l'angle de frottement à l'interface sol-structure :  $\delta$

Skempton a suggéré que l'adhérence peut être négligée, et l'équation peut ainsi s'écrire sous la

forme suivante :

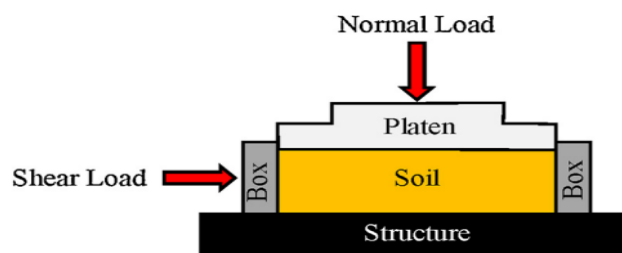
$$\tau = \sigma_n \tan \delta \quad (1.2)$$

# Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

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

Les dispositifs couramment utilisés pour mesurer la résistance au cisaillement à l'interface sol-structure sont présentés ci-dessous :

Deux compartiments indépendants (demi-boîtes), supérieurs et inférieurs, sont assemblés pour constituer le dispositif de cisaillement direct modifié, dans lequel la section inférieure est modifiée en y insérant un bloc en acier ou un autre matériau. L'essai s'effectue en appliquant une contrainte normale centrée maintenue constante durant l'essai, ensuite, une contrainte de cisaillement est imposée selon le plan de glissement de sol-interface. Une vue schématique du dispositif de cisaillement direct modifié est présentée à la Fig. 2.2. Ce dispositif est le plus simple parmi les autres essais de cisaillement d'interface. Ce dispositif se distingue d'une procédure d'essai et une préparation d'échantillons simples, qui sont des propriétés connus pour ce dispositif. Cependant, En raison des particularités géométriques de ce dispositif, les contraintes se concentrent et se localisent principalement aux extrémités. Contrairement à l'appareil de cisaillement simple, conçu pour déterminer les déformations dues au cisaillement du sol ainsi que celles dues au glissement, cette distinction est plus complexe avec cet appareil. En raison de la simplicité de l'essai de cisaillement direct modifié, il est très populaire parmi les ingénieurs et a été largement utilisé dans différentes études d'interface sol-structure.

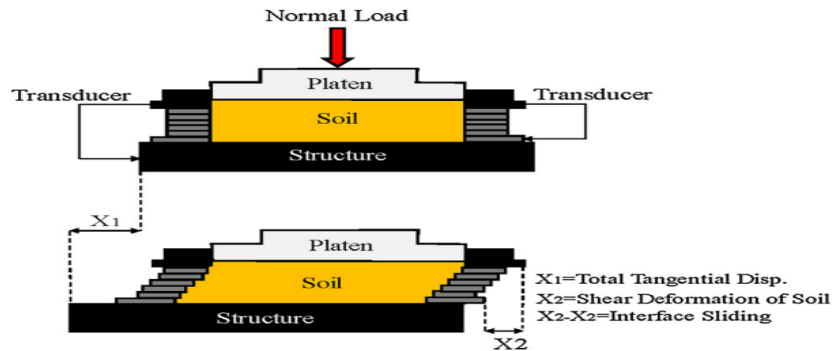


**Fig. 1.2** Schéma de l'essai de cisaillement direct modifié (d'après Saberi et al. 2018)

Uesugi et Kishida (1986) ont développé un essai de cisaillement simple capable de mesurer le glissement et la déformation par cisaillement dans la zone d'interface entre les sols granulaires et les surfaces structurales. Une vue schématique du dispositif de cisaillement simple est présentée à la Figure 1.3. Dans cet essai, Les contraintes se localisent aux extrémités toujours en raison de la forme de la boîte de cisaillement. Uesugi et al. (1989, 1990) ont utilisé l'essai de cisaillement simple. À travers cette méthode, ils ont pu examiner les mécanismes de

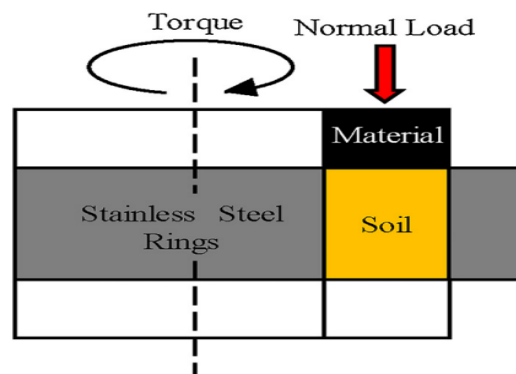
## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

déformation et de glissement sous différentes conditions de charge. Egalement, d'autres chercheurs tels que Fakharian (1996), et Fakharian et Evgin (1997), pour étudier la mécanique des systèmes d'interface sol-structure sous des charges statiques et dynamiques.



**Fig. 1.3** Schéma de dispositif de cisaillement simple conventionnel (d'après Uesugi et Kishida, 1986)

Dans le dispositif de cisaillement par torsion annulaire, le sol et le matériau présentent une forme annulaire, et la charge normale est appliquée à l'aide d'un poids en acier et d'un cric hydraulique. La charge de cisaillement sur l'interface est appliquée par un couple, comme le montre la Figure 1.4. Étant donné qu'il n'y a pas d'extrémités dans la direction circonférentielle de l'échantillon, la zone de contact pendant l'essai reste constante et aucune concentration de contrainte ne se produit. Ce dispositif est également applicable à un test d'interface avec de grands déplacements. Cependant, la préparation des échantillons peut être fastidieuse. Seules quelques applications de cet essai existent, notamment l'essai réalisé par Yoshimi et Kishida (1981), Yasufuku et Ochiai (2005), Desai et al. (2005), Koval et al. (2011) pour étudier le comportement monotone et cyclique des interfaces sol-structure granulaires.

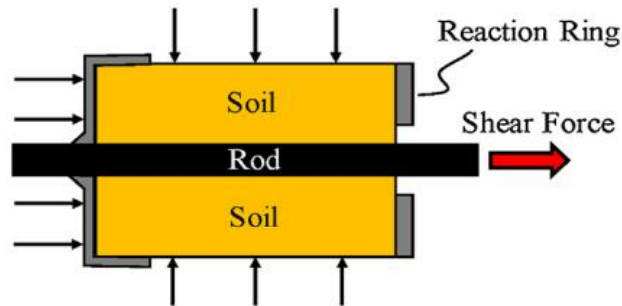


**Fig. 1.4** Schéma du dispositif de cisaillement par torsion annulaire (d'après Yoshimi et Kishida, 1981)

Le dispositif de cisaillement annulaire, développé par Brummund et Leonards (1973), sert à étudier l'angle de frottement de l'interface sable-structure. Ce dispositif se compose d'un

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

échantillon de sol cylindrique entouré d'une membrane en caoutchouc et d'une tige dans la direction de l'axe du dispositif. La contrainte normale est appliquée en évacuant l'air de l'intérieur de la membrane. Une force longitudinale est appliquée sur la tige pour glisser à l'intérieur de la masse de sol. Cet essai peut être un outil utile pour comprendre le comportement de frottement dans les systèmes de fondations sur pieux. Une vue schématique du dispositif de cisaillement annulaire est illustrée à la Figure 1.5.



**Fig. 1.5** Schéma du dispositif de cisaillement annulaire (D'après Fakharian. 1996)

### 1.2.2 Conditions aux limites des essais de cisaillement au laboratoire

A l'interface sol-structure des sols granulaires, le confinement du sol granulaire adjacent a un effet important sur le comportement volumétrique de l'interface. Selon Evgin et Fakharian (1996), Dejong et Westgate (2009), la condition de confinement imposée à la zone d'interface peut être définie par le biais d'un paramètre de raideur normale ( $K$ ). Ce paramètre prend en compte la réponse élastique du champ lointain (par exemple, les sols environnants à distance d'un pieu) et lie linéairement le changement de contrainte normale ( $d\sigma_n$ ) au changement de volume ( $dU_n$ ). Ainsi, par le changement de volume du sol sous charge de cisaillement, la contrainte normale peut être calculée comme suit :

$$\sigma_n = \sigma + \Delta\sigma = \sigma_{n0} - K\Delta U_n \quad (1.3)$$

Dans cette formulation,

$\sigma_{n0}$ ,  $\Delta U_n$ ,  $K$  : sont la contrainte normale initiale, la variation du déplacement selon un incrément du temps  $\Delta t$ , la raideur.

L'effet de la raideur normale ( $K$ ) sur le comportement de l'interface sol-structure granulaire peut être capturé à travers une raideur normale constante ( $K = \text{cst}$ ) et deux conditions aux limites de  $K = 0$  et  $K = \infty$ . Ces conditions sont perçues comme trois chemins distincts de

# Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

contraintes, permettant d'étudier la mécanique des systèmes d'interface sol-structure. Dans les essais de cisaillement sol-structure ces chemins de contraintes sont déterminés par trois conditions aux limites :

## Charge Normale Constante (CNC)

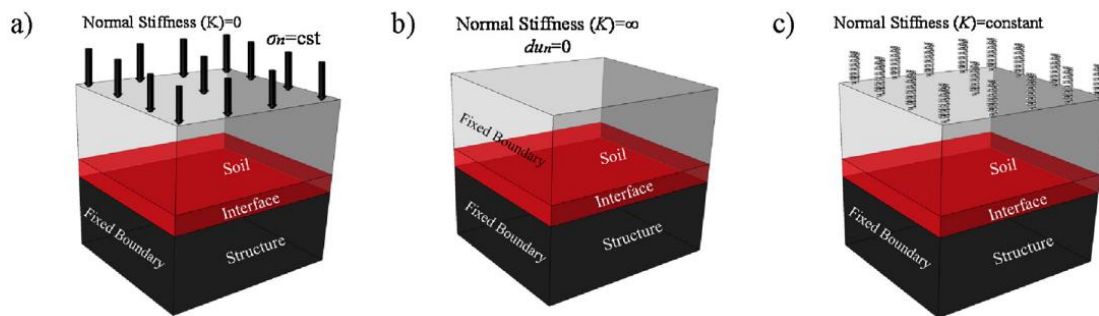
Ici, l'incrément de contrainte normale est nul ( $\Delta\sigma_n = 0$ ) et l'incrément de déplacement normal est non nul ( $\Delta U_n \neq 0$ ). Ainsi, la raideur de l'essai est nulle ( $K=0$ ) (Fig. 1.6a).

## Volume Constant (VC)

Ici, l'incrément de contrainte normale est non nul ( $\Delta\sigma_n \neq 0$ ) et l'incrément de déplacement normal est nul ( $\Delta U_n = 0$ ). Ainsi, la raideur de l'essai est infinie ( $K=\infty$ ) (Fig. 1.6b).

## Rigidité Normale Constante

Ici, les incréments de la contrainte normale et le déplacement normal sont différents de zéro ( $\Delta\sigma_n \neq 0, \Delta U_n \neq 0$ ). Ainsi, la rigidité de l'essai est constante ( $K = \text{constante}$ ) (Fig. 1.6c).



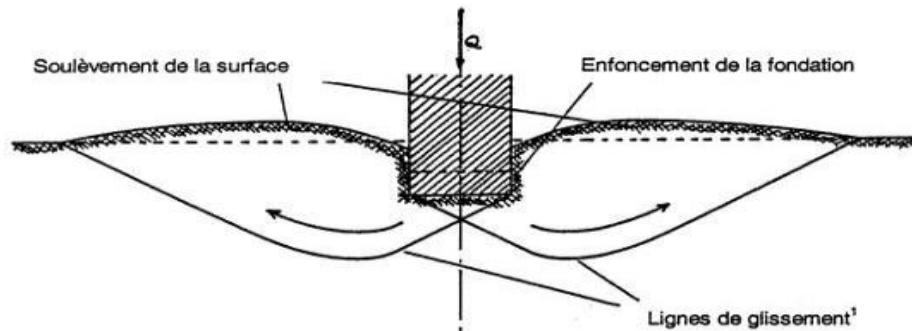
**Fig. 1.6** Une vue schématique des différentes conditions aux limites dans l'étude expérimentale de l'interface : a) Charge Normale Constante (CNC) b) Volume Constant (VC) c) Rigidité Normale Constante

## 1.3 Résistance au cisaillement des sols cohérents

L'étude de la stabilité des sols repose sur l'évaluation de leur résistance au cisaillement, une tâche qui peut s'avérer particulièrement complexe, notamment pour les sols cohérents. Lorsqu'une surface de rupture est soumise à des forces motrices, la contrainte de cisaillement se développe le long de cette surface (voir Figure 1.7). La rupture qui se produit à ce niveau n'est pas le résultat de la rupture des grains eux-mêmes, mais du glissement entre ceux-ci. En conditions drainées, la résistance au cisaillement augmente jusqu'à un pic, puis décroît pour se stabiliser à une valeur résiduelle, souvent bien inférieure. Cette diminution est liée à la rupture

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

des liaisons entre les particules et à leur réorganisation, ce qui affecte les angles de frottement interne :

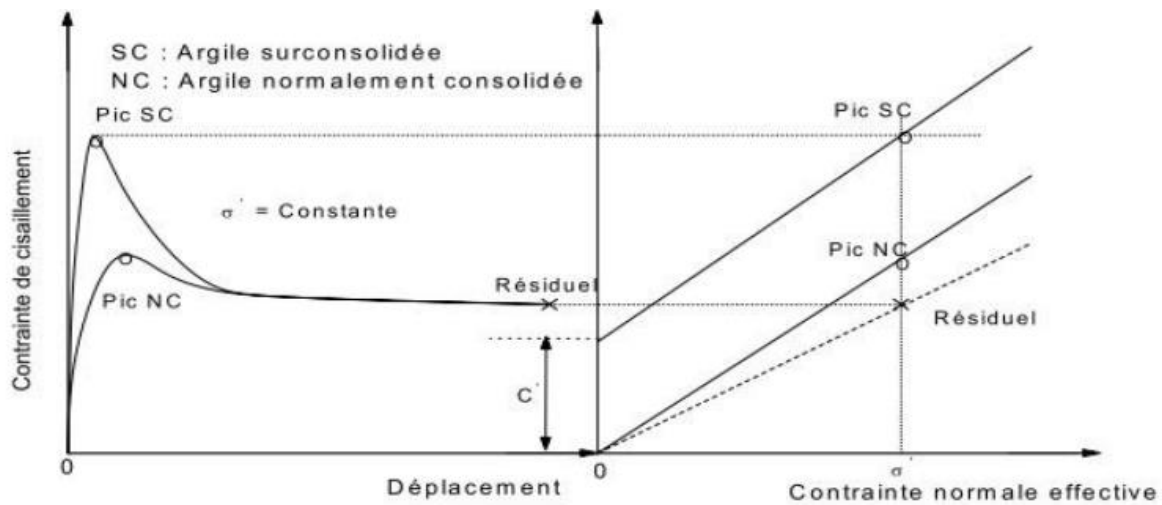


**Fig. 1.7** Schéma représentatif des lignes de glissements générées dans un sol (cas d'une fondation située sur la surface d'un sol chargé jusqu'à la rupture)

La résistance au cisaillement du sol détermine sa capacité à résister à la déformation causée par des contraintes tangentielle (ou de cisaillement). Un sol ayant une résistance au cisaillement plus élevée présentera une plus grande cohésion entre ses particules, ainsi qu'un frottement ou un enchevêtrement plus important pour empêcher le glissement des particules les unes sur les autres. En représentant graphiquement l'évolution de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) en fonction de la déformation ( $\varepsilon$ ), on obtient une courbe qui reflète le comportement du sol, comme présenté dans la figure 1.8. Dans le cas d'un sol fragile soumis à un cisaillement drainé, deux formes de résistance au cisaillement sont identifiables sur cette courbe. La première est la résistance au pic, qui marque le point où la résistance atteint son maximum, souvent observée lors d'une augmentation progressive de la contrainte pour des déplacements faibles. La deuxième est la résistance résiduelle, qui est bien plus basse que la résistance au pic et se stabilise après une diminution continue de la contrainte, atteignant une valeur constante pour des déplacements plus importants. Ce comportement est typique des argiles surconsolidées et des sables denses, ainsi que des argiles normalement consolidées riches en particules argileuses. En revanche, pour les argiles normalement consolidées et les sables laches, la résistance au pic est très proche de la résistance résiduelle. La figure 1.8 montre deux courbes représentatives de la relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation pour des argiles normalement consolidées et surconsolidées, accompagnées de leurs enveloppes de rupture respectives. L'angle de frottement interne résiduel, noté " $\phi'_r$ ", peut être significativement inférieur que

# Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

l'angle de frottement interne au pic, " $\phi'_p$ ", en fonction des caractéristiques du sol, de sa composition minéralogique et de sa teneur en particules argileuses.



**Fig. 1.8** La relation (Contrainte de cisaillement- Déformations (Déplacement)), Contrainte de cisaillement- Contrainte Normale pour les argiles Surconsolidées et Normalement Consolidées

Dans un matériau cohérent, les particules sont reliées entre elles par des forces internes qui confèrent au sol une certaine résistance à sa rupture immédiate. Le critère de rupture généralement utilisé pour déterminer l'état d'équilibre limite des argiles sous faibles déplacements est celui de Mohr-Coulomb. Cette loi est fréquemment adoptée comme référence pour modéliser la résistance des sols, en particulier dans le cadre des matériaux argileux où les interactions entre les particules jouent un rôle essentiel.

$$\tau_p = C + \sigma_n \tan \phi \quad (1.4)$$

Où,

Cette formule contient les mêmes termes que l'équation (1.1), où le premier terme représente la résistance au cisaillement de pic ( $\tau_p$ ) plutôt que celle à l'interface sol-structure (résistance au cisaillement à l'interface). De plus, la cohésion ( $C$ ) et l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) du sol remplacent l'adhérence, l'angle de frottement à l'interface.

## 1.3.1 Résistance au cisaillement résiduelle

La résistance au cisaillement résiduelle correspond à la capacité du sol à maintenir une résistance stable face à des déplacements importants. À l'inverse, la résistance au pic représente la valeur maximale de la résistance au cisaillement observée lors de faibles déplacements. La résistance résiduelle est particulièrement significative dans le cas des argiles qui subissent de

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

---

grands déplacements, car elle définit le comportement du sol à long terme sous des conditions de déformation importantes. Les premières études sur la résistance des argiles en cas de déformations importantes ont été menées par Tiedeman en 1937 et Haefeli entre 1938 et 1939. Ce dernier a introduit le terme "résistance au cisaillement résiduelle" en 1951 pour décrire la valeur résiduelle de cette résistance sur la courbe contrainte-déformation, soulignant son importance dans la caractérisation des propriétés de cisaillement des argiles.

Skempton (1964) a été le premier à étudier l'effet de la résistance au cisaillement résiduelle drainée du sol pour l'analyse de la stabilité des glissements de terrain réactivés. Il a suggéré que la diminution de la résistance au cisaillement est en partie due aux changements d'orientation des particules d'argile lors du cisaillement unidirectionnel et a noté que la résistance au cisaillement de ces sols est proche de la résistance résiduelle. Cette observation a renforcé l'idée que la résistance résiduelle joue un rôle crucial dans la stabilité des sols sous des conditions de déformation importantes. Bjerrum, en 1967, a défini la résistance résiduelle comme la résistance ultime mesurée pour un échantillon soumis à un cisaillement continu au-delà de la rupture, tout en maintenant une valeur constante lors de déformations supplémentaires. Selon LaGatta (1970), lorsque l'indice de vides et les contraintes effectives restent constants, la résistance au cisaillement ultime, obtenue après des déformations continues, est qualifiée de résistance résiduelle. En traçant les courbes des résistances au pic et résiduelle en fonction de la contrainte effective, on observe une relation qui suit les principes de la loi de Mohr-Coulomb. De ce fait, la résistance au pic peut être formulée à travers l'équation suivante :

$$\tau_p = C' + \sigma_n \tan \phi_p' \quad (1.5)$$

Et la résistance résiduelle par l'équation :

$$\tau_r = C_r' + \sigma_n \tan \phi_r' \quad (1.6)$$

Dans l'étude de nombreux projets de construction, la résistance au cisaillement au pic est celle qui est le plus souvent utilisée. Cependant, les argiles dures ayant déjà subi des glissements de terrain renferment des surfaces de cisaillement préexistantes, et lorsque ces glissements sont réactivés, la résistance de ces argiles se rapproche bien de la résistance résiduelle qui est inférieure à la résistance au pic. Il est donc important de prendre cela en compte pour une étude rationnelle de ces projets. Ces conditions peuvent se développer, autour des pieux où un

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

---

refoulement notable du sol peut se produire pour s'y inoduire. Autrement dit, cela concerne les situations présentant un risque de rupture progressive du sol.

La résistance résiduelle peut également se manifester lors de l'installation de pieux battus, où un remaniement important de sol est susceptible de se produire (Randolph et Wroth 1981 ; Bond et Jardine 1991 ; Tika-Vassilikos et al.1992, etc.). Ce refoulement entraîne des déformations significatives et la formation d'une surface de rupture autour des pieux. Par la suite, le chargement du pieu entraîne des conditions résiduelles. Il est donc préférable de prendre en compte ces conditions pour le dimensionnement du pieu.

### 1.3.1.1 Mécanisme de rupture résiduelle

Plusieurs chercheurs ont tentés de décrypter les mécanismes qui gouvernent la résistance résiduelle des sols cohérents en conduisant des essais expérimentaux au laboratoire à l'aide de multitude dispositifs diponibles.

Skempton (1964) a observé qu'au niveau de la zone de cisaillement, des bandes minces se formaient, dans lesquelles les particules argileuses plates étaient orientées suivant le plan de cisaillement. Les couches adjacentes à cette zone, montraient la présence de domaines secondaires au sein d'une matrice argileuse, pouvant atteindre une épaisseur de 25,4 mm, et qui n'étaient pas nécessairement parallèles au plan de cisaillement. Au-delà de cette couche, aucune orientation particulière des particules n'a été observée. Il a également indiqué que la résistance résiduelle dans les argiles limoneuses est plus élevée que dans celles contenant une proportion importante de particules argileuses. Ainsi, l'orientation complète des particules argileuses suivant un plan de cisaillement ne peut pas se produire dans les sols contenant du quartz.

D'après les résultats obtenus par Lupini et al. (1981) concernant le cisaillement annulaire sur des mélanges de bentonite et de sable, trois modes de cisaillement résiduel ont été identifiés : le mode turbulent, le mode transitoire et le mode glissant. Ces modes dépendent de plusieurs facteurs, notamment de la forme des particules et du coefficient de frottement entre celles-ci, comme illustré dans la figure 1.9 :

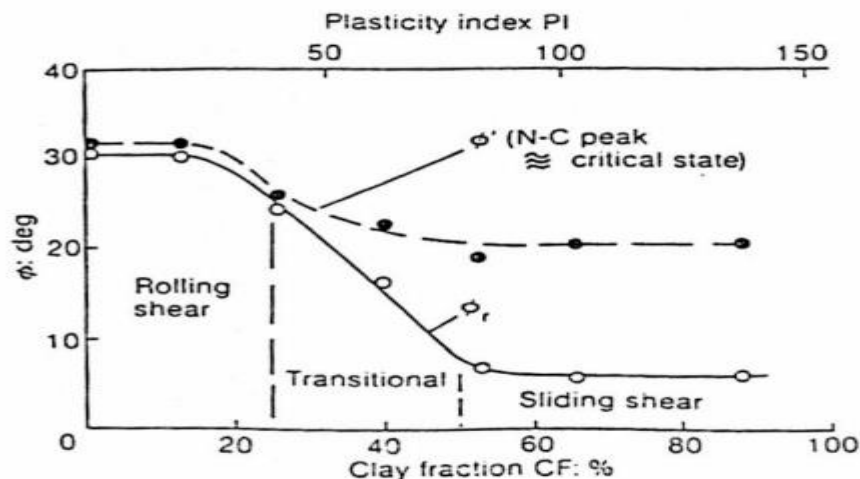
Le mode turbulent a lieu lorsque le comportement de cisaillement résiduel est dominé par les particules rondes ou probablement dominé par les particules plates, quand le coefficient du frottement inter-particules entre ces particules est élevé. Il n'y a pas une orientation evidente des particules et la fragilité est due au comportement de dilatance. L'angle du frottement résiduel dépend principalement de la forme et l'ensemble des particules rondes et pas du coefficient de frottement inter-particules. Une fois la zone de cisaillement est formée, c'est une

# Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

zone à différentes porosités et elle est considérablement modifiée par l'historique de contraintes ultérieures.

Le mode glissant a lieu lorsque le comportement de cisaillement résiduel est dominé par les particules plates, le coefficient du frottement inter-particules faible. Une surface de résistance au cisaillement faible et de particules fortement orientées est formée. L'angle du frottement résiduel dépend principalement de la minéralogie, de la pression interstitielle, et du coefficient du frottement inter-particules. Une fois la zone de cisaillement est formée, elle n'est pas affectée par l'historique de contraintes ultérieures. La fragilité durant le premier cisaillement est due principalement à l'orientation des particules développée suivant un plan de cisaillement.

Le mode transitoire a lieu lorsqu'il n'y a pas une dominance particulière pour l'une des forme de particules par rapport aux autres dans une zone de cisaillement les deux modes turbulent et glissant sont impliquées. Les propriétés du sol à l'état de cisaillement résiduel changent progressivement à travers la phase transitoire de celles typiques du mode turbulent à celle typiques du mode glissant.



**Fig. 1.9** Essais de cisaillement annulaires sur des mélanges sable – bentonite

(d'après Lupini et al, 1981)

## 1.3.2 Paramètres affectant la résistance résiduelle

### 1.3.2.1 Effet de la vitesse de cisaillement

Les sols composés de pierre de boue (mudstone) sont réputés pour leur capacité à posséder des surfaces de glissement préexistantes. Lors de déplacements de grande amplitude, ces sols présentent des comportements variés, ce qui a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs.

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

---

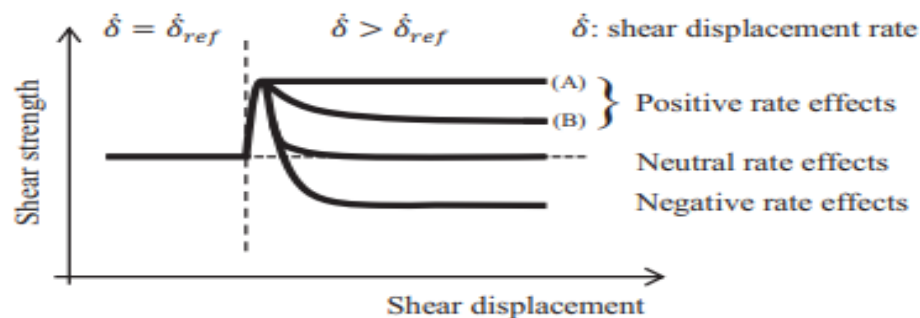
Une compréhension précise de la résistance de ces surfaces sous des charges dynamiques est essentielle, notamment pour évaluer la stabilité des pentes lors d'événements tels que les séismes.

La vitesse joue un rôle clé dans l'analyse et la prédiction du comportement des glissements de terrain. Selon Leroueil, l'évolution des déplacements au fil du temps est fortement influencée par la vitesse de cisaillement, ce qui affecte directement la résistance au cisaillement résiduelle. Pour les glissements de terrain dans la phase de réactivation, une telle influence peut avoir un effet bénéfique en empêchant de grands mouvements. De manière similaire, un effet de vitesse favorable aurait contribué à limiter l'accélération soudaine et catastrophique d'un glissement de terrain au Japon, qui était soumis à des cycles répétitifs de mouvements alternant entre accélérations et décélérations.

Trois réponses caractéristiques à la variation de la vitesse de cisaillement à l'état résiduel ont généralement été observées dans la littérature. En augmentant progressivement la vitesse de cisaillement à partir d'une vitesse de référence spécifiée, la première réaction à la déformation imposée sera une augmentation de la résistance au cisaillement. Par la suite, si le déplacement continue à une vitesse de cisaillement constante, la résistance au cisaillement mesurée peut soit : rester à une résistance au cisaillement supérieure à la résistance de référence (effet positif), retour à la résistance au cisaillement de référence (effet neutre) ou chute à une résistance inférieure à la résistance de référence (effet négatif), comme illustré dans la figure 1.10. Les effets positifs de la vitesse peuvent être classés comme suit : (A) Entièrement persistant ou (B) Effets temporaires et persistants combinés.

Les effets de vitesse observés à l'état résiduel ont été liés aux modes de cisaillement du sol. Les argiles à haute plasticité présentent généralement des effets positifs associés à un mode de cisaillement glissant, les sols granulaires présentent des effets neutres associés à un mode de cisaillement turbulent, tandis que les argiles à faible et moyenne plasticité montrent un mode de cisaillement transitionnel qui, dans certains cas, peut être associé à des effets négatif

*K.K. Sorensen et al. / Influence of Shearing Rate on Residual Strength of Clays*



**Fig. 1.10** Schéma représentatif de la relation : (vitesse de cisaillement-résistance résiduelle)

Afin d'analyser l'impact de la vitesse de cisaillement, Tika et Hutchinson (1999) ont mené une série de tests annulaires sur des échantillons prélevés dans des zones de glissements naturels de l'étalée, en utilisant des vitesses de cisaillement lentes (0,045 mm/min) puis des vitesses rapides allant jusqu'à 100 mm/min. Cette recherche vise à étudier les glissements de terrain en phase statique et dynamique en déterminant leurs coefficients de frottement correspondants. Les résultats ont donné un rapport de 0.6 entre la résistance résiduelle rapide et la résistance résiduelle lente, pour des vitesses de cisaillement dépassant 100 mm/min.

Rouaiguia et Rogers. (2001) ont montré, à la suite de trois séries d'essais dont les premiers essais consistaient à faire varier la vitesse de cisaillement pour chaque cycle en arrière de 0.00881 mm/min à 0.03968 mm/min avec un taux constant de cisaillement pour chaque cycle en avant de 0.00881 mm/min. La deuxième série d'essais a examiné les effets du cisaillement cyclique rapide répété des argiles contre une surface rocheuse de grès rugueuse. Après la consolidation, l'échantillon a été soumis à une vitesse de cisaillement de 53 mm/min pendant 200 cycles répétés (à la fois en avant et en arrière) avec un déplacement de 10 mm. L'essai a ensuite été interrompu pendant une période de 4 heures avant qu'une vitesse de cisaillement lente de 0.00881 mm/min ne soit appliquée jusqu'à ce que la condition résiduelle soit établie. La troisième série d'essais a été menée de manière similaire à la deuxième série d'essais, mais pour 2000 cycles répétés et une longueur de déplacement de 1 mm. Les conclusions suivantes ont été tirées de ces essais :

- Dans la troisième série d'essais, pour les sols testés contre du grès rugueux il y eu une diminution dans l'angle de frottement au pic comprise entre 1,1 et 3,1 degrés par rapport à la résistance maximale mesurée lors du cisaillement lente. Aucun changement cohérent n'a été observé dans la résistance au cisaillement résiduelle.

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

---

• Dans la deuxième série d'essais, pour les sols testés contre du grès rugueux, il y a une variation notable de la résistance (que ce soit pic ou résiduelle).

Des échantillons de "l'argile noire" ont été initialement pré-cisaillés avec une vitesse lente de 0.1 mm/min puis cisaillés avec une vitesse rapide variant de 1 à 200 mm/min à l'aide de la boîte de cisaillement annulaire de Bromhead dans une étude menée par Farzad et Hamid (2018). Leurs résultats présentaient un comportement de cisaillement similaire à celui de Lemos par une augmentation immédiate de la résistance au cisaillement puis une augmentation progressive jusqu'à atteindre une valeur maximale qui est la résistance au pic. Avec des déplacements supplémentaires cette résistance diminue jusqu'à atteindre une valeur inférieure à la résistance résiduelle lente (effet négatif). En conséquence, le déplacement et la vitesse de cisaillement sont des facteurs déterminants dans la variation de la résistance résiduelle.

Long et al. (2020), ont mené une étude, comportant une série d'essais de cisaillement annulaires conduits sur des échantillons combinés comportant (kaolin-kaolin) : (dans la couche supérieure et inférieure) et un mélange (kaolin- (kaolin-bentonite)) : (le kaolin dans la couche supérieure et le mélange kaolin-bentonite dans la couche inférieure). Les essais ont été effectués avec les données suivantes :

- Vitesses de cisaillement ; 0,02 mm/min à 20 mm/min
- Contraintes normales : 98 kPa à 294 kPa.

Ils ont conclu que l'effet de la vitesse de cisaillement sur la résistance résiduelle était fortement influencé par les propriétés des matériaux en contact.

### *1.3.2.2 Effet de l'accélération*

Les dommages causés par les tremblements de terre peuvent être catastrophiques ; ils peuvent menacer la stabilité des ouvrages construits ou en cours de construction. Ces dernières années, de nombreux pays ont installé des accéléromètres et ont obtenu des enregistrements sismiques. Sur la base de ces enregistrements, certaines accélérations maximales en surface du sol sont rapportées comme ayant dépassé 980 cm/s<sup>2</sup> (Inukai, 2008). Les observations sur le terrain montrent que la vitesse de glissement d'un bloc de sol n'est pas constante à l'état résiduel. Dunong et al. (2018) ont souligné que l'effet de l'accélération sur la résistance résiduelle du sol devrait être étudié. Bien que l'effet de la vitesse soit un facteur fondamental affectant la stabilité des glissements de terrain. Dans les analyses de stabilité des pentes, de nombreuses publications (Newmark, 1965; Xu et al, 2011 ; Korzec, 2016 et Fang et al., 2018) ont pris en compte l'impact de l'accélération sur la stabilité de la pente. Cependant, peu d'informations sont disponibles sur

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

---

la manière dont l'accélération influence la résistance résiduelle. Pour des accélérations modérées, leur effet sur la résistance résiduelle est négligeable. Cependant, par rapport à l'accélération maximale de  $980 \text{ cm/s}^2$ , ces valeurs sont trop basses pour représenter complètement l'effet de l'accélération sur la résistance résiduelle. Comme expliqué ci-dessus,

### 1.3.2.3 Effet de type de l'appareil

Pour déterminer les paramètres géotechniques pertinents dans un cas de conception, des essais au laboratoire visant à reproduire aussi fidèlement que possible les conditions de chargement sur le terrain doivent être effectués (Kjellmann, 1951). Dans les essais au laboratoire, la résistance au cisaillement est généralement déterminée par trois méthodes principales, à savoir l'essai de cisaillement triaxial, l'essai à la boîte de cisaillement direct et le cisaillement annulaire. Parmi ceux-ci, l'essai de cisaillement triaxial est le plus couramment employé en raison de sa capacité à contrôler les conditions de drainage et à mesurer la pression interstitielle de l'eau. Toutefois, lorsqu'il s'agit de déterminer la résistance résiduelle d'un sol à l'aide de cet appareil, la contrainte maximale pouvant être appliquée à l'échantillon reste limitée, surtout pour les sols des zones de glissement contenant des particules plus grossières (Chen et Liu, 2014). En outre, l'évaluation de la résistance résiduelle le long des surfaces de glissement dans ce type d'essai s'avère difficile. À l'inverse, des méthodes comme le test de cisaillement direct ou le cisaillement annulaire permettent de mesurer cette résistance de manière plus efficace. Bien que les techniques varient, les résultats obtenus sont généralement similaires, comme en témoignent les essais réalisés avec ces dispositifs (La Gatta, 1970; Bishop et al., 1971; So et Okada, 1978). L'essai de cisaillement annulaire, cependant, est très utile car il n'y a aucun changement dans la surface de la section transversale au fur et à mesure de l'avancement de l'essai, et l'échantillon peut être cisailé par un déplacement continu de n'importe quelle magnitude. Cela permet une orientation complète des particules parallèlement à la direction du cisaillement, ce qui détermine une véritable condition de résistance résiduelle (Stark and Vettel, 1992). Par conséquent, l'essai de cisaillement annulaire est recommandé pour obtenir la résistance résiduelle des sols.

Depuis les années 1920, de nombreux chercheurs et institutions de recherche travaillent sur le développement d'équipements d'essai de cisaillement annulaire présentant une structure simple, une utilisation pratique et une préparation d'échantillons facile (Hong et al., 2009). Les premiers appareils de cisaillement annulaire développés étaient à anneau unique (Hong et al. 2009). Cependant, deux inconvénients sont associés à ce type : la rupture par cisaillement a lieu généralement à proximité de la plaque de compression rotative, la distribution non uniforme de

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

---

la contrainte radiale et de la déformation le long de l'échantillon cylindrique, ce qui entraîne des valeurs mesurées ne reflétant pas les véritables propriétés mécaniques produites dans les échantillons de sol. Hvorslev (1939) a développé le premier appareil de cisaillement annulaire véritable en concevant une boîte de cisaillement à un seul anneau monolithique dans une boîte circulaire dont le haut et le bas sont séparés. Ces premiers appareils de cisaillement annulaire étaient tous contrôlés par contrainte. Dans les décennies qui ont suivi, le progrès dans la conception de l'appareil de cisaillement annulaire se sont considérablement ralentis. Cependant, avec l'intensification des recherches sur la résistance résiduelle dans les années 1960 et les besoins croissants liés aux évolutions sociales, l'intérêt pour l'étude de cet appareil a été ravivé. Sur la base du concept de conception de Hvorslev (1939), Bishop et al. (1971), Bromhead (1979), Sassa (1997), Sassa et al. (2004) et d'autres chercheurs ont développé davantage l'appareil de cisaillement annulaire. Cependant, connus par leurs simplicité et coût avantageux, l'appareil de Bishop et Bromhead sont devenus très populaires et commercialisés dans le marché par rapport aux autres modèles. De nos jours, De nombreux chercheurs se consacrent actuellement à l'amélioration des dispositifs de cisaillement annulaire modernes, qui se distinguent par leur capacité à reproduire les effets de la liquéfaction sous l'influence de charges sismiques, ainsi que les mouvements de terrain liés à des contraintes normales élevées et aux variations du niveau de la nappe phréatique. Le Tableau 1.1 résume les paramètres typiques des appareils de cisaillement annulaire représentatifs. On constate que les paramètres des appareils de cisaillement annulaire ont évolué au fil du temps, ce qui peut être dû aux exigences des recherches précises. L'équipe de recherche du DPRI (Institut de recherche sur la prévention des catastrophes) de l'Université de Kyoto est actuellement la plus représentative, en particulier pour le développement des appareils DPRI-6 (Sassa, 1997) et DPRI-7 (Sassa et al. 2004), qui peuvent être utilisés pour étudier les caractéristiques de la pente avant et après une défaillance par instabilité. De plus, selon les appareils de cisaillement annulaires répertoriés dans le Tableau 1.1, la contrainte normale maximale et la vitesse de cisaillement maximale peuvent atteindre respectivement 3000 kPa et 180 000 mm/min.

# Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

**Tableau. 1.1** : Paramètres typiques des appareils de cisaillement annulaire représentatifs

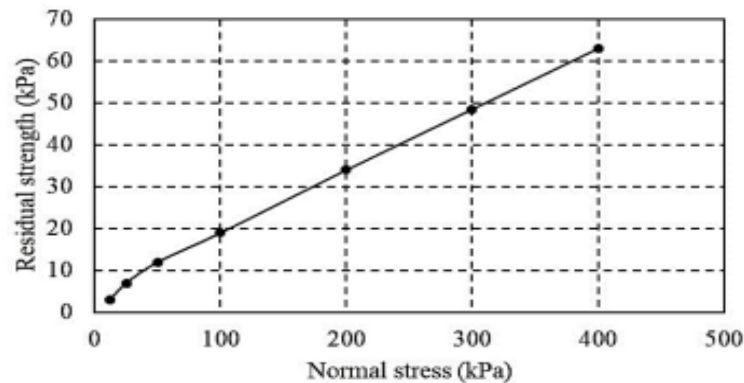
| Author(s)                                | Bishop et al. (1971) | Bromhead (1979) | Hungr and Morgenstern (1984) | Tika (1989) | Garga and Sendano (2002) | Sassa (1997) | Sassa et al. (2004) |
|------------------------------------------|----------------------|-----------------|------------------------------|-------------|--------------------------|--------------|---------------------|
| Shear box                                |                      |                 |                              |             |                          |              |                     |
| Inner diameter (cm)                      | 10.16                | 7.0             | 22.0                         | 10.16       | 9.0                      | 25.0         | 27.0                |
| Outer diameter (cm)                      | 15.24                | 10.0            | 30.0                         | 15.24       | 13.3                     | 35.0         | 35.0                |
| Max. height of sample (cm)               | 1.9                  | 0.5             | 2.0                          | 1.9         | 2.0                      | 3.0          | 2.88                |
| Shear area (cm <sup>2</sup> )            | 101.34               | 40.05           | 326.73                       | 101.34      | 72.45                    | 471.24       | 389.56              |
| Max. normal stress (kPa)                 | 980                  | -               | 200                          | 980         | 660                      | 3000         | 500                 |
| Max. shear speed (mm/min)                | -                    | 44.52           | 60,000                       | 5598        | -                        | 134,400      | 180,000             |
| Max. data acquisition rate (reading/sec) | -                    | 1000            | -                            | 10          | -                        | 200          | 1000                |

## 1.3.2.4 Effet de la contrainte normale

Eid et al. (2016) ont résumé que pour simuler avec précision des glissements de terrain se produisant pour la première fois ou réactivés, il convient de prendre en compte des valeurs de contrainte normale comprises entre 10 et 700 kPa. Une multitude de compagnes d'essais de cisaillement ont été entreprises pour déterminer la résistance résiduelle drainée des sols sur une large plage de contraintes normales (La Gatta, 1970 ; Bishop et al., 1971 ; Hawkins and Privett, 1985 ; Tiwari and Marui, 2005) ont montré que la résistance résiduelle augmente avec l'augmentation de la contrainte normale, et que la valeur du coefficient frottement  $\frac{\tau_r}{\sigma_N}$  ( $\tau_r$  : résistance résiduelle ;  $\sigma_N$  : contrainte normale), reste presque la même avec l'augmentation ou la diminution de la contrainte normale tant qu'elle est supérieure à 100 kPa. Lorsque la contrainte normale est inférieure à 100 kPa, la résistance résiduelle change brusquement. D'autre part, on a depuis longtemps souligné que les enveloppes de résistance au cisaillement des sols plastiques sont non linéaires dans la plage de contraintes normales basses de  $\sigma_N < 50$  kPa (Penman, 1953 ; Ponce and Bell, 1971 ; Charles and Soares, 1984 ; Skempton, 1985 ; Day and Axten, 1989 ; Maksimovic, 1989). La raison pour laquelle la résistance résiduelle n'est pas stable à des contraintes normales faibles peut être expliquée par Gibo et al. (1987). Ils ont indiqué que le degré d'orientation des particules est très faible à des contrainte normale faibles en utilisant la technique de diffraction des rayons X, ce qui résulte en une résistance résiduelle plus élevée à travers les sols dominés par la smectite. Eid et al. (2016) ont également souligné le phénomène selon lequel la courbure ou la non-linéarité diminue significativement à des contraintes normales effectives supérieures à 200 kPa, comme illustré dans la Figure 1.11, et

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

ont expliqué que le phénomène non linéaire à des niveaux de faible contraintes normales peut être attribué à la faible orientation des particules d'argile parallèlement à la direction de cisaillement. Par conséquent, pour obtenir avec précision la résistance résiduelle, une contrainte normale élevée est recommandée comme l'une des conditions d'essais à utiliser dans l'essai de cisaillement.



