

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Présenté par : BOUDRA Ouarda

**Thème : Détermination de la résistance au cisaillement
résiduelle d'un sable argileux compacté et renforcé par
la poudre de caoutchouc**

Sous la direction du : Pr. NOUAOURIA Mohamed Salah

Juin 2018

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier mes parents pour le soutien inconditionnel dont ils ont fait preuve depuis que mon projet professionnel est défini. Merci pour le soutien financier, moral, psychologique et matériel. Si je suis ici aujourd'hui, c'est grâce à vous.

*Je tiens ensuite à remercier **Mr.Pr NOUAOURIA Mohamed Salah**, mon directeur de mémoire, pour tout le soutien, l'aide, l'orientation, la guidance qu'elle m'a apporté durant les deux années de mon cursus infirmier ainsi que pour ses précieux conseils et encouragements lors de la réalisation de mon mémoire.*

*Je remercie **Madame Adjabi** qui a participé à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.*

Je remercie également toutes les personnes qui, de près ou de loin ont participé à l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, je remercie mes amis et camarades de promotion pour ces deux années passées ensemble, dans les meilleurs moments comme dans les pires.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à la fille qui n'a pas pu aller à l'école.

Résumé

L'étude de la résistance au cisaillement résiduelle a de grands intérêts pour tous les ouvrages géotechniques, à savoir les problèmes de stabilité des pentes, les murs de soutènement, les barrages en terre, les tunnels, les remblais de routes, etc...

L'objectif de notre étude est la détermination des paramètres de la résistance au cisaillement résiduelle. Pour ce fait, nous avons réalisé des séries d'essai au Laboratoire de recherche de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH) de l'université 8 Mai 1945 Guelma. Le sol étudié est un sable argileux, composé de 75% d'une fraction de sable normalisé (taille de grains entre 710 μ m et 500 μ m) et 25% de kaolinite fournie par le groupe CONTROLS. Ce sable argileux est mélangé avec quatre différentes teneurs en poudre de caoutchouc : 5%, 10%, 15% et 20%. Les paramètres de résistance de cisaillement résiduelle ont été déterminés dans le cas non saturé et saturé respectivement.

Mot clés : Résistance au cisaillement résiduelle, Boite de cisaillement annulaire, Poudre de caoutchouc, sol compacté, sable argileux, kaolinite.

Abstract

The study of residual shear strength has great interests for all geotechnical structures, such as slope stability problems, retaining walls, earth dams, tunnels, road embankments, etc.

The objective of our study is the determination of residual shear strength parameters. For this fact, we have undertaken test series at the Research Laboratory of Civil Engineering and Hydraulics (LGCH) of the University May 8th, 1945 Guelma. The soil studied is a clayey sand, constituted of 75% of a standardized sand fraction (grain size between 710 μ m and 500 μ m) and 25% of kaolinite supplied by the CONTROLS group. This clayey sand is mixed with four different rubber powder contents: 5%, 10%, 15% and 20%. The residual shear strength parameters were determined in the unsaturated and saturated case respectively.

Key words: Residual shear strength, Ring shear box, Rubber powder, compacted soil, clayey sand, kaolinite.

ملخص

إن دراسة مقاومة القص المتبقية ذات اهتمامات كبيرة لجميع الهياكل الجيوتقنية ، مثل مشاكل ثبات المنحدرات ، الجدران الاستنادية ، السدود الأرضية ، الأنفاق ، سدود الطرق ، إلخ .

الهدف من دراستنا هو تحديد معايير مقاومة القص المتبقية . من أجل هذا الهدف ، قمنا بإجراء سلسلة فحوص في مخبر أبحاث الهندسة المدنية و المياه التابع لجامعة 8 ماي 1945 قالمة .

التربة التي تمت دراستها عبارة عن رمل طيني ، تشكل 75٪ من جزء الرمل القياسي (حجم الحبيبات بين 710 ميكرو متر و 500 ميكرو متر) و 25٪ من الكاولينيت الموردة من عند مجموعة CONTROLS .

تم مزج هذه الرمال الطينية مع أربعة محتويات مختلفة من مسحوق المطاط: 5 ٪ ، 10 ٪ ، 15 ٪ و 20 ٪ . ثم حددت معايير مقاومة القص المتبقية في الحالة غير المشبعة والمشبعة على التوالي .

الكلمات المفتاحية: مقاومة القص المتبقية ، صندوق القص الدائري ، مسحوق المطاط ، التربة المرصوصة ، الرمال الطينية ، الكاولينيت .