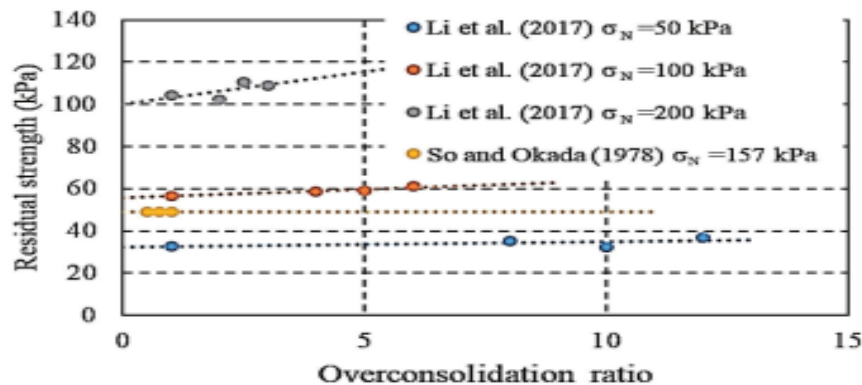
**Fig. 1.11** Relation entre la résistance résiduelle et la contrainte normale (Eid et al. 2016)

### 1.3.2.5 Effet de l'indice de surconsolidation

Pour obtenir la résistance résiduelle des sols, il est nécessaire de consolider l'échantillon avant le cisaillement (Bishop et al. 1971 ; Bromhead, 1979). Certaines études ont pour objet l'étude de la relation entre la résistance résiduelle et l'indice de surconsolidation des sols (Skempton, 1964 ; La Gatta, 1970 ; Bishop et al., 1971 ; So and Okada, 1978 ; Vithana et al., 2012 ; Li et al., 2017). À partir de la Figure 1.12 (So and Okada, 1978 ; Li et al., 2017), on constate un effet négligeable de cet indice pour les contraintes normales ayant une valeur supérieure à 50 kPa. Cependant, si la contrainte normale est inférieure à cette valeur une légère augmentation a été constatée, qui pourrait être analysée de manière similaire à l'effet de faible contrainte normale. Li et al. (2017) ont souligné que l'effet de la surconsolidation sur la résistance résiduelle peut être négligé. Skempton (1964) a également souligné que la valeur de la résistance résiduelle obtenue à partir des essais au laboratoire est presque la même, que ce soit par la condition de consolidation normale ou de surconsolidation, mais que le temps nécessaire pour obtenir la résistance résiduelle par consolidation normale est beaucoup plus long que par surconsolidation. Autrement dit, pour obtenir efficacement la résistance résiduelle, il est recommandé de surconsolider les échantillons. Plusieurs études ont été réalisées pour mieux comprendre le lien entre la résistance résiduelle et l'indice de surconsolidation, en recourant à des essais de cisaillement annulaires (La Gatta, 1970 ; Bishop et al., 1971 ; Yuan et al., 2019),

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

et So et Okada (1978) ont mené leur étude pour clarifier la relation en utilisant la boîte à cisaillement direct. En comparant les résultats, il se pourrait conclure que, quelle que soit la méthode d'essai, la résistance résiduelle est indépendante de l'indice de surconsolidation. So and Okada (1978) ont également souligné que tant que toutes les particules ont déjà une orientation parallèle à la résistance résiduelle, l'effet de l'indice de surconsolidation sur la résistance résiduelle peut être négligé.



**Fig. 1.12** Résistance résiduelle à différents indices de surconsolidation

### 1.4 Conclusion

Cette recherche bibliographique a offert une synthèse des connaissances de la résistance au cisaillement à l'interface et de la résistance résiduelle des sols cohérents. Elle a également abouti aux conclusions suivantes :

- Les interactions entre le sol et la structure sont principalement gouvernées par la résistance au cisaillement à l'interface. Le comportement des interfaces peut être déterminant, car elles peuvent influencer le mécanisme de transfert de charges entre la structure et le sol environnant.
- Le dispositif de cisaillement annulaire se caractérise par leur capacité de maintenir une surface de cisaillement constante tout en permettant de grands déplacements sans modifier la direction. Il est ainsi largement préféré aux autres dispositifs de cisaillement. En réponse aux exigences du développement social, des appareils de cisaillement annulaire ont été développés pour simuler des conditions géologiques complexes, comme celles observées lors des tremblements de terre et sous les fluctuations de la nappe phréatique.
- Pour réduire l'impact de la contrainte normale sur la résistance résiduelle, il est conseillé d'utiliser une contrainte normale élevée lors des essais. Le phénomène non linéaire dans

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

---

l'enveloppe de résistance au cisaillement est lié à un faible degré d'orientation des particules sous de faibles contraintes normales.

- L'effet de la surconsolidation sur la résistance résiduelle peut être négligé. Cependant, pour obtenir efficacement la résistance résiduelle, une surconsolidation est recommandée.
- La vitesse de cisaillement influe sur la résistance au cisaillement résiduelle selon trois mode : 01) effet positif (la résistance minimale rapide supérieure à la résistance résiduelle lente) 02) Effet neutre (la résistance minimale rapide égale à la résistance résiduelle lente) 03) Effet négatif (la résistance minimale rapide inférieure à la résistance résiduelle lente).
- Bien que l'effet de l'accélération sur la résistance résiduelle puisse être ignoré pour de faibles valeurs absolues d'accélération, davantage recherches sur une gamme plus large de valeurs d'accélération et sur différents types de sols seraient bénéfiques, car seulement quelques recherches se sont focalisées sur cette question.

**Chapitre 2 :**

**Interfaces utilisées et quantification de la rugosité de surface**

# Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

---

## 2 Interfaces utilisées et quantification de la rugosité de surface

### 2.1 Introduction

La tribologie, définie comme la science des frottements, se concentre sur les phénomènes qui se produisent lorsque deux surfaces en contact entrent en mouvement relatif, générant une force qui résiste au déplacement. Les lois du frottement, formulées dès le 18<sup>ème</sup> siècle par Amontons et Coulomb (préalablement mise en évidence par Léonard de Vinci 200 ans plus tôt),

Les applications du coefficient de frottement se retrouvent dans divers domaines, notamment en génie civil, où le sol entre en contact avec différents matériaux. Si le comportement du sol est généralement bien compris, celui de la zone d'interface, reste moins connu.

Une surface rugueuse est définie par la présence d'aspérités, tant microscopiques que macroscopiques. Cette rugosité englobe des caractéristiques telles que l'amplitude, l'angularité, l'ondulation et l'anisotropie. L'analyse de la rugosité implique souvent l'étude des profils de surface à l'aide de diverses méthodes d'analyse, où le profil représente la trace de l'intersection entre un plan et la surface du matériau. Les paramètres linéaires dérivés de ces profils sont couramment utilisés pour décrire la rugosité.

Il est essentiel d'effectuer une mesure précise de cette rugosité afin d'accomplir une caractérisation morphologique des interfaces. Dans ce chapitre, les méthodes de caractérisation de la rugosité, ainsi que les profils des interfaces utilisées seront présentés.

### 2.2 Paramètres de mesure

Chaque surface est définie par une topographie unique, composée de plusieurs profils couvrant l'ensemble de la surface. En pratique, la production et l'analyse d'une surface en deux dimensions sont complexes et nécessitent des outils spécifiques et sophistiqués. Toutefois, divers paramètres sont utilisés pour définir la rugosité le long d'un profil, qui doit être représentatif de l'intégralité de la surface. Un paramètre est pratiquement utilisé qui représente une moyenne arithmétique des paramètres mesurées pour chaque profil. Les paramètres couramment utilisés en géomécanique sont présentés ci-dessous.

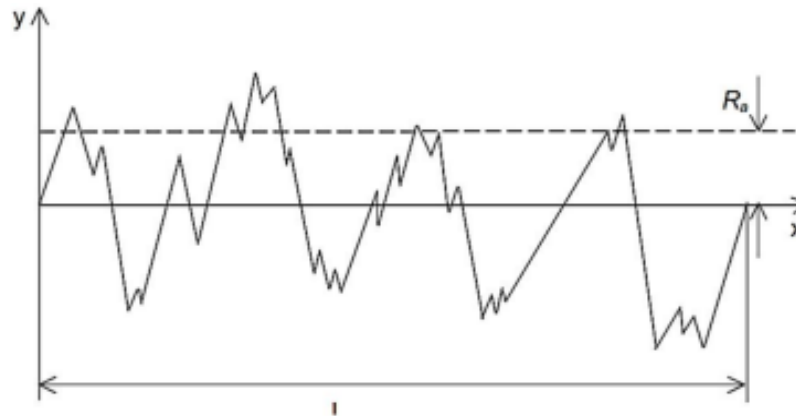
#### **Rugosité arithmétique moyenne (Ra) :**

La définition mathématique est donnée ci-dessous :

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

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

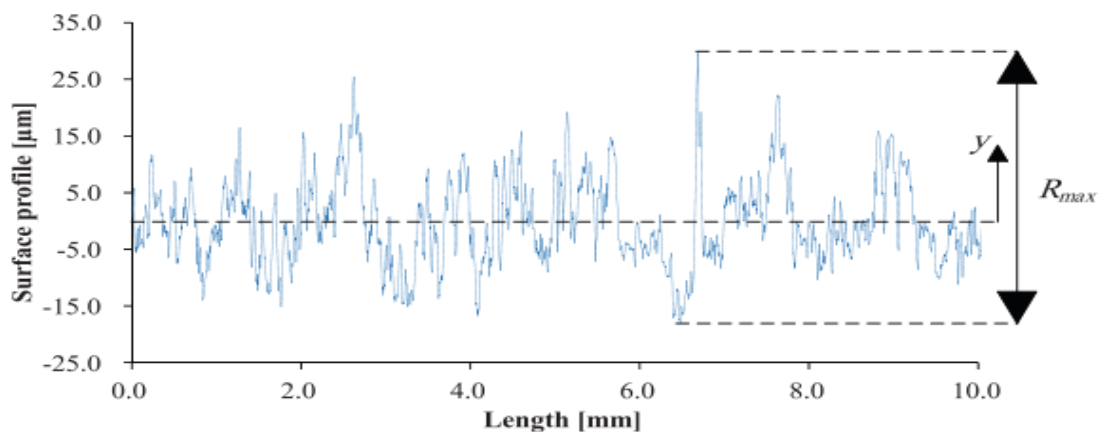
où  $y$  est la hauteur du profil et  $l$  est la longueur d'évaluation La figure 2.1, illustre la définition de ce paramètre.



**Fig. 2.1** Définition du paramètre de rugosité  $R_a$

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

Un autre paramètre qui peut être adopté est la distance maximale Pic-au-creux (Peak-to-valley) du profil de surface ( $R_{max}$  dans la Fig. 2.2), introduite pour la première fois par Yoshimi et Kishida (Figure 2.2).



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

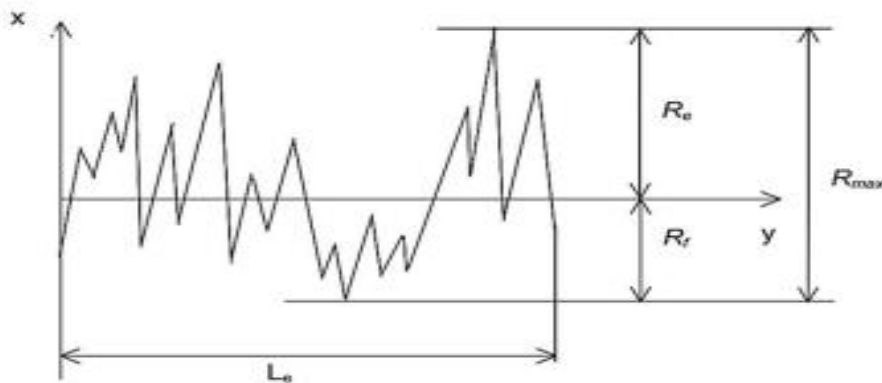
### Pic maximal ( $R_e$ )

Est définie comme la hauteur maximale du profil au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation.

### creux minimal ( $R_f$ )

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

Est définie comme la profondeur maximale du profil en dessous de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation :  $R_{\max} = R_e + R_f$  (Figure 2.3).



**Fig. 2.3** Définition des paramètres de  $R_e$ ,  $R_f$

### Rugosité quadratique moyenne ( $R_q$ )

Ce paramètre est connu sous le nom de (RMS). Il représente l'écart-type de la distribution des hauteurs de surface, ce qui en fait un paramètre important pour décrire la rugosité de surface par des méthodes statistiques. Ce paramètre est plus sensible que la rugosité arithmétique moyenne ( $R_a$ ) aux deviations par rapport à la ligne moyenne. L'implémentation mathématique et numérique de ce paramètre est la suivante :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} y^2 dx} \quad (2.2)$$

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

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

### RMS de la dérivée première du profil ( $Z_e$ )

$$Z_e = \sqrt{\frac{1}{Le} \int_0^{Le} \left( \frac{dy}{dx} \right)^2 dx} \quad (2.4)$$

Est couramment utilisé pour analyser les changements enregistrés de la pente locale du profil. Il quantifie principalement l'intensité des variations de cette pente sur l'ensemble de la surface :

### L'indice de rugosité du profile, $R_p$ :

Est le rapport entre la longueur réelle du profile à une hauteur donnée et la longueur totale de la trace L:

$$R_p = \frac{l}{L} \quad (2.5)$$

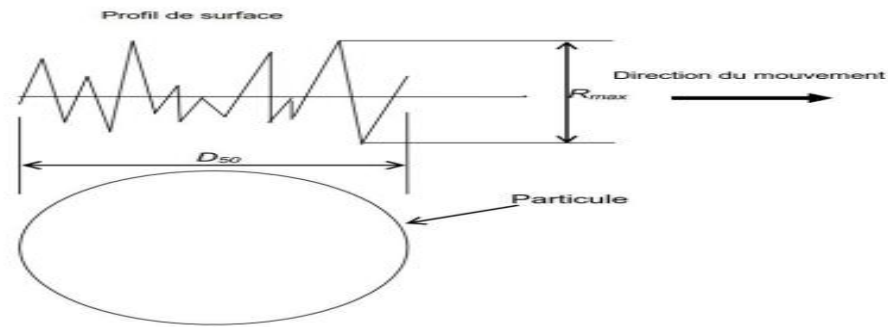
### 2.3 Quantification de la rugosité dans le cas d'interface sol-matériau solide

Nous avons exploré ci-dessus les différents paramètres utilisés pour quantifier la rugosité de surface. Cependant, à l'interface sol-matériau solide, il ne convient pas d'utiliser  $R_{max}$  et  $R_{min}$  pour décrire la rugosité du matériau solide, car la rugosité de celui-ci dépend des caractéristiques du sol en question. Le fait que les grains du sol se distinguent d'une forme, d'une taille, et d'une angularité variante d'un sol à un autre nécessite d'utiliser d'autres paramètres, de ce fait les paramètres suivantes sont proposés :

#### Rugosité normalisée $R_n$

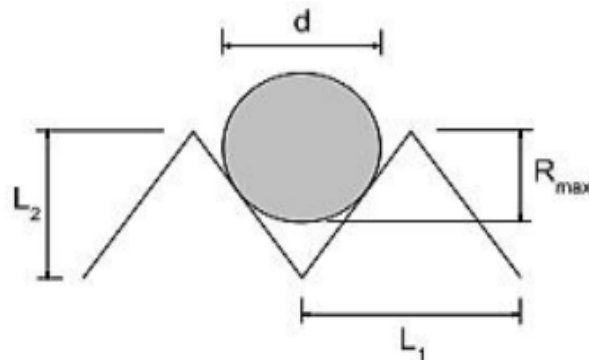
Tant  $R_a$  que  $R_{max}$  sont exclusivement des fonctions de la surface et ne tiennent pas compte de la taille des grains du sol, qui est connue pour affecter de manière marquée la réponse de l'interface. Uesugi et Kishida ont suggéré de normaliser  $R_{max}$  en le divisant par la taille moyenne des grains de l'interface du sol. En conséquence, la rugosité de surface normalisée ( $R_n$ ) est définie comme suit :

$$R_n = \frac{R_{max}}{D_{50}} \quad (2.6)$$



**Fig. 2.4** Définition de la rugosité normalisée  $R_n$

George (2008) a introduit un modèle décrivant l'interaction entre les grains, tels que ceux du sable, et une surface, en prenant en compte les dimensions caractéristiques des grains ( $d$ ) ainsi que celles de la surface ( $L_1$  et  $L_2$ ) (voir Figure 2.5). Il a mis en évidence deux types de contact entre les particules et la surface : un contact sur une facette et un contact sur une arête, comme illustré dans la Figure 2.6.



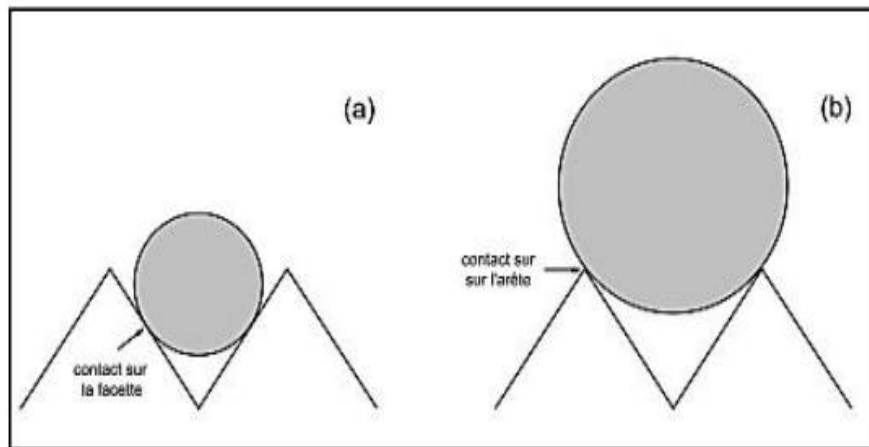
**Fig. 2.5** Schéma pour la détermination de la rugosité maximale  $R_{max}$  dans la configuration expérimentale utilisée.

Par un raisonnement géométrique simple, il a vérifié que cette limite est atteinte pour un diamètre qui vaut :  $d_{lim} = \frac{L_1}{L_2} \sqrt{\left(\frac{L_1}{2}\right)^2 + (L_2)^2}$

Donc la rugosité normalisée vaut pour le système étudié :

$$R_n = \frac{L_2}{d} - \frac{1}{L_1} \sqrt{\left(\frac{L_1}{2}\right)^2 + (L_2)^2} - \frac{1}{2} \quad \text{si } d \leq d_{lim} \quad (2.7)$$

$$R_n = \frac{1}{2} - \frac{1}{d} \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_1}{2}\right)^2} \quad \text{si } d \geq d_{lim} \quad (2.8)$$



**Fig. 2.6 :** Schéma représentatif du mode de contact : (a) sur la facette (b) : sur une arête

### Rugosité relative $R$

La rugosité relative  $R$ , qui peut être utilisée pour analyser les interfaces le sol et matériaux solides dans des conditions drainées, a été proposée par Subba Rao et al. (1998; 2000). Cette approche consiste à normaliser  $R_a$  en fonction du diamètre moyen des particules du sol, noté  $D_{moy}$ . Il peut être calculé de la courbe représentant l'analyse granulométrique du sol. La définition de  $R$  est donnée par :

$$R = \frac{R_a}{D_{moy}} \quad (2.9)$$

### 2.4 Techniques de caractérisation morphologique

La mesure de la rugosité de surface peut être caractérisée à l'aide de méthodes quantitatives ou qualitatives. Les techniques qualitatives incluent l'aspect optique tel que la réflectivité d'une surface ou la force de la couche d'usure. L'analyse quantitative a évolué du profilomètre bidimensionnelle simple à une analyse de zone tridimensionnelle plus avancée, où des informations sur la structure de surface peuvent être facilement obtenues. Pour quantifier un profil de surface, il est essentiel de supprimer les composants de longueur d'onde inutiles et d'établir un point de référence à partir duquel les paramètres peuvent être calculés. Un système de mesure de la rugosité de surface basé sur un stylet est présenté dans la figure 2.7.

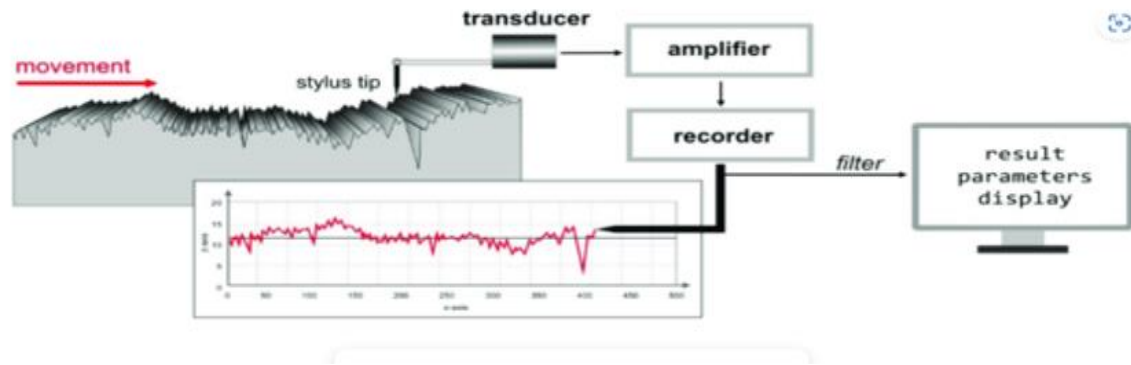


Fig. 2.7 Mesure de rugosité de surface à l'aide d'un stylet

### 2.4.1 Méthodes de mesure

#### 2.4.1.1 Mesure basée sur le contact : Mesure au stylet

La méthode de contact implique le glissement d'un stylet en diamant dont les dimensions de la pointe sont telles qu'elle peut pénétrer la géométrie détaillée de la surface. Le stylet est monté sur un bras avec un capteur à l'autre extrémité, comme illustré dans la figure 2.8. Tout changement de hauteur du stylet dû aux caractéristiques de la surface correspond à un changement du signal détecté et amplifié par le capteur et les composants électroniques subséquents. Le type de capteur le plus courant est basé sur le principe de l'inductance et offre une grande plage de résolution ainsi qu'une construction robuste.

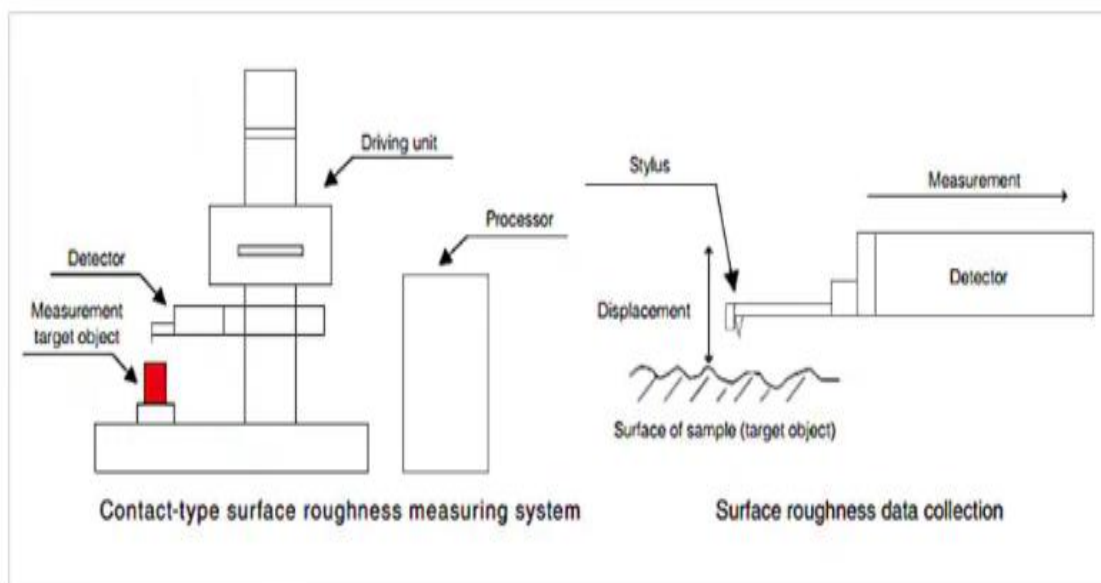


Fig. 2.8 Mesure basée sur un stylet

### Avantages et inconvénients du contact

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

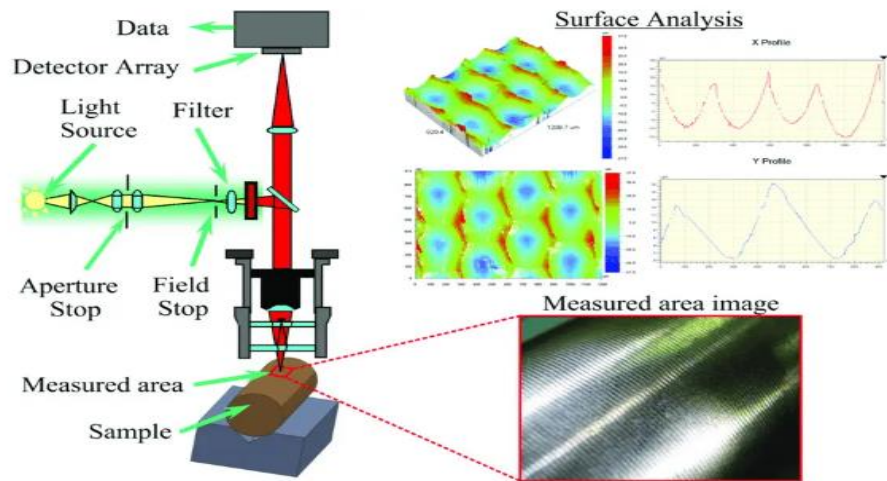
---

La mesure de la rugosité de surface par contact est l'une des méthodes les plus largement utilisées pour mesurer la rugosité de surface. Cependant, elle présente ses propres avantages et inconvénients dans la mesure du profil de rugosité de surface, les avantages incluent le profil d'onde clair ; puisque la pointe du stylet est en contact avec la surface de l'échantillon, le profil de rugosité obtenu est très clair et une réplique de la surface. Il est également capable d'effectuer des mesures à longue distance, ce qui n'est pas possible dans le cas de mesures optiques.

Les inconvénients de la mesure basée sur le contact comprennent principalement l'usure de la pointe du stylet, qui résulte du contact entre sa partie acérée et la rugosité de la surface. Ce frottement provoque des rayures sur la surface de l'échantillon lors du déplacement du stylet, et la précision de la mesure est restreinte par le rayon de la pointe du stylet. Cette méthode n'est pas utilisée pour mesurer la rugosité des échantillons visqueux, et c'est également un processus très chronophage. Initialement, la mesure nécessite le positionnement approprié du stylet sur le point de mesure approprié, ce qui est difficile dans cette méthode, et parfois il est également nécessaire de couper les échantillons pour les tracer par le détecteur.

### 2.4.1.2 *Mesure sans contact : Interférométrie optique*

Les interféromètres optiques fonctionnent sur le principe d'exposer la surface à caractériser à une lumière monochromatique ou blanche et d'observer les franges d'interférence produites en utilisant une plaque optique inclinée à un petit angle. Les motifs de franges sont produits en divisant le faisceau lumineux et les motifs d'interférence sont produits en raison de l'interférence entre les réflexions de la plaque optique inclinée et la surface à mesurer. Les motifs de franges sont analysés par un programme informatique incorporant les algorithmes appropriés pour donner une représentation non filtrée de la surface. Les données peuvent être traitées statistiquement et filtrées pour fournir des valeurs paramétriques. La figure 2.9 montre l'interférométrie optique.



**Fig. 2.9** Représentation de l'interférométrie optique

## Avantages et inconvénients de la mesure sans contact

Les développements en microscopie optique ont conduit à l'implémentation de l'optique dans diverses applications, un exemple étant l'interférométrie optique. L'interférométrie optique permet de pallier les limitations des méthodes de mesure de la rugosité basées sur le contact et s'impose comme une technologie efficace. La précision des balayages réalisés par ces instruments de mesure dépend principalement des caractéristiques optiques des matériaux analysés. Les matériaux hautement réfléchissants produisent des pics artificiels dans les profils de rugosité. Le principal inconvénient de cette technique est que les matériaux avec des propriétés de réflexion faibles ne peuvent pas être mesurés à l'aide de ces dispositifs.

### 2.5 Interfaces utilisées

La morphologie de surface d'un modèle d'interface utilisé dans l'étude d'un comportement sol-matériau solide joue un rôle important dans les résultats obtenus. Cette morphologie est déterminée par la hauteur des aspérités (rugosité) et leur distribution (texture). Des surfaces qui diffèrent en texture peuvent avoir une rugosité similaire.

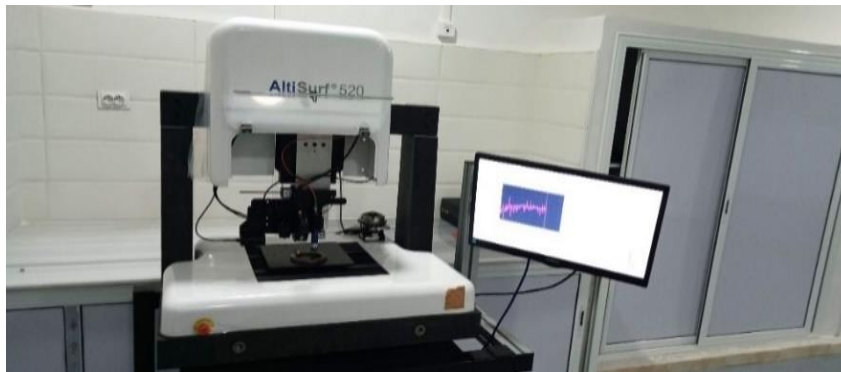
Dans cette étude, quatre interfaces en acier ont été fabriquées en plus de la pierre poreuse originale de l'appareil, ayant une surface de 10 cm<sup>2</sup> et une épaisseur de 0,5 cm. La surface la plus lisse a été obtenue par rectification plane, tandis que les autres degrés de rugosité et formes différentes ont été obtenus en variant la hauteur des rainures et leur distribution. Ces surfaces présentent une rugosité et une texture différentes comme suit :

- Une interface lisse (S0).

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure

- Trois interfaces rainurées (S1, S2, S3) avec une surface presque lisse entre les rainures. Des reliefs aléatoires avec des bords tranchants ont été créés le long des côtés des rainures de S1.
- Une pierre poreuse d'origine (S4) de l'appareil avec une surface aléatoire entre les rainures.

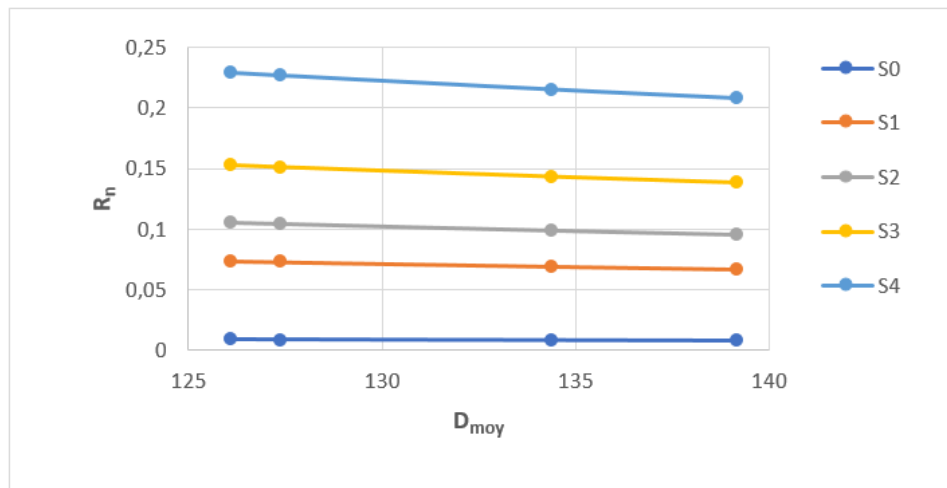
La figure 2.10 représente le profilomètre 3D **AltiSur 520** utilisé pour mesurer la rugosité des interfaces utilisées. Idéalement adapté à l'analyse de la topographie des grandes surfaces (X, Y, Z (mm) : 200 x 200 x 200 mm), il possède deux types de mesures de contact : une sonde inductive et une sonde microforce (résolution de 6 nm) et trois types de mesures sans contact : 02 sondes chromatiques confocales avec (100  $\mu$ m et 10 mm) et une sonde d'interférométrie sur le même capteur avec une plage de 90  $\mu$ m (résolution de 0,5  $\mu$ m), un laser triangulé et équipé d'un logiciel permettant d'analyser la rugosité, la tribologie, ainsi que le phénomène topographique.



**Fig. 2.10** Vue générale de profilomètre, rugosimètre 3D **AltiSurf520**

La figure 2.11 présente la relation entre la rugosité relative  $R_n$  et le diamètre moyen  $D_{moy}$ , tandis que les figures 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16 et 2.17 illustrent les interfaces en acier avec la pierre poreuse et leurs profils de rugosité de surface typiquement mesurés, respectivement. Les valeurs de la rugosité moyenne  $R_a$  et de la rugosité relative  $R_n$  sont données dans les tables 2.1 et 2.2.

## Chapitre 1 : La résistance au cisaillement à l'interface sol-structure



**Fig. 2.11** Relation entre la rugosité relative  $R_n$  et le diamètre moyen  $D_{moy}$

**Tableau. 2.1** Valeurs de  $Ra$

| Interfaces             | S0   | S1   | S2   | S3   | S4   |
|------------------------|------|------|------|------|------|
| Average roughness $Ra$ | 1.05 | 9.27 | 13.3 | 19.2 | 28.9 |

**Tableau. 2.2** Valeurs de  $R_n$

| Interfaces | Kaolin | 90K+10S | 80K+20S | 70K+30S |
|------------|--------|---------|---------|---------|
| S0         | 0.0083 | 0.0082  | 0.0075  | 0.0078  |
| S1         | 0.073  | 0.072   | 0.066   | 0.068   |
| S2         | 0.105  | 0.104   | 0.095   | 0.098   |
| S3         | 0.152  | 0.150   | 0.137   | 0.142   |
| S4         | 0.229  | 0.226   | 0.207   | 0.215   |



Fig. 2.12 Modèles d'interfaces utilisées

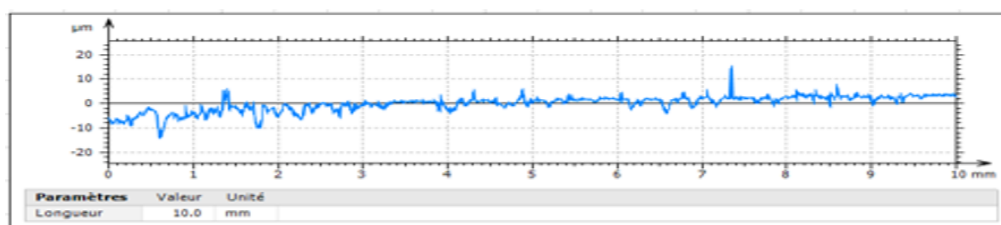


Fig. 2.13 Profil de l'interface d'acier S0

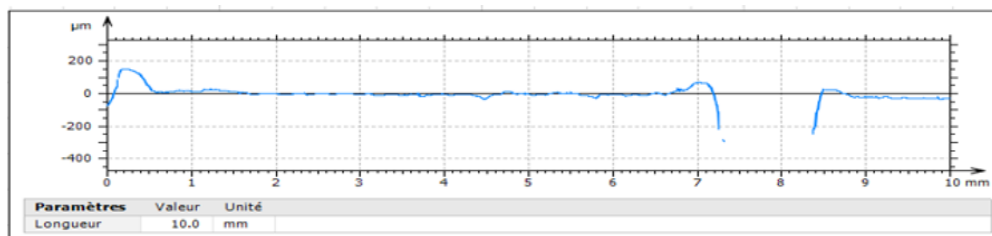


Fig. 2.14 Profil de l'interface d'acier S1

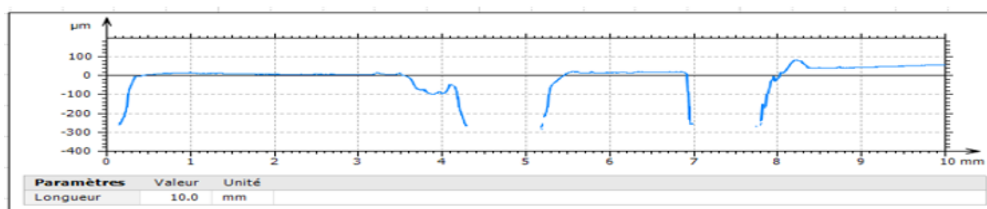


Fig. 2.15 Profil de surfaces d'acier S2

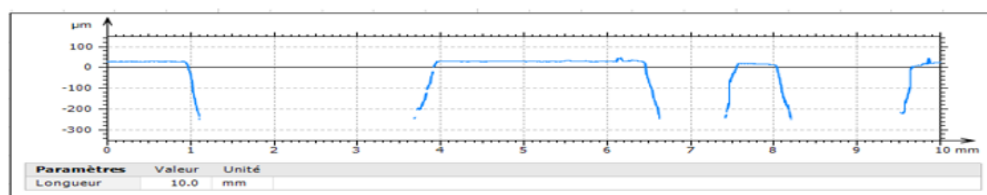
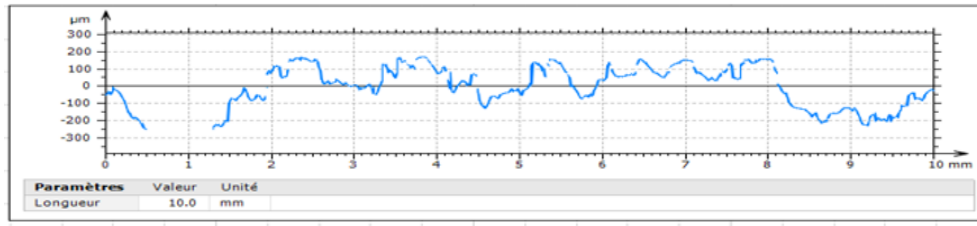


Fig. 2.16 Profil de surface d'acier S3



**Fig. 2.17** Profil de la pierre poreuse S4

### 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une synthèse des caractéristiques générales des différents paramètres utilisés pour quantifier la rugosité de surface, ainsi que des méthodes de mesure qui leur sont associées. Plus précisément, l'emploi d'un profilomètre optique 3D dans cette étude a permis une évaluation précise des profils de rugosité des interfaces en acier ainsi que de la pierre poreuse de l'appareil utilisés dans le programme expérimental. Les techniques d'obtention de ces interfaces sont également décrites. Les résultats des mesures de rugosité, incluant les valeurs de  $R_a$  et  $R_n$ , sont présentés. Ces paramètres fournissent les données nécessaires pour l'analyse ultérieure des courbes de comportement.

### *Chapitre 3 :*

**Equipements, Matériaux et programme expérimental**

### 3 Equipements, matériau et programme expérimental

#### 3.1 Introduction

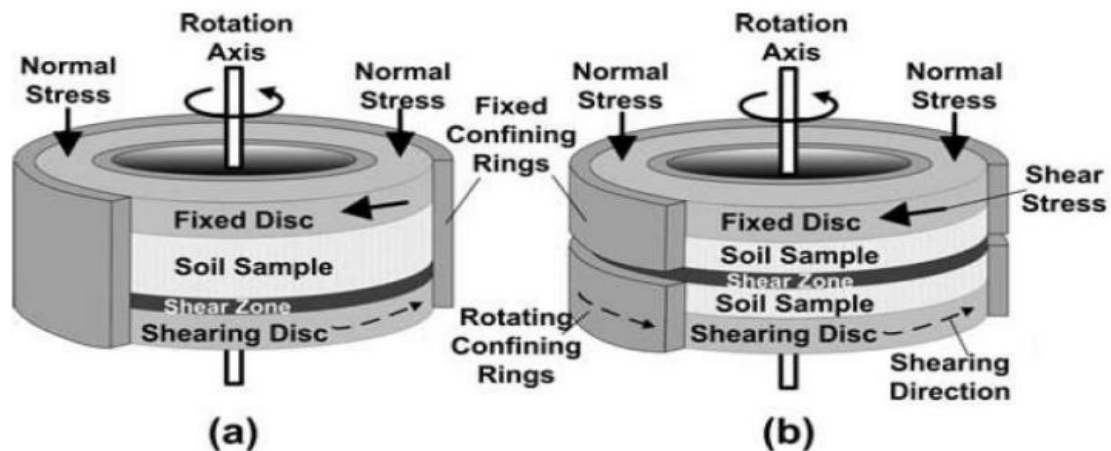
D'après Hovslov (1930), Les premières études menées sur le cisaillement annulaire (échantillons de forme annulaire) en utilisant des appareils de cisaillement rotatifs remontent aux années 1930. Il a été observé que ce type de dispositif présentait des avantages spécifiques par rapport aux autres dispositifs de cisaillement développés auparavant. Cette méthode offre la possibilité de déformer l'échantillon sans que l'appareil n'impose de contrainte mécanique (limites), tout en garantissant que la surface du plan de cisaillement reste constante durant toute la durée de l'essai.

Effectivement, la capacité de l'échantillon à se déformer de manière continue, sans altérer l'orientation du plan de cisaillement pendant toute la durée de l'essai, a permis de préserver une surface de cisaillement constante. Le premier dispositif de cisaillement annulaire a été initié par l'American Society of Civil Engineering (A.S.C.E., 1917). Il est composé de deux parties essentielles : Un disque nervuré dans la partie inférieure qui assure la rotation. Il a un diamètre pratiquement inférieur à celui de l'échantillon, et un conteneur se trouve dans la partie supérieure qui assure le confinement radial de l'échantillon sur lequel une charge verticale est appliquée. Le développement des dispositifs de cisaillement annulaire a été continué avec d'autres chercheurs (Streck, 1928 ; Franzius et al. 1929 ; Langer, 1938), conçus d'une manière dont l'échantillon est toujours en forme de disque. Cependant, ce design est distingué par un défaut majeur qui consiste à la distribution non uniforme de contraintes et de déformations. Les contraintes de cisaillement et les variations de volume augmentent radialement, allant de zéro au centre de l'échantillon jusqu'à un maximum aux bords.

Pour résoudre ce problème, un modèle alternatif a été proposé, consistant à adopter une forme annulaire pour l'échantillon. Cette configuration permet de surmonter les défauts liés à la distribution inégale des contraintes et aux variations de déformation. Les dispositifs développés à cette époque ont en commun le principe selon lequel la rupture par cisaillement se forme à proximité de l'interface sol-surface de rotation. Les denteleurs mises en place pour entraîner le sol engendrent un remaniement local du sol entraînant ainsi une sous-estimation de la résistance résiduelle. Pour cette raison, Gruner et Haefeli (1934) ont proposé un modèle alternatif basé sur des anneaux divisés, dans lequel le plan de cisaillement est forcé de se déplacer vers le centre de l'échantillon. Cette configuration permet d'éviter les mesures surestimées dues aux dents, donnant ainsi une valeur acceptable de la résistance résiduelle. D'autre

## Chapitre 3 : Equipements, Matériaux et programme expérimental

chercheur ont également adopté cette configuration (Tiedemann, 1937 ; Langer, 1938). Le schéma présenté dans la figure 3.1 illustre ces deux méthodes de confinement de l'échantillon.