<i>Remerciement</i>	ii
<i>Dédicace</i>	iii
<i>Résumé</i>	iv
<i>Abstract</i>	v
<i>ملخص</i>	vi
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xv
Notations	xvii
Symboles	xviii
INTRODUCTION GENERALE.....	xx

Table de matière	vii
------------------------	-----

CHPITRE 1 Résistance au cisaillement des sols

1.1 Introduction	1
1.2 Définition de la rupture du sol.....	1
1.3 Modes de rupture.....	2
1.4 Critère de rupture	3
1.4.1 Etat de contrainte	3
1.4.2 Hypothèse de rupture de Mohr	5
1.4.3 Représentations de coulomb.....	6
1.4.4 Représentations de Lambe et de Cambridge. Chemins de contraintes.....	8
1.4.5 Contraintes totales et contraintes effectives	9
1.5 Comportement drainé et non drainé	11
1.5.1 Comportement drainé	11
1.5.2 Comportement non drainé	11
1.5.3 Détermination des caractéristiques drainé et non-drainés en laboratoire.....	11
1.5.4 Calcul à long terme et à court terme.....	12

1.6 Les essais géotechniques	13
1.6.1 Essais en laboratoire	13
1.6.1.1 Essais de cisaillement direct à la boîte.....	13
1.6.1.2 Essais à l'appareil triaxial de révolution.....	16
1.6.1.3 Essais de cisaillement direct alterné à la boîte.....	18
1.6.2 Essais in-situ	19
1.6.2.1 Essais au scissomètre de chantier.....	19
1.6.2.2 Essais au pénétromètre statique	21
1.6.2.3 Essais au pressiomètre de MENARD	23
1.7 Conclusion	24

CHPITRE 2 Etude bibliographique sur la résistance au cisaillement résiduelle

2.1 Introduction	25
2.2 La résistance au pic et résiduelle.....	25
2.4 Mesure de la résistance au cisaillement résiduelle.....	30
2.5 Améliorations apportées à l'appareillage de mesure et à la procédure de test.....	36
2.5.1 A l'appareillage de mesure	37
2.5.2 A la méthodologie	38
2.6 Facteurs affectant la résistance résiduelle	39
2.6.1 Influence de la procédure de préparation des échantillons et de la structure initiale ..	39
2.6.2 Influence de l'amplitude des contraintes normales	40
2.6.3 Influence de la vitesse de cisaillement	42
2.6.4 Influence du type d'appareil d'essai	44
2.6.5 La résistance résiduelle en fonction de quelques paramètres géotechniques	46
2.6.5.1 La minéralogie et la forme des particules	47
2.6.5.2 L'indice de plasticité.....	47
2.6.5.3 Fraction argileuse.....	47
2.6.5.4 Limite de plasticité et limite de liquidité	48
2.7 Applications de la résistance résiduelle.....	49
2.8 Conclusion.....	50

CHAPITRE 3 Essais expérimentaux

3.1 Introduction	51
3.2 Appareil de cisaillement annulaire de Bromhead.....	51
3.2.1 Principe de fonctionnement	51
3.2.2 Description.....	52
3.3 Matériaux étudiés	55
3.4 Préparation de l'échantillon	57
3.5 Procédure expérimentale	59
3.6 Acquisition de données	59
3.7 Calculs et résultats.....	61
3.7.1 Calculs	61
3.7.2 Analyse des résultats	62
3.7.2.1 Sable argileux (75% sable + 25% kaolinite).....	62
3.7.2.2 PC 5%	70
3.7.2.3 PC 10 %	77
3.7.2.4 PC 15%	83
3.7.2.5 PC 20 %	90
3.8 Commentaires sur les résultats	98
3.9 Conclusion.....	103
Conclusion générale et perspectives.....	105
Références	106
ANNEXE A	110
ANNEXE B.....	126

Liste des figures

CHPITRE 1 Résistance au cisaillement des sols

Figure 1.1 courbe contrainte deformation.	2
Figure 1.2 courbes contrainte deformation de differents modes de rupture.....	3
Figure 1.3 modele de cisaillement simple	4
Figure 1.4 etat de contrainte en un point	4
Figure 1.5 courbe intrinseque selon mohr	6
Figure 1.6 courbes intrinseques selon coulomb pour sol pulverulent et sol coherent.....	7
Figure 1.7 representation du critere de mohr-coulomb dans l'espace des contraintes.....	8
Figure 1.8 exemple de trois chemins de contraintes en conditions axisymetriques.....	9
Figure 1.9 contraintes totales et contraintes effectives.....	10
Figure 1.10 principe de l'essai de cisaillement direct	14
Figure 1.11 courbe effort de cisaillement-deplacement relatif de demi boites	15
Figure 1.12 resultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de mohr	15
Figure 1.13 principe de l'appareil triaxial de revolution.....	16
Figure 1.14 resultats d'un essai triaxial dans le plan de mohr	18
Figure 1.15 principe de l'essai au scissometre	21
Figure 1.16 penetrometre statique	22
Figure 1.17 principe de l'essai pressiometrique	23

CHAPITRE 2 Etude bibliographique sur la résistance au cisaillement résiduelle

Figure 2.1 courbes typiques contrainte de cisaillement