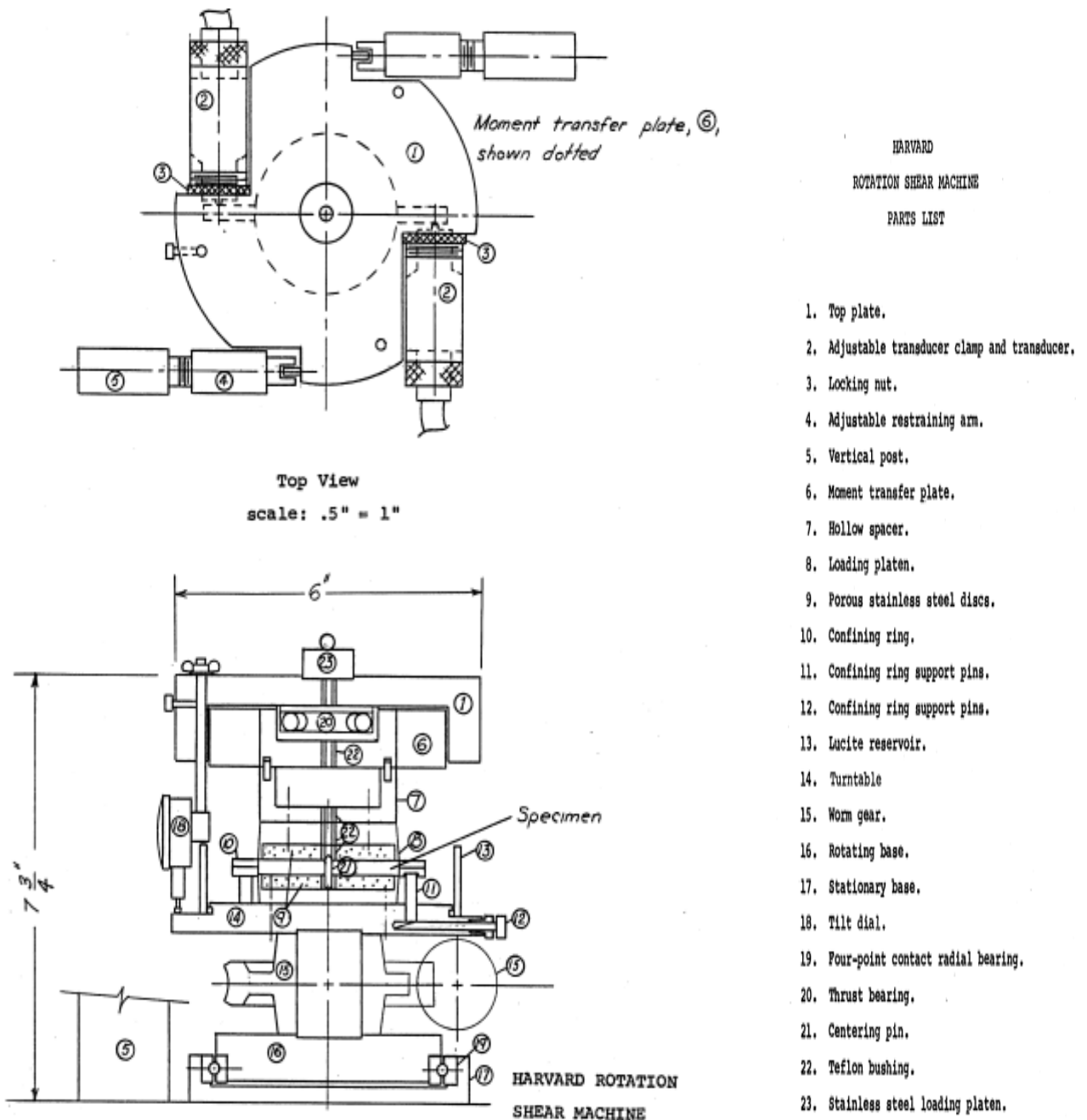


**Fig. 3.1** (a) Schéma représentant les anneaux fixes ou solides (b) schéma représentant les anneaux divisées (Sadrekarimi et Olson, 2009)

### La seconde vague d'innovation

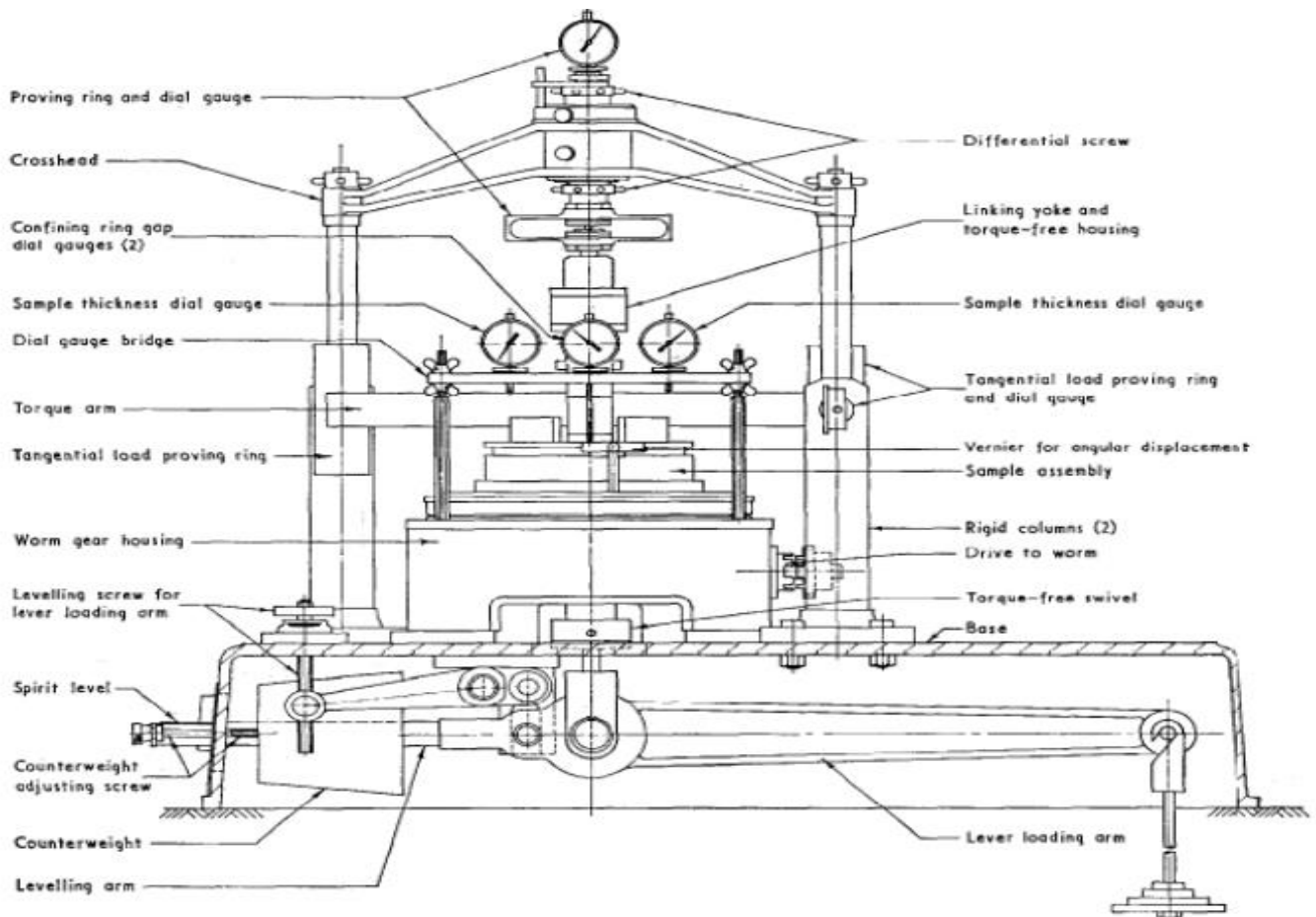
L'importance de la résistance résiduelle a été soulignée par Skempton lors de la "Rankine's Lecture" en 1964, qui portait sur la stabilité à long terme des pentes dans l'argile. Il a démontré qu'un sol comportant un plan de cisaillement préexistant présente une résistance mobilisée inférieure à celle de l'argile remaniée. Ainsi, sa résistance peut être comparable à celle observée dans les glissements de terrain réactivés.

Dans les années 1970, les travaux de Skempton concernant la résistance résiduelle ont suscité un intérêt croissant pour la recherche, visant à améliorer les dispositifs de cisaillement annulaires. Toutefois, ces études n'ont pas permis d'établir les conditions du cisaillement résiduel. En examinant les études publiées sur ce sujet, LaGatta a constaté que le plateau de la résistance résiduelle n'avait pas été atteint. Par la suite, lors de ses recherches à l'Université de Harvard, en collaboration avec celle-ci, il a réussi à développer un appareil de cisaillement annulaire à déformation contrôlée. Dans ce dispositif, les dimensions sont les suivantes (diamètre intérieur : 5,08 cm, diamètre extérieur : 7,11 cm et épaisseur : 2,5 cm). De plus, les anneaux de confinement utilisés ne se limitent pas aux anneaux solides, mais peuvent également être divisés en deux à mi-hauteur, séparés par une distance de 0,005 cm. Ces modifications ont permis de corriger les sources d'erreurs qui entraînaient la surestimation de la résistance résiduelle.



**Fig. 3.2** Schéma de l'appareil Harvard (LaGatta, 1970)

Près d'un an plus tard, Bishop, en collaboration avec les chercheurs de l'Imperial College et de l'Institut Géotechnique Norvégien, a introduit un appareil de cisaillement annulaire, connu sous le nom de "NGI" (Fig 1.3), qui est rapidement devenu un outil commercialement viable et largement utilisé pour évaluer la résistance résiduelle drainée. Cet appareil fonctionne sur le principe de déformation contrôlée. Ses dimensions sont les suivantes : (diamètre intérieur : 10,16 cm, diamètre extérieur : 15,24 cm, épaisseur : 1,905 cm).



**Fig. 3.3** Schéma général de l'appareil NGI (Bishop et al. 1971)

Le problème qui attire l'attention de nombreux chercheurs concernant les dispositifs de cisaillement annulaire est la tendance à surestimer la résistance résiduelle en raison du frottement entre les anneaux inférieurs, qui sont généralement en rotation, et les anneaux supérieurs fixes. Ce frottement s'ajoute à la résistance au cisaillement résiduelle mesurée. Les travaux de LaGatta et Bishop visaient à résoudre ce problème en créant un espace entre les anneaux afin de minimiser le frottement entre eux. Cependant, cette solution a entraîné l'extrusion du sol, affectant principalement les bords intérieur et extérieur de l'échantillon, ce qui a pour conséquence une distribution non uniforme des contraintes, le centre étant moins impacté.

## Chapitre 3 : Equipements, Matériaux et programme expérimental

---

LaGatta et Bishop ont introduit un système de contrôle d'ouverture entre les deux paires d'anneaux, aussi bien qu'un système permettant la mesure du frottement produit entre les deux anneaux. Ce frottement sera par la suite déduit de la résistance résiduelle mesurée

LaGatta (1970) et Bishop et al. (1971) ont observé que la méthode de préparation des échantillons, qu'ils soient intacts ou remaniés, n'affecte pas les résultats de la résistance résiduelle. Cela signifie que, en cas de non-disponibilité d'échantillons intacts, il est possible d'utiliser des échantillons remaniés sans altérer la qualité des mesures, bien que cette approche complique la caractérisation de la résistance au pic.

### La population de l'essai :

En 1979, Bromhead, a réussi à introduire sur le marché un dispositif de cisaillement qui est rapidement devenu très populaire, non seulement dans les laboratoires de recherche, mais aussi dans les laboratoires commerciaux, en raison de son coût avantageux, la procédure assez simple de préparation de l'échantillon, et sa rapidité. Cet appareil possède les caractéristiques suivantes :

- Les échantillons sont de forme annulaire, dont les dimensions sont (Diamètre extérieur x Diamètre intérieur x Epaisseur : 100 x 70 x 5).
- La conception de l'appareil donne lieu au plan de cisaillement de se produire près de la surface, juste sous la pierre poreuse supérieure, grâce à l'utilisation d'anneaux de confinement solides.
- La consolidation est très rapide, en raison du parcours court de drainage. La production du plan de rupture près de la surface facilite la dissipation des pressions interstitielles générées.

Dans le cadre du développement d'un appareil de cisaillement annulaire pratique, Bodset (1981) a introduit un dispositif connu sous le nom de "UBC" (Fig 3.4), conçu pour l'Université de la Colombie-Britannique, qui présente les caractéristiques suivantes :

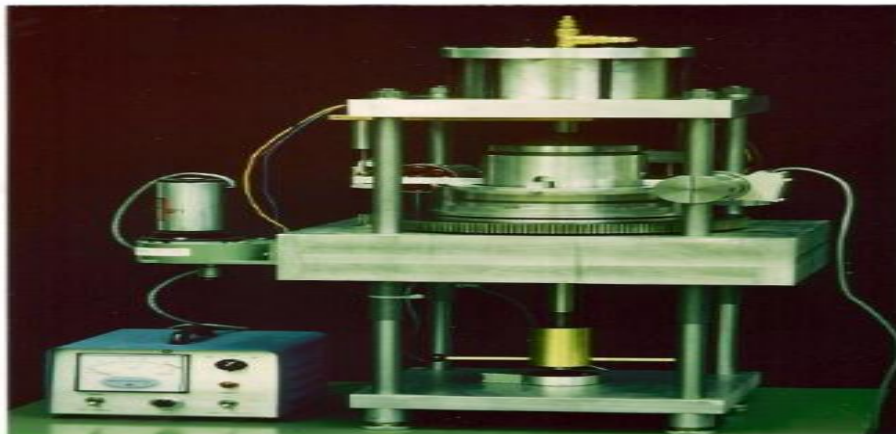
- Il fonctionne sur le principe des déformations contrôlées.

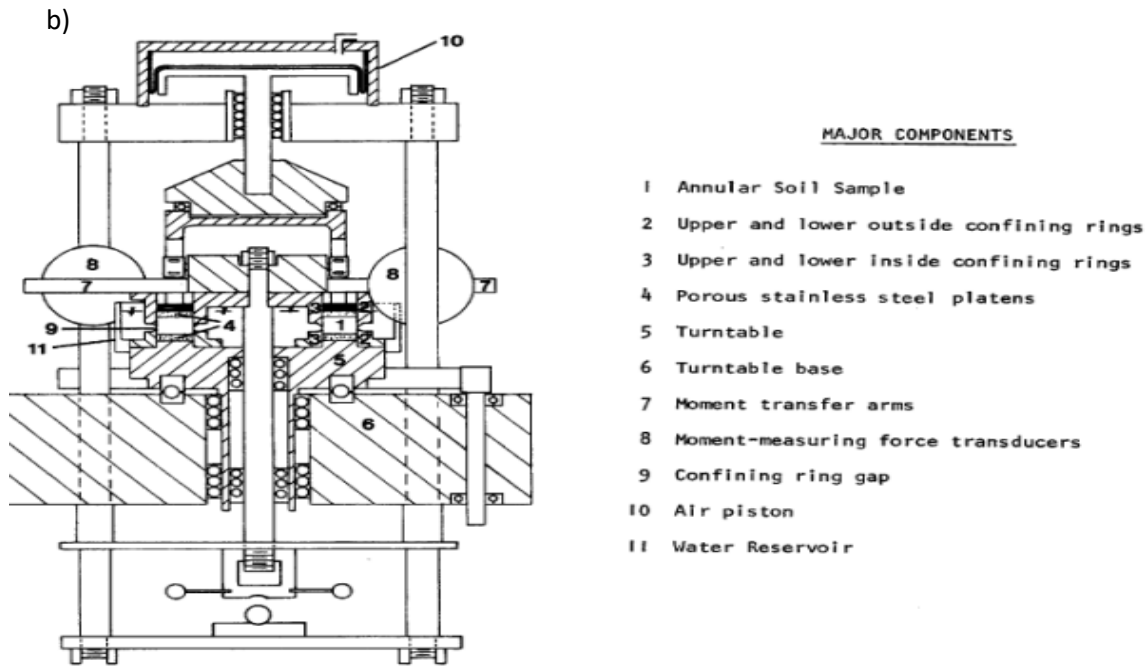
### Chapitre 3 : Equipements, Matériaux et programme expérimental

- Il utilise un système automatisé d'acquisition de données avec un ordinateur. (Selon Bodset, il s'agit du premier appareil annulaire à utiliser cette technique).
- Il est équipé d'une paire d'anneaux divisés, ayant respectivement des diamètres extérieurs de 9,985 cm, des diamètres intérieurs de 4,445 cm, et des épaisseurs variables allant jusqu'à 1,905 cm.
- Le parcours de drainage est ajustable.

Des essais ont été réalisés avec cet appareil sur trois types d'argiles présentant des caractéristiques différentes. Les résultats obtenus ont révélé des valeurs surestimées de la résistance résiduelle. Ces valeurs élevées ont été attribuées à un frottement latéral excessif au niveau de l'anneau supérieur, dû à la présence de zébrures de corrosion dans cette zone. En conséquence, Bodset a recommandé l'utilisation d'anneaux fabriqués en acier inoxydable ou en aluminium.

a)





**Fig. 3.4** (a) Photo prise de l'appareil de Bodset (UBC) (b) Une vue frontal de l'appareil de Bodset (UBC) (Bosdet, 1980)

### 3.2 Appareil de Bromhead

#### 3.2.1 Description et principe général (selon Bromhead)

Un conteneur de forme annulaire qui joue un rôle de confinement radial reçoit un échantillon d'une forme correspondante ayant des dimensions de 100 mm comme diamètre extérieur et 70 mm comme diamètre intérieur et 5 mm comme épaisseur. Il est comprimé verticalement entre des plateaux de charge en bronze poreux à l'aide d'un système de levier et de poids morts.

Dans le prototype, ce système de levier était adapté à partir d'un système de suspension à rapport 5 :1, complet avec un cric de nivellement de levier faisant initialement partie d'un appareil de cisaillement direct. Ce système a cependant été supprimé de la gamme de ce fabricant ainsi que de la machine en question, et remplacé par une nouvelle machine avec un système à contrepoids à rapport 10 :1. En conséquence, les machines de production ont été adaptées pour utiliser les nouveaux composants.

Une rotation est impartie à la plaque de base et au plateau inférieur à l'aide d'un moteur à vitesse variable et d'une boîte de vitesses entraînant une transmission par vis sans fin. Cela provoque le cisaillement de l'échantillon, la surface de cisaillement se formant près du plateau

## Chapitre 3 : Equipements, Matériaux et programme expérimental

supérieur (qui est artificiellement rugueux pour empêcher le glissement à l'interface plateau/sol). Le tassement du plateau supérieur pendant la consolidation ou le cisaillement peut être surveillé au moyen d'un comparateur sensible placé sur le haut du bras de mise en charge. Le couple de torsion exercé sur l'échantillon à la rotation est mesuré par les deux anneaux dynamométriques.

### 3.2.2 Préparation de l'échantillon

La pierre poreuse inférieure et les anneaux de confinement sont assemblés, puis un échantillon remanié est malaxé et mis en place dans la cavité annulaire. Le haut de l'échantillon est ensuite arasé de niveau de telle sorte qu'il soit aligné avec les anneaux de confinement. Le plateau supérieur est placé en position, centré sur la goupille de centrage, préalablement bien graissée. Une fois le bain d'eau (qui s'ajuste parfaitement sur le joint torique) en place, l'échantillon est immergé dans l'eau distillée. S'il s'agit d'un échantillon très mou, il est important de lui laisser le temps de s'équilibrer sous la charge du plateau supérieur, puis sous la charge de chaque élément du système de chargement à levier, car si une trop grande charge est appliquée trop rapidement, il peut y avoir une perte excessive de sol à travers le jeu entre le plateau supérieur et les anneaux de confinement. Cependant, avec certains sols, il peut être préférable d'appliquer une charge sur l'échantillon pour éviter le gonflement. Ensuite, l'échantillon est consolidé sous des charges qui fournissent la contrainte effective normale désirée sur des plans horizontaux, et le coefficient de consolidation peut être évalué en surveillant le tassement vertical. Lorsque le sol est entièrement consolidé, il peut être cisailé à la vitesse appropriée. La figure 3.5 montre une vue générale de l'appareil de Bromhead ainsi que les anneaux de confinement.

a)



b)

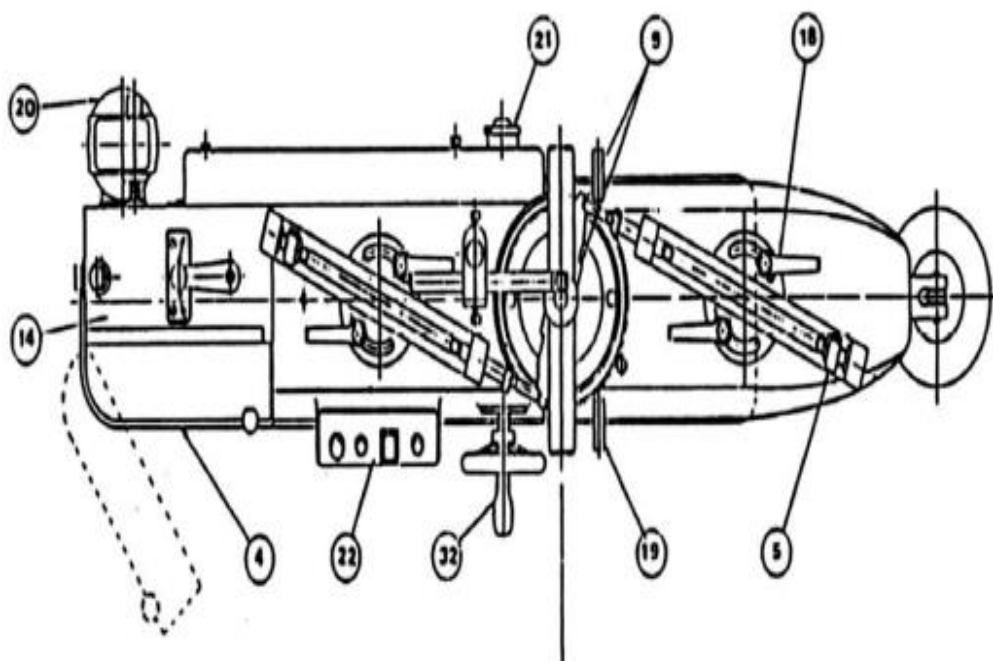


**Fig. 3.5** (a) Vue d'ensemble de l'appareil de Bromhead, avec les anneaux de confinement  
(b) Plateau supérieur et plateau inférieur + conteneur

Les figures 3.6 et 3.7 montre une vue en plan et vue de coté de l'appareil :

### Légende

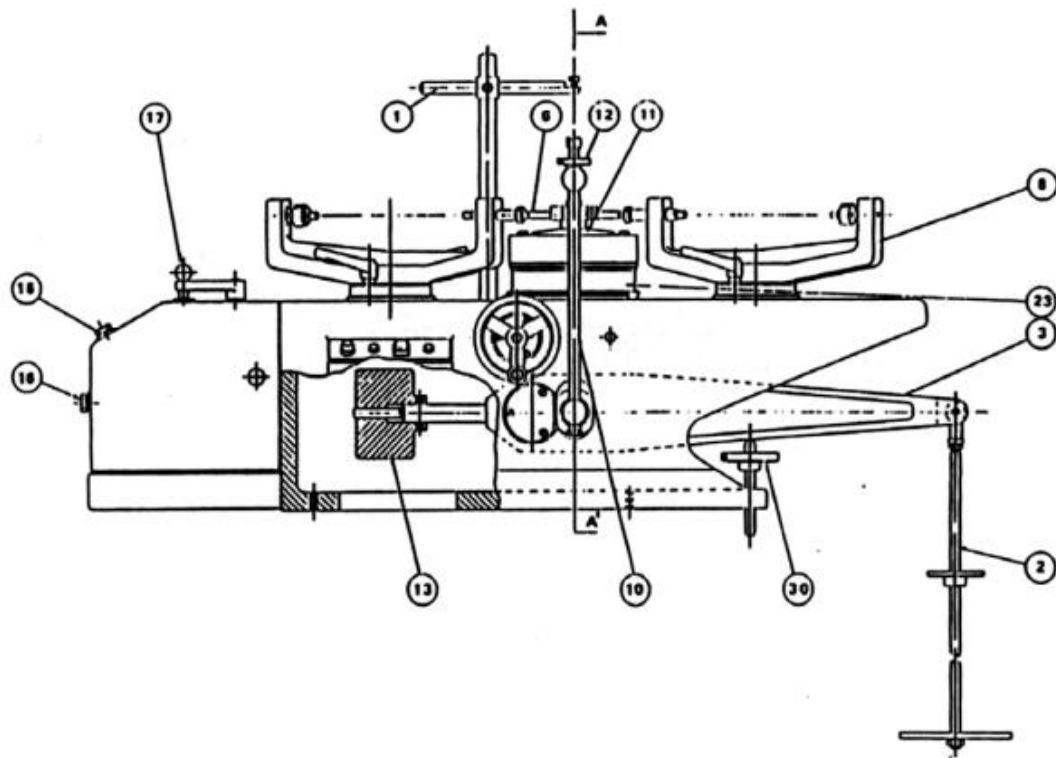
- 4- Couvercle de la boîte à vitesse
- 5- Adaptateur pour anneaux dynamométrique
- 9- Appuis d'anneau dynamométrique
- 14- Boîte à vitesse
- 18- Levier de serrage
- 19- Butées
- 20- Moteur
- 21- Commande d'embrayage
- 22- Interrupteur
- 32- Volant



**Fig. 3.6** Vue de dessus de l'appareil

### Légende

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



**Fig. 3.7** Vue latérale de l'appareil

## Chapitre 3 : Equipements, Matériaux et programme expérimental

### 3.3 Matériaux étudiés :

L'analyse des matériaux constituant l'objet de l'étude est une étape importante pour interpréter les résultats des essais mécaniques et pour comprendre les phénomènes impliqués.

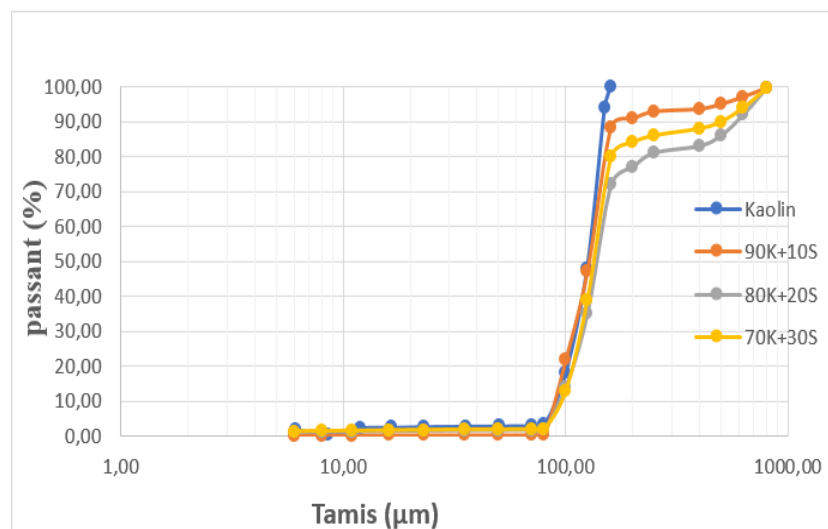
De ce fait, nous avons décidé d'étudier les sols suivants : Le kaolin, et un mélange de kaolin-sable à divers pourcentages dont le kaolin est de 90, 80, 70% et le sable 10, 20, 30% respectivement.

Les caractéristiques physiques de ces sols sont représentées dans le tableau suivant :

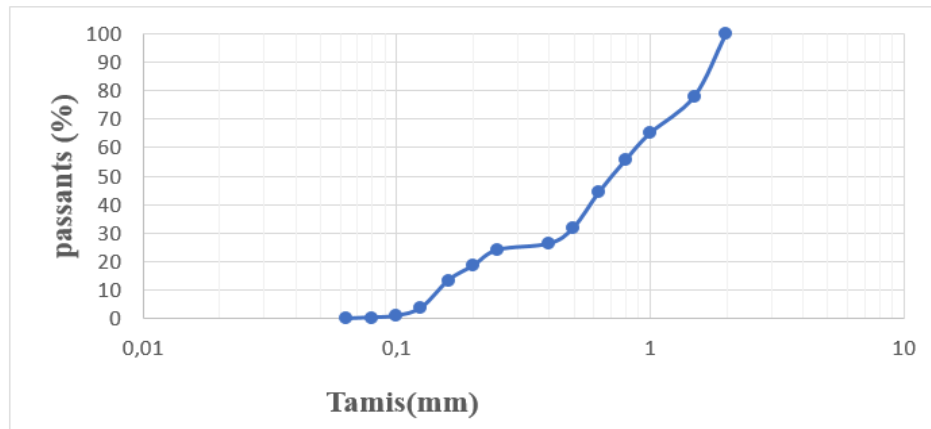
**Tableau. 3.1** Les propriétés physiques des sols utilisés

|                             | kaolin | 90K+10S | 80K+20S | 70K+30S |
|-----------------------------|--------|---------|---------|---------|
| Limite de liquidité WL (%)  | 60     | 59      | 56      | 53      |
| Limite de plasticité WP (%) | 39     | 29      | 26.5    | 21.5    |
| Indice de plasticité IP (%) | 21     | 30      | 29.5    | 31.5    |
| Diamètre moyenne Dmoy (μm)  | 126.08 | 127.38  | 139.18  | 134.39  |
| Gravité spécifique Gs       | 2.64   | 2.5     | 2.48    | 2.41    |

Les courbes granulométriques de ces courbes sont représentées à la figure 3.12 :



**Fig. 3.8** Courbes granulométriques du kaolin et de mélange kaolin-sable.



**Fig. 3.9 :** Courbe granulométrique du sable normalisé

### 3.3 Programme d'essais

Le programme expérimental comporte 4 parties :

- La première partie porte sur l'étude de l'effet de la teneur en eau et de la vitesse de cisaillement sur la résistance à l'interface sol-matériau solide. Cette étude est menée en suivant le processus suivant : des échantillons de kaolin et un mélange kaolin –sable ont été préparés avec des teneurs en eau allant de 20 % à 30 %. Ensuite testés avec des vitesses de cisaillement variables allant de 0,5 mm/min à 20 mm/min.
- La deuxième partie porte sur l'étude de l'effet du frottement mural sur la résistance résiduelle. Cette étude a été menée en soumettant un ensemble d'échantillon du kaolin à une vitesse de cisaillement de 0.035 mm/min pour 3 procédure d'essai, à savoir "Single stage", "Multistage", "Précisaillement", préparés à une teneur en eau égale à 1.2 la limite de liquidité du kaolin.
- La troisième partie porte sur l'étude de l'effet de rugosité et le colmatage des interfaces par le sol en contact sur la résistance résiduelle, en utilisant différents modèles d'interfaces. Pour cela, un ensemble d'échantillons de kaolin et de mélange kaolin-sable, avec les mêmes pourcentages mentionnés précédemment, a été soumis à une vitesse de cisaillement de 0,035 mm/min.
- La quatrième partie porte sur la proposition d'une procédure d'essai pour la mesure de la résistance résiduelle.

Le programme expérimental est résumé dans le tableau 3.2 :

## Chapitre 3 : Equipements, Matériaux et programme expérimental

**Tableau. 3.2** Programme expérimental des essais

| sol                                                        | essai                                                                                                                                                                                                              | Interface                            | contrainte | objectif                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kaolin                                                     | teneur en eau 20% sous 4 vitesses de cisaillement 0.5, 5, 10, 20 mm/min                                                                                                                                            | La pierre poreuse de l'appareil      | 50 kPa     | Etudier l'effet de la teneur en eau sur la résistance au cisaillement à l'interface sol cohérent- matériau solide dans des drainées    |
|                                                            | teneur en eau 25% sous 4 vitesses de cisaillement 0.5, 5, 10, 20 mm/min                                                                                                                                            |                                      |            |                                                                                                                                        |
|                                                            | teneur en eau 30% sous 4 vitesses de cisaillement 0.5, 5, 10, 20 mm/min                                                                                                                                            |                                      |            |                                                                                                                                        |
| Mélange kaolin-sable: 90K+10S, 80K+20S, 70K+30S            | teneur en eau 20% sous 4 vitesses de cisaillement 0.5, 5, 10, 20 mm/min                                                                                                                                            | La pierre poreuse de l'appareil      | 50 kPa     |                                                                                                                                        |
|                                                            | teneur en eau 25% sous 4 vitesse de cisaillement 0.5, 5, 10, 20 mm/min                                                                                                                                             |                                      |            |                                                                                                                                        |
|                                                            | teneur en eau 30% sous 4 vitesse de cisaillement 0.5, 5, 10, 20 mm/min                                                                                                                                             |                                      |            |                                                                                                                                        |
| Kaolin                                                     | échantillons préparés à une teneur en eau égale à 1.2 la limite de liquidité de sol pour une vitesse de cisaillement lente de 0.035 mm/min pour 3 procédures d’essai : "Single stage", "Multistage", "Preshearing" | La pierre poreuse de l'appareil      | 50 kPa     | Etudier l'effet du frottemnt mural sur la résistance résiduelle résultant de la consolidation dans des conditions consolidées drainées |
|                                                            |                                                                                                                                                                                                                    |                                      | 100 kPa    |                                                                                                                                        |
|                                                            |                                                                                                                                                                                                                    |                                      | 200 kPa    |                                                                                                                                        |
| Kaolin et mélanges kaolin-sable: 90K+10S, 80K+20S, 70K+30S | echantillons précisaiillés a une vitesse de cisaillement de 15 mm/min pour créer une surface de cisaillement puis cisaiillés à une vitesse de 0.035mm/min                                                          | La pierre poreuse de l'appareil (S4) | 50 kPa     | Etudier l'effet de la rugosité ainsi que l'effet de colmatage des interface par le sol en contact sur la résistance résiduelle         |
|                                                            |                                                                                                                                                                                                                    | interface S0                         | 100 kPa    |                                                                                                                                        |
|                                                            |                                                                                                                                                                                                                    | Interface S1                         |            |                                                                                                                                        |
|                                                            |                                                                                                                                                                                                                    | Interface S2                         | 200 kPa    |                                                                                                                                        |
|                                                            |                                                                                                                                                                                                                    | Interface S3                         |            |                                                                                                                                        |
| Kaolin                                                     | échantillons prépares à une teneur en eau égale à 1 fois la limite de liquidité de sol, cisaiillés à une vitesse de cisaillement de 0.035 mm/min                                                                   | La pierre poreuse de l'appareil      | 50 kPa     | Proposer un Eprocédure d'essai pour la mesure de la résistance résiduelle                                                              |
|                                                            |                                                                                                                                                                                                                    |                                      | 100 kPa    |                                                                                                                                        |
|                                                            |                                                                                                                                                                                                                    |                                      | 200 kPa    |                                                                                                                                        |

## Chapitre 3 : Equipements, Matériaux et programme expérimental

---

### 3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré l'histoire des dispositifs annulaires, depuis leur toute première conception jusqu'à leur évolution à travers les différentes générations, notamment après la "deuxième Conférence de Rankine" où Skempton a ravivé l'importance de la résistance résiduelle. C'est à cette époque qu'ont été introduits les dispositifs de Bishop en 1971 et de Bromhead en 1979, qui sont devenus les plus couramment utilisés pour évaluer cette résistance. De plus, nous avons présenté le programme expérimental entrepris ainsi que les matériaux impliqués et leurs propriétés physiques.

## **Chapitre 4 :**

### **Présentation des résultats et discussion**

### 4 Présentation des résultats et discussion

#### 4.1 Effet de la teneur en eau et de la vitesse de cisaillement sur la résistance au cisaillement de pic et résiduelle

##### 4.1.1 Introduction

Les glissements de terrain sont devenus fréquents dans diverses régions du monde. Par exemple, dans la région des Trois Gorges en Chine, plus d'un millier de glissements de terrain ont été enregistrés, posant un risque pour la sécurité du barrage, menaçant la vie des résidents locaux et entravant le développement urbain. Ces zones sujettes aux glissements de terrain sont principalement composées de sols fins tels que l'argile limoneuse et l'argile. Afin d'améliorer la prédiction et l'analyse des glissements de terrain, il est crucial de considérer la structure des zones de cisaillement dans les sols fins. À l'échelle microscopique, les propriétés des structures de ces zones incluent la distribution de la taille des grains, leur forme, leur orientation ainsi que les interactions entre les grains. Ces caractéristiques évoluent au fil du temps, même après la formation d'une zone de cisaillement atteignant un état résiduel. Les propriétés de ces zones continuent de s'ajuster en fonction des changements environnementaux, tels que les fluctuations de l'humidité du sol et les variations de la vitesse de cisaillement induites par l'activité sismique. De petits changements environnementaux peuvent entraîner des changements significatifs dans la déformation, le comportement et la stabilité des glissements de terrain. Par conséquent, l'étude de ces réponses dans les sols fins soumis à de grands déplacements de cisaillement est cruciale pour comprendre le développement des glissements de terrain.

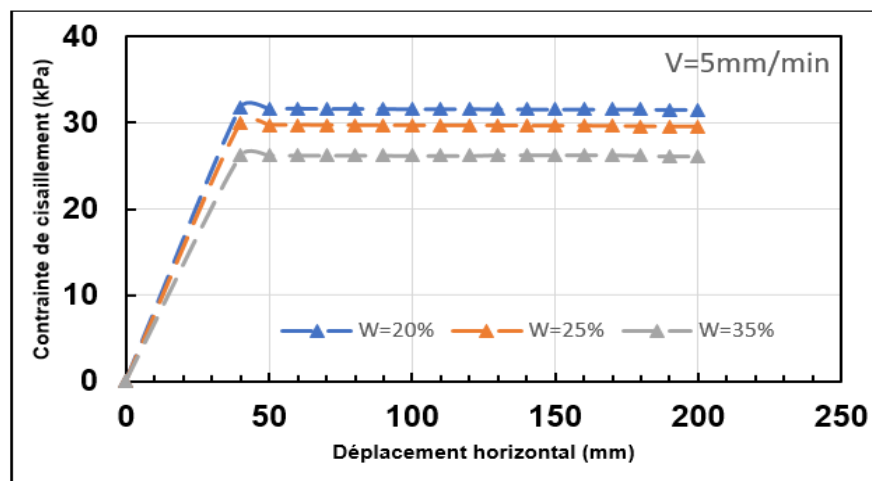
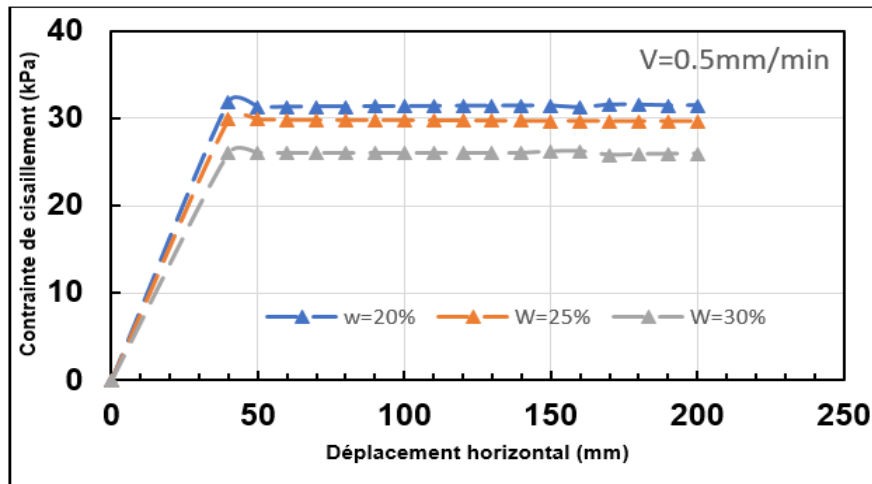
##### 4.1.2 Procédure expérimentale

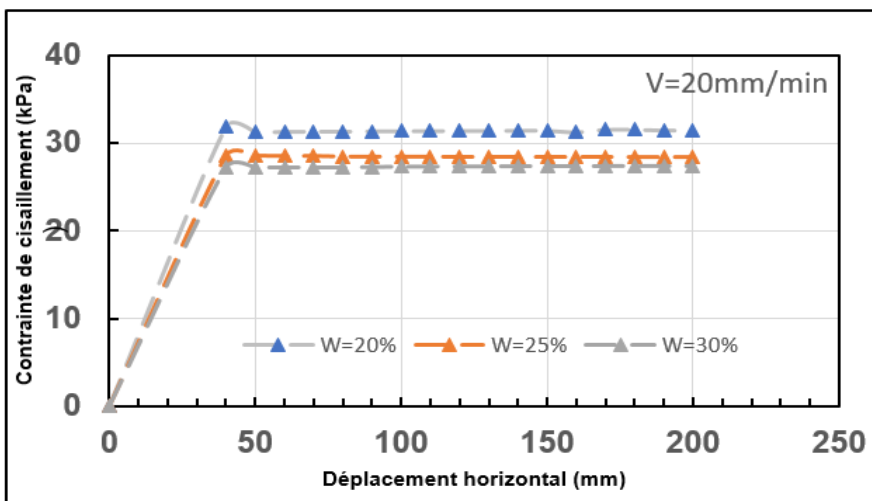
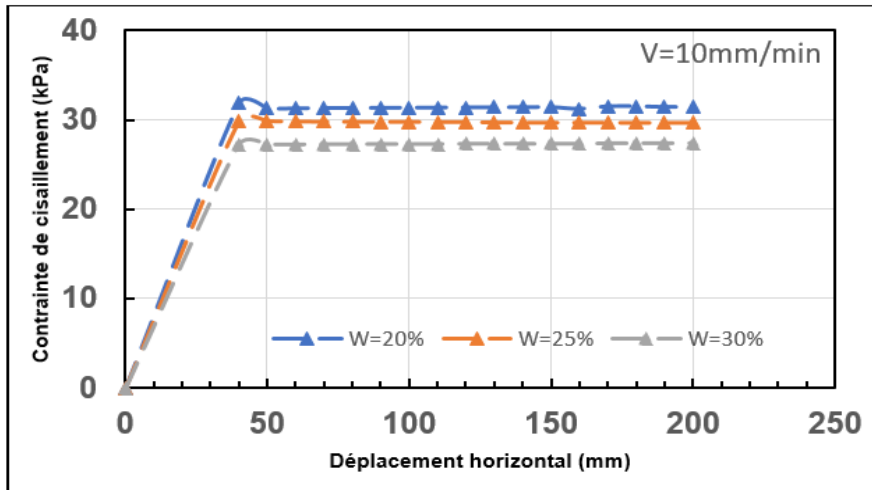
Un ensemble d'échantillons de kaolin et un mélange de kaolin-sable ont été préparés en mélangeant le sol sec avec l'eau distillée à des teneurs en eau de 20%, 25%, 30%. Pour les échantillons de mélange, 10%, 20% et 30% de sable (poids sec) ont été mélangés avec 90%, 80% et 70% de kaolin, respectivement. Un protocole de mélange a été utilisé pour préparer le mélange kaolin-sable, qui consiste à mélanger du kaolin sec, du sable sec et de l'eau distillée dans l'ordre kaolin- sable-eau. Le sable sec a été ajouté au kaolin sec progressivement, puis mélangé. Après avoir ajouté tout le sable, l'eau distillée est ajoutée à la teneur en eau désirée en fonction du poids total de l'échantillon. Puis le tout est mélangé en faisant tourner une baguette en verre agitatrice dans un récipient pendant 5 minutes jusqu'à ce qu'une homogénéisation visuelle soit observée. Pour étudier l'effet de la vitesse de cisaillement, le cisaillement a eu lieu à différentes vitesses de : 0.5 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min, 20 mm/min, respectivement pour chaque échantillon.

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

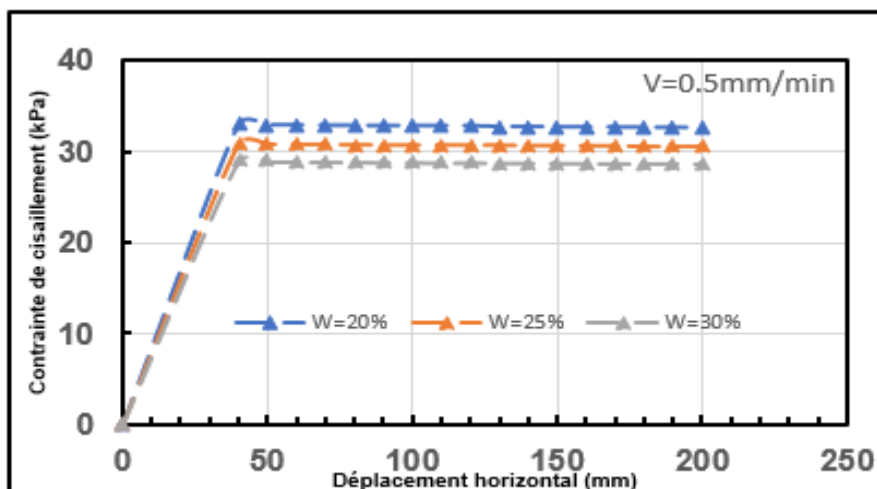
### 4.1.3 Discussion des résultats

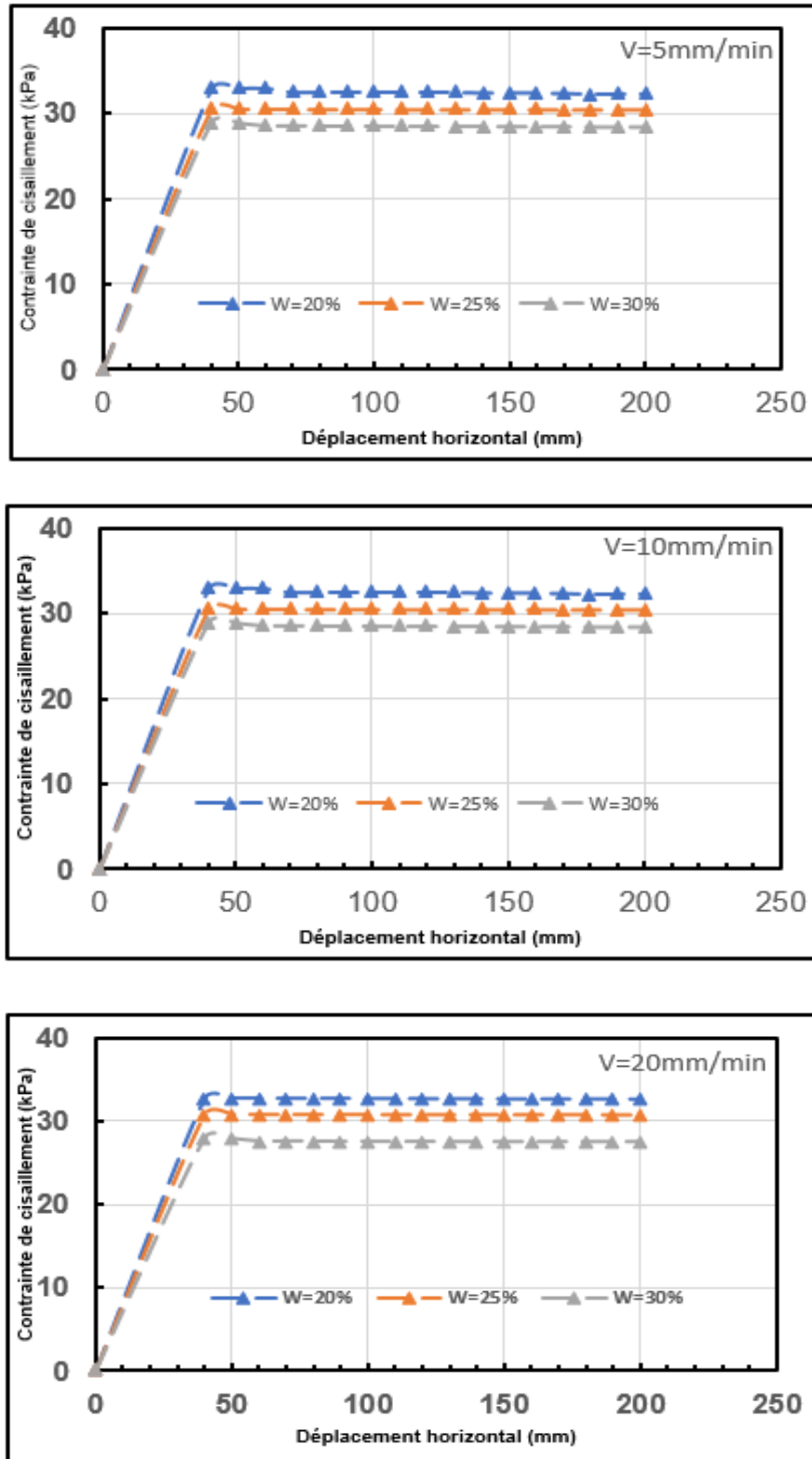
Les figures 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 représentent la variation de la résistance au cisaillement de l'interface au pic et résiduelle en fonction de la teneur en eau, soit 20%, 25%, 30%, pour des vitesses de cisaillement de : 0,5 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min, 20 mm/min, relatives au kaolin et les mélanges kaolin-sable : 90K+10S, 80K+20S, 70K+30S, respectivement





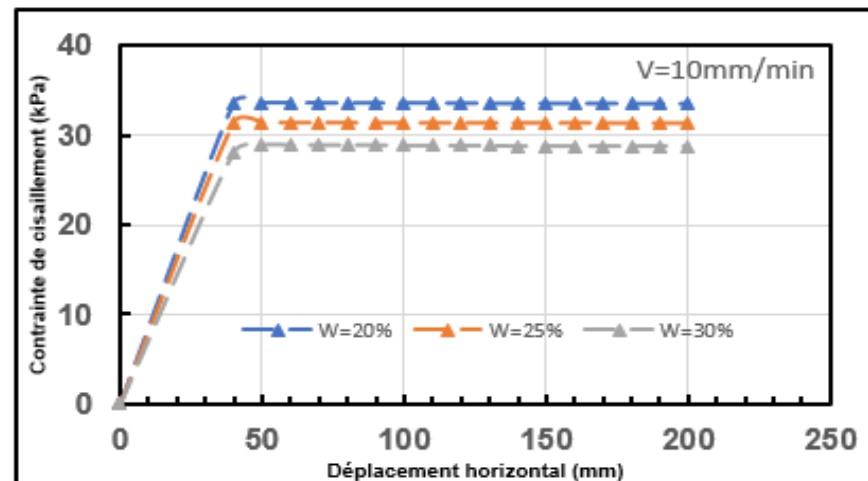
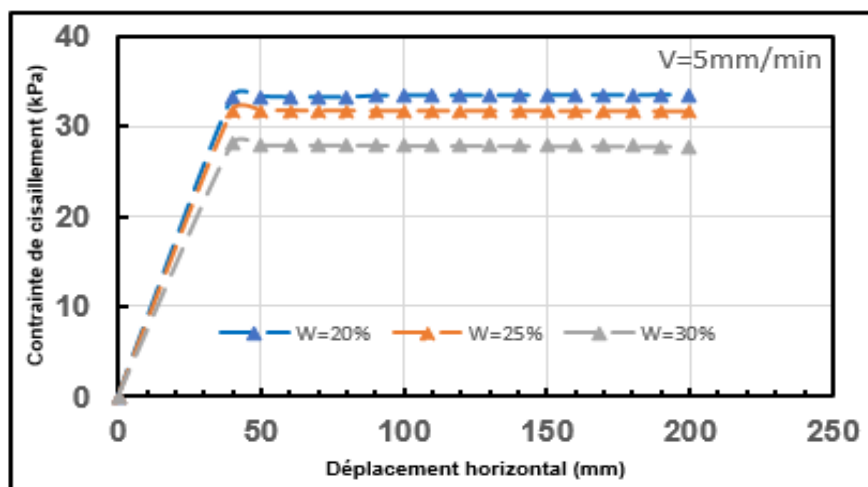
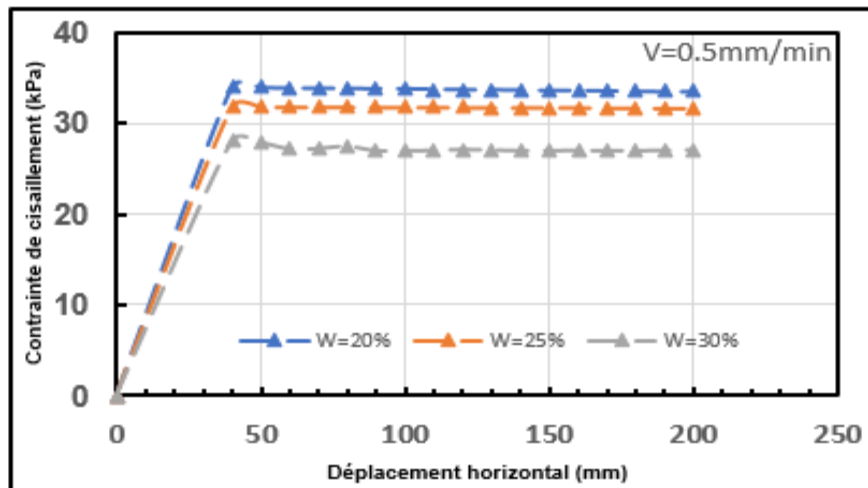
**Fig.4.1** Effet de la teneur en eau à 20%, 25%, 30% à des vitesses de cisaillement De :0.5 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min, 20 mm/min pour le kaolin



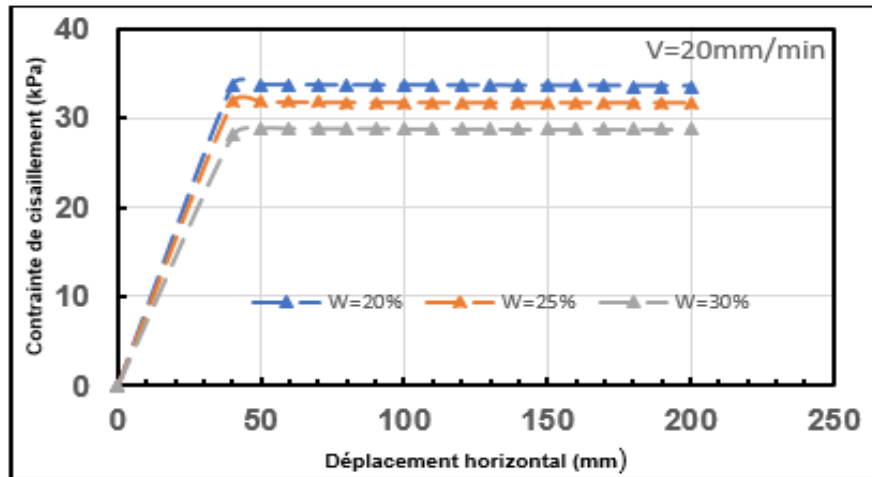


**Fig.4.2** Effet de la teneur en eau à 20%, 25%, 30% à des vitesses de cisaillement de : 0.5 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min, 20 mm/min pour le mélange 90K+10S.

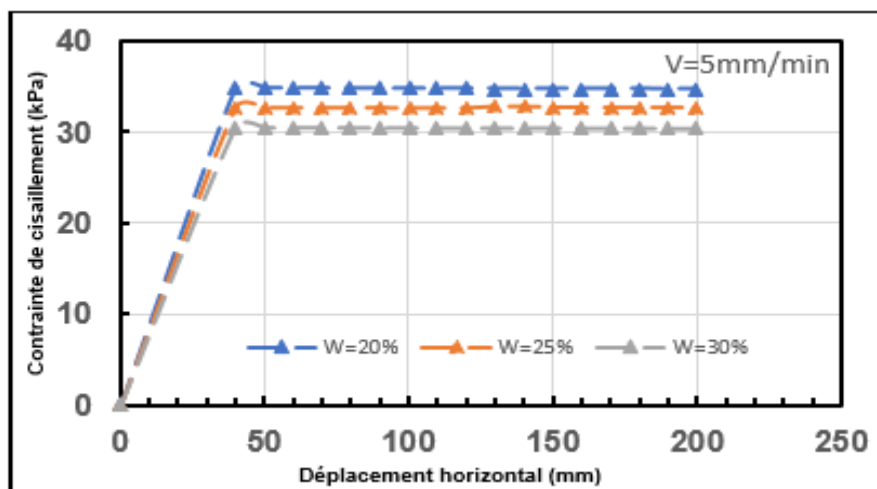
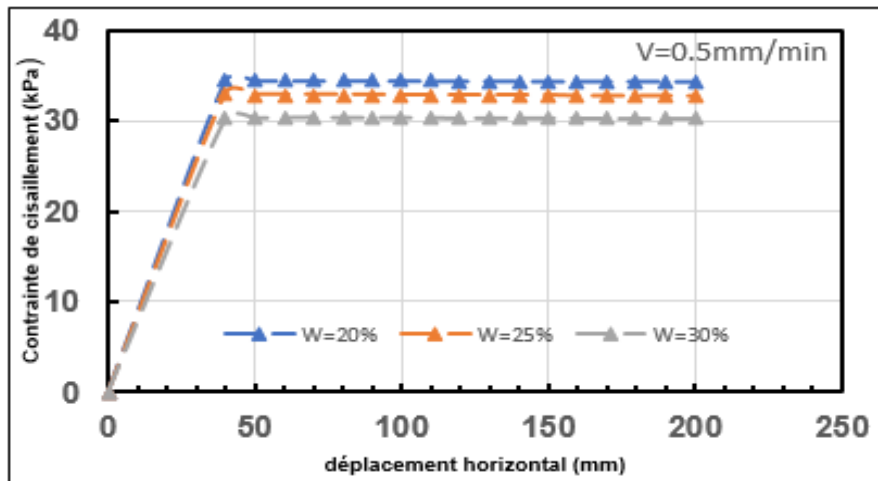
## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

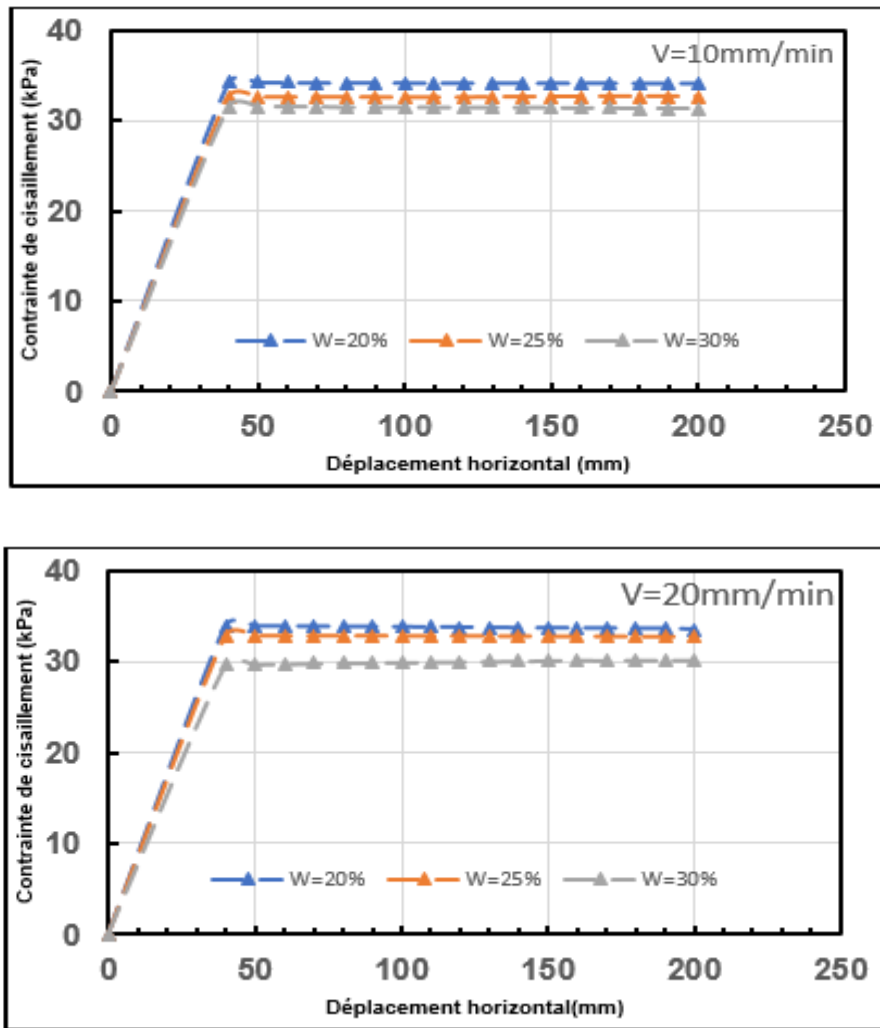


## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion



**Fig.4.3** Effet de la teneur en eau à 20%, 25%, 30% à des vitesses de cisaillement de : 0.5 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min, 20 mm/min pour le mélange 80K+20S.





**Fig.4.4** Effet de la teneur en eau à 20%, 25%, 30% à des vitesses de cisaillement

de :0.5 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min, 20 mm/min pour le mélange 70K+30S.

Comme le montre les Figures 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, Les résultats des essais réalisés sur le kaolin et le mélange indiquent que la résistance au cisaillement au pic et résiduelle diminue avec l'augmentation de la teneur en eau, et que la résistance au cisaillement au pic est légèrement supérieure à la résistance résiduelle. Ce phénomène peut être attribué à la distribution des tailles de grains au sein des zones de cisaillement et des couches adjacentes. De plus, il peut être attribué aux caractéristiques de surface de la zone de cisaillement, qui peuvent varier de rugueuses et denses à lisses et moins denses. Lunan Wang et al. (2020) ont examiné l'effet de la teneur en eau et la vitesse de cisaillement dans les zones de cisaillements des sols fins soumis aux grands déplacements sur une argile limoneuse. Trois séries d'essais ont été réalisées dénommés T1, T2, T3 avec des teneurs en eau 24.8%, 20.8%, 16.8%, respectivement et des vitesses de cisaillement de : 0.1, 0.5, 1, 5, 10 mm/min pour les trois séries d'essais. Ils

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

---

ont comparé la répartition des tailles de grains composant l'argile limoneuse, notamment le limon, l'argile et le sable, dans les zones de cisaillement ainsi que dans les couches adjacentes. Ils ont utilisé une classification comprenant une couche de référence appelée "BS" (before shearing) avant le cisaillement, et après cisaillement comprenant 5 couches désignées A, B, C, D, E. La couche C représente la zone de cisaillement, tandis que les couches B et D sont adjacentes à celle-ci, et les couches A et E sont les plus éloignées de la zone de cisaillement. Les résultats des essais ont montré que les variations de la taille des grains étaient inégales entre les couches, avec une redistribution notable dans la zone de cisaillement (C), où le sable diminuait et l'argile augmentait significativement en volume. Les variations de la fraction de limon étaient négligeables. Dans les couches éloignées de la zone de cisaillement (A et E), les variations étaient imperceptibles, mais une redistribution importante était observée dans les couches de transition (B et D), en particulier dans le test T1. Indépendamment de la teneur en eau de l'échantillon, l'argile augmentait progressivement de A à C et diminuait progressivement de C à E, suggérant une concentration des particules d'argile autour des plans de cisaillement. De plus, la redistribution des grains était influencée par la teneur en eau de l'échantillon.

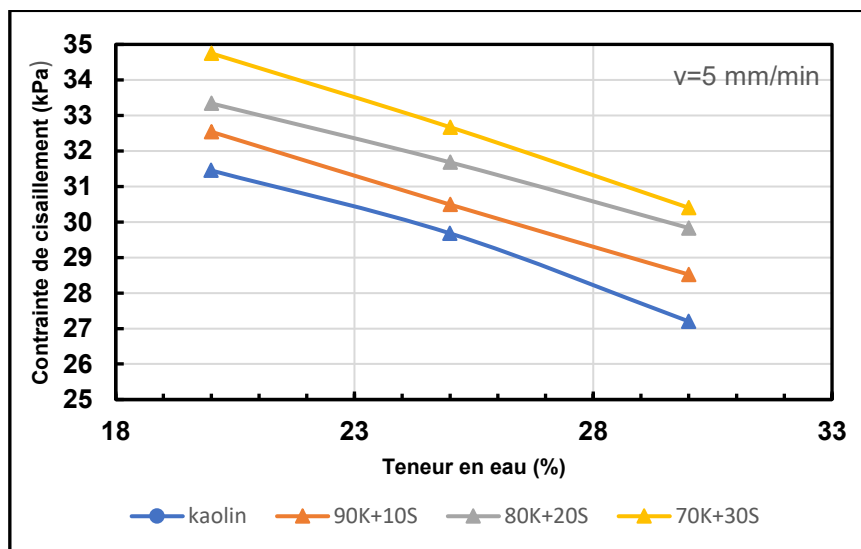
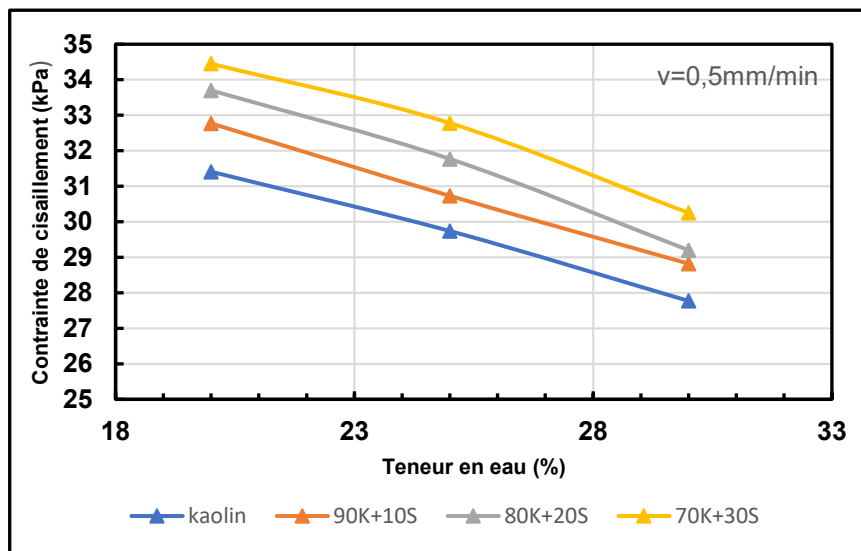
Des images ont également été prises par le microscope à balayage au niveau des zones de cisaillement. La magnification des images est maintenue à 100 pour enquêter de manière exhaustive sur les structures de la zone de cisaillement. Une surface lisse de cisaillement a été observée pour une teneur en eau élevée de 24,8% (T1), avec un indice de vide correspondant de 0,12. En diminuant la teneur en eau, la surface devient de plus en plus rugueuse et l'indice de vide augmente jusqu'à atteindre un maximum de 0,42. De plus, le pourcentage en volume de sable augmente tandis que le pourcentage en argile diminue en passant de la teneur en eau la plus élevée à la plus faible. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'après un cisaillement à grand déplacement, la concentration de la fraction argileuse autour des plans de cisaillement était importante dans les échantillons avec une forte teneur en eau. Les plans de cisaillement correspondants apparaissaient lisses et denses, ce qui entraînait une résistance au cisaillement et une porosité plus faible des échantillons. Tandis que la concentration de la fraction argileuse autour des plans de cisaillement n'était pas évidente et que les plans de cisaillement correspondants apparaissaient rugueux et poreux dans les échantillons avec une faible teneur en eau, entraînant ainsi une résistance au cisaillement élevée et une porosité importante.

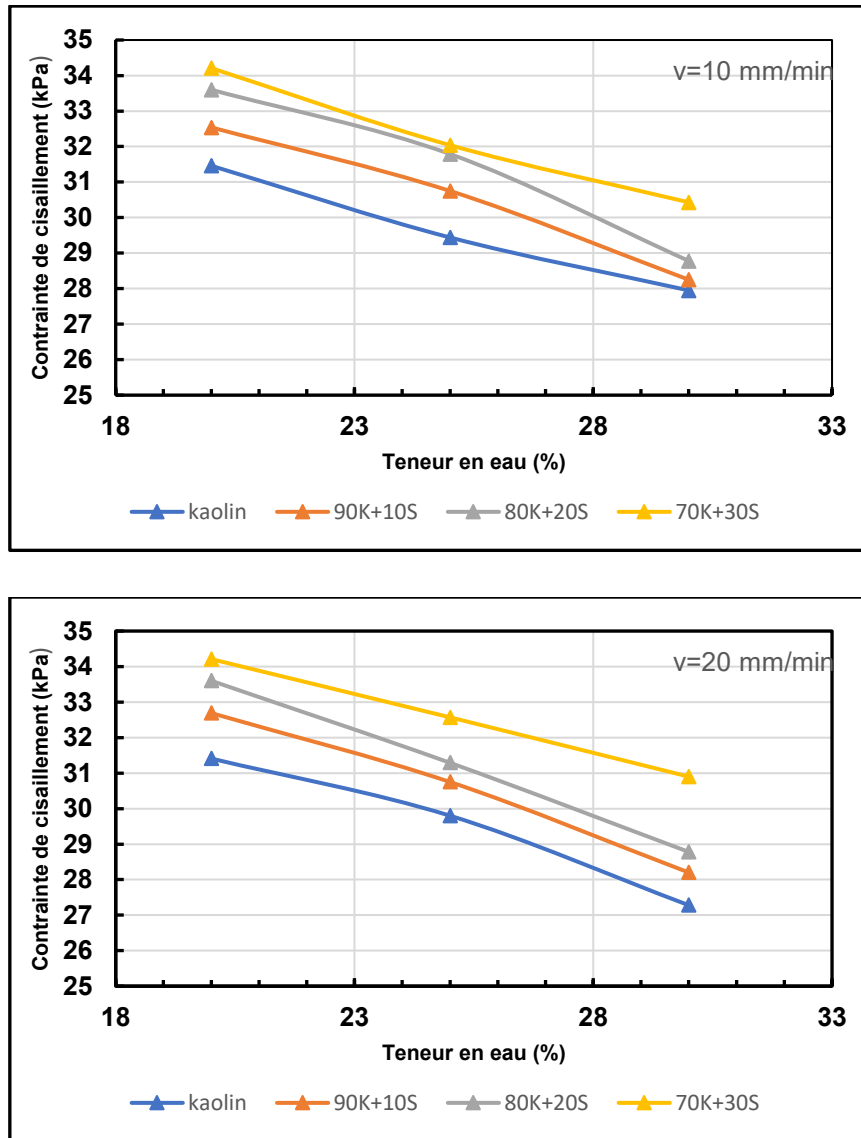
Dans ce contexte, nous avons également observé lors de nos essais que l'ajout de sable conduit à l'obtention de résistances au cisaillement supérieures à celles du kaolin. Plus le pourcentage en volume de sable augmente, plus la résistance au cisaillement augmente, passant

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

de 10% à 30% pour les échantillons 90K+10S, 80K+20S, 70K+30S, respectivement comme illustré dans la figure 4.5.

À partir de la figure 4.5, il est également possible de constater que l'effet de la vitesse de cisaillement avec la teneur en eau simultanément sur la résistance au cisaillement de l'interface pour la gamme des vitesses de cisaillement sélectionnées est presque négligeable. Par exemple, en passant de la vitesse de 0,5 mm/min à 20 mm/min, la résistance au cisaillement pour une teneur en eau de 20% ne semble pas être affectée par le changement de la vitesse de cisaillement.





**Fig.4.5** Diagrammes représentant la relation contrainte de cisaillement-teneurs en eau pour des domaines de vitesse de cisaillement de 0.5 à 20 mm/min pour les sols étudiés

Yanchao Wang et Lu Cong ont conduit une série de 25 essais de cisaillement annulaire sur des sols provenant du glissement de terrain de Zhangjiawu le long de la rive du réservoir du projet des Trois Gorges, en Chine. Différentes teneurs en eau (6, 9 et 12 %), vitesses de cisaillement (0,5, 5,0 et 50 mm/min) et niveaux de contrainte normale (25, 50, 100, 200, 300 et 400 kPa) ont été utilisées. Ils ont constaté que la différence de contrainte au cisaillement correspondante au teneur en eau 9% ( $\tau_9$ ) et 6% ( $\tau_6$ ) lorsque la contrainte normale  $\sigma_n$  était inférieure à 200 kPa, et à la vitesse de cisaillement 0,5 mm/min était très minimale, nettement moins importante que lorsque était 5,0 et 50,0 mm/min. Par conséquent, ils ont conclu que pour appliquer la résistance résiduelle mesurée d'essais de cisaillement annulaire afin d'évaluer la stabilité d'un glissement de terrain peu profond, qui se trouve sous des conditions non drainées

et des pressions de surcharge plus faibles ( $< 200$  kPa), il est préférable et conseillé d'obtenir la contrainte résiduelle du sol de glissement à une vitesse de cisaillement plus faible pour minimiser l'effet négatif de la teneur en eau.

### 4.1.4 Conclusion :

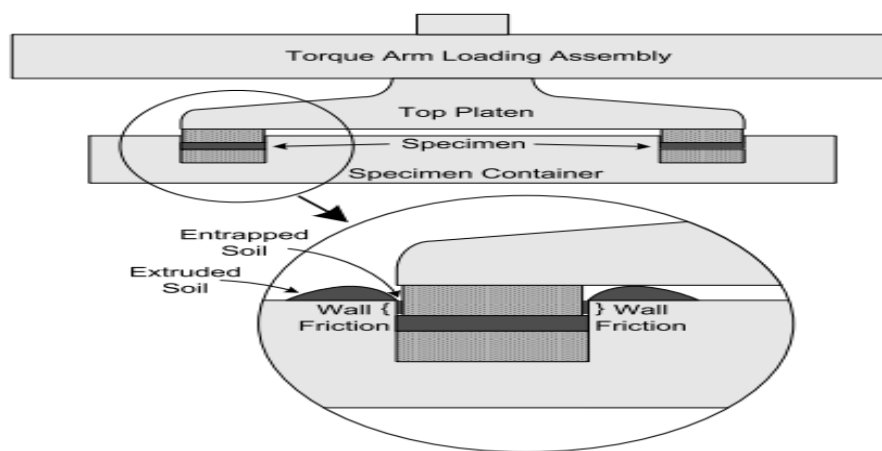
Dans cette partie du programme expérimental dédiée à l'étude de l'effet de la teneur en eau et de la vitesse de cisaillement sur la résistance au cisaillement à l'interface sol-structure, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La résistance au cisaillement de l'interface, qu'elle soit au pic ou résiduelle, diminue avec l'augmentation de la teneur en eau.
- L'effet négatif de la teneur en eau sur la résistance au cisaillement de l'interface peut être attribué à la distribution des tailles de grains dans les couches de cisaillement et les couches adjacentes.
- Les zones de cisaillement présentant une forte teneur en eau se caractérisent par des surfaces lisses et denses avec des indices des vides faibles, ce qui conduit à des résistances au cisaillement et une porosité faibles. En revanche, à des faibles teneurs en eau, ces zones se caractérisent par des surfaces de plus en plus rugueuses et moins denses avec des indices des vides élevés, ce qui conduit à des résistances au cisaillement et une porosité élevées.
- La plage de vitesses de cisaillement sélectionnées ne semble pas avoir d'impact sur la résistance au cisaillement.

### 4.2 Effet du frottement mural sur la résistance résiduelle

#### 4.2.1 Introduction

L'appareil de Bromhead est largement utilisé pour évaluer la résistance résiduelle, mais plusieurs chercheurs ont examiné ses limites. La principale critique concerne le frottement mural, également connu sous le nom de "wall friction" ou "side friction". Ce phénomène résulte de l'enfoncement de la pierre poreuse supérieure dans le conteneur, résultant à l'extrusion du sol. Le frottement mural se résulte du frottement du sol avec la pierre poreuse supérieure, les parois internes et externes des anneaux de confinement. À mesure que la pierre poreuse s'enfonce davantage dans le conteneur, le frottement mural s'intensifie.



**Fig. 4.6** Mécanisme de développement du frottement mural (D'après Mehan et al. 2007).

Le frottement mural se produit lors de la consolidation, du pré-cisaillement et du cisaillement, comme l'ont identifié Mehan et al. (2007). Stark et Vettel (1992) ont également souligné que la principale source d'erreur affectant les valeurs de la résistance résiduelle obtenues avec l'appareil de Bromhead est le frottement mural. Cependant, cet effet du frottement mural n'est pas observé dans les appareils NGI et Harvard, Dont le confinement est assuré par une paire d'anneaux séparés. Beaucoup de chercheurs se sont efforcés pour arriver aux procédures d'essais de cisaillement annulaires plus performantes et ont tenté d'améliorer les différents composants d'appareils de cisaillement annulaire visant à minimiser l'effet du frottement mural (Anayi et al. (1989), Stark et Eid (1993), Meehan et al. (2007)).

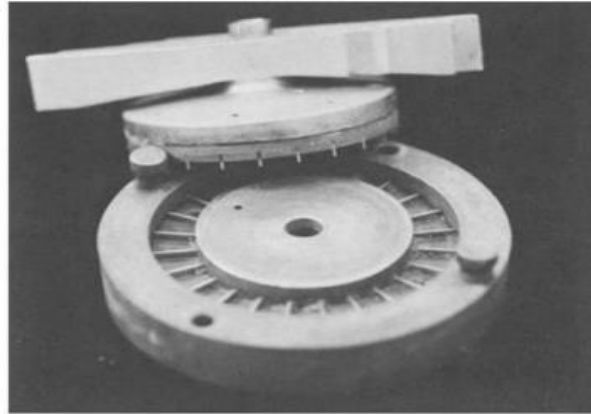
Ces auteurs examinent au total quatre procédures, à savoir les procédures "single stage", "multistage", "preshearing" et "flush" (Stark et Vettel, 1992).

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

---

- La procédure d'essai "single stage" : consiste à consolider l'échantillon du sol testé sous la contrainte normale désirée, puis initier le cisaillement annulaire drainé en utilisant un seul échantillon.
- La procédure d'essai "précisaillement" : consiste à consolider l'échantillon du sol testé sous la contrainte normale désirée. Ensuite, imposer un précisaillement avec une vitesse relativement rapide, puis lancer le cisaillement annulaire drainé en utilisant un seul échantillon.
- La procédure "Multistage" : consiste à consolider l'échantillon du sol testé sous la première contrainte normale désirée, puis initier le cisaillement sous la même contrainte normale. Ensuite, en augmentant progressivement la contrainte normale, doublant sa valeur et suivant les mêmes étapes précédentes, Ce processus se répète jusqu'à ce que l'enveloppe des contraintes de cisaillement en fonction des contraintes normales soit déterminée, tout cela à partir d'un unique échantillon.
- La procédure "Flush" proposée par Stark et Vettel (1992) : consiste à consolider l'échantillon du sol testé sous la contrainte normale désirée. Puis ajouter du sol remanié à nouveau jusqu'à rebord en lui imposer la même contrainte normale (reconsolider). Cette technique vise à minimiser l'extrusion de sol durant la consolidation et le cisaillement.

Les travaux d'Anderson et Hammoud (1988) sur deux types d'argiles normalement consolidées ont révélé que les sols contenant plus 50 % de particules d'argile ne donnaient pas de résultats acceptables pour la procédure "Multistage" en comparaison avec la procédure "singlestage". Pour palier au inconvénient de débalancement des forces mesurées par les anneaux de mesure, et pour transférer plus efficacement le torque à l'échantillon, Anay et al. (1989) ont inséré de petites aubes dans la pierre poreuse supérieure. Les aubes mesurent 0,6 cm de long et s'étendent de 0,3 cm dans la pierre poreuse supérieure et de 0,3 cm dans l'échantillon (Fig 4.7). Les nouvelles dispositions ont efficacement surmonté le problème de débalancement. Cependant, cela a également contribué au déplacement du plan de rupture vers le centre de l'échantillon. Bien qu'il soit efficace pour limiter l'extrusion du sol, ce dispositif a également provoqué une augmentation de la surface de contact entre la section tournante de l'échantillon et les parois fixes de l'anneau de confinement. Cela a conduit à une hausse du frottement mural, ce qui a finalement affecté la qualité des résultats, les rendant moins précis.



**Fig. 4.7** Pierre poreuse modifié par Anay et al. (1989)

Stark et Eid (1993) proposent d'autres modifications au conteneur de l'échantillon, accompagnés d'une nouvelle procédure d'essai. Les modifications consistent à surconsolider l'échantillon dans un conteneur modifié, permettant également de pré-découper l'échantillon avant qu'il ne soit soumis à un essai multistage. Cette procédure est avantageuse, car il permet d'établir plus rapidement les conditions résiduelles en utilisant un seul échantillon pour toutes les phases. Ces ajustements ont permis d'obtenir des tassements inférieurs à ceux limités par Stark et Vettel (1992). Ainsi, les déplacements nécessaires pour atteindre les conditions résiduelles sont réduits de manière similaire à la méthode de "preshearing", mais sans les inconvénients qui y sont associés. Cette méthode permet d'obtenir des résultats compatibles avec ceux de la littérature de manière bien plus efficace que la procédure "flush" proposée par Stark et Vettel (1992). Kakou et al. (2002) ont proposé la procédure de "presheared flush", qui implique de pré-cisailler l'échantillon avant d'utiliser la procédure de "flush". Cette démarche a entraîné des valeurs de résistance résiduelle inférieures par rapport à la procédure "flush" à la suite des essais réalisés sur des échantillons d'argile du tunnel de Niigata. Meehan et al. (2007) suggèrent également des ajustements à la pierre poreuse supérieure (Fig. 4.8). Ils recommandent de découper un biseau à 45° sur son pourtour, ce qui diminue la surface de contact avec les parois du conteneur d'échantillon. Ainsi, l'intensité du frottement mural est abaissée à un niveau où son impact sur la résistance au cisaillement résiduelle mesuré et la contrainte verticale appliquée devient insignifiant. Ding Shu-yun et al. (2013) ont examiné l'impact des procédures d'essai dans un appareil de cisaillement annulaire. Ils ont comparé les résultats des procédures d'essai "single stage" et "multistage" sur du sable. Leurs conclusions indiquaient que la procédure "multistage" produisait des valeurs plus élevées de résistance résiduelle par rapport à la procédure "single stage". Cette différence était attribuée à l'accumulation de sol extrudé dû

au cisaillement et la consolidation à chaque phase, entraînant ainsi une augmentation du frottement mural.

a)



b)



**Fig. 4.8** (a) plateau superieur de l'appareil (b) plateau superieur modifie

Meehan et al. (2007)

Sélectionner la procédure d'essai la plus efficace et optimale implique d'obtenir une résistance au cisaillement en bonne accord avec les valeurs estimées auparavant de l'historique de cas du terrain. Cela peut être réalisé en examinant comment les tassements résultant de la consolidation, du pré-cisaillement et du cisaillement influent sur la résistance au cisaillement dans diverses procédures d'essai. Cette étude examine spécifiquement l'effet de frottement mural sur la résistance au cisaillement résultant de la consolidation.

### 4.2.2 Procédure expérimentale :

Afin d'évaluer l'effet du frottement mural, un ensemble d'échantillons de kaolin dans état remanié a été préparé. Le sol initialement est à l'état sec en poudre auquel l'eau distillé est ajoutée visant à obtenir une teneur en eau égale à 1,2 fois sa limite de liquidité. Les échantillons ont été déposés dans le conteneur à l'aide d'une spatule, puis placés dans l'appareil de cisaillement annulaire. Avant d'initier le cisaillement, et afin d'examiner plus efficacement l'effet du frottement mural résultant de la consolidation dans les différentes procédures d'essai, un processus de consolidation a été effectué avec quatre durées distinctes : 0 minute, 15 minutes, 30 minutes et 45 minutes. Chaque durée a été sélectionnée pour produire des tassements de plateau supérieurs variables. Ensuite, les tassements finaux pour les procédures d'essai "single stage", "preashearing" et "multistage" ont été comparés. Dans les deux premières procédures, une vitesse cisaillement de 0,035 mm/min a été appliquée. Cependant, dans le cas de la procédure d'essai "preashearing", une vitesse de cisaillement rapide de 15 mm/min a été utilisée pour créer une surface de cisaillement, et le cisaillement drainé est initié avec une vitesse de

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

cisaillement plus lente de 0,035 mm/min. Des vitesses de cisaillement lentes ont été sélectionnées en utilisant l'équation suivante (issue de l'ASTM D 6467-99) :

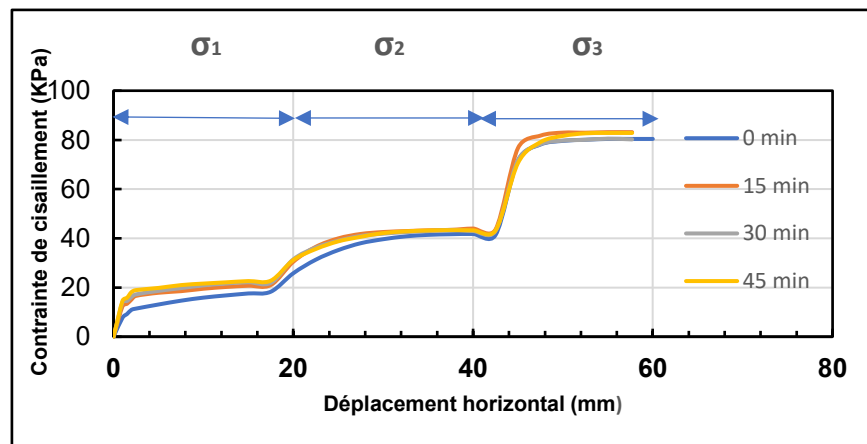
$$\text{Displacement rate} = \frac{\text{Dis.at failure}}{\text{time to failure}} = \frac{5 \text{ mm}}{50 \times t_{50}} \quad (4.1)$$

$t_{50}$ : temps nécessaire pour atteindre 50% de consolidation

### 4.2.3 Discussion des résultats

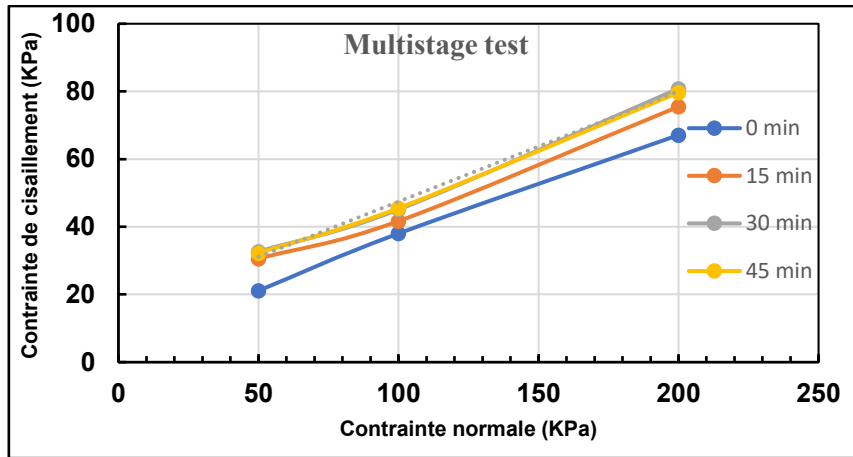
**Tableau 4.1** Le tassement vertical initial et final en fonction de temps de consolidation pour les différentes procédures d'essai

|                                 | Le temps de consolidation | Multistage test |            |            | single stage test |            |            | Preashearing test |            |            |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------|------------|------------|-------------------|------------|------------|-------------------|------------|------------|
|                                 |                           | $\sigma_1$      | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_1$        | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_1$        | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ |
| Le déplacement vertical initial | 0 min                     | 0               | 0.82       | 0          | 0                 | 0          | 0          | 0                 | 0          | 0          |
|                                 | 15 min                    | 0.3             | 0.9        | 1.04       | 0.2               | 0.2        | 0.1        | 0.3               | 0.42       | 0.49       |
|                                 | 30 min                    | 0.3             | 1          | 1.1        | 0.26              | 0.2        | 0.1        | 0.36              | 0.5        | 0.55       |
|                                 | 45 min                    | 0.2             | 0.9        | 1.2        | 0.3               | 0.3        | 0.2        | 0.4               | 0.56       | 0.61       |
| Le déplacement vertical final   | 0 min                     | 0.82            | 1.04       | 1.04       | 0.63              | 0.67       | 0.39       | 0.92              | 1.2        | 1.61       |
|                                 | 15 min                    | 0.9             | 1.1        | 1.1        | 0.8               | 0.8        | 0.5        | 0.85              | 0.91       | 1.5        |
|                                 | 30 min                    | 1               | 1.1        | 1.8        | 0.6               | 0.6        | 0.6        | 0.9               | 0.98       | 1.62       |
|                                 | 45 min                    | 0.9             | 1.1        | 1.2        | 0.7               | 0.7        | 0.5        | 0.89              | 0.94       | 1.58       |

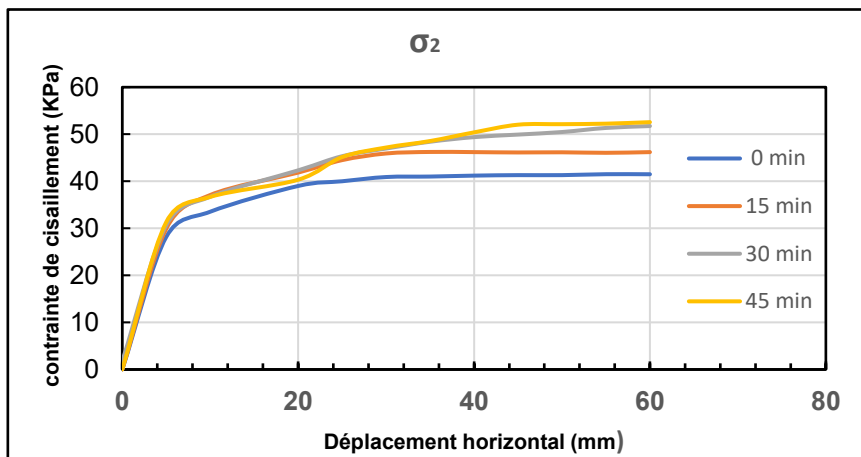
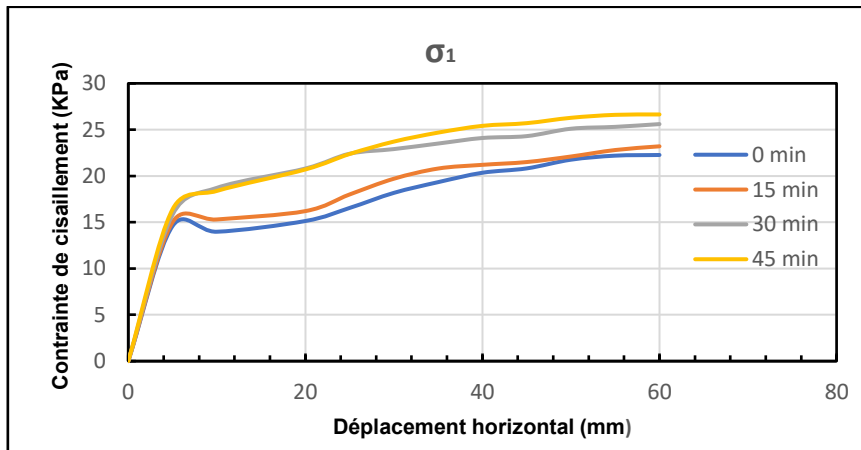


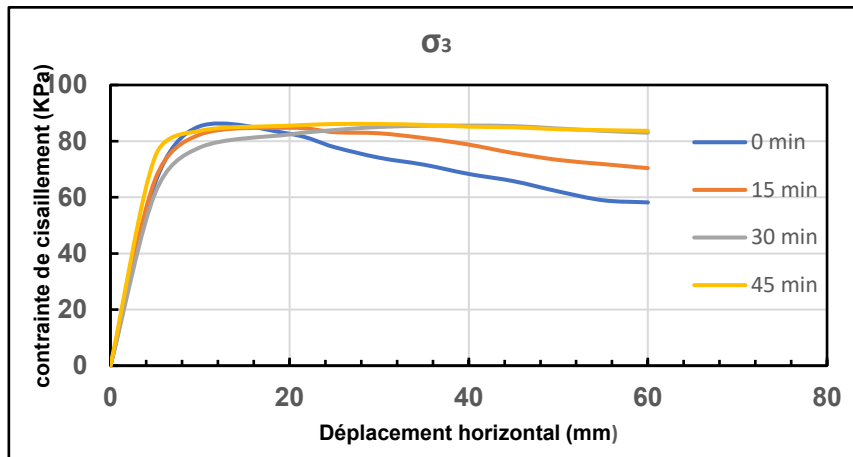
**Fig. 4.9** Courbe de cisaillement-déplacement en fonction du temps consolidation pour la procédure d'essai Multistage : a)  $\sigma_1=32$  kPa, b)  $\sigma_2=101,66$  kPa, c)  $\sigma_3=202,64$  kPa

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

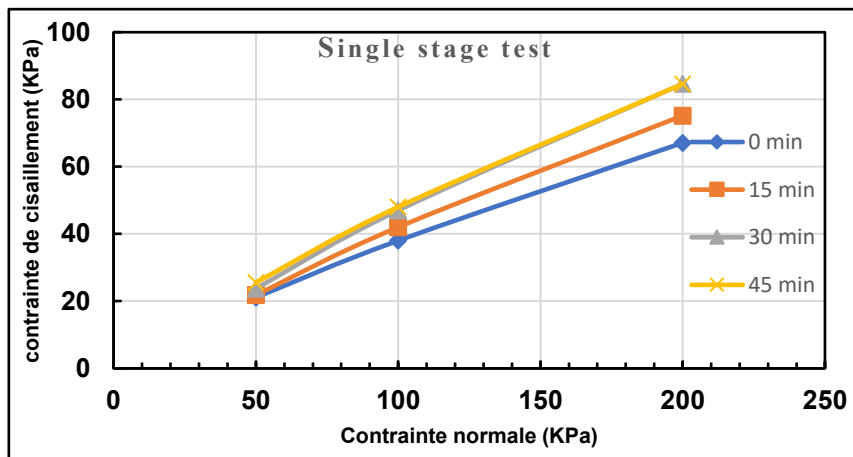


**Fig. 4.10** Courbe de contrainte cisaillement- contrainte normal en fonction du temps de consolidation pour la procédure d'essai Multistage

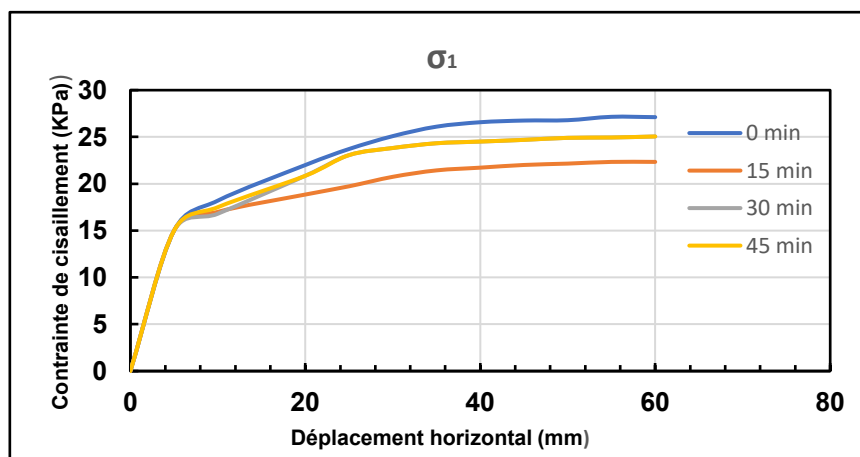


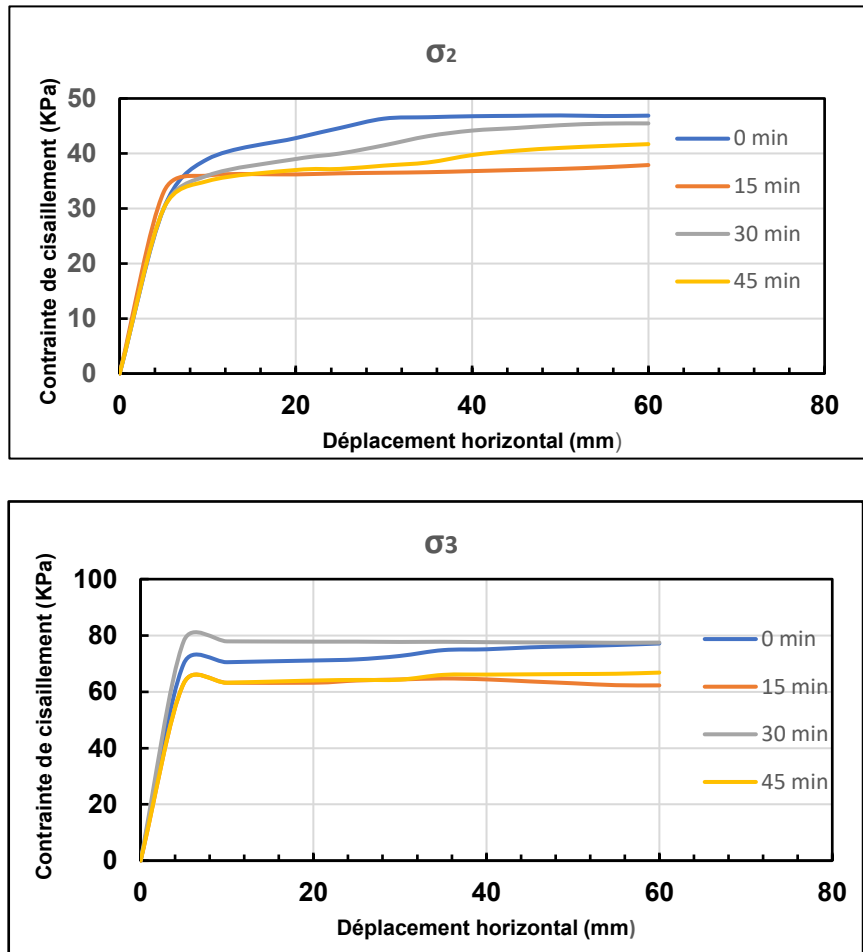


**Fig. 4.11** Courbe de cisaillement-déplacement en fonction du temps consolidation pour la procédure d'essai Single stage : a)  $\sigma_1=32$  kPa, b)  $\sigma_2=101,66$  kPa, c)  $\sigma_3=202,64$  kPa

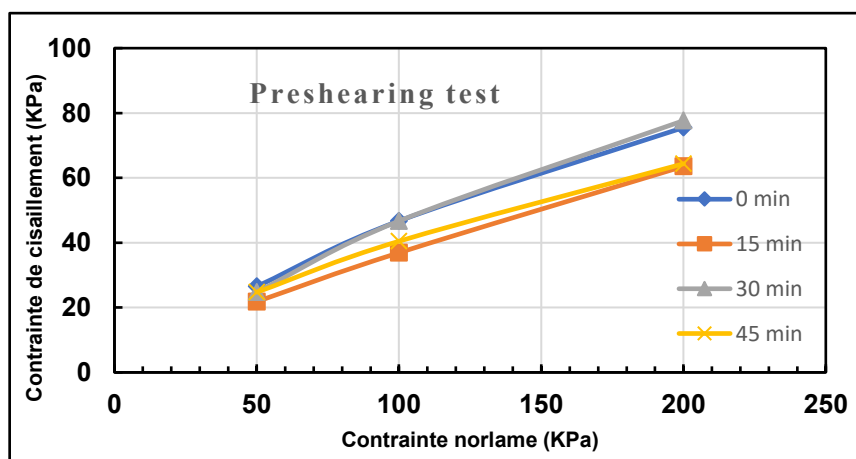


**Fig. 4.12** Courbe de contrainte cisaillement- contrainte normal en fonction du temps de consolidation pour la procédure d'essai Single stage





**Fig. 4.13** Courbe de cisaillement-déplacement en fonction du temps consolidation pour la procédure d'essai Preshearing : a)  $\sigma_1=32$  kPa, b)  $\sigma_2=101,66$  kPa, c)  $\sigma_3=202,64$  kPa



**Fig. 4.14** Courbe de contrainte cisaillement- contrainte normal en fonction du temps de consolidation pour la procédure d'essai Single stage

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

---

Dans la procédure ‘‘multistage’’, il y a une accumulation progressive des effets de frottement mural dû à la consolidation et au cisaillement à chaque phase, principalement en raison de l'utilisation du même échantillon tout au long de toutes les phases. Le frottement mural maximal se produit au niveau de la contrainte normale finale. Il est important de noter que la résistance résiduelle de la phase précédente a tendance à être moins surestimée par rapport à la phase suivante. En examinant la Fig. 4.9, nous pouvons faire plusieurs observations clés. Toutes les courbes de résistance au cisaillement présentent une tendance cohérente, et il est évident la contrainte de cisaillement augmente rapidement, atteignant un pic à un déplacement de cisaillement d'environ 5 mm. Il convient de noter que la résistance au cisaillement au temps de consolidation de 0 minute est légèrement inférieure à celle observée après des consolidations de 15, 30 et 45 minutes. Lorsque l'on regarde les temps de consolidation de 15, 30 et 45 minutes, leurs courbes de résistance au cisaillement presque se coïncide, en particulier au niveau de contraintes normales  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ . En examinant la Fig. 4.10 qui représente la relation entre la contrainte de cisaillement et la contrainte normale, les angles de frottement résiduel sécant ont été déterminés comme étant de  $16,69^\circ$ ,  $17,20^\circ$ ,  $17,74^\circ$  et  $17,81^\circ$  pour des temps de consolidation de 0, 15, 30 et 45 minutes, respectivement. On peut voir que les angles de frottement résiduel correspondant au temps 0 min est inférieur à celles des temps de consolidation de 15, 30, 45 minutes qui sont très proches. De plus, les valeurs des tassements finaux montrent que celles des temps de consolidation de 15, 30, 45 minutes sont très proches et supérieures à celle de 0 minutes (Tableau 4.1). Cela peut s'expliquer par le fait qu'au temps de consolidation de 0 min, aucune consolidation n'a été autorisée avant le cisaillement et le cisaillement a été initié immédiatement après avoir placé le conteneur dans le dispositif et réglé le capteur de déplacement vertical. Par conséquent, aucune intrusion du plateau supérieur dans l'échantillon ou extrusion du sol n'a été produite. Au fur et à mesure que le temps passait de 15 à 45 minutes, plus de tassements se sont produits, entraînant une augmentation de l'effet de frottement mural. L'accumulation de sol commence à la phase 2 ( $\sigma_2$ ) avec le dépôt du sol extrudé de la phase 1 ( $\sigma_1$ ) sur le sol extrudé à la phase 2, et se poursuit jusqu'à la phase 3 ( $\sigma_3$ ) en ajoutant le sol extrudé des phases 1 et 2 à celui de la phase 3. C'est pourquoi il existe une légère différence entre les courbes de cisaillement au niveau de la phase 1, qui finissent par se coïncident au niveau des phases 2 et 3.

Dans la procédure ‘‘single stage’’, l'échantillon est chargé jusqu'à la contrainte normale désirée et cisailé une fois, puis un nouvel échantillon est utilisé pour l'essai suivant. A partir de la Fig. 4.11 la contrainte de cisaillement augmente et atteint rapidement un pic à un déplacement

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

---

horizontal d'environ 5 mm. À un temps de consolidation de 0 minutes, la plus faible contrainte de cisaillement est enregistrée. A un temps de consolidation plus long, la résistance résiduelle montre une augmentation. Cela est dû au fait que plus le plateau supérieur s'enfonce dans le conteneur, plus la quantité du sol extrudée est importante. Contrairement aux courbes observées dans la procédure "multistage", les courbes dans la procédure "single stage" présentent une distinction notable, cela devient évident en examinant la Fig. 4.12, où les angles de frottement résiduel sécant dérivés de cette figure ont été mesurés à 16,9°, 19,96°, 21,8°, 21,3° pour un temps de consolidation de 0, 15, 30, 45 minutes, respectivement. Ces valeurs reflètent clairement la distinction notable observée dans les courbes, confirmant cette observation. Les déplacements verticaux finaux également présentent une variation significative comme le montre le tableau 4.1. Le tassement dû à la consolidation, cumulé au tassement provoqué par le cisaillement, qui est nettement supérieur à celui de la consolidation, entraîne l'extrusion d'une quantité de sol et une surestimation de la contrainte de cisaillement résiduelle. Cette quantité augmente progressivement avec le temps de consolidation. Dans la procédure "single stage", où un seul échantillon est utilisé pour un essai, cet effet de variation du temps de consolidation sera clairement visible d'un essai à l'autre. En revanche, dans la procédure "multistage", l'accumulation progressive du sol extrudé dans chaque phase rend l'effet de consolidation négligeable tant que le tassement lors du cisaillement est supérieur à celui de la consolidation.

Dans la procédure "preshearing", l'échantillon subit un processus de pré-cisaillement initial à une vitesse de cisaillement rapide pour créer une surface de cisaillement, suivi d'un cisaillement ultérieur à une vitesse de cisaillement lente. Dans le contexte de la procédure "preshearing", de manière similaire, la figure 4.13 montre que la contrainte de cisaillement augmente rapidement et atteint son pic autour de 5 mm de déplacement horizontal, bien qu'il n'y ait pas d'une tendance cohérente dans les courbes de contrainte de cisaillement. Cette divergence résulte des variations des tassements du plateau supérieur qui se sont produits au cours des phases de cisaillement rapide et lent, qui diffèrent d'un temps de consolidation à un autre. Il est important de noter que le tassement final d'un échantillon avec un temps de consolidation plus court peut dépasser celui d'un échantillon avec un temps de consolidation plus long, même lorsque le premier n'a pas eu de tassement initial, comme le montrent les données du déplacement final du tableau 4.1.

### 4.2.4 Conclusion

- L'effet du frottement mural sur la résistance résiduelle induit par la variation de temps de consolidation pour la procédure multistage est négligeable, notamment pour les

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

---

phases 2 et 3. Ceci est dû à l'utilisation d'un seul échantillon pour toutes les phases qui est à l'origine de l'accumulation de sol qui commence à partir de la phase de 2, ainsi qu'au fait que les tassements dus à la consolidation sont moins importants par rapport à celles dus au cisaillement.

- Pour procédure single stage, cet effet, de 0 min à 45 min, est notable. Ceci s'explique par l'utilisation d'un seul échantillon pour chaque essai et chaque phase de contrainte conduisant à l'évitement de l'accumulation du sol.
- Pour la procédure preshearing, ne montre pas de tendance cohérente dans les courbes. Il est possible qu'un temps de consolidation plus court présente une résistance résiduelle supérieure à celui d'un temps de consolidation plus long. Cela s'explique par le fait que les tassements pendant le précisaillement et le cisaillement peuvent être pour un temps de consolidation plus court plus importants pour un temps de consolidation plus long.
- Cette conclusion est applicable pour un niveau de contrainte normale inférieur à 200 kPa. Des investigations supplémentaires doivent être réalisées, impliquant des durées de consolidation plus longues et une plage plus large de contraintes normales.

### 4.3 Effet de la rugosité sur la résistance résiduelle

#### 4.3.1 Introduction

L'influence de la rugosité de surface a attiré l'attention de plusieurs chercheurs comme Uesugi and kishida (1986), Shahrour and Rezai (1997), Zang and Zang (2006), Feligha et al. (2015), Martinez and Frost (2016), Tijender et al. (2020). La rugosité de surface a été abordée en termes de degrés et de texture. En ce qui concerne les degrés de rugosité de surface, la plupart

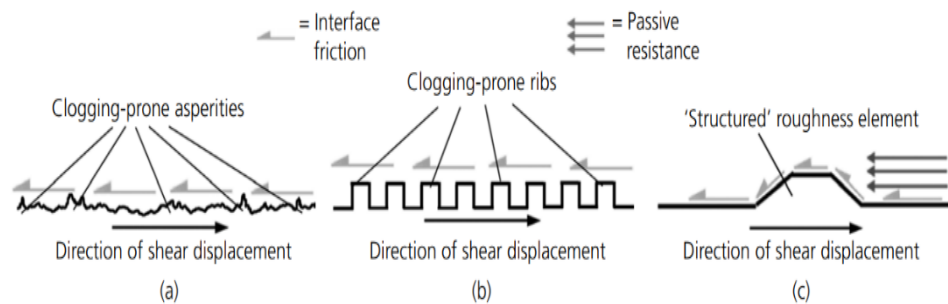
## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

---

des études ont régulièrement constaté que la résistance résiduelle au cisaillement tend à augmenter lorsque les degrés de rugosité de surface passent de lisse au rugueuse. Cependant, en ce qui concerne la texture, Dejong et al. (2001) ont noté que l'angle de frottement de pic restait le même pour deux textures différentes. De même, Tan et al. (2008) ont réalisé des essais sur la kaolinite saturée avec des textures variables et ont observé des angles de frottement presque identiques. De plus, Feilgha et al. (2015) ont étudié quatre textures distinctes (TX1, TX2, TX3, TX4) présentant toutes une valeur  $R_a$  identique de  $5,69 \mu\text{m}$ . Leurs résultats ont conduit à la conclusion que les courbes de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal pour ces interfaces présentaient une tendance identique, suggérant ainsi que ces modèles de texture n'avaient guère d'impact apparent sur la contrainte de cisaillement. Un autre aspect de la recherche sur la texture considère l'impact du colmatage de l'interface, où sur des surfaces de faible rugosité, le transfert de charge ne se produit que par frottement, tandis que sur des surfaces de rugosité élevée, le transfert de charge peut également se produire par résistance passive créée lorsque la topographie de la surface entraîne le déplacement des particules. Cela a conduit à la classification des surfaces nervurées et aléatoires comme formes de rugosité colmatantes (clogging roughness forms) et des surfaces structurées comme formes de rugosité non colmatantes (non-clogging roughness forms) (Fig. 4.15). De plus, La rugosité de surface critique marque une limite au-delà de laquelle la rupture par cisaillement se produit dans le sol lui-même et la résistance à l'interface maximale égale la résistance du sol résultant en une condition ' $\delta = \phi$ '. Lorsque la rugosité de surface tombe en dessous de cette limite, le glissement et le cisaillement se produisent à l'interface entre le sol et le matériau. Pour les surfaces nervurées et aléatoires, cette limite critique et le colmatage restreignent la résistance de l'interface pour correspondre à la résistance interne du sol résultant en une condition ' $\delta = \phi$ '. En revanche, les surfaces structurées peuvent mobiliser une résistance de l'interface supérieure à la résistance interne du sol conduisant à une condition ' $\delta > \phi$ ' en raison du maintien non colmatées et de la résistance passive supplémentaire comme souligné par Tsubakihara and Kishida (1993). Martinez et Frost (2016) ont rapporté dans leur étude, menée sur trois types de sable sec, à savoir, le sable d'Ottawa 20-30, le sable d'Ottawa 50-70, le sable d'explosion (blast sable) 20-30 et impliquant trois formes de textures nervurée, aléatoire et structurée que la résistance des interfaces avec des formes aléatoires et nervurées était restreinte aux conditions ' $\delta = \phi$ ', tandis que les interfaces avec des formes structurées mobilisaient des conditions ' $\delta > \phi$ '. Ce comportement est une manifestation du colmatage des interfaces avec des formes aléatoires et nervurées qui se comportaient comme des interfaces sable-sable, tandis que les interfaces avec des formes structurées restaient non colmatées et mobilisaient des résistances passives

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

supplémentaires, comme le montrent les mesures de déformation du sol adjacent à l'interface. Divers points de vue ont émergé sur cette question. Certains chercheurs pensent que la résistance de l'interface peut correspondre à la résistance interne du sol, conduisant à des conditions ' $\delta = \phi$ ', comme le soutiennent (Uesugi and Kishida 1986 ; Subba Rao et al. 1998 ; and Dietz and Lings 2006). En revanche, d'autres pensent que des surfaces très rugueuses peuvent mobiliser des angles de frottement d'interface qui sont plus grands que l'angle de frottement interne du sol, entraînant des conditions ' $\delta > \phi$ ' (Irsyam and Hryciw 1991 ; Frost and Dejong 2005 ; Hebel et al. 2015).



**Fig. 4.15** Formes de rugosité de surfaces (D'après Frost et Martinez. 2016)

### 4.3.2 Procédure expérimentale :

Un ensemble d'échantillons de kaolin et un mélange de kaolin-sable ont été préparés en mélangeant le sol sec avec l'eau distillé à une teneur en eau de 30 %. Pour les échantillons de mélange, 10 %, 20 % et 30 % de sable (poids sec) ont été mélangés avec respectivement 90 %, 80 % et 70 % de kaolin. Les échantillons utilisés dans cette étude ont été testés sous différentes contraintes normales de 50,32, 101,66 et 202,64, contre 4 textures et la pierre poreuse de l'appareil (chapitre 2) et ont été cisailés à une vitesse rapide de 15 mm/min pour créer une surface de cisaillement puis à une vitesse lente de 0.035 mm/min avec chaque texture (S0, S1, S2, S3, S4, présentées dans le chapitre précédent). L'objectif de créer une surface de cisaillement est pour réduire les déplacements requises pour atteindre les conditions résiduelles. Les essais ont été réalisés dans des conditions consolidées drainées.

### 4.3.3 Les mécanismes de cisaillement d'interface :

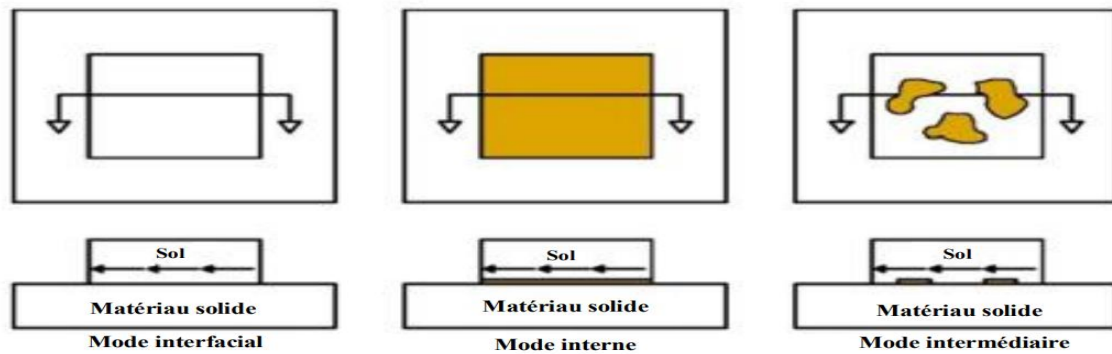
**Mode interfacial :** Pour les interfaces caractérisées par des surfaces lisses un glissement entier des particules a lieu au niveau la région de l'interface dans laquelle les particules sont mobilisées dans cette interaction. La rupture se produit à proximité du haut de l'échantillon dans ce mode. Il est caractérisé par des coefficients de frottement faible par rapport à ceux qui résultent de cisaillement sol-sol.

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

**Mode mixte** : pour les interfaces caractérisées par des surfaces ayant une rugosité modérée, le mode de cisaillement implique à la fois le glissement et le cisaillement au sein du sol. Un accrochement partiel du sol en contact sur les interfaces entraîne un cisaillement sol-sol au niveau de ces zones et un cisaillement sol-interface dans les autres zones où l'accrochement n'a pas eu lieu.

**Mode interne** : pour les interfaces caractérisées par des surfaces ayant une rugosité importante, la rupture par cisaillement au sein du sol est le mode dominant. Les plans de cisaillement sont créés au sein du sol et non à l'interface.

La figure 4.16 montre les 3 modes de cisaillement d'interface :



**Fig. 4.16** Mode de cisaillement à l'interface

### 4.3.4 Discussion des résultats

**Des essais** sol-sol ont été effectués pour déterminer l'angle de frottement interne du kaolin et mélanges kaolin-sable. Une courbe typique de type sol-sol sur le kaolin est présentée à la figure 4.17a.

**Tableau 4.2** : les valeurs de  $\frac{\delta}{\phi}$  pour le kaolin et le mélange en fonction des interfaces

| $\frac{\delta}{\phi}$ (rapport de l'angle du frottement à l'interface sur l'angle de frottement du sol) |        |         |         |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|
|                                                                                                         | Kaolin | 90K+10S | 80K+20S | 70K+10S |
| S0                                                                                                      | 0.7    | 0.73    | 0.53    | 0.45    |

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

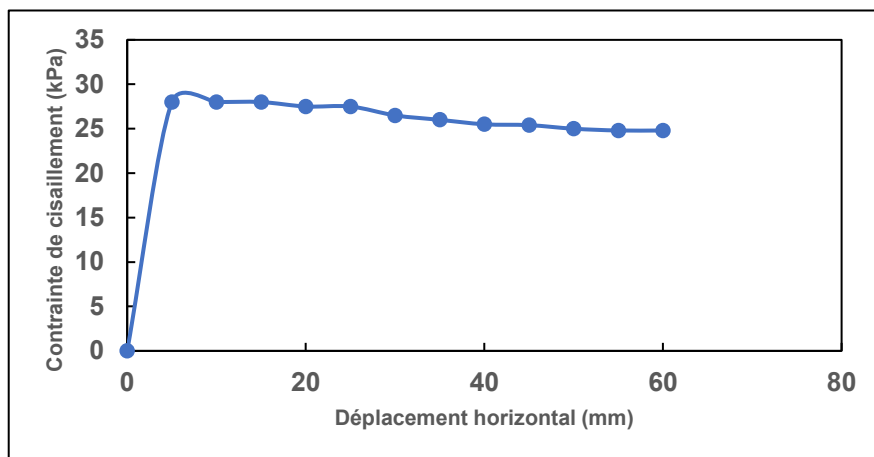
|    |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|
| S1 | 1.13 | 0.95 | 0.9  | 0,1  |
| S2 | 0.92 | 0.94 | 0.89 | 0.92 |
| S3 | 0.85 | 0.96 | 0.8  | 0.91 |
| S4 | 0.82 | 1.31 | 1.04 | 1.05 |

Les figures 4.17, 4.22, 4.23 et 4.24 présentent les résultats des essais réalisés sur le kaolin et un mélange kaolin-sable. Ces figures représentent la relation entre la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) et le déplacement horizontal à différents degrés de rugosité et formes de surfaces. Dans la Figure 4.17, il est évident que l'interface désignée par S1 a produit la plus grande résistance résiduelle à travers trois différentes contraintes normales. En revanche, l'interface la plus lisse a produit la plus faible résistance résiduelle, tandis que la surface la plus rugueuse, S4, a présenté une valeur de résistance résiduelle similaire à celle de S2 et S3. Pour S0, une interface lisse, le cisaillement s'est produit par glissement, nécessitant un minimum d'énergie pour glisser le long de cette interface, ce qui explique la résistance au cisaillement minimale enregistrée. Le colmatage dans les interfaces S2 et S3 s'est manifesté principalement dans les rainures, avec un degré partiel de colmatage observé sur la surface lisse entre elles comme indiqué dans la Figure 4.18. En revanche, l'interface S4, présentant une surface aléatoire, a montré un colmatage complet avec le sol en contact comme indiqué dans la Figure 4. 19. Par conséquent, dans le cas de S2 et S3, le processus de cisaillement a donné lieu à un frottement entre le sol logé dans les rainures et le sol adhérent sur la surface lisse d'un côté, et le sol en contact dans le conteneur de l'autre côté. Pour S2 et S3, le mode de cisaillement combine à la fois le sol-sol et le sol-interface simultanément. Tant que le colmatage au niveau des surfaces lisses entre les rainures est important, et étant donné que ces surfaces sont lisses, leur frottement avec le sol en contact n'affecte pas l'angle de frottement. Cela conduit à des angles de frottement similaires à ceux du frottement sol-sol. Pour S4, le frottement s'est produit entre le sol qui avait complètement colmaté l'interface sur le plateau supérieur et le sol en contact, ce qui l'a amené à présenter un comportement similaire à celui des interfaces sol-sol résultant en une condition ' $\delta = \phi$ '. La Figure 4.20 montre la présence de bords tranchants le long des côtés des rainures dans l'interface S1. La Figure 4.21 montre l'une des surfaces polies créées au sommet des échantillons de kaolin. La plus grande résistance à l'interface de cisaillement obtenue pour S1 est attribuée au fait que les bords tranchants le long des côtés des rainures lui ont permis de se comporter comme une surface structurée, facilitant ainsi sa pénétration de la surface polie et lui permettant de

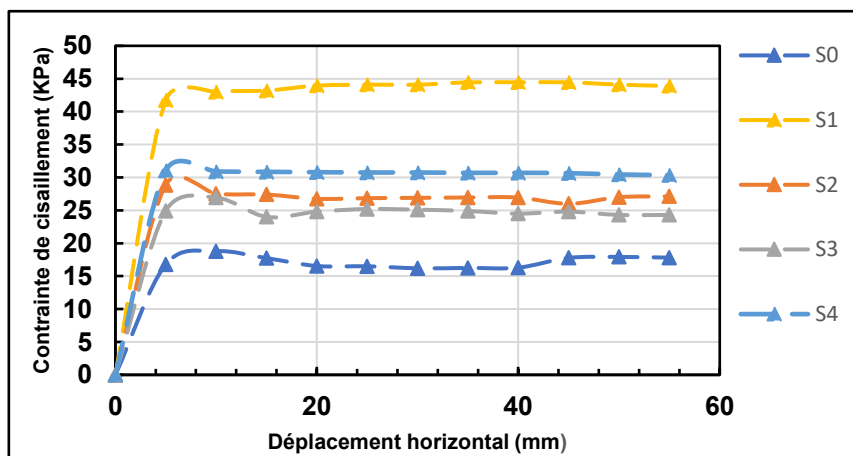
## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

s'enchevêtre avec les particules du kaolin dans le sol et générant une résistance passive supplémentaire. Le tableau 4.2 présente les valeurs du rapport entre l'angle de frottement résiduel et l'angle de frottement interne. Il révèle que la surface lisse S0 a enregistré la valeur la plus faible de 0,7, tandis que les surfaces S2, S3 et S4 ont affiché des valeurs comprises entre 0,82 et 0,92. Ces valeurs se rapprochent bien au rapport de 1, qui signifie une égalité entre l'angle de frottement résiduel et l'angle de frottement interne du sol. De plus, cela suggère que le frottement sol-interface s'opère sous la condition ' $\delta = \phi$ '. Pour S1, un rapport supérieur à 1, soit 1,13, indiquant que le frottement sol-interface s'opère sous la condition ' $\delta > \phi$ '.

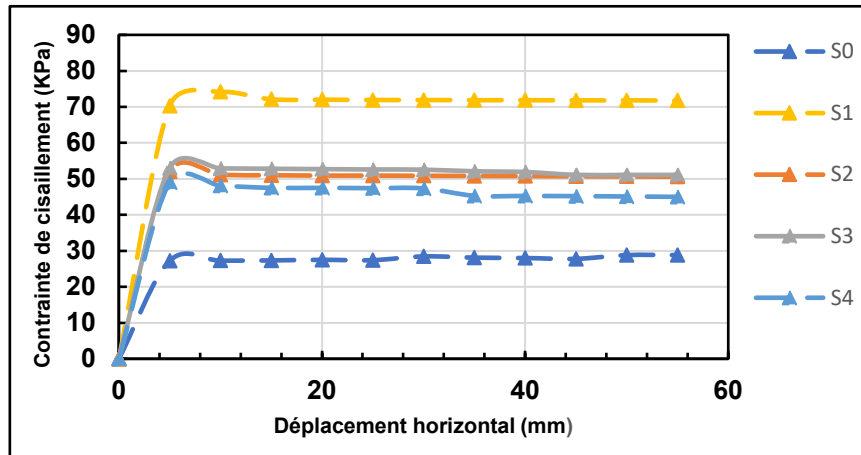
a)



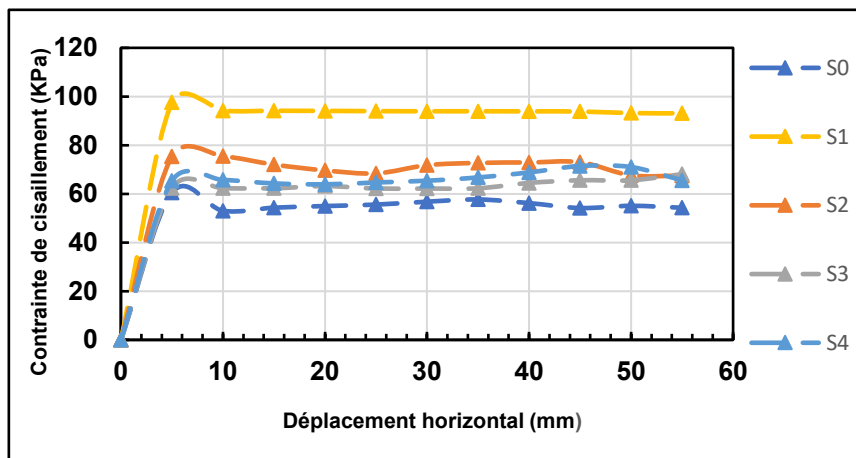
b)



c)



d)



**Fig. 4.17** Courbe de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal en fonction de différentes formes et rugosité pour a) courbe de kaolin type sol-sol b)  $\sigma_1=32\text{kPa}$ , c)  $\sigma_2=101,66\text{kPa}$ , d)  $\sigma_3=202,64\text{kPa}$



**Fig. 4.18** Vue générale du colmatage par le sol En contact qui se manifeste au niveau des rainures  
**Fig. 4.19** Vue générale du colmatage complet par le sol en contact pour S4  
Et la surface lisse entre elles pour S3.

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

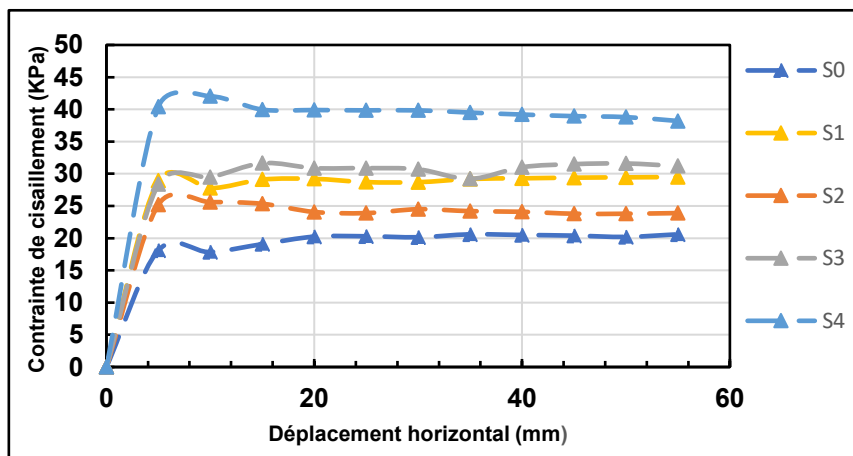


**Fig. 4.20** Vue générale des bords tranchants  
S1

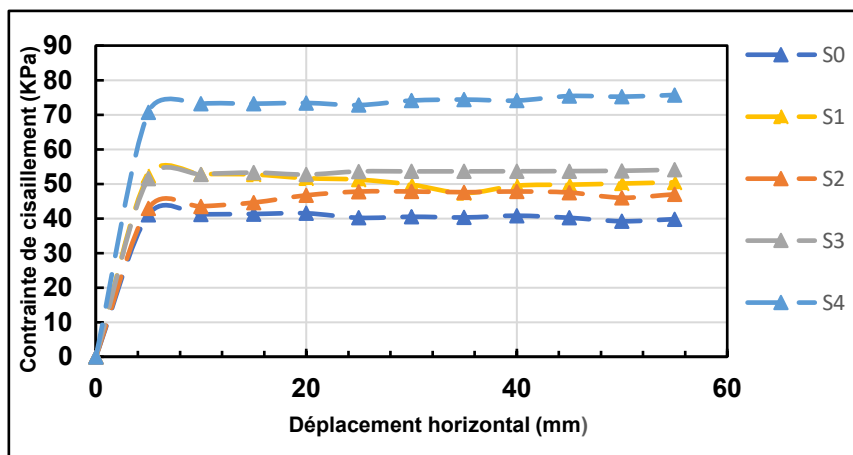


**Fig. 4.21** Vue de l'un des surfaces polies de  
Créés sur le haut des échantillons de kaolin

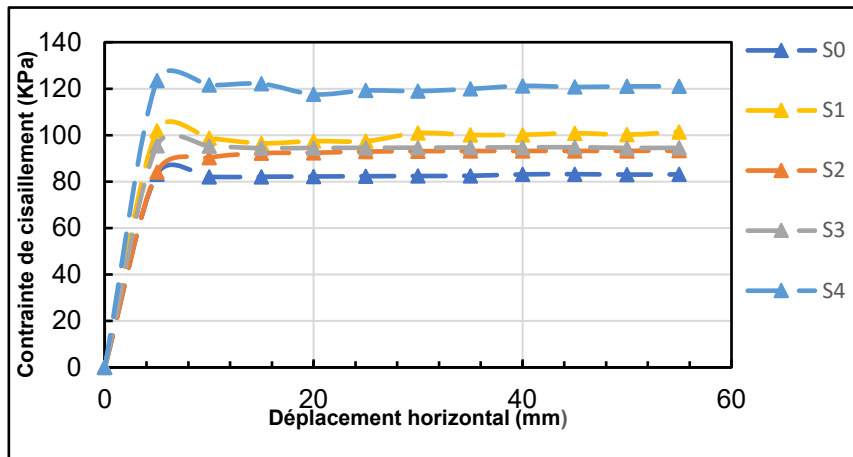
a)



b)

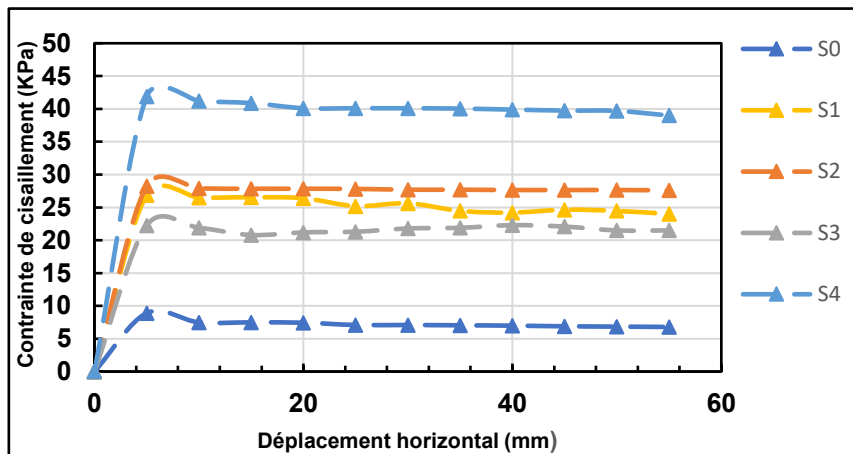


c)

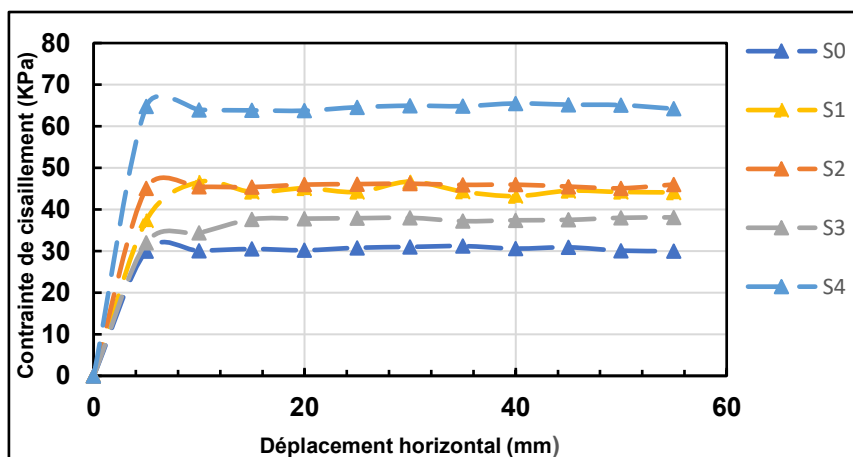


**Fig. 4.22** Courbe de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal en fonction de différentes formes et rugosité pour a)  $\sigma_1=32\text{kPa}$ , b)  $\sigma_2=101,66\text{kPa}$ , c)  $\sigma_3=202,64\text{kPa}$  pour le mélange 90K+10S

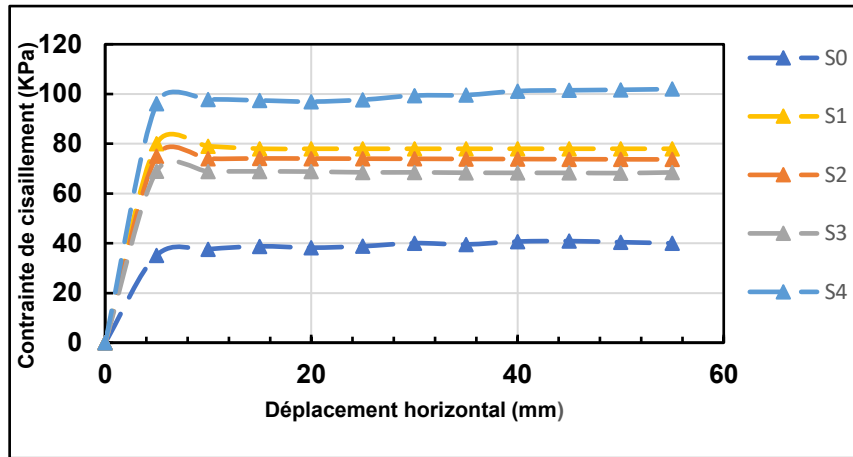
a)



b)

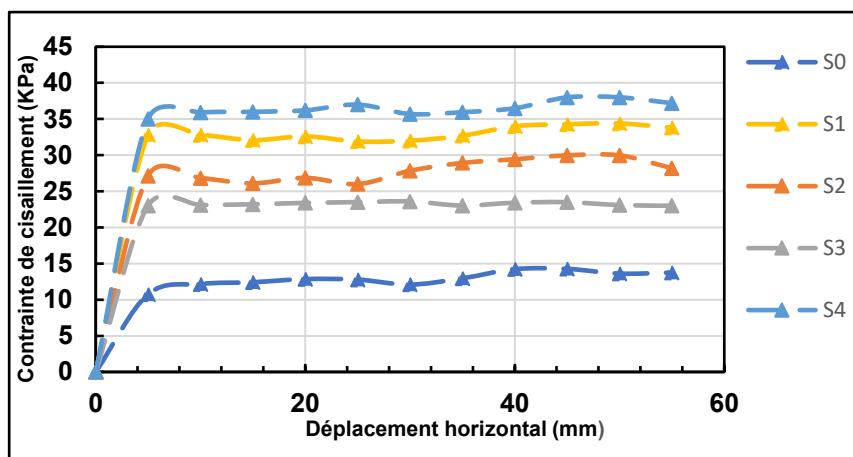


c)

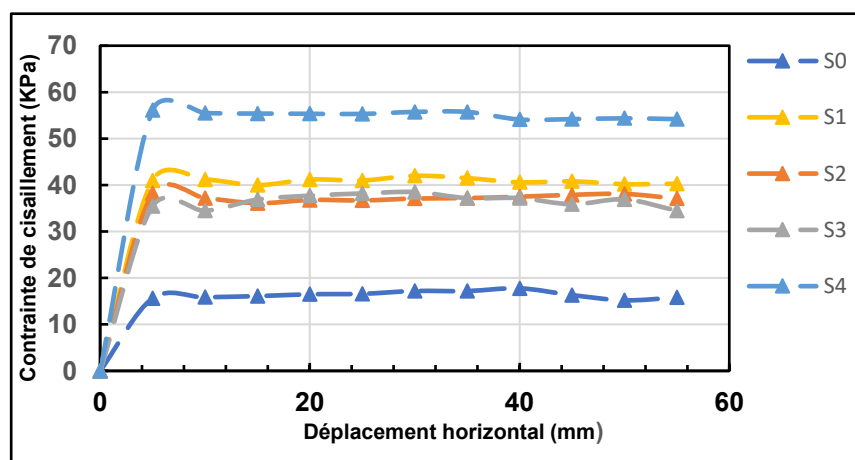


**Fig. 4.23** Courbe de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal en fonction de différentes formes et rugosité pour a)  $\sigma_1=32\text{kPa}$ , b)  $\sigma_2=101,66\text{kPa}$ , c)  $\sigma_3=202,64\text{kPa}$  pour le mélange 80K+20S

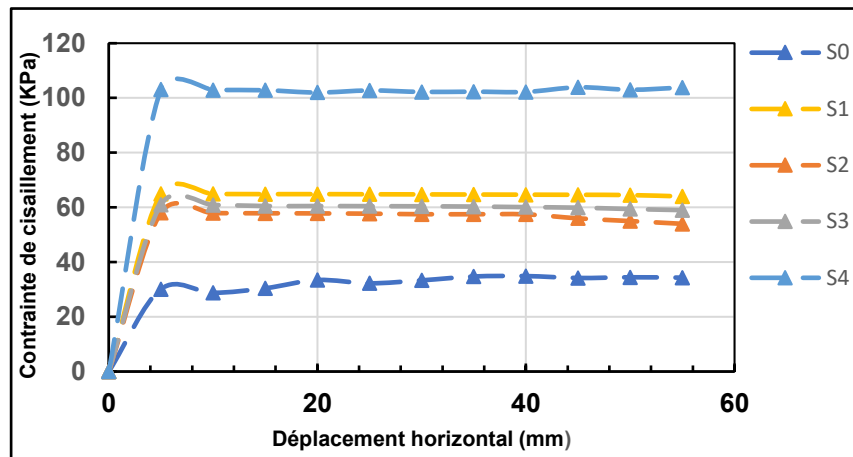
a)



b)



c)



**Fig. 4.24** Courbe de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal en fonction de différentes formes et rugosité pour a)  $\sigma_1=32\text{kPa}$ , b)  $\sigma_2=101,66\text{kPa}$ , c)  $\sigma_3=202,64\text{kPa}$  pour le mélange 70K+30S

Il est observé à partir des Figures 4.22, 4.23 et 4.24 que le mélange de kaolin-sable interférant S0 a donné la plus faible valeur de résistance à l'interface à travers les trois contraintes normales. L'interface S1 a donné une valeur très proche de S2 et S3. En revanche, la surface la plus rugueuse, S4, a donné la plus haute valeur de résistance résiduelle pour les trois types de mélange 90K+10S, 80K+20S, 70K+30S. On peut observer que l'ajout de sable au kaolin modifie le comportement du kaolin vis-à-vis de S4. De même, dans les interfaces S1, S2 et S3, un colmatage par le sol en contact dans les rainures et une adhérence aux surfaces lisses entre elles se sont produites. Ce phénomène a conduit au même processus de frottement discuté précédemment et a abouti à la condition ' $\delta = \phi$ '. Dans le cas de S4, le haut de la surface du sol après le cisaillement était distinct de celui du kaolin, comme le montre la figure 4.25, présentant une texture plus grossière. De plus, étant donné que le plateau supérieur était colmaté avec un mélange de kaolin-sable, le frottement impliquait des matériaux plus grossiers que ceux rencontrés dans le cas de kaolin, ce qui explique la plus haute valeur de résistance résiduelle obtenue. Le tableau 4.2 montre également que le rapport entre l'angle de frottement résiduel et l'angle de frottement interne de sol est compris entre 0.80 et 0.96 pour les interfaces S1, S2, S3, un rapport tend vers 1, indiquant que le frottement s'opère sous la condition ' $\delta = \phi$ '. Pour S4 le rapport est supérieur à 1, indiquant que le frottement s'opère sous la condition ' $\delta > \phi$ '.

Dans ce contexte, Martinez et Frost (2016), dans leur étude menée en 2016, ont examiné méticuleusement trois types distincts de sols sableux secs, spécifiquement le sable d'Ottawa 20-30, le sable d'Ottawa 50-70 et le sable provenant d'explosion (Blast sand) 20-30. Cette investigation a englobé trois configurations distinctes de texture de surface : nervurée, aléatoire

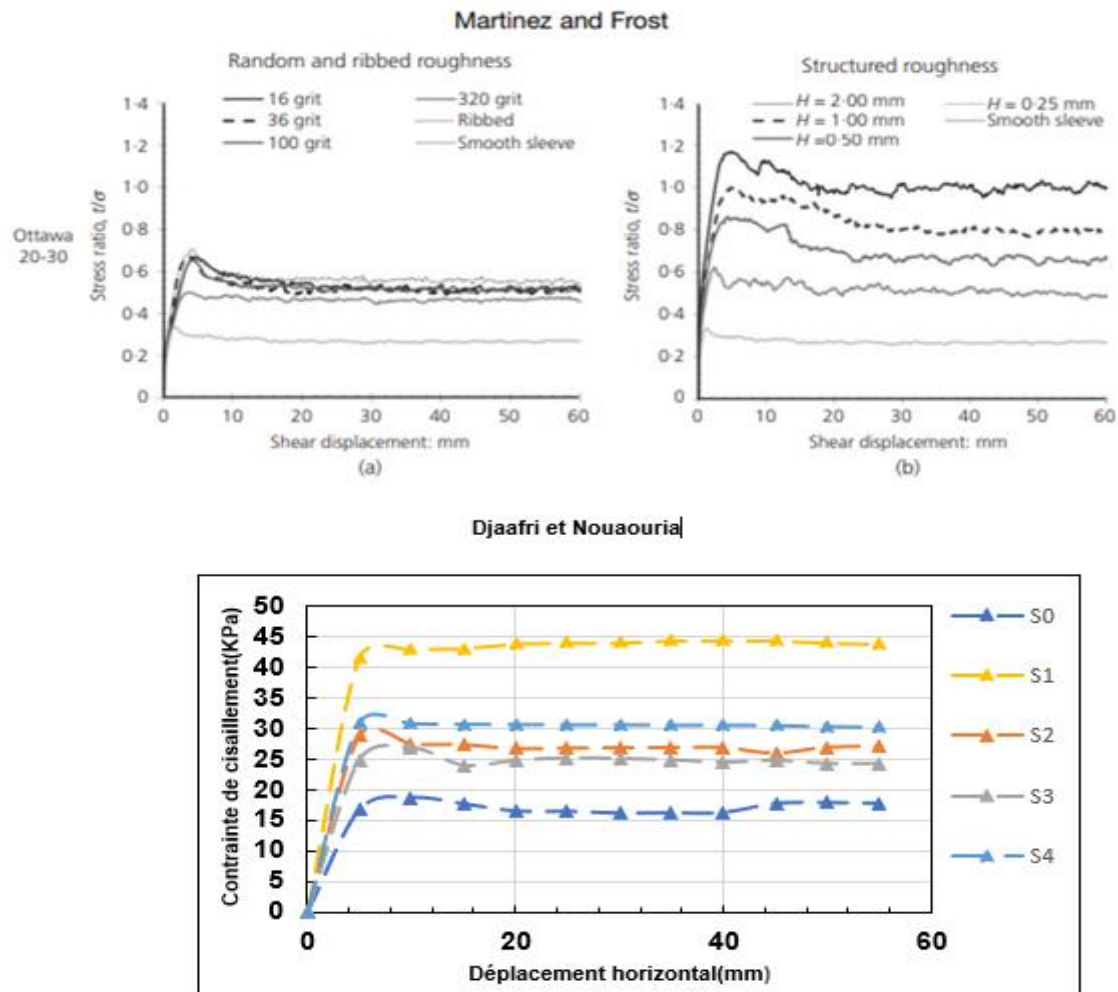
## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

---

et structurée. Les conclusions de leur étude ont révélé un phénomène intrigant. Il a été observé que les interfaces caractérisées par des textures de surface aléatoires et nervurées étaient limitées à fonctionner dans la condition ' $\delta = \phi$ '. Ce comportement restreint a été attribué au colmatage de ces interfaces par le sol en contact, les rendant semblables aux interfaces de sable-sable. En revanche, les interfaces avec des textures de surface structurées ont présenté un comportement contrasté. Elles ont efficacement fonctionné sous la condition ' $\delta > \phi$ ', montrant leur capacité à mobiliser des résistances passives supplémentaires. La figure 4.26 représente les courbes de coefficient de frottement -déplacement horizontal pour le sable d'Ottawa 20-30 en fonction des différentes formes de rugosité de surfaces (Frost et al. 2016) et les courbes de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal pour le kaolin (Djaafri et Nouaouria. 2024). Il ressort clairement de ces courbes que les interfaces présentent une forme structurée ont mobilisé des angles de frottement plus élevés que les angles de frottement internes du sol, tandis que celles présentant une forme aléatoire et nervurée ont mobilisé des angles de frottement proches de l'angle de frottement interne du sol.



**Fig. 4.25** Une photo capturée depuis le sommet de l'échantillon 80K+20S après le cisaillement



**Fig. 4.26** Coefficient de frottement- déplacement horizontal pour le sable d'Ottawa 20-30 (Martinez et Frost) et contrainte de cisaillement-déplacement horizontal pour le kaolin (Djaafri et Nouaouria) types de sables et les différentes formes de rugosité surface

### 4.3.5 Conclusion :

L'étude expérimentale menée pour étudier l'effet du colmatage au niveau des interfaces par le sol en contact sur le comportement frictionnel à l'interface sol cohérent -structure a permis de faire les conclusions suivantes :

Dans le cas de kaolin :

- Le frottement avec l'interface S1 a produit la valeur la plus faible, car cette interface présente une surface lisse et que le mode de cisaillement implique un glissement, ce qui entraîne des valeurs de résistance faibles.

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

---

- Pour les interfaces S2, S3 et S4, le colmatage se produit dans les rainures, et partiellement sur les surfaces lisses entre elles dans le cas de S2 et S3, tandis que pour S4, il est complet. Cela entraîne un frottement sol-sol dans les rainures et simultanément un frottement sol-sol et sol-interface sur les surfaces lisses pour S2 et S3, et sol-sol pour S4, ce qui conduit à opérer sous la condition ' $\delta = \phi$ '.
- Les caractéristiques distinctes de S1, avec ses bords tranchants, lui ont permis de se comporter différemment en pénétrant la surface polie sur le haut de l'échantillon et en s'enchevêtrant avec les particules du kaolin, produisant ainsi la valeur la plus élevée.

Dans le cas du mélange kaolin-sable :

- De même, pour le mélange de kaolin et de sable, les interfaces S1, S2 et S3 ont montré un colmatage dans les rainures et un accrochement du sol en contact aux surfaces lisses entre elles. Ce phénomène a entraîné le même processus de frottement discuté précédemment, aboutissant à ' $\delta = \phi$ '.
- Dans le cas de S4, le frottement impliquait des matériaux plus grossiers en raison de la texture grossière observée à la surface de l'échantillon après le cisaillement et le colmatage de S4 par le mélange kaolin-sable, ce qui a conduit à la valeur de résistance résiduelle la plus élevée.

### 4.4 Proposition d'une procédure d'essai pour mesurer la résistance résiduelle drainée (Preconsolidated presheared flush testing procédure P.P.F)

En raison de sa conception simple et de son coût avantageux, l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead est largement utilisé pour évaluer la résistance résiduelle drainée à travers diverses procédures d'essai telles que : "single stage", "multistage", "précisaillement". Cependant, les valeurs obtenues par ces procédures d'essais sont surestimées en raison du frottement mural, lorsqu'on les compare avec les résultats obtenus auparavant de l'historique de cas de terrain. Pour remédier à cela, Stark et Vettel (1992) ont introduit la procédure d'essai "flush" qui consiste à ajouter du sol remanié à l'échantillon et à le reconsolider, afin de minimiser le frottement mural. Bien que cette procédure ait donné des résultats satisfaisants, elle prend plus de temps. Donc on propose la procédure d'essai (P.P.F) dont Les résultats ont montré que cette procédure a réussi à minimiser avec succès l'effet du frottement mural, fournissant des valeurs inférieures à celles obtenues en utilisant la procédure flush en moins de temps.

#### 4.4.1 Procédure d'essai flush

Les échantillons ont été préparés en mélangeant le sol sec avec de l'eau distillée jusqu'à ce qu'une teneur en eau égale à leur limite liquide soit atteinte. Ensuite, l'essai a été mené selon la procédure décrite par Stark et Vettel (1992), qui implique l'ajout de sol remanié après consolidation pour augmenter l'épaisseur de l'échantillon et le reconsolider à la contrainte normale désirée. Une fois la reconsolidation terminée, le cisaillement drainé est initié.

#### 4.4.2 Procédure d'essai preconsolidated presheared flush testing procedure (P.P.F):

Dans leurs recherches, Stark et Vettel ont noté que pour obtenir une résistance résiduelle drainée cohérente avec l'historique de cas du terrain, il est nécessaire de limiter les tassements à 0,75 mm. Pour ce faire, ils ont proposé la procédure d'essai flush, qui consiste à maximiser l'épaisseur de l'échantillon en ajoutant du sol remanié et en le reconsolidant plusieurs fois afin de rester dans le seuil spécifié après le cisaillement. Néanmoins, les auteurs reconnaissent que cette approche prend plus de temps. Par conséquent, nous proposons la procédure d'essai preconsolidated presheared flush testing procedur (P.P.F), qui consiste à consolider un échantillon dans le conteneur de l'appareil de cisaillement annulaire et, à partir du même échantillon, à préparer un autre échantillon à consolider dans l'oedomètre pendant 24 heures. Ensuite, au lieu d'ajouter un échantillon remanié et de le reconsolider, nous ajoutons l'échantillon consolidé, le soumettre à la contrainte normale désirée pendant 15 minutes, le cisailier, puis lançons le processus de cisaillement.

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

---

Cette procédure d'essai est réalisée conformément à la norme ASTM D 6467-99 pour l'essai de cisaillement annulaire, qui peut être résumée comme suit:

### Préconsolidation :

Placer et fixer le conteneur avec l'échantillon dans un bain d'eau vide. Appliquer une petite charge de mise en place pour atteindre une contrainte normale d'environ 3.0 kPa sur l'échantillon, y compris le plateau supérieur. Remplir le bain d'eau et consolider l'échantillon jusqu'à la contrainte normale maximale désirée pour l'enveloppe de résistance au cisaillement, en utilisant un incrément de chargement. Il est essentiel de vérifier l'achèvement de la consolidation primaire à chaque étape de chargement. Pour l'incrément de charge maximal, il convient de s'assurer de l'étendue de la consolidation secondaire en produisant une relation bien définie entre la déformation et le logarithme du temps.

### Précisaillement :

Décharger l'échantillon jusqu'à la contrainte normale désirée. Cisaillement l'échantillon en sélectionnant une vitesse de cisaillement inférieure à 25 degrés/min pour une révolution complète. Après le cisaillement, confirmer la dissipation de toute surpression d'eau dans les pores en veillant à ce que le déplacement vertical devienne presque négligeable.

### Les calculs:

La contrainte de cisaillement Moyenne est calculée comme suit :

$$\tau = \frac{3 (F_1 + F_2)L}{4\pi(R_2^3 - R_1^3)} \quad (4.2)$$

$\tau$  : Contrainte de cisaillement, kPa.

$F_1, F_2$  : Les forces des anneaux agissants, N.

$R_1, R_2$  : Diameters intérieurs et extérieurs de l'échantillon, mm.

$L$  : Longueur de couple, mm.

La contrainte normale est calculée comme suit :

$$\sigma'_n = \frac{P}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \quad (4.3)$$

$\sigma'_n$  : Contrainte normale, kPa.

$P$  : La force normale agissant sur l'échantillon, N.

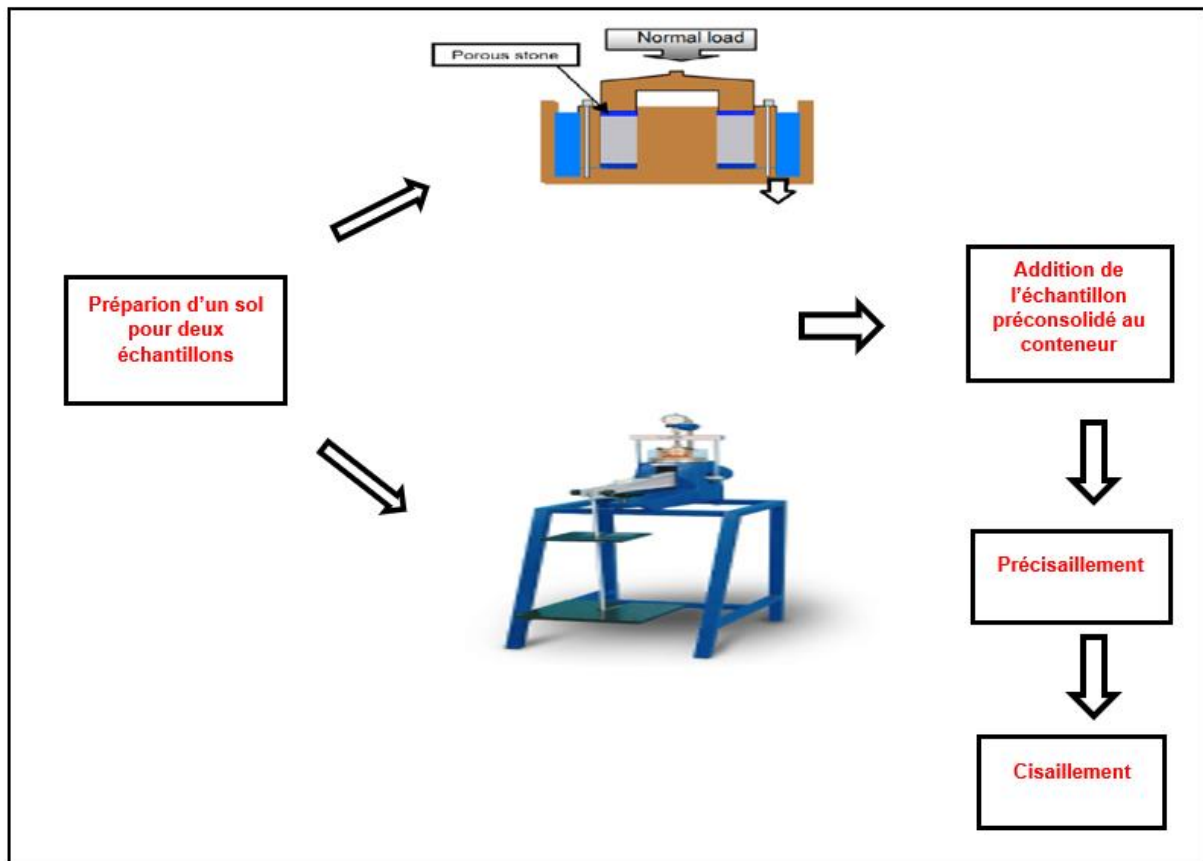
## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

---

Dans la procédure d'essai (P.P.F), la première étape consiste à préparer un échantillon avec une teneur en eau égale à sa limite de liquidité (Fig. 4.27). À partir de cela, deux échantillons sont extraits. L'un de ces échantillons subit une consolidation dans le conteneur de l'appareil de cisaillement annulaire, tandis que l'autre subit une consolidation dans l'oedomètre pendant 24 heures, selon un incrément de chargement comme spécifié par l'ASTM D 6467-99. Les deux échantillons sont consolidés en utilisant une série d'incrément de chargement jusqu'à la charge finale, de 200 kPa et 300 kPa, pour l'échantillon cisailé sous la charge de 50 kPa et 100 kPa, 200 kPa, respectivement. Dans la deuxième étape, au lieu d'ajouter du sol remanié et de le consolider à nouveau, l'échantillon préconsolidé est ajouté et soumis à la charge désirée pendant 15 minutes jusqu'à ce que le déplacement vertical devienne négligeable. Dans la troisième étape, l'échantillon est précisaillé en utilisant le plateau supérieur déchargé, pour une révolution complète à une vitesse de cisaillement de 10 mm/min (moins de 25 degrés/min comme recommandé par l'ASTM D 6467-99). Après le précisaillage, nous retirons le sol piégé entre la pierre poreuse supérieure et les parois intérieure et extérieure du conteneur de pour éviter sa contribution à l'augmentation du frottement mural. Ensuite, nous attendons que le sol atteigne l'équilibre en veillant à ce que le déplacement vertical devienne presque négligeable. La dernière étape consiste à initier le processus de cisaillement avec une faible vitesse de cisaillement de 0,035 mm/min. D'après les travaux de Bromhead (1986), cette vitesse de cisaillement est appropriée pour garantir un drainage complet au cours des essais de cisaillement annulaire, en particulier pour la majorité des sols argileux. La Figure 4.28 illustre la procédure d'essai.



**Fig. 4.27** Vue Générale de l'échantillon préparé.

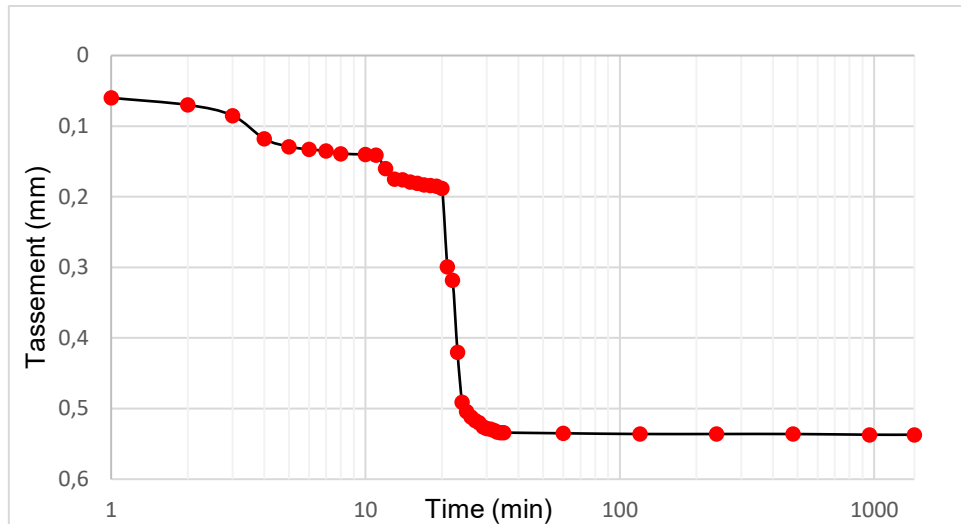


**Fig. 4.28** Procedure d'essai preconsolidated presheared testing procedure (P.P.F)

Skempton (1964) et Stark et Aid (1994) ont discuté l'approche secante  $\Phi$ , qui suppose qu'il n'y a pas de cohésion résiduelle et que l'angle résiduel secant  $\Phi$  moyen est calculé comme suit :

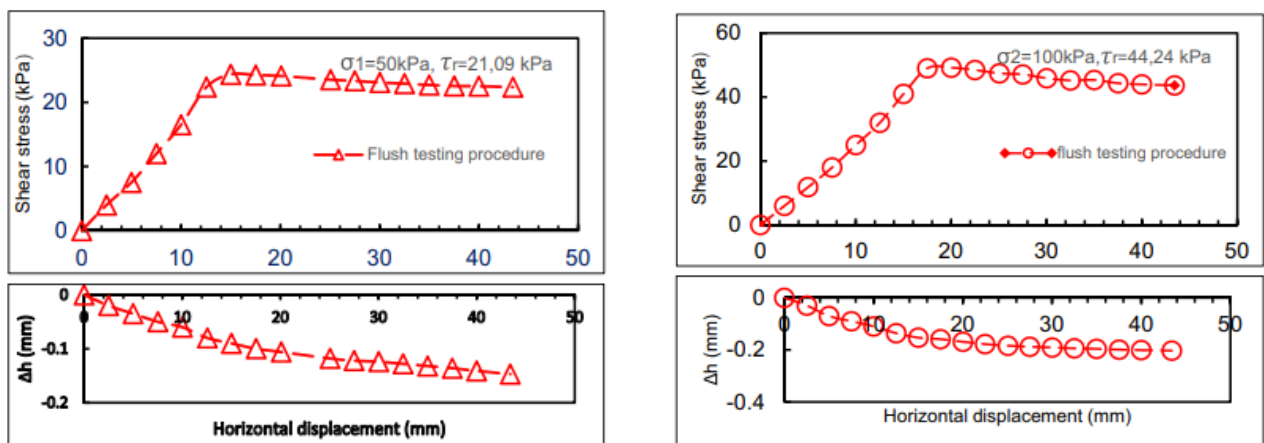
$$\Phi'_r = \tan^{-1} \left( \frac{\tau_r}{\sigma_N} \right) \quad (4.4)$$

La figure 4.29 représente une courbe de consolidation typique montrant la consolidation par incrément de contrainte selon la méthode du logarithme du temps (méthode de Casagrande), dans le cas de  $\sigma_N = 50$  kPa pour la procédure d'essai P.P.F. La consolidation pour tous les échantillons a été procédé par incrément de contrainte dans les deux procédures d'essai. Cette courbe montre que la consolidation primaire a été accomplie pour le premier et le deuxième chargement, et s'étend à la consolidation secondaire pour la troisième chargement (charge maximale).

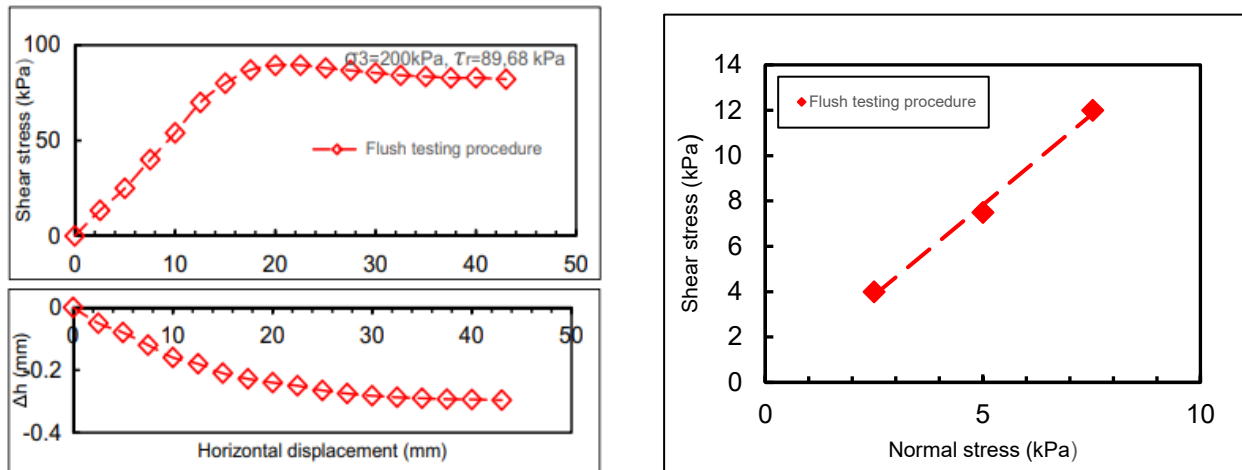


**Fig. 4.29** Courbe de consolidation typique pour la procedure (P.P.F) pour  $\sigma_N = 50$  kPa

Les résultats du cisaillement annulaire sont présentés sous forme de courbe, où la contrainte de cisaillement et les déplacements verticaux associés sont tracés en fonction du déplacement horizontal (Fig.29) pour trois valeurs de contrainte normale ( $\sigma_N$  : 50, 100, 200). De plus, elle inclut aussi la courbe intrinsèque de la contrainte de cisaillement par rapport à la contrainte effective normale pour les mêmes valeurs de contrainte normale. Pour la procédure d'essai flush. On peut voir sur cette figure que la résistance au cisaillement maximale a été atteinte à environ 14 à 15 mm et est légèrement supérieure à la résistance au cisaillement résiduelle, tandis que la résistance au cisaillement résiduelle a été atteinte à environ 30 mm. Les résistances au cisaillement résiduelles moyennes sont de 21.09, 44.24 et 88.68 kPa, et les déplacements verticaux correspondants sont de 0.174, 0.203 et 0.296 mm pour des contraintes normales de 50, 100 et 200, respectivement. L'angle résiduel secant obtenu à partir de la courbe de régression de la contrainte de cisaillement par rapport au déplacement horizontal est de  $24.70^\circ$ .



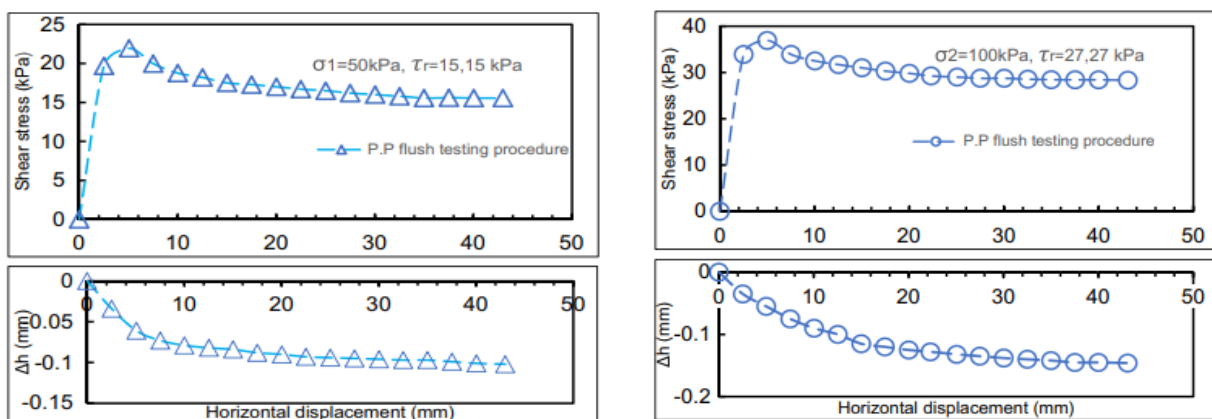
## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion



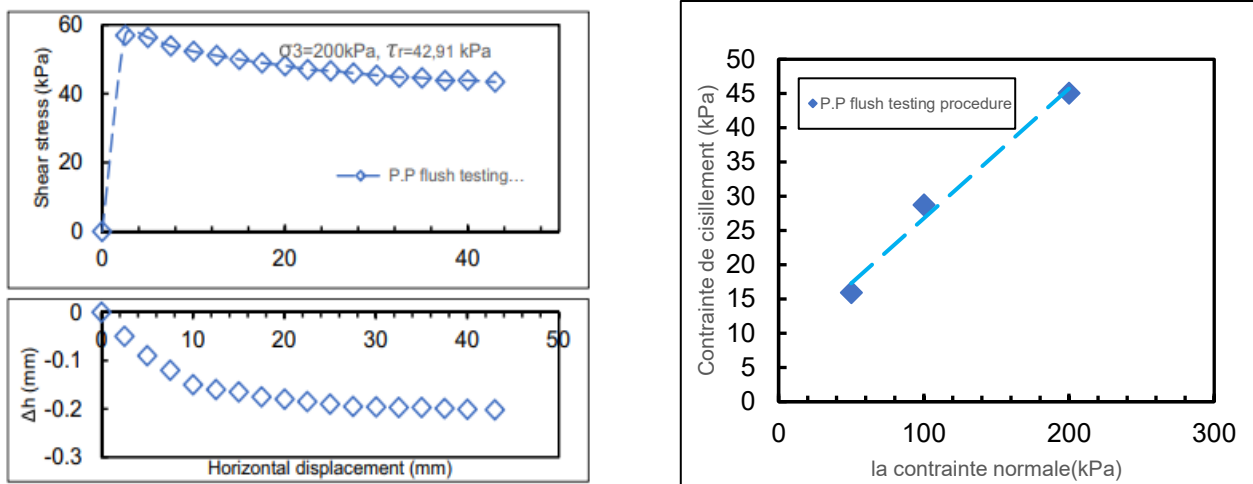
**Fig. 4.30** Les courbes de contrainte de cisaillement et déplacement vertical- déplacement horizontal pour la procedure d'essai Flush

La Figure 4.31 illustre les résultats de la procédure d'essai (P.P.F) représenté par des courbes identiques, telles que décrites ci-dessus. On peut voir sur ces courbes que la contrainte au cisaillement de pic a été atteinte à environ 4 à 5 mm et elle est plus prononcée que celle de la procédure d'essai flush, tandis que la résistance au cisaillement résiduelle a été atteinte à environ 25 mm. Les valeurs moyennes de la résistance au cisaillement résiduel s'élèvent à 15,15, 27,27 et 42,91 kPa, avec des déplacements verticaux associés de 0,101, 0,146 et 0,202 mm sous des contraintes normales respectives de 50, 100 et 200. Par ailleurs, l'angle secant résiduel, dérivé de la courbe de régression, est de 10,20 °.

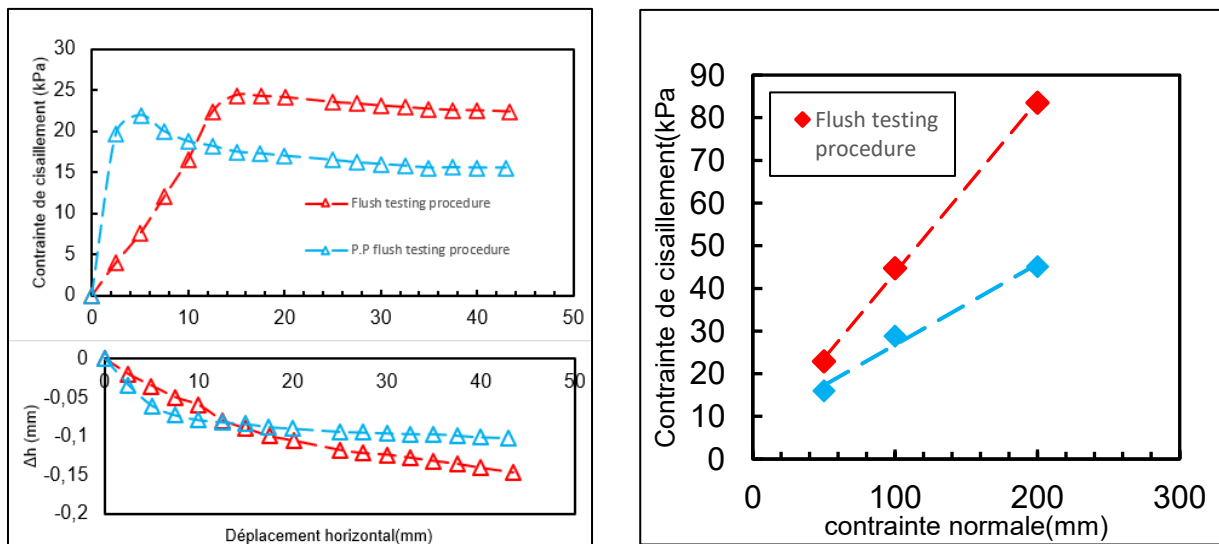
La Figure 4.32 présente les résultats obtenus pour les procédures d'essai flush et (P.P.F) à ( $\sigma_N$  : 50). Il est évident que la procédure d'essai (P.P.F) a donné des résultats inférieurs à ceux obtenus avec la procédure flush.



## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion



**Fig. 4.31** Courbes de contrainte de cisaillement et déplacement vertical- déplacement horizontal pour la procedures d’essai (P.P.F)



**Fig. 4.32** Comparison des résultats de la procedure Flush et (P.P.F) pour  $\sigma_N$  : 50 kPa

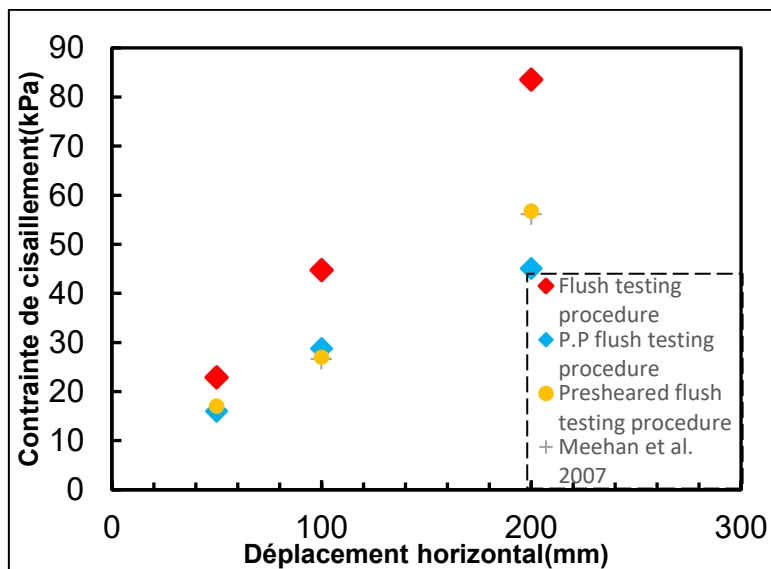
**Tableau 4.3** comparaison des résultats des deux procedures (procedures: PPF et Flush)

| Procédure d’essai         | Contrainte nor (kPa) | Le délpacement horizontal requis pour atteint l’etat de pic (mm) | Le délpacement horizontal requis pour atteint l’etat résiduel (mm) | La contrainte de cisaillement résiduelle moyenne (kPa) | L’angle de frottement résiduel sécant (°) |
|---------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Procédure d’essai Flush   | 50                   | 14 to 15 mm                                                      | 30 mm                                                              | 21.09                                                  | 24.70                                     |
|                           | 100                  |                                                                  |                                                                    | 44.24                                                  |                                           |
|                           | 200                  |                                                                  |                                                                    | 89.68                                                  |                                           |
| Procédure d’essai (P.P.F) | 50                   | 4 to 5 mm                                                        | 25                                                                 | 15.15                                                  | 10.75                                     |
|                           | 100                  |                                                                  |                                                                    | 27.27                                                  |                                           |
|                           | 200                  |                                                                  |                                                                    | 42.81                                                  |                                           |

## Chapitre 4 : Présentation des résultats et discussion

Le tableau met en évidence que la procédure d'essai (P.P.F) a efficacement réduit l'impact du frottement mural par rapport à la procédure d'essai flush. Cela se manifeste par le temps plus court nécessaire pour atteindre les états de pic et résiduel, ainsi que par les déplacements verticaux plus faibles. De plus, les résistances au cisaillement résiduel pour la procédure d'essai (P.P.F) étaient de 31 à 45 % inférieures à celles de la procédure d'essai Flush.

Deux essais additionnels ont été effectués pour prouver l'efficacité de cette méthode qui a produit des angles résiduels sécants de  $10,35^\circ$  et  $11,05^\circ$ . Ces tests ont été comparés à d'autres dans la littérature, tels que la procédure d'essai Flush pré-cisaillée (presheared) et les résultats obtenus en utilisant le plateau modifiée de Meehan. Les résultats détaillés peuvent être trouvés dans la figure 4.33.



**Fig. 4.33** Comparison entre la procédure d'essai proposée (P.P.F), la procédure Flush, la),  
procédure presheared Flush (précisaillée), le plateau superieur modifié de Meehan et  
al. 2007

### 4.4.3 Conclusion

Le principal facteur affectant la résistance résiduelle mesurée en conditions drainées est le frottement mural développé le long des circonférences intérieures et extérieures du conteneur d'échantillon, entraînant ainsi une augmentation de celle-ci. Une nouvelle procédure d'essai qui permet l'addition d'un échantillon préconsolidé au lieu de sol remanié, connue sous le nom de procédure d'essai "**preconsolidé précisaille Flush**" (**preconsolidated presheared testing procedure (P.P.F)**) a été proposée dans cette étude. Les conclusions suivantes sont faites:

- La procédure d'essai flush a donné des résultats satisfaisants, cependant, elle prend plus de temps et nécessite des déplacements plus importants pour atteindre les résistances au cisaillement de pic et résiduel.
- La procédure d'essai (P.P.F) peut économiser du temps en ajoutant des échantillons préconsolidés au lieu de sol remanié, comme dans la procédure flush.
- La procédure d'essai (P.P.F) a donné des contraintes de cisaillement de pic et résiduel, ainsi que des déplacements verticaux inférieurs à ceux de la procédure d'essai flush. Cela peut être interprété par le fait que cette procédure a réussi à minimiser l'effet du frottement mural.
- Contrairement à le plateau supérieur modifié proposé par Stark et Eid (1993), qui permet l'inclusion d'échantillons surconsolidés et prédécoupés par le biais d'une procédure "multistage", la procédure d'essai P.P.F permet l'utilisation des échantillons préconsolidés et précisailés avec le conteneur d'origine de l'appareil.

## **Chapitre 5**:

**Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et  
comparaison des résultat**

## **Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats**

---

### **5 Modélisation de la résistance au cisaillement de l'interface et comparaison des résultats**

#### **5.1 Introduction**

La simulation numérique a été un outil efficace pour étudier le comportement des problèmes d'interaction sol-structure (SSI) sous différentes conditions de chargement. Différentes approches numériques ont été développées pour simuler le comportement des interfaces et sont catégorisées, en méthodes d'analyse de contact, éléments d'interface et simulation numérique utilisant des méthodes d'éléments discrets.

#### **5.2 Les types d'approches numériques**

##### **5.2.1 Méthode d'analyse de contact**

Cette méthode utilise différentes approches telles que les méthodes lagrangiennes et les méthodes de pénalité (Aliabadi et Brebbia 1993) pour simuler l'interface entre deux corps. Ces approches ont été largement utilisées dans des codes commerciaux d'éléments finis tels qu'ABAQUS (Dassault Systèmes, Abaqus Documentation, 2013). et ANSYS (A. Inc, ANSYS Mechanical User's Guide, 2013). Ces méthodes sont efficaces pour traiter les grandes discontinuités telles que le glissement et la séparation entre deux corps. Cependant, elles ne sont pas appropriées pour simuler les interfaces granulaires sol-structure. Les zones d'interface granulaires sol-structure ont une épaisseur et, sous différentes conditions de chargement et chemins de contrainte, elles présentent un comportement complexe (par exemple, durcissement et adoucissement par déformation, dilatance, dégradation de la contrainte et contraction accumulative) qui ne peut pas être capturé par les méthodes de contact.

##### **5.2.2 Élément d'interface**

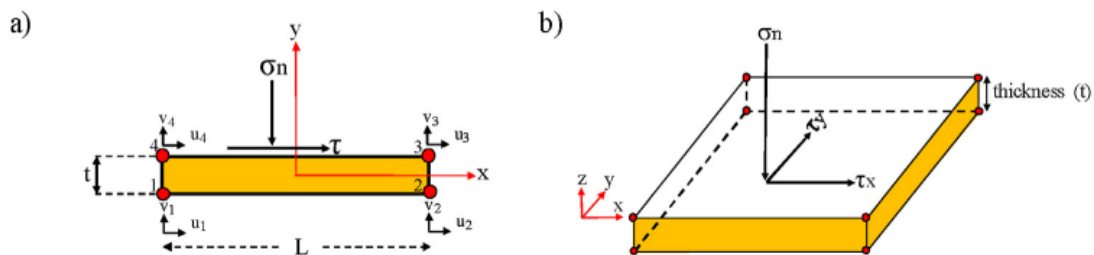
Les éléments d'interface ont été largement utilisés dans la simulation numérique des problèmes d'interaction sol-structure (SSI). Le type d'élément et le modèle constitutif associé sont deux caractéristiques essentielles influençant la capacité de l'élément d'interface pour la simulation numérique.

###### **5.2.2.1 Type d'élément**

Les éléments d'interface peuvent être classés en deux types d'éléments à épaisseur nulle proposés par Goodman et al. (1968) et en éléments solides minces proposés par Zienkiewicz et al. (1970) et Desai et al. (1984). Les éléments de Goodman à épaisseur nulle ont été utilisés dans différents problèmes SSI (Desai et al. 1984 ; Clough et Duncan 1971 ; Hu et Pu 2003). Cependant, cet élément ne peut pas capturer avec précision le comportement volumétrique des interfaces granulaires sol-structure. De plus, la rigidité de l'élément dans la direction normale est supposée très grande pour interdire la pénétration ou le chevauchement du sol et des

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

structures aux interfaces. Cette hypothèse entraîne une prédiction insatisfaisante des contraintes normales dans les problèmes SSI et de joints (Desai et al. 1984 ; Sharma et Desai 1992). Desai et al. (1984) ont observé que l'interface entre le sol granulaire et le matériau structural a une épaisseur et que son comportement est différent de celui des sols adjacents. Cela a également été confirmé par d'autres études (par exemple : Fakharian 1996 ; Hu et Pu 2004 ; Frost et al. 2004 ; Dejong et Westgate 2009 ; Zang et Zang 2009) sur le comportement des interfaces granulaires sol-structure. Desai et al. (1984) ont proposé que la zone d'interface dans les problèmes SSI soit simulée par des éléments solides minces bidimensionnels ou tridimensionnels avec une petite épaisseur ( $t$ ), représentés schématiquement dans la Fig. 5.1. Ces éléments en couches minces, définis par des modèles constitutifs, ont été utilisés dans différentes études (par exemple Al Younes 2013 ; Saberi et al. 2018). Comme le montre la Fig. 5.1 le vecteur de contrainte dans un élément d'interface se compose d'une contrainte normale et d'une contrainte tangentielle dans un élément bidimensionnel (Fig. 5.1a) et d'une contrainte normale et de deux contraintes tangentielles dans un élément tridimensionnel (Fig. 5.1b).



**Fig. 5.1** Diagramme schématique des éléments solides minces conventionnels : a) élément 4 nœuds en deux dimensions et b) élément 8 nœuds en trois dimensions

La formulation de la matrice de rigidité d'un élément solide mince bidimensionnel dans un repère local utilisable dans un code d'éléments finis est expliquée dans cette section. La géométrie d'un élément d'interface à quatre nœuds est illustrée dans la Fig. 5.1a.

Les déplacements dans la direction  $x$  ( $U$ ) et dans la direction  $y$  ( $V$ ) à tout point à l'intérieur de l'élément solide mince de l'interface sont donnés comme suit :

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

---

$$\begin{Bmatrix} U \\ V \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N1 & 0 & N2 & 0 & N3 & 0 & N4 & 0 \\ 0 & N1 & 0 & N2 & 0 & N3 & 0 & N4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U1 \\ 1 \\ U2 \\ 2 \\ U3 \\ 3 \\ U4 \\ 4 \end{Bmatrix} = N\{d\} \quad (5.1)$$

Où  $N_i$  (c'est-à-dire  $N1, N2, N3, N4$ ) sont des fonctions d'interpolation, obtenues à partir de l'équation (5.1) pour un élément solide bidimensionnel, et  $\{d\}$  est le vecteur de déplacement nodal.

$$N_i = \frac{1}{4} \left( 1 \pm \frac{2x}{L} \right) \left( 1 \pm \frac{2y}{t} \right) \quad (5.2)$$

$L$  et  $t$  sont la longueur et l'épaisseur de l'élément, respectivement.

Les déformations sont liées avec les déplacements comme suit:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} = B\{d\} \quad (5.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Où  $B$  est la matrice de transformation déformation-déplacement.

Les trois composants de contrainte associés à l'équation (5.3) sont  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  et  $\tau_{xy}$ .  $\sigma_x$  est la contrainte dans le plan  $x$  de l'interface,  $\sigma_y$  est la contrainte normale à l'interface et  $\tau_{xy}$  est la contrainte de cisaillement. Étant donné que l'épaisseur dans les interfaces est faible, les contributions de  $\varepsilon_x$  et  $\sigma_x$  sont petites et peuvent être ignorées comme expliqué par Sharma et

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

Desai (1992). Ainsi, les composants de contrainte et de déformation au sein d'une zone d'interface bidimensionnelle peuvent être obtenus à partir de:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \gamma \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{V_{relati}}{t} \\ \frac{U_{relati}}{t} \end{Bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{Bmatrix} \quad (5.6)$$

Dans cette formulation

$V_{relative}$  et  $U_{relative}$  : sont les déplacements normaux et de cisaillement relatifs.

$d_\sigma, d_\varepsilon$  : Les variations incrémentales de contrainte et de déformation.

sont reliées entre elles à l'aide des approches classiques de la théorie de l'élasticité et de la plasticité, comme indiqué ci-dessous :

$$\{d_\sigma\} = \begin{Bmatrix} d_{\sigma_n} \\ d_\tau \end{Bmatrix} = D \{d_\varepsilon\} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{\varepsilon_n} \\ d_\gamma \end{Bmatrix} \quad (5.7)$$

Où D est la matrice constitutive, qui peut être élastique ou élasto-plastique en fonction du comportement du matériau de l'interface. La matrice de rigidité K s'écrit comme suit :

$$K = \iint B^T D B dx dy \quad (5.8)$$

### 5.2.2.2 Modèle constitutif d'interface

Les modèles constitutifs d'interface pour la simulation du comportement des matériaux d'interface ont d'abord été développés sur la base de l'élasticité non linéaire, comme les modèles proposés par Clough et Duncan (1970), Desai et al. (1985), et Desai et Nagaraj (1988). Le modèle d'élasticité non linéaire développé par Clough et Duncan est couramment employé dans la modélisation numérique des éléments d'interface. Il repose sur une fonction hyperbolique pour décrire la relation entre la contrainte de cisaillement et le déplacement. Les modèles d'élasticité non linéaire ne sont pas capables de simuler la dilatance normale sous chargement de cisaillement. Pour surmonter les limitations de l'élasticité non linéaire, les modèles constitutifs d'interface élasto-plastiques ont été proposés dans le cadre de la plasticité. Ghaboussi et al. (1973), et Brandt (1985) en se basant sur la plasticité élastique-parfaite, Ghionna et Mortara (1985), Genaro et Frank (2002), et D'Aguiar et al. (2011), dans le cadre de la plasticité classique, ont développé des modèles constitutifs pour simuler le comportement des interfaces granuleuses. D'autres approches telles que la plasticité avec endommagement et le concept d'état perturbé (DSC) ont également été utilisées par Desai et Ma (1992), Hu et Pu (2004), Desai et al. (2005), et Zhang et Zhang (2008), pour simuler l'endommagement et l'adoucissement au sein des zones d'interface. Pour mieux simuler le comportement complexe des interfaces, en particulier sous chargement cyclique, Liu et al. (2006, 2014), et Liu et Ling (2008) ont développé des modèles constitutifs dans le cadre de la plasticité généralisée. La

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

plasticité à deux surfaces a également été une théorie appropriée pour développer des modèles constitutifs avancés sous chargement monotone et cyclique. En utilisant cette théorie, Lashkari (2013) et Lashkari et Kadivar (2016) ont développé des modèles constitutifs d'interface pour les conditions monotones, et Shahrour et Rezaie (1997), Mortara et al. (2002), et Saberi et al. (2016, 2017, 2018) ont proposé des modèles constitutifs d'interface capables de simuler le comportement cyclique et les conditions de mécanique des sols en état critique. Stutz et al. (2016) ont récemment simulé le comportement de l'interface sol-structure granulaire pendant les conditions monotones en utilisant également la théorie de l'hypoplasticité. Selon Genaro et Frank (2002), dans les zones d'interface, les rigidités élastiques normales et tangentielles dépendent de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ). Cette hypothèse a été appliquée avec succès dans la formulation élastique de plusieurs modèles constitutifs d'interface tels que Liu et al. (2006, 2014), Lashkari (2016), et Saberi et al. (2016, 2017). La majeure partie des déformations dans les interfaces sol-structure granulaire est de nature plastique ; par conséquent, la réponse générale de ces systèmes n'est pas beaucoup affectée par les constantes d'élasticité tant qu'elles sont de l'ordre de grandeur correct. Dans les modèles constitutifs d'interface, la rigidité normale élastique peut être considérée comme proportionnelle à la rigidité tangentielle élastique, et une rigidité normale élastique égale à 1–1,5 fois la rigidité tangentielle élastique a permis d'obtenir des prédictions raisonnables dans de nombreux systèmes d'interface sol-structure granulaire basés sur les simulations numériques précédentes telles que Ghionna et Mortara (2002), Lashkari (2013), et Saberi et al. (2016).

La majorité des modèles constitutifs d'interface existants mentionnés ci-dessus ont été développés pour les interfaces sol-structure en sable. De nombreuses grandes géostructures telles que les remblais, les barrages à parement en béton et les lignes de chemin de fer à grande vitesse ont des interfaces entre des sols graveleux et des matériaux de construction. Comme l'ont noté Zhang et Zhang (2006, 2008), le comportement mécanique, y compris la relation contrainte-déplacement, la friabilité des particules sous cycles de cisaillement et la résistance cyclique, des interfaces sol-structure graveleuses peut être significativement différent de celui des interfaces sol-structure sableuses. Parmi les modèles constitutifs d'interface, les modèles de Liu et al. (2014) et de Saberi et al. (2018) ont été calibrés pour les interfaces sol-structure tant sableuses que graveleuses, tandis que les modèles proposés par Zhang et Zhang (2008) et Saberi et al. (2016, 2017) ont été formulés spécifiquement pour les interfaces graveleuses.

Les observations expérimentales (par exemple : Fakharian 1996 ; Dejong et al. 2006 ; Dejong et Westgate 2009) ont révélé qu'une interface sol-structure granulaire, similaire aux sols granulaires sous chargement monotone, atteint un état ultime à de grands déplacements de cisaillement. Dans cet état, bien que le coefficient de frottement ( $\mu = \frac{\sigma}{\tau}$ ) reste inchangé, la déformation de cisaillement augmente sans changement de volume. Cet état ultime est appelé état critique en mécanique des sols et a été utilisé pour la première fois par Liu et al. (2006) dans la formulation constitutive d'un modèle d'interface sol-structure en sable. Par la suite, le concept de mécanique des sols à état critique (CSSM) a été utilisé dans un certain nombre de modélisations constitutives des interfaces entre sols sableux et matériaux structuraux, tels que les modèles proposés par Liu et Ling (2008), Lahskari (2013), Liu et al. (2014) et Saberi et al. (2018), ainsi que pour les sols graveleux et les matériaux structuraux par Saberi et al. (2016, 2017). L'adoption du concept de CSSM dans la formulation des modèles constitutifs d'interface a grandement aidé à simuler le comportement dépendant de l'état de l'interface sol-structure granulaire en utilisant le concept de paramètre d'état ( $\Psi$ ). Liu et al. (2006, 2014), Liu et Ling

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

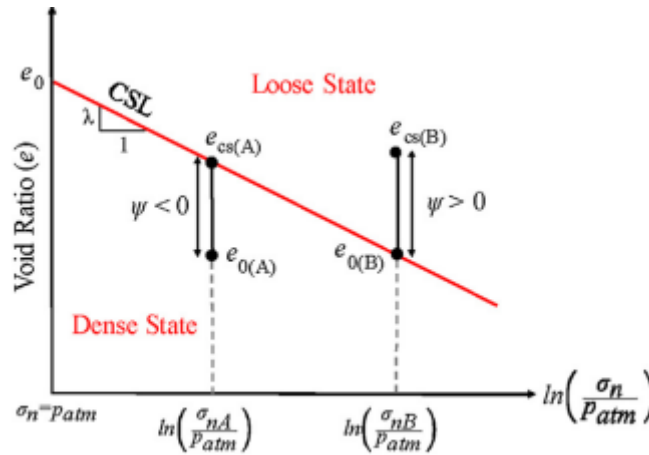
(2008), D'Aguiar et al. (2011), Lahskari (2013), Lashkari et Kadivar (2016) et Saberi et al. (2016) ont utilisé le concept de paramètre d'état ( $\Psi$ ) dans leurs formulations constitutives pour les simulations de modèles d'interface. Basé sur le concept de paramètre d'état ( $\Psi$ ), suggéré pour la première fois par Been et Jefferies (1985), le comportement d'un sol dépend de l'état actuel par rapport à l'état critique dans le plan lié l'indice vides ( $e$ ) – contrainte effective moyenne ( $p$ ). Cela est quantifié dans un modèle d'interface par le concept modifié du paramètre d'état ( $\Psi$ ) dans le plan représentée par l'équation :  $e - \ln(\frac{\sigma_n}{p_{atm}})$  selon l'équation (5.9) .

$$\Psi = e - e_{cs} \quad (5.9)$$

Où  $e$  est l'indice des vides à l'état actuel,  $e_{cs}$  est l'indice des vides à l'état critique et  $p_{atm}$  est la pression atmosphérique. Pour utiliser le concept du paramètre d'état, il est nécessaire de définir l'emplacement de la ligne d'État Critique (CSL) dans le plan représentée par l'équation :  $e - \ln(\frac{\sigma_n}{p_{atm}})$ . Dans un modèle d'interface, si la CSL est formulée comme une relation linéaire dans le plan :  $e - \ln(\frac{\sigma_n}{p_{atm}})$ ,  $e_{cs}$  est donné par l'équation (5.10)

$$e_{cs} = e_0 - \lambda \ln \left( \frac{\sigma_n}{p_{atm}} \right) \quad (5.10)$$

Où  $e_0$  est l'indice des vides à la contrainte normale atmosphérique, et  $\lambda$  est la pente de la ligne d'état critique dans le plan de  $e - \ln(\frac{\sigma_n}{p_{atm}})$ . La Fig. 5.2 illustre les définitions du paramètre d'état et de la ligne d'état critique. Comme on peut le déduire de cette figure, si l'état initial du sol est sous la CSL, le paramètre d'état ( $\Psi$ ) est considéré comme négatif et le sol est dans un état dense et connaîtra une expansion (dilatation) pour de grands déplacements.



**Fig 5.2** La ligne d'état critique et la définition du paramètre d'état dans la formulation d'interface

Pour les états au-dessus de la CSL, le sol est plus lâche que l'état critique et le paramètre d'état ( $\Psi$ ) a une valeur positive. Dans cette condition, le sol présente un comportement contractif sous déformation de cisaillement. En utilisant le concept du paramètre d'état, les modèles constitutifs d'interface sont capables de simuler le comportement des interfaces sol-structure granulaire avec différentes densités (lâche et dense) en utilisant un ensemble unique

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

de paramètres du modèle, comme le montrent les études précédentes telles que Liu et al. (2006, 2014), Liu et Ling (2013), Lahskari (2013), et Saberi et al. (2016, 2017).

Pour que les interfaces soient classées comme étant à l'état critique, deux conditions importantes doivent être remplies : (1) L'indice des vides ( $e$ ) et la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) dans le plan :  $e - \ln(\frac{\sigma_n}{p_{atm}})$  doivent satisfaire à la formulation de la CSL (Éq. 5.9), et (2) le coefficient du frottement ( $\mu = \frac{\sigma}{\tau}$ ) dans le plan  $\tau - \sigma_n$  doit être égal à celui à l'état critique ( $\mu^{cs}$ ). Le coefficient du frottement à l'état critique est défini comme le rapport de la contrainte de cisaillement ( $\tau_{cr}$ ) à la contrainte normale ( $\sigma_{cr}$ ) à l'état critique. L'état critique dans le plan  $\tau - \sigma_n$  est une ligne partant de l'origine avec une pente égale à ( $\mu^{cs}$ ). Pour être compatible avec la CSSM, un modèle constitutif d'interface doit satisfaire aux deux conditions mentionnées ci-dessus.

Parmi les modèles constitutifs d'interface existants, un petit nombre possède une certaine capacité à simuler les relations charge-déformation cycliques. Ces modèles ont été développés dans différents cadres de plasticité : élasto-plastique. Cependant, la théorie de la plasticité à deux surfaces est connue pour être la plus adaptée à la simulation du comportement cyclique des matériaux sous une histoire de chargement complexe dans la plage plastique. Lors du chargement cyclique, les interfaces sol-structure granulaire subissent une contraction cumulative, principalement due à la cassure des particules de sol. Par conséquent, prendre en compte la cassure des particules dans la formulation du modèle constitutif pour les interfaces sous chargement cyclique peut améliorer la précision. Parmi les modèles constitutifs d'interface existants, Edill et Zeghal (2002), Ling et Liu (2008), Liu et al. (2014) et Saberi et al. (2017) ont développé des modèles d'interface intégrant la rupture des particules. Des recherches précédentes ont montré que la rupture des particules dans les sols granulaires influence la position de la CSL dans le plan :  $e - \log(p'')$ , où  $p''$  est la pression effective moyenne (Daouadji et al 2001 ; Kooper et li 1992 ; Konrad 1998). Lors des essais de compression triaxiale, la CSL subit un changement brusque de pente au début de la cassure des particules (Konrad 1998). Cependant, en induisant un chemin de contrainte déviatorique lors des essais triaxiaux, la CSL des sols granulaires dans le plan  $e - \log p_0$  se déplace vers le bas (translation vers un indice de vides plus bas) en raison de la cassure des particules (Daouadji et al. 2001 et 2010 ; Ghafghazi et al. 2014).

Pour simuler l'effet de la cassure des particules dans les modèles constitutifs d'interface en déplaçant la CSL vers des indices de vides plus petits, deux facteurs jouent un rôle important dans le processus. Tout d'abord, les modèles constitutifs d'interface doivent être compatibles avec la mécanique des sols à état critique (CSSM). Ensuite, la formulation de la CSL doit être développée de manière à simuler la translation vers le bas dans le plan  $e - \ln(\frac{\sigma_n}{p_{atm}})$ . À cet effet, la formulation de la CSL du modèle peut être modifiée conformément à l'Éq. (5.11).

$$e_{cs} = e_0(1 - Br) - \lambda \ln \left( \frac{\sigma_n}{p_{atm}} \right) \quad (5.11)$$

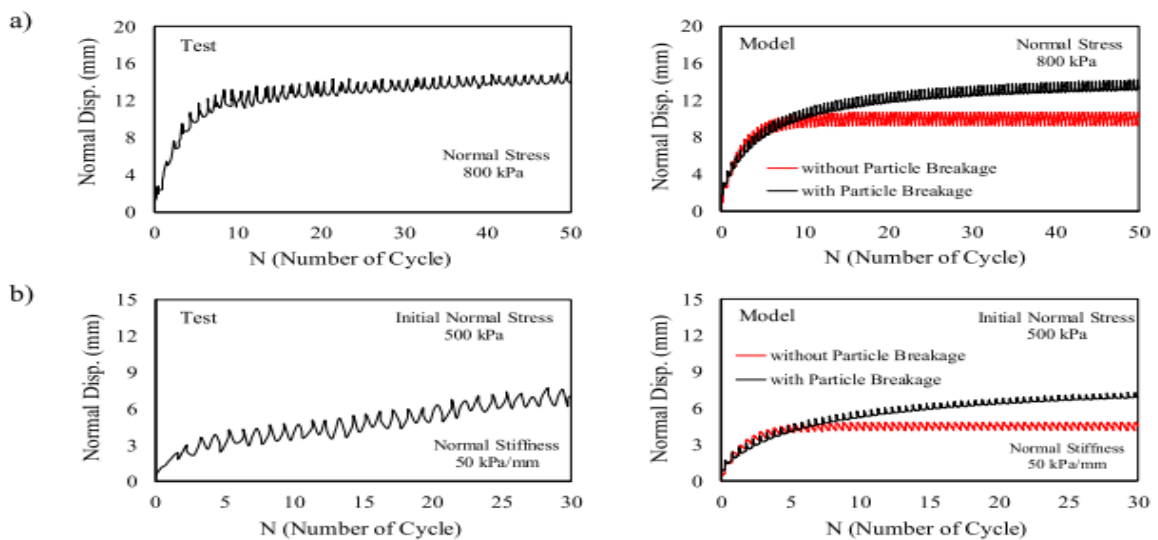
où  $Br$  est un indice pour quantifier le degré de cassure des particules. L'indice proposé par Lade et al. (1996) est connu pour être efficace dans la quantification du degré de cassure des particules. En utilisant cet indice,  $Br$  est donné par une formulation hyperbolique indiquée dans l'Éq. (5.12).

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

$$B_r = \frac{W}{a+bW} \quad (5.12)$$

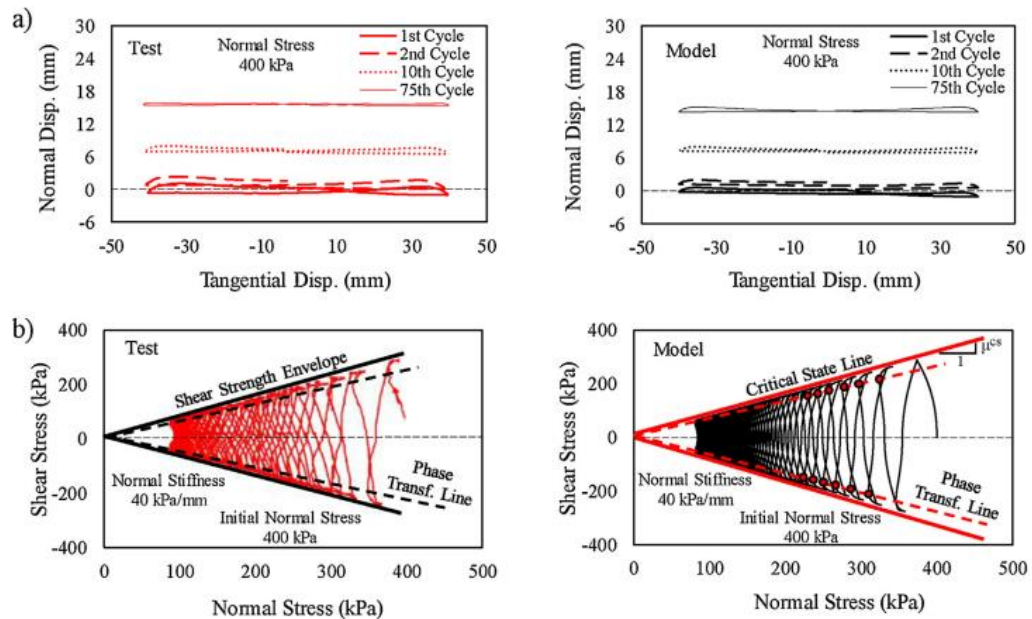
Où  $a$  et  $b$  sont deux constantes, et  $W$  est soit l'énergie totale d'entrée ( $W_e$ ), soit le travail plastique total ( $W_p$ ).

La Fig. 5.3 illustre les performances du modèle d'interface proposé par Saberi et al. (2017) avec et sans prise en compte de la cassure des particules. Le modèle développé par Saberi et al. (2017) est un modèle constitutif d'interface avancé formulé dans le cadre de la plasticité à deux surfaces et compatible avec les concepts de CSSM et de paramètre d'état ( $\Psi$ ). La cassure des particules a été simulée pour cette comparaison en traduisant la CSL dans le plan  $e-\ln(\frac{\sigma_n}{p_{atm}})$  comme une fonction hyperbolique du travail plastique total ( $W_p$ ). La Fig. 5.3 concerne une interface entre sol graveleux et acier sous chargement cyclique CNL ( $\sigma_n = 800$  kPa) (Fig. 5.3a) et sous des chemins de contraintes CNS ( $\sigma_n = 500$  kPa et  $K = 50$  kPa/mm) (Fig. 5.3b). Les données expérimentales proviennent de Zhang et Zhang (2006, 2009). Comme on peut l'observer sur la Fig. 5.3, en négligeant la cassure des particules, la meilleure prédiction possible par le modèle pour la contraction cumulative se stabilise après un petit nombre de cycles et ne peut pas bien simuler la contraction progressive observée avec l'augmentation du nombre de cycles ( $N$ ). De plus, la contraction cumulative de l'interface est largement sous-estimée, surtout pour un grand nombre de cycles. Le modèle proposé par Saberi et al. (2017) en tenant compte de la cassure des particules est capable de simuler la contraction normale de l'interface jusqu'à un grand nombre de cycles. Comme on peut le voir sur la Fig. 5.4a, le modèle simule de manière satisfaisante la contraction cumulative d'une interface sol-graveleux-acier jusqu'à 75 cycles. Comme représenté sur la Fig. 5.4b, le modèle est également capable de simuler le chemin des contraintes dans le plan de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) et de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) pendant le chargement cyclique pour une interface gravier-acier. Les points de transformation de phase auxquels la contraction se transforme en dilatation sont précisément capturés par le modèle. De plus, l'enveloppe de résistance au cisaillement dans le plan  $\sigma_n - \tau$  pour les observations expérimentales est également bien prise en compte par le modèle en utilisant la définition de la ligne d'état critique.



**Fig. 5.3** Comparaison de l'impact de friabilité des particules (a) chemin de contrainte CNL, et (b) chemin de contrainte CNS.

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats



**Fig. 5.4** Comparaison des résultats du modèle et les résultats expérimentaux : a) déplacement vertical - déplacement horizontal sous le chemin de contrainte CNL (données de Hou (2008)), et b) contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) - contrainte normale ( $\sigma_n$ ) sous le chemin de contrainte CNS (données de Zhang et Zhang (2006, 2009))

### 5.2.3 Méthode des éléments discrets (DEM)

Dans la méthode des éléments finis (FEM), les sols ont été modélisés comme un continuum. Les sols étant des matériaux granulaires composés d'un grand nombre de particules, la FEM ne peut pas évaluer le comportement du sol au niveau des particules, où les particules tournent et les déplacements entre les particules sont importants. Cundall et Strack ont proposé en 1979 la Méthode des Éléments Discrets (DEM) pour étudier le comportement des matériaux granulaires au niveau des particules. Un nombre limité d'études ont utilisé la DEM pour simuler et étudier le comportement des interfaces sol-structure (Jensen et al. (1999, 2001), Frost et al. (2002), et Martinez et Frost (2017)). La formation de la zone de cisaillement entre le sol granulaire et le matériau structural a également été simulée en utilisant la DEM par Wang et al. (2007). Leur étude a confirmé les résultats d'investigations antérieures par Uesugi (1988), Hu et Pu (2004), DeJong et al. (2006), et DeJong et Westgate (2009) sur la formation d'une zone de cisaillement avec une épaisseur allant jusqu'à 8–10 fois les diamètres des particules à la zone de contact entre les sols granulaires et les surfaces structurales. Bien que la DEM présente certaines limites concernant le nombre de particules à simuler et la calibration du modèle, Elle offre des données essentielles pour comprendre la mécanique des interfaces entre le sol et les structures granulaires, ainsi que les divers facteurs qui affectent le comportement de ces zones critiques, qui ne peuvent être capturés par la FEM ou même en laboratoire. Des investigations supplémentaires sur le comportement des interfaces en utilisant la DEM sont encore nécessaires et, heureusement, les capacités de la DEM se sont largement améliorées ces dernières années. Ainsi, la méthode DEM et l'interface sol-structure granulaire pourraient constituer un sujet intéressant pour de futures recherches

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

### 5.3 Modélisation numérique de l'effet du frottement mural dû à la consolidation par la méthode des éléments discrets (DEM)

#### 5.3.1 Méthode des éléments discrets :

Cundall et Strack (1979) présentent la formulation fondamentale de la Méthode des Éléments Discrets (DEM), qui repose sur une approche de sphères déformables. Cette méthode considère explicitement les particules individuelles dans un matériau granulaire et leurs interactions (O'Sullivan, 2011). Elle résout la loi du mouvement de Newton pour contraindre les particules à se déplacer vers de nouvelles positions. Une fois les particules créées, les contacts entre elles sont détectés à chaque itération. Ces contacts transmettent les forces et les moments agissant sur les particules en raison de la gravité ou des collisions (Williams et al. 1985). Une fois les forces et les moments connus, la vitesse, le déplacement et la rotation des particules peuvent être calculés.

La forme des particules est l'une des caractéristiques les plus importantes contrôlant la réponse des matériaux granulaires (Cho et al. 2006), et dans le cas des simulations numériques utilisant la DEM, elle doit être correctement capturée si la méthode est utilisée comme outil prédictif (Lu et al. 2015). Les sphères sont couramment utilisées dans les simulations, ce qui est avantageux en raison de l'efficacité de la détection des contacts, ce qui influence à son tour le temps de simulation. Il est connu que le comportement global peut diverger des résultats expérimentaux lorsque des sphères sont utilisées dans les simulations (Coetzee, 2017). Par conséquent, les modèles disponibles utilisent soit des particules non sphériques sous forme de grappes (clumps) (Tolomeo et McDowell, 2022 ; Suhr et Six, 2022), soit sous forme de blocs (Block) définis comme des polyèdres fermés (Moncada et al. 2023 ; Liu et al. 2023), soit appliquent un moment pour résister au roulement des particules au contact (O'Sullivan, 2011). Ce moment résiste au roulement et simule l'effet d'enchevêtrement observé chez les grains réels. Cette étude utilise le modèle de contact linéaire de résistance au roulement basé sur le modèle de Iwashita et Oda, implémenté dans le logiciel commercial Particle Flow Code (PFC3D), pour modéliser les interactions des particules (Itasca, V.6.0). Le modèle de résistance au roulement a été choisi car il est le modèle le plus simple capable de capturer la réponse réelle du matériau granulaire via un proxy de la forme des particules.

##### 5.3.1.1 Itasca PFC6.0 (particle flow code):

PFC (Particle Flow Code) est un cadre de modélisation à éléments distincts (DEM) polyvalent, disponible en versions bidimensionnelle et tridimensionnelle (PFC2D et PFC3D, respectivement). La suite PFC inclut à la fois PFC2D et PFC3D. PFC2D peut également être acheté séparément.

PFC (Particle Flow Code) simule des matériaux synthétiques constitués d'un ensemble de particules rigides de tailles variées qui interagissent entre elles lors des contacts. Ces particules modélisent à la fois des matériaux granulaires et solides. Les modèles PFC permettent de simuler indépendamment le mouvement (translation et rotation) ainsi que l'interaction des particules rigides, lesquelles échangent des forces et des moments internes lors des contacts. Les particules peuvent être représentées sous différentes formes, telles que des disques en 2D, des sphères en 3D, des "grappes" rigides de disques ou de sphères, ainsi que des polygones convexes en 2D ou des polyèdres en 3D. La mécanique des contacts repose sur des lois d'interaction qui actualisent les forces et moments internes. PFC propose seize modèles de contact intégrés, tout en offrant la possibilité d'ajouter des modèles personnalisés définis par l'utilisateur (UDMs) programmés en C++.

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

La version PFC6.0 inclut divers modèles de contact, qui sont résumés dans le tableau ci-dessous :

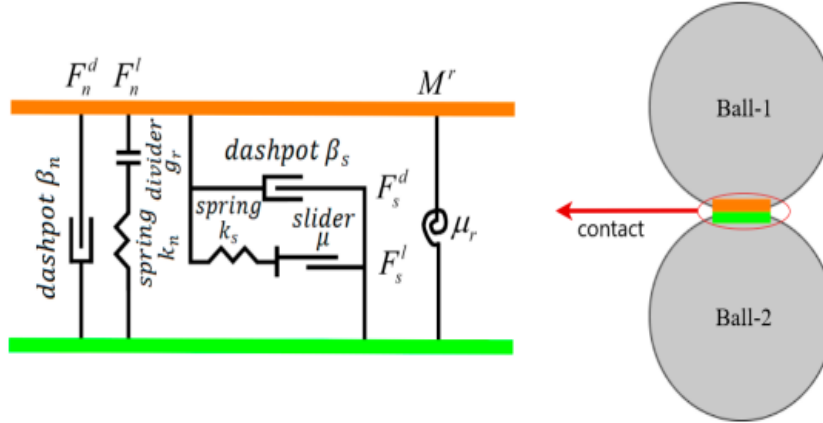
**Tableau. 5.1** Les modèles adoptés dans le logiciel PFC3d

| Modèle de contact                         | description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Null</b>                               | est le modèle de contact par défaut, sans interaction mécanique. Aucune force ni moment n'est généré.                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Linear contact model</b>               | Le modèle linéaire reproduit le comportement mécanique d'une interface infinitésimale, élastique linéaire et frictionnelle qui supporte une force ponctuelle. L'interface ne résiste pas à la rotation relative, et des amortisseurs visqueux optionnels peuvent être activés.                                                                 |
| <b>Linear bond model</b>                  | Le modèle de liaison de contact linéaire fournit le comportement d'une interface infinitésimale, élastique linéaire, et soit frictionnelle, soit liée, qui supporte une force ponctuelle et ne résiste pas à la rotation relative.                                                                                                             |
| <b>Linear Parallel Bond</b>               | Le modèle de liaison parallèle linéaire fournit le comportement force-déplacement d'un matériau cimentaire de taille finie déposé entre deux pièces à proximité de l'emplacement du contact, agissant en parallèle avec un modèle linéaire.                                                                                                    |
| <b>Soft-bond</b>                          | Semblable au modèle de liaison parallèle linéaire, mais avec l'ajout d'un paramètre de ramollissement qui permet de modifier la rigidité dans le régime de défaillance en traction, permettant une dégradation de la rigidité en traction en fonction de l'allongement croissant de la liaison.                                                |
| <b>Linear rolling resistance</b>          | Basé sur le modèle linéaire mais incorporant un couple agissant sur les pièces en contact pour résister au mouvement de roulement dans les applications granulaires.                                                                                                                                                                           |
| <b>Adhesive Rolling Resistance Linear</b> | Basé sur le modèle de résistance au roulement linéaire, auquel est ajouté un composant adhésif. La cohésion provient d'une attraction à courte portée, qui est une approximation linéaire de la loi de force de van der Waals.                                                                                                                 |
| <b>Flat Joint</b>                         | Un contact de joint plat simule le comportement d'une interface entre deux surfaces notionnelles, chacune étant rigidement connectée à une boule ou un caillou. Les surfaces notionnelles sont appelées faces, qui sont des lignes (PFC2D) ou des disques (PFC3D).                                                                             |
| <b>Smooth Joint</b>                       | Le modèle de joint lisse simule le comportement d'une interface indépendamment des orientations locales des contacts des particules le long de l'interface. Le comportement d'un joint frictionnel ou lié peut être modélisé en attribuant des modèles de joint lisse à tous les contacts entre particules situées des côtés opposés du joint. |
| <b>Hertz</b>                              | Le modèle de contact Hertz dans PFC consiste en une formulation non linéaire basée sur une approximation de la théorie de Mindlin et Deresiewicz.                                                                                                                                                                                              |
| <b>Hysteretic</b>                         | Le modèle de contact hystérétique dans PFC combine la portion élastique du modèle Hertz comme décrit dans le document sur le modèle de contact Hertz, avec un groupe alternatif d'amortisseurs consistant en un élément viscoélastique non linéaire dans la direction normale.                                                                 |
| <b>Burger's</b>                           | Simule les mécanismes de fluage en utilisant un modèle Kelvin et un modèle Maxwell connectés en série dans les directions normale et de cisaillement.                                                                                                                                                                                          |

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

### 5.3.2 Le modèle de contact de résistance au roulement (rolling resistance contact model RSCM):

Le modèle de contact de résistance au roulement (avec des particules simples) a été utilisé. La résistance au roulement est appliquée en ajoutant un coefficient de frottement au roulement aux contacts entre les particules modélisées, comme le montre la Figure 5.5. Comparé au modèle de contact linéaire largement utilisé, ce modèle est plus performant pour offrir une représentation réaliste des assemblages en restreignant la rotation relative des particules.



**Fig. 5.5** Illustration schématique du modèle de résistance au roulement

Le modèle de contact de résistance au roulement dans PFC3D est basé sur le modèle linéaire mais inclut un mécanisme de résistance au roulement. La loi force-déplacement pour le modèle linéaire de résistance au roulement met à jour la force et le moment de contact comme suit :

$$F^l + F_c, \quad M_c = M^r$$

Ici,  $F^l$  désigne la force linéaire,  $F_c$  désigne la force d'amortissement, et  $M^r$  désigne le moment de résistance au roulement. Les forces linéaire et d'amortissement sont mises à jour de la même manière que dans le modèle linéaire, tandis que la résistance au roulement est mise à jour en suivant les étapes ci-dessous. Tout d'abord, le moment de résistance au roulement est incrémenté comme suit :

$$M^r = M^r + K_r \Delta\theta_b$$

Où  $\Delta\theta_b$  est l'incrément de rotation relative et  $K_r$  est la rigidité de la résistance au roulement, défini comme suit :

$$K^r = K^s \bar{R}^2$$

Avec  $\bar{R}$  est le diamètre effective de contact, défini comme suit :

$$\frac{1}{\bar{R}} = \frac{1}{R^{(1)}} + \frac{1}{R^{(2)}}$$

$R^{(1)}$  et  $R^{(2)}$  sont les rayons des particules en contact. Si un côté du contact est un mur, le rayon correspondant :  $R^{(2)} = \infty$

La magnitude du moment de résistance au roulement mis à jour est ensuite vérifiée et comparée au seuil limite :

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

$$\begin{cases} M^r = M^r, \|M^r\| \leq M^* \\ M^* \left( \frac{M^r}{\|M^r\|} \right), \text{autrement} \end{cases}$$

Le couple limite est défini :

$$M^* = \mu_r R F_n^l$$

Où  $\mu_r$  est le coefficient de résistance au roulement et  $F_n^l$  est la force normale linéaire.

### 5.3.3 Les étapes de la modélisation :

La modélisation comprend les étapes suivantes :

- Créer les demi-boîtes inférieure et supérieure.
- Créer un ensemble de sphères représentant les grains du matériau étudié, avec toutes leurs propriétés, qui se stabilisent sous l'effet de la gravité.
- Appliquer la contrainte de consolidation souhaitée.
- Appliquer la contrainte de cisaillement en appliquant une vitesse de cisaillement angulaire tout en faisant tourner la demi-boîte inférieure, maintenant la demi-boîte supérieure fixe, et conserver la même contrainte de consolidation.

#### a) Création des deux demi-boîtes :

Avant de créer les deux demi-boîtes, il faut définir 'l'étendue du domain' ou 'domain extent' dans lequel sera créer les deux demi-boîtes :

```
2 model domain extent -0.20 0.20
```

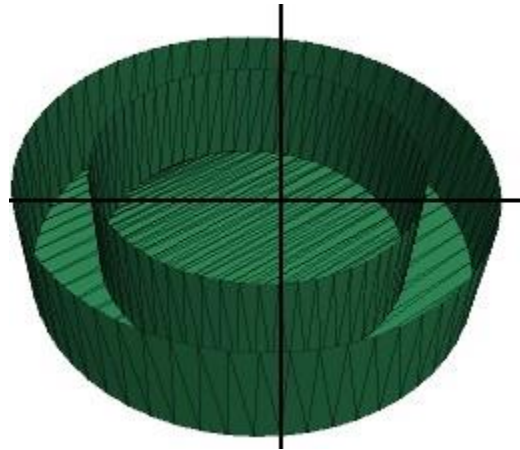
Après la définition du l'étendue du domain les deux demi-boîtes sont créés :

```
; --- create the shearbox lower part
wall generate group 'outer' cylinder ...
    axis 0 0 1 ...
    base 0.0 0.0 0 ...
    cap true false ...
    height 0.005 ...
    radius 0.05 ...
    resolution 0.1

wall generate group 'inner' cylinder ...
    axis 0 0 1 ...
    base 0.0 0.0 0 ...
    cap true false ...
    height 0.005 ...
    radius 0.035 ...
    resolution 0.1
```

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

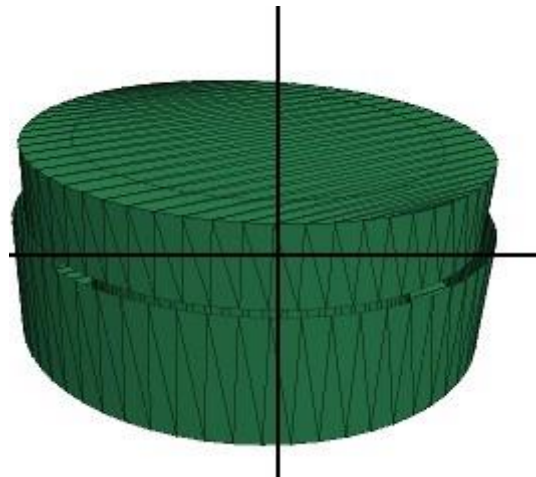
---



**Fig. 5.6** Vue de la partie inférieure de la boîte de cisaillement annulaire simulée

```
; --- create the shearbox upper part
wall generate group 'inner' cylinder ...
    axis 0 0 1 ...
    base 0.0 0.0 0.004 ...
    cap false false ...
    height 0.005 ...
    radius 0.037 ...
    resolution 0.1

wall generate group 'outer' cylinder ...
    axis 0 0 1 ...
    base 0.0 0.0 0.004 ...
    cap false true ...
    height 0.005 ...
    radius 0.048...
    resolution 0.1
```



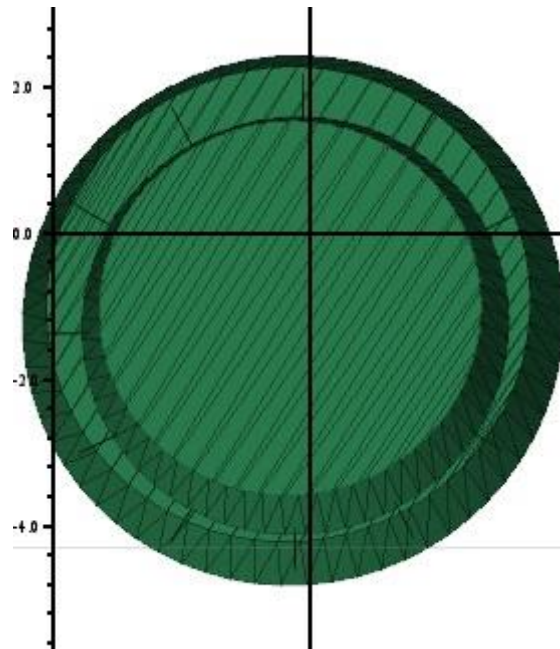
**Fig. 5.7** Modél de la boîte simulée

Les deux demi-boîtes sont définies sous forme de cylindres en utilisant la commande « wall generate » ou « générer un mur ». Cette commande permet de définir des murs sous forme de boîtes, de cylindres, de cônes, etc. La définition d'un cylindre à l'aide de la commande « wall generate » dans le groupe « cylindre » comprend les éléments suivants : son axe (X, Y, Z), sa

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

base (la position dans le repère (X, Y, Z)), sa couverture (cap) inférieure et supérieure selon la logique booléenne : true et false (true signifie créer une couverture et false non), sa hauteur (height), et son diamètre (radius).

Des secteurs radiaux sont introduits à la fois au niveau de la partie supérieure et inférieure des boîtes simulées. Ces secteurs ont la hauteur de  $R_{\max}$  de la pierre poreuse utilisée dans la partie expérimentale, afin d'obtenir une rugosité similaire. Ils sont employés par divers chercheurs pour simuler la rugosité de l'interface (Baran et al., 2009 ; Zhao et al., 2022 ; Uday et Pena Olarte, 2023). Selon Zhao et Uday, les secteurs de la partie inférieure sont également utilisés pour faire bouger les particules lors de la rotation de cette partie, tandis que ceux de la partie supérieure servent à fixer les particules de la partie supérieure. Cela permet d'obtenir un comportement linéaire en parallèle avec la résistance au roulement.

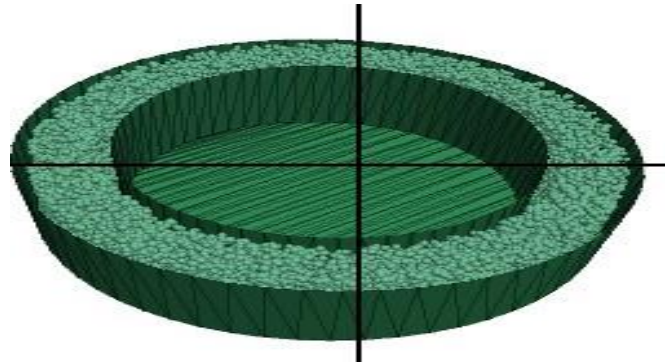


**Fig. 5.8** Secteurs radiaux introduit au niveau demi -boite supérieur

### b) Creation du materiau :

Les grains du matériau sont simulés par des sphères ayant un diamètre similaire à celui du matériau, ainsi que par ses caractéristiques (porosité, densité, etc.) :

```
; --- generate a ball assembly, settle under gravity
ball distribute porosity 0.25 ...
               resolution 0.006 ...
               radius 0.05 0.15 ...
               range cylinder end-1 (0,0,0) end-2 (0,0,0.005) ...
               radius 0.035 0.05
ball property 'fric' 0.01
ball attribute density 2640.0
model gravity 10.0
```



**Fig.5.9** Vue de l'espace annulaire comportant les sphères

La porosité, la fraction granulaire (radius), et la demi-boîte inférieure contenant le matériau granulaire, ainsi que sa densité, sont spécifiées. Un certain coefficient de frottement est attribué aux sphères pour qu'elles puissent se stabiliser sous l'effet de la gravité.

### C) Application de la contrainte de consolidation :

La contrainte de consolidation est appliquée aux sphères à l'aide de la commande « servo wall ». Cette commande applique une force générant la contrainte désirée, équivalente au poids d'une masse sous l'effet de la gravité, sur le mur supérieur de la boîte supérieure.

```
; --- activate servo on top wall to apply a target force
ball attribute displacement 0.0 0.0 0 damp 0.7
ball property 'fric' 0.5
[m=157.0] ; mass
[p=m*global.gravity()] ; force
wall servo force [p] activate on range set name 'Wall-7'
```

### d) Application de la contrainte de cisaillement :

La contrainte de cisaillement est générée en imposant une vitesse de cisaillement angulaire à la partie inférieure de la boîte de cisaillement annulaire, assurant ainsi un déplacement qui correspond aux conditions observées lors des essais expérimentaux. Dans le logiciel PFC3D, le déplacement est appliqué en utilisant la commande "wall rotate", en définissant l'axe de rotation, l'angle équivalent au déplacement expérimental (60 mm correspond à 80,92°) et le point de rotation. La vitesse de cisaillement est appliquée via la commande "wall spin", exprimée en rad/s (0,035 mm/min correspond à environ 0,00036 rad/s).

```
; --- maintain servo on top wall but superimpose an angle velocity
history purge
ball attribute displacement 0.0 0.0 0
wall attribute displacement 0.0 0.0 0
wall rotate axis 0 0 1 angle 80.92 point 0 0 0 ...
|         |         |         range cylinder end-1 (0,0,0) end-2 (0,0,0.005) ...
|         |         |         radius 0.05
wall rotate axis 0 0 1 angle 80.92 point 0 0 0 ...
|         |         |         range cylinder end-1 (0,0,0.005) end-2 (0,0,0.005) ...
|         |         |         radius 0.035
wall attribute spin 0.00036 range cylinder end-1 (0,0,0) end-2 (0,0,0.005)...
|         |         |         radius 0.05
wall attribute spin 0.00036 range cylinder end-1 (0,0,0) end-2 (0,0,0.005) ...
|         |         |         radius 0.035
measure create id 1 radius 0.15
measure history name '1' stress-xz id 1
measure history name '2' stress-yy id 1
```

Le modèle employé dans la simulation est le modèle linéaire de Résistance au Roulement (Rolling Resistance Linear Model). Ce modèle permet de limiter et de réduire la rotation des sphères (particules) afin d'obtenir un comportement linéaire comparable à celui observé expérimentalement.

| Les proprietes des particules                                              |                   |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|
| Le diameter des particules                                                 | mm                | 0.05-0.15 |
| Le module de Young E                                                       | Pa                | 1E7       |
| Le coefficient de rigidité normale à la rigidité de cisaillement $K_n/K_s$ | /                 | 1         |
| Densité                                                                    | Kg/m <sup>3</sup> | 2640      |
| Le coefficient de frottement inter-particules $\mu$                        | /                 | 0.5       |
| La porosité                                                                | /                 | 0.25      |
| Le coefficient de resistance au roulement $\mu_r$                          | /                 | 0.3       |

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

### 5.3.4 Présentation des résultats :

La modélisation des tassements verticaux liés à la consolidation s'effectue en modifiant la position de la base de la demi-boîte inférieure, selon la magnitude de tassement désiré. Les contraintes sont mesurées en créant des sphères de diamètre connu, ce qui permet de déterminer les contraintes de cisaillement selon les plans XZ ou YZ. Un exemple des contraintes mesurées pour les procédures multistage et pré cisaillement est présenté ci-dessous :

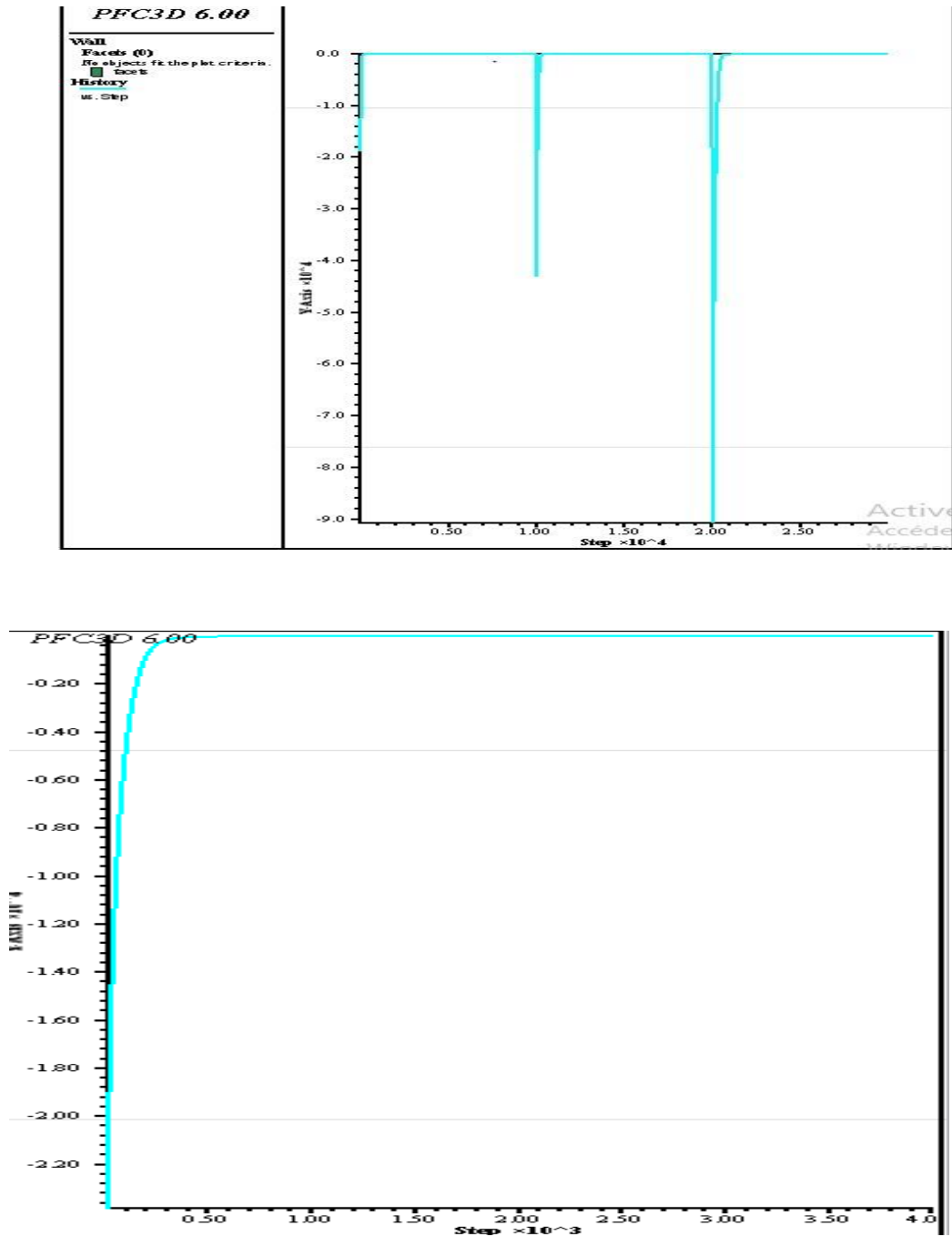
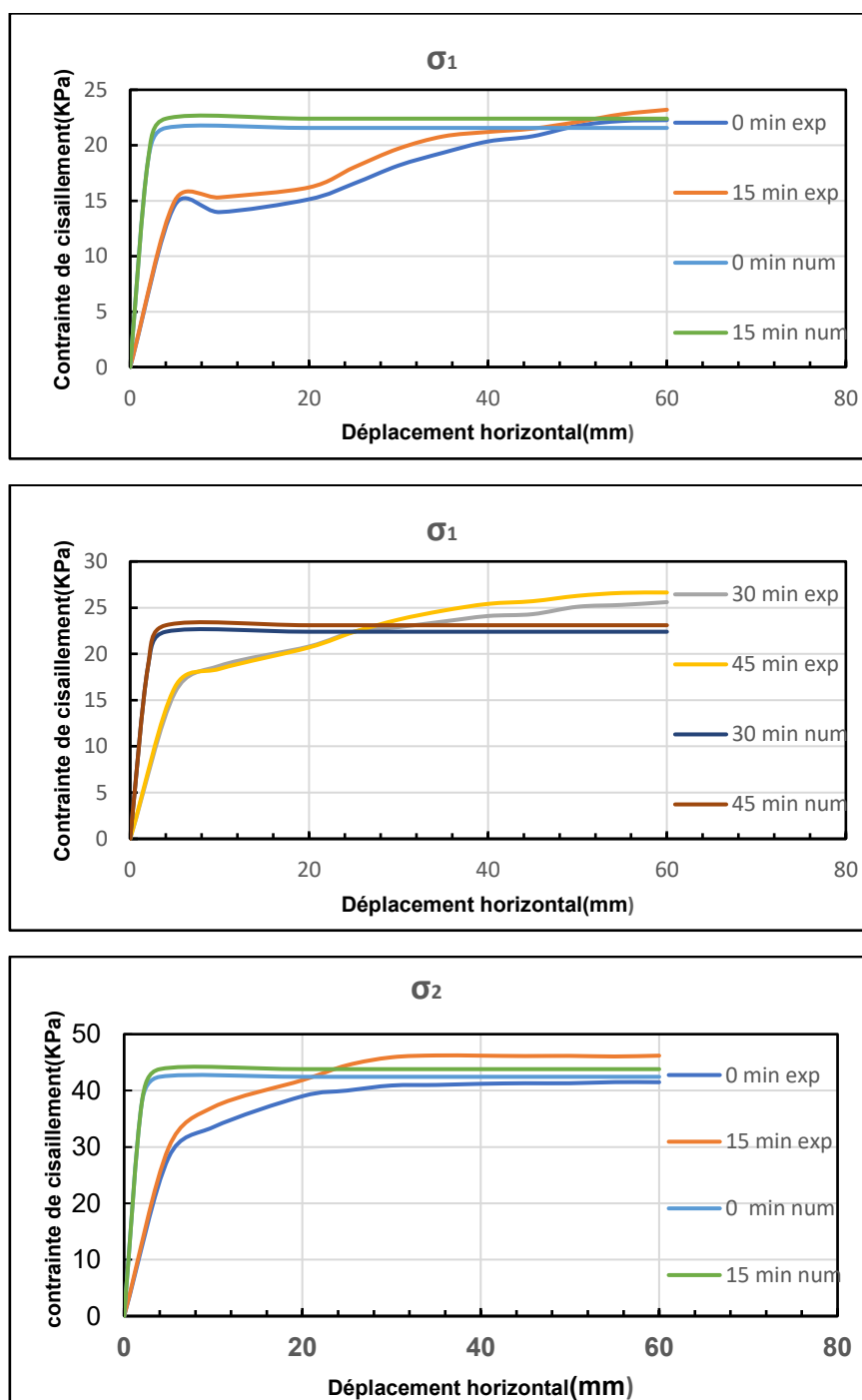


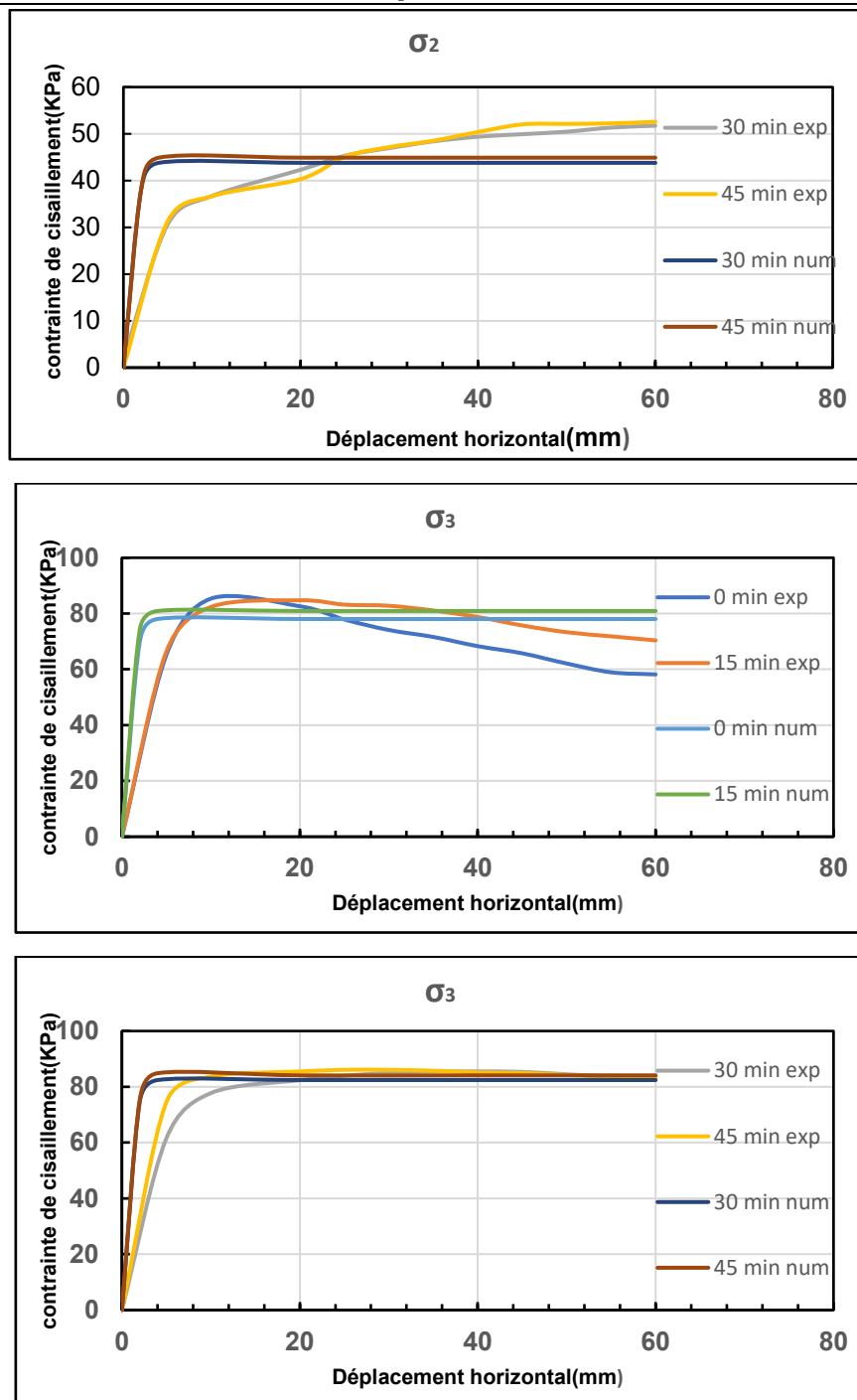
Fig. 5.10 Exemple des résultats de contraintes de cisaillement obtenues de la simulation numérique pour la procédure d'essai multistage et preshearing.

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

Les résultats des simulations des procédures d'essais : single stage, precésaillement, multistage avec les essais expérimentaux sont représentés dans les figures : 5.11, 5.12, 5.13:

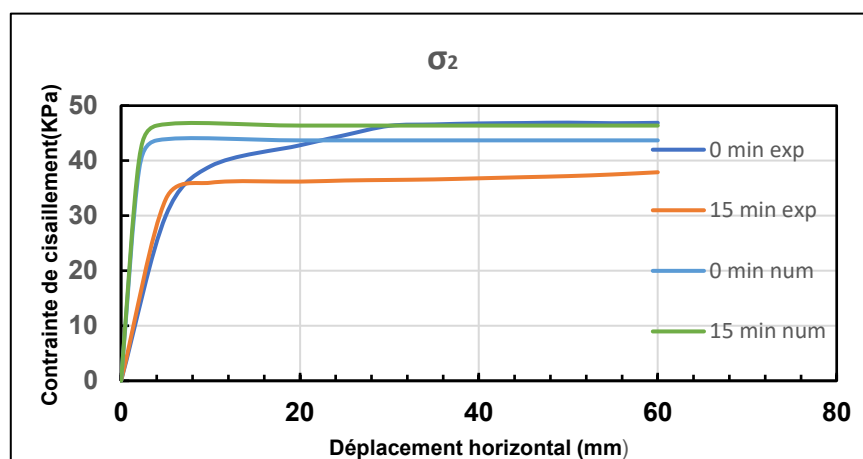
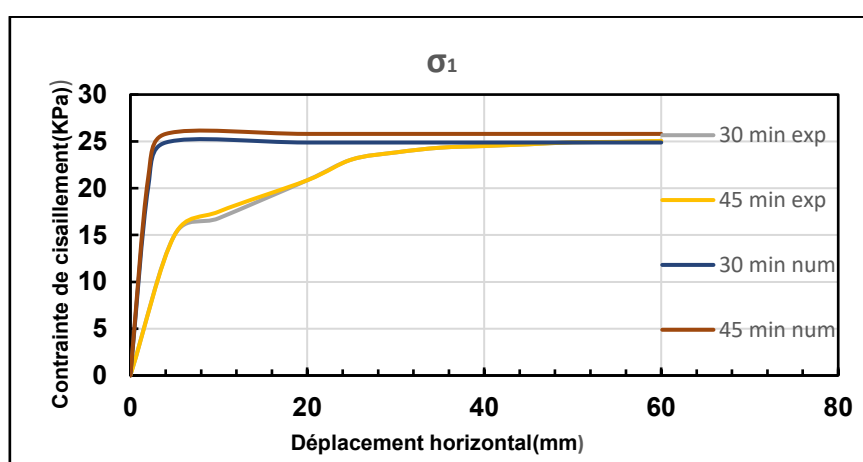
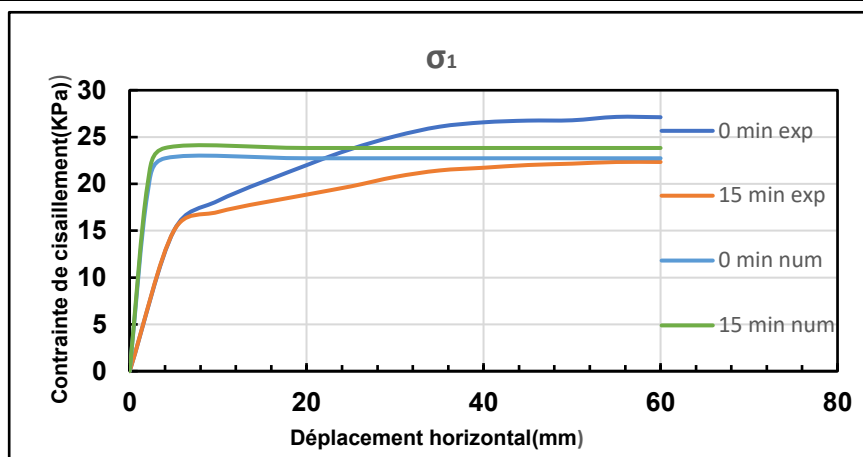


## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

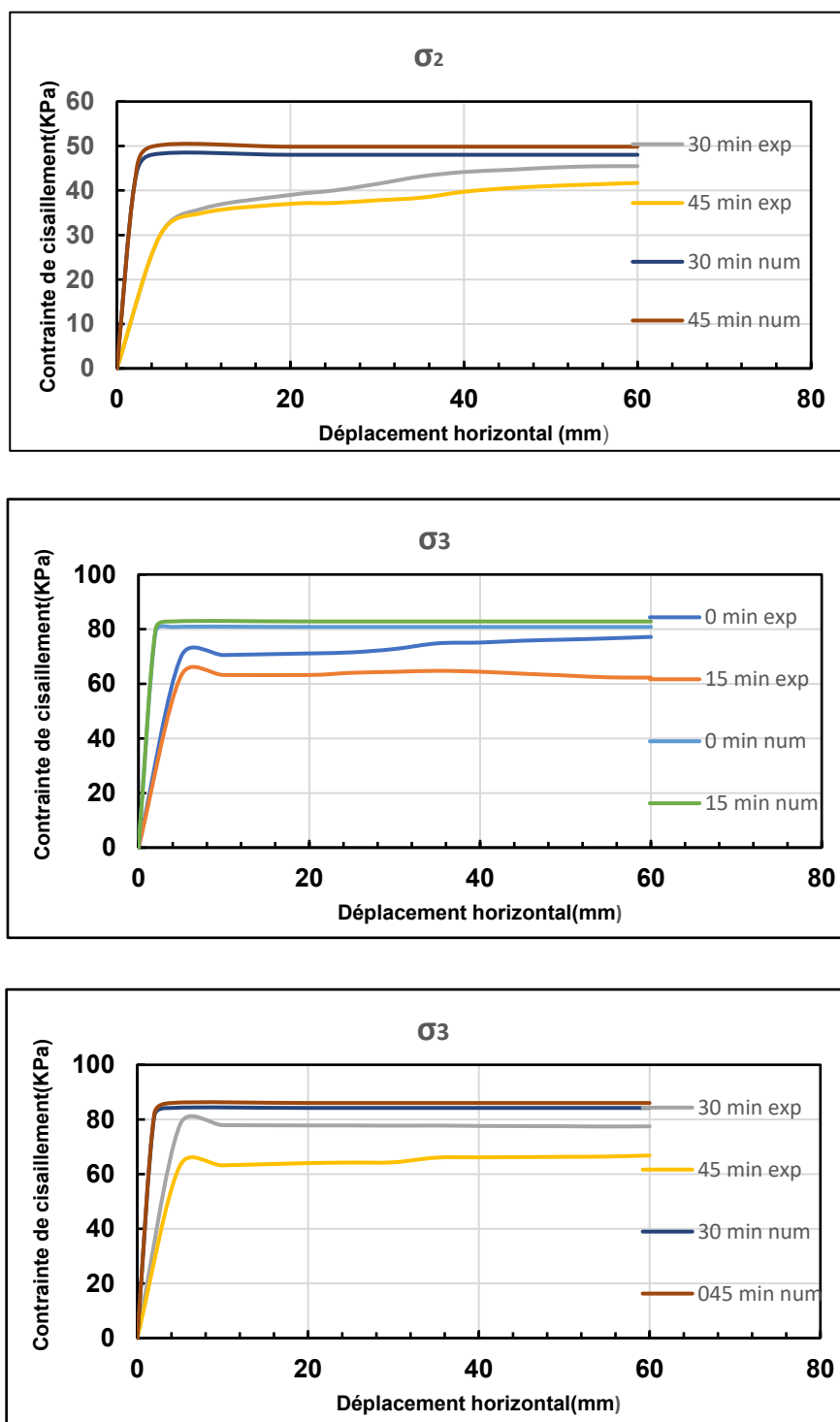


**Fig. 5.11** Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour la procédure d'essai single stage

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

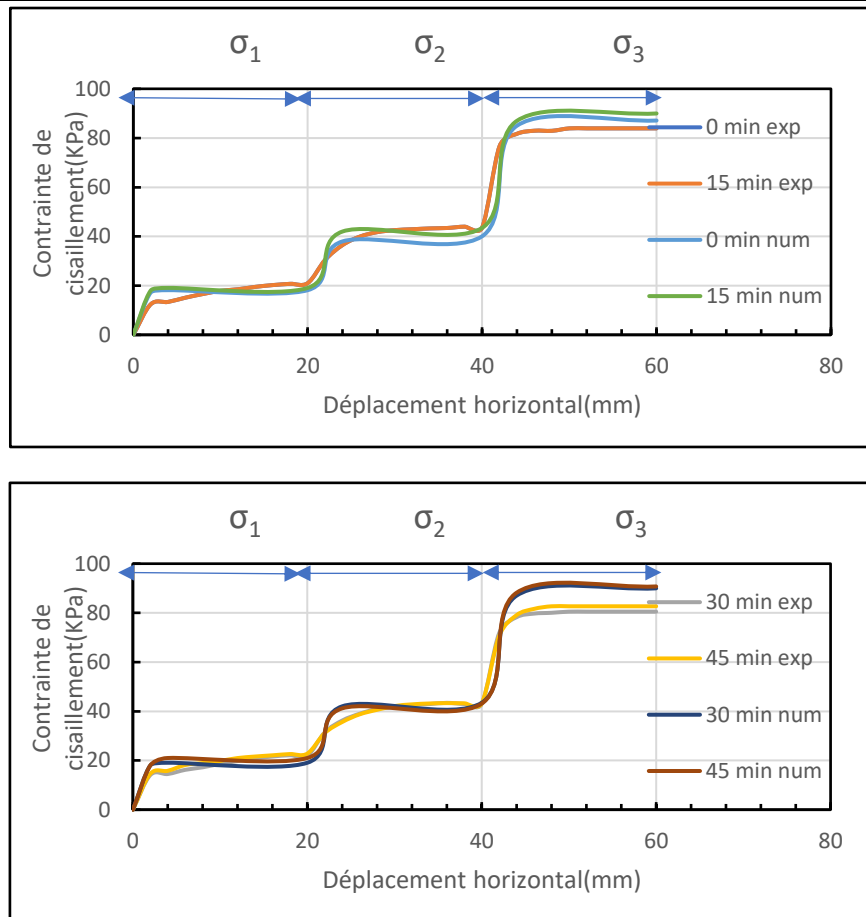


## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats



**Fig. 5.12** Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour la procédure d'essai précisaillement

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats



**Fig. 5.13** Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques pour la procédure d'essai multistage

### Pour la procédure d'essai single stage :

Les courbes de la simulation numérique de résistance au cisaillement montrent une tendance cohérente, avec une augmentation rapide de la contrainte de cisaillement qui atteint rapidement une valeur stable sans pic notable. Pour les contrainte au cisaillement  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$ , la valeur de la résistance au cisaillement à 0 min est inférieure à celle mesurée expérimentalement. De 0 min à 45 min, les valeurs de la résistance au cisaillement sont très proches et finissent par être inférieures à celles obtenues expérimentalement à 45 min.

### Pour la procédure d'essai précisaillement :

Les courbes de la simulation numérique de résistance au cisaillement montrent une tendance cohérente, avec une augmentation rapide de la contrainte de cisaillement qui atteint rapidement une valeur stable sans pic notable. Cependant, les valeurs de la contrainte au cisaillement enregistrées par ces courbes sont plus élevées que celles des essais de la procédure single stage. Cela peut s'expliquer par le fait que, même pour les essais de précisaillement réalisés expérimentalement, les valeurs mesurées avant le précisaillement sont inférieures à

## Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats

---

celles observées après le précisaillement en raison du sol extrudé durant les deux phases (cisaillement à une vitesse rapide puis à une vitesse lente). Concernant la contrainte de cisaillement  $\sigma_3$ , la valeur observée à 0 minute est plus élevée que celle obtenue expérimentalement. De 0 min à 45 min, les valeurs de la résistance au cisaillement sont très proches.

### Pour la procédure d'essai multistage :

Les résultats de la simulation numérique révèlent une tendance constante de la résistance au cisaillement, caractérisée par une augmentation rapide de la contrainte de cisaillement, qui se stabilise rapidement sans afficher de pic significatif au cours des trois phases. Les résultats de la simulation numérique pour les phases 1 et 2 correspondent bien aux résultats expérimentaux. Cependant, pour la troisième phase, les résultats de la simulation sont légèrement supérieurs à ceux expérimentaux.

### 5.3.5 Conclusion :

- Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes approches numériques pour simuler le cisaillement à l'interface sol-structure : la méthode d'analyse de contact, les éléments d'interface et la méthode des éléments discrets, sur laquelle nous nous sommes basés pour simuler le comportement du matériau soumis au cisaillement à l'interface sol-structure.
- Étant donné que le phénomène de colmatage au niveau des surfaces des modèles d'interface et son effet sur la réponse du matériau soumis au cisaillement est très difficile à représenter avec la méthode DEM, nous avons opté pour la modélisation de l'effet de frottement mural sur la résistance au cisaillement.
- Le modèle adopté pour la modélisation est le modèle Linéaire de Résistance au Roulement (Linear Rolling Resistance contact model), qui attribue aux sphères un coefficient de frottement de résistance au roulement pour limiter leurs rotations et obtenir un modèle quasi-linéaire.
- Les étapes de la formulation du modèle sont présentées, avec les paramètres microscopiques dérivés des paramètres macroscopiques (obtenus expérimentalement).
- Les tassements verticaux résultant de la consolidation sont simulés dans le modèle en modifiant la position de la base de la demi-boîte inférieure, en fonction du niveau de tassement souhaité.
- La comparaison des résultats a permis de constater que le modèle numérique a donné des prévisions satisfaisantes. Néanmoins, nous avons constaté que les résultats

## **Chapitre 5 : Modélisation de la résistance au cisaillement à l'interface et comparaison des résultats**

---

numériques étaient très proches de 0 à 45 minutes, et nous avons également constaté que la meilleure concordance était pour la procédure multistage.

### Conclusion générale :

Cette thèse a pour objet d'étudier la résistance au cisaillement à l'interface entre un sol cohérent -structure, cette dernière étant constituée de différents modèles d'interfaces en acier avec divers rugosité de surface. Ce sujet de recherche revêt une importance capitale dans de nombreux contextes géotechniques où l'interface se trouve dans divers ouvrages tels que les pieux, les murs de soutènement et les fondations.

Pour étudier la résistance au cisaillement à l'interface entre un sol cohérent et une structure, cinq modèles d'interfaces ont été utilisés : quatre en acier et un en pierre poreuse. Du côté du sol, quatre types ont été employés, dont du kaolin et des mélanges kaolin-sable avec les proportions suivantes : 90 %, 80 %, et 70 % de kaolin, et 10 %, 20 %, et 30 % de sable. Des essais ont été réalisés à l'aide de la boîte de cisaillement annulaire Bromhead en utilisant ces sols et ces modèles d'interfaces. Cette étude a été complétée par une modélisation numérique d'une partie du travail expérimental. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- 1) Les zones de cisaillement qui présentent des surfaces lisses et denses avec de faibles indices de vides, entraînant une résistance au cisaillement réduite. En revanche, les couches adjacentes, caractérisées par des surfaces plus rugueuses et moins denses, montrent des résistances au cisaillement à l'interface plus élevées.
- 2) L'effet du frottement mural induit par la variation du temps de consolidation dépend de la procédure d'essai. Pour la procédure multistage, l'accumulation du sol extrudé à chaque phase lors du cisaillement, due à l'utilisation d'un seul échantillon pour toutes les phases, réduit cet effet, car le sol extrudé pendant le cisaillement est supérieur à celui de consolidation. En revanche, pour la procédure single, cet effet est plus marqué en raison de l'utilisation d'un échantillon distinct pour chaque phase. Pour la procédure de pré-cisaillement, cet effet n'affiche pas de tendance cohérente.
- 3) L'effet du colmatage des surfaces d'interfaces sur la résistance résiduelle dépend de topographie des interfaces. Pour les interfaces ayant des surfaces nervurées et aléatoires le colmatage complet ou partiel de ces surfaces au niveau des rainures est partiellement au niveau des surfaces lisses entre les rainures entraîne, principalement un frottement sol-sol, et un frottement sol-interface. Ce phénomène limite la résistance de l'interface, l'amenant à correspondre à la résistance interne du sol, ce qui conduit à une condition ' $\delta = \phi$ '. En revanche, les surfaces structurées peuvent mobiliser une résistance d'interface supérieure à la résistance interne du sol conduisant à une condition ' $\delta > \phi$ ' en raison du maintien non colmatées et de la résistance passive supplémentaire.

## Conclusion générale

---

- 4) La procédure d'essai proposée par Stark et Vettel (1992) s'est révélée être la plus conservatrice en ce qui concerne l'effet du frottement mural, bien qu'elle soit plus longue que les autres méthodes. La procédure proposée, la Presheared Preconsolidated Flush Procedure, a montré des résultats performants. Cette méthode consiste à préparer, à partir du même échantillon consolidé dans l'appareil de Bromhead, un autre échantillon à consolider dans l'oedomètre pendant 24 heures. Ensuite, au lieu d'ajouter un échantillon remanié et de le reconsolider, on utilise directement l'échantillon de l'oedomètre, ce qui permet de gagner du temps.
- 5) L'application de la simulation numérique via la méthode des éléments discrets (DEM) pour étudier le frottement mural de la partie expérimentale a fourni des prévisions satisfaisantes, en particulier pour la procédure multistage. Cela démontre que la DEM reste un outil efficace, complémentaire aux expériences, à condition de sélectionner correctement le modèle de contact.

### Perspectives de recherche et de développement

Bien que cette étude a permis de mettre en lumière des points essentiels relatives aux mécanismes fondamentaux de la résistance au cisaillement à l'interface sol cohérent-structure, De nombreuses questions demeurent sans réponse et n'ont été que brièvement explorées dans ce contexte. Pour approfondir la compréhension du sujet, des recherches supplémentaires s'avèrent nécessaires. Les résultats obtenus ouvrent la voie à plusieurs pistes de recherche future. Voici quelques suggestions pour les investigations à venir :

- 1) L'effet de la teneur en eau et de la vitesse de cisaillement sur la résistance au cisaillement à l'interface a été étudié par différents chercheurs, mais une explication scientifique solide reste encore à établir. Il est donc recommandé d'examiner des matériaux granulaires et cohérents, ainsi que leurs mélanges, sur une gamme plus étendue de teneurs en eau, en parallèle avec l'utilisation du microscope pour analyser les zones de cisaillement. De plus, la vitesse de cisaillement doit être étudiée en utilisant divers matériaux (granulaires, cohérents et leurs mélanges).
- 2) L'effet du frottement mural est crucial car il peut conduire à une surestimation de la résistance résiduelle. Bien que ce travail ait mis en lumière une des principales causes du frottement mural, à savoir la consolidation, d'autres facteurs tels que la phase de cisaillement et pré cisaillement nécessitent encore d'être explorés. Les conclusions de cette étude sont valables pour des niveaux de contrainte normale inférieurs à 200

## Conclusion générale

---

kPa. Des recherches supplémentaires doivent être réalisées, en allongeant les périodes de consolidation et en étendant l'éventail des contraintes normales analysées.

- 3) L'effet du colmatage des modèles d'interfaces est un phénomène récent qui n'a été abordé que par Martinez et Frost (2016), comme indiqué dans leur article, et uniquement pour un matériau granulaire (le sable). En revanche, notre étude s'est focalisée sur un matériau cohérent. Pour mieux comprendre ce phénomène, il est conseillé d'examiner différentes catégories de surfaces rugueuses (aléatoires, nervurées et structurées), en se concentrant particulièrement sur la variation de la hauteur des aspérités pour les interfaces structurées et sur la profondeur des rainures pour les interfaces nervurées.
- 4) La procédure d'essai proposée (Preconsolidated presheared flush) vise à résoudre le principal inconvénient de la procédure Flush, à savoir le temps de traitement long, et a donné des résultats satisfaisants. Cependant, pour confirmer ces résultats, des essais supplémentaires doivent être réalisés en utilisant cette procédure.
- 5) L'utilisation de la méthode des éléments discrets a permis d'obtenir des prévisions satisfaisantes par rapport aux résultats expérimentaux. Il a été observé que la génération des deux demi-boîtes sans utiliser une structure dentée (les secteurs radiaux placés sur les plateaux supérieur et inférieur) a donné des moments très éloignés des résultats expérimentaux. De plus, il a été constaté que lorsque le moment était appliqué via la paroi annulaire, la vitesse des particules ne variait pas de manière homogène le long de la direction radiale, ce qui entraînait une stratification. En revanche, la simulation de la boîte de cisaillement annulaire équipée de secteurs radiaux au niveau des plateaux donne des résultats qui peuvent être alignés avec les résultats expérimentaux. la structure dentée étant capable de fournir idéalement le moment nécessaire au développement du cisaillement.

### Références bibliographique

1. Anayi, J. T., Boyce, J. R. & Rogers, C. D. F. (1989). Modified Bromhead ring shear apparatus. *Geotechnical Testing Journal* 12(2) :171-173.
2. Anayi, J.T.- Boyce, J.R, and Rodger, C.D.F(1988). Comparison of Alternative Methods of Measuring the Residual Strength of a Clay. *Transportation Research Record* 1192, Transportation Research Board, Washington, DC, pp.16-26.
3. Anderson, W.F., Hammoud, F. (1988) Effect of Testing Procedure in Ring Shear Tests. *Geotech. Test. J.*, ASTM, 11(3) :204-207 .
4. ASTM Standard D 6467-99: Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soils, Annual Book of Standards, Vol 4, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
5. Benmbark, M.A., Rad, M.M., Benmbarek, S. (2023). 3D DEM Analysis of Particle Breakage Effect on Direct Shear Tests of Coarse Sand. 16(14), 5025.
6. Benmbark, M.A., Rad, M.M., Effect of Rolling Resistance Model Parameters on 3D DEM Modeling of Coarse Sand Direct Shear Test. *Materials*, 16(5), 2077.
7. Bishop, A.W., Green, G.E., Garaga, V.K., Andresen.A ., and Brown,J.D. (1971). A New Ring Shear Apparatus and its Application to the Measurement of Residual Strength. *Geotechnique*, 21(4) :273-328.
8. Bromhead, E. N. (1986). *The stability of slopes*, Surrey university Press, London
9. Chengshun, X., Xin., Xinyue, L., Fuchu, D., Shuang, J. (2018). *Engineering Geology*, 233 :183-190
10. Deepak, R.B., Yatabe, R., Bhandary, N.P. (2018). Effect of Shearing Rate on Residual Strength of Kaolin Clay. *Electronic Journal of Getechnical Engineering*. 18(G) :1387-1396
11. Dejong, J.T., Frost, D. Cargill, E. (2001). Effect of surface texturing on CPT friction sleeve measurements. *J Geotech Geoenviron Eng* 127(2):158–168
12. Dietz, M.. Lings, M. (2006). Postpeak strength of interfaces in a stress-dilatancy framework. *J. Geotech. Geoenviron. Engng* 132(11):1474–1484.
13. DING, S-Y., BI, Q-T., CAI Z-Y., HUANG, Z-Q. (2013). Test procedure for ring shear apparatus. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35 :197-201.
14. Farzad, H., Hamid, N. (2018). Effect of shear rate on the residual shear strength of pre-sheared clays. *Cogent Geoscience*.4(1)
15. Feligha, M. (2015). Contribution à l'étude du cisaillement à l'interface sol cohérent-matériau solide. Thèse de doctorat, Université de Skikda, Algérie.
16. Feligha, M., Hammoud, F., Belachia, M., Nouaouria, M.S. (2015). Experimental investigation of frictional behavior between cohesive soils and solid materials using direct shear apparatus. *J Geotech Geol Eng*, 34(2):567–578.
17. Gianvito, S., Caterina, D.M. (2016). Influence of displacement rate on residual shear strength of clays. *Procedia Earth and planetary science*, 16 ( 2016 ) 137 – 145
18. Grabowski, A., Nitka, M., Tejehman, J. (2021) 3D DEM simulations of monotonic interface behaviour between cohesionless sand and rigid wall of different roughness. *Acta Geotechnica* 16:1001–1026

## Références bibliographiques

---

19. Hebel, G.L., Martinez, A., Frost, J.D. (2015). Shear: Zone evolution of granular soils in contact with conventional and textured CPT friction sleeves. *KSCE J. Civil Engng*, 20(4):1267–1282
20. Huie, C., Wenliang, M., Xiaoqing, Y., Cencen, N., Bin, S., Guili, T. (2020). Influence of stress conditions on shear behavior of slip zone soil in ring shear test: an experimental study and numerical simulation. *Natural Hazards*, 111:1179-1197
21. Hammoud, F., (2006). Contribution à l'étude de la résistance au cisaillement à l'interface sol cohérent-matériau solide dans le domaine des grands déplacements, Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie
22. Irsyam, M., Hryciw, R.D. (1991). Friction and passive resistance in soil reinforced by plane ribbed inclusions. *Géotechnique*, 41(4):485–498, <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1991.41.4.485>
23. Kakou, B.G., Shimizu, H., Nishimura, S., Matsumoto, Y., (2002). Residual shear strength of landslide soils by presheared flush testing for stability quantification. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 7: Bundle A
24. Kilic, I.E., Cengiz, C., Edincliler, A., Guler, E. (2021). Seismic behavior of geosynthetic-reinforced retaining walls backfilled with cohesive soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5) :1256-1269.
25. La Gatta, D.P. (1970). Residual Strength of Clays and Clay-Shales by Rotation Shear Tests. Ph.D. thesis reprinted as Harvard Soil Mechanics Series No. 86, Harvard University. Cambridge. MA, p. 204.
26. Li, M., Li, Y., Rajedul Islam, Md. (2021). Effects of water content and interface roughness on the shear strength of silt–cement mortar interface. *Soils and Foundations*, 61(6):1615-1629.
27. Lunan, W., Jie, H., Xiaomeng, Y., Songyang, L. (2020). Effect of moisture content and shearing speed on shear zone structure in fine-grained soils at large displacement. *Arabian journal of geoscience* 13(264).
28. Martinez, A., Frost, J.D. (2016). The influence of surface roughness form on the strength of sand-structure interface. *Geotechnique letters*, 7(1):1-8.
29. Mehan, L.C., Brandon, T., Duncan, J.M (2007) Measuring Drained Residual Strengths in the Bromhead Ring Shear, *Geotechnical Testing Journal* 30(6).
30. Mitchell, J.K., Villet, W.C. (1987) Reinforcement of Earth Slopes and Embankments; NCHRP Report; Transportation Research Board: Washington, DC, USA.
31. Motoyuski, S., Shunsuki, T., et Testsuro, Y. (2007). Residual shear strength characteristics naturally and artificially cemented clays in reversal direct shear test. *Soils and Foundations*, 47( 6) :1029–1044.
32. Naoui, T., Khemissa, M. (2016). Modelling of the Soil-Structure Interface Behavior by Direct Shear Tests under Monotonous Loading. Conference Paper.
33. Nghiem, X.T., Taeho.B., Byeong-Soo, Y., Sung-Ryul, K. (2021). Evaluation of the soil–pile interface properties in the lateral direction for seismic analysis in sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.140 :106473.
34. Nguyen, T., Motoyuki, S., Nguyen, V.H. (2018). Rate and acceleration effects on residual strength of kaolin and kaolin–bentonite mixtures in ring shearing. *Soil and foundation*. 58(5) :1153-1172.

## Références bibliographiques

---

35. Nguyen, T.D., Motoyuki, S. (2019). Rate effect on the residual interface strength between two different soil layers. *Geotechnic for Sustainable Infrastructure Development*. 62 :985-992.
36. Shiva, P.K.K., Guobin, G., Moy, C.K.S, Lei, F. (2018). Direct shear test simulations using DEM. *Indian geotechnical conference*.
37. Rouaiguia, A., Rogers, C.D.F. (2001). Fast shear rate effects on the residual shear strength of clay. *15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Istanbul)*. International Society for Soil Mechanics and geotechnical engineering.
38. Rouaiguia, A. (2010.) Residual shear strength of clay-structure interfaces . *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 10(3).
39. Saberi, M., Annan, C-D., Konrad, J-M. (2018). On the mechanics and modeling of interfaces between granular soils and structural materials. *Archive of civil and mechanical engineering*. 18(4) :1562-1579.
40. Skempton, A. W. (1964). Long term stability of clay. *Géotechnique* 14, N° 2, 77-108.
41. Stark, T.D., Vettel, J.J. (1992). Bromhead Ring Shear Test Procedure. *Geotech. Test. J., ASTM*, 15(1) : 24- 32.
42. Stark, T.D., and Eid, H.T. (1994). Drained Residual Strength of Cohesive Soils. *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 120(5) : 856-871.
43. Subba Rao, K.S., Allam, M.M., Robinson, R.G. (1998). Interfacial friction between sands and solid surfaces. *Proc. Instn Civil Engrs – Geotech. Engng*, 131(2): 75–82, <http://dx.doi.org/10.1680/igeng.1998.30112>.
44. Suran, W., Yu, H. (2022). Experimental study on the effect of particle size on the shear characteristics of large-displacement soil exposed to heat treatment: Shear fluctuation and heat degradation. *Engineering geology*, 300 :106581
45. Tan, W.H., Lee, C.Y., Sivadas, T. (2008), Behaviour of clay-steel interfaces. *Int Conf Construct Build Technol*, 2:11-20.
46. Tejinder, T., Deepak, M., Priyanka, S., Shashwat, K., Kala, V. U. (2020). Interface behavior between soil and different surface textures. *Geotechnical Characterization and Modelling*, 85:353–364.
47. Tsubakihara, Y., Kishida, H. (1993). Frictional behaviour between normally consolidated clay and steel by two direct shear type apparatuses. *Soils Found*, 33(2):1–13.
48. Uday, A., Peña-Olarte, A.A. (2023). Investigation of the response of Cuxhaven sand under triaxial and ring shear boundary conditions using DEM. *10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*.
49. Uday, A., Peña-Olarte, A.A., Wang, Y. (2024). Discrete modelling of the mechanical response of Cuxhaven sand under shear and oedometric condition. *8<sup>th</sup> International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (IS-Porto 2023)*.
50. Uesugi, M., – Kishida, H. (1986) Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel. *Soils Found*.
51. Wang, R., Dominic, E.O., Peerun, M. Iand, Dong, D.E.L, Jeng, D-S. (2022). Influence of Surface Roughness and Particle Characteristics on Soil–Structure Interactions: A State-of-the-Art Review *Geoscience*, 12(4), 145.
52. Wykeham Farrance Engineering Ltd Operators Manual. (1988). Bromhead Ring Shear Apparatus (Slough, England Engineering Ltd, Slough, England).

## Références bibliographiques

---

53. Xue-Ying, J., Wan-Huan, Z., Yangmin, L. (2017). Interface direct shearing behavior between soil and saw-tooth surfaces by DEM simulation. *Procedia Engineering*. 175 : 36-42.
54. Yanchao, W.L., Lu C. (2020). Effects of Water Content and Shearing Rate on Residual Shear Stress 44:8915–8929.
55. Yong-Hui, L., Meng-Fan, L., Yuan-Cheng G , Mao-Song. (2021). Effects of the soil water content and relative roughness on the shear strength of silt and steel plate interface. *Measurement*, 174 :109003
56. Zhang, G., Liang, D., Zhang, J.-M. (2006). Image analysis measurement of soil particle movement during a soil–structure interface test. *Comput. Geotech*, 33(4-5): 248–259.
57. Zhang.N., Evans,T.M. (2018). Three dimensional discrete element method simulations of interface shear. *Soil and foundations*.54 (4) :941-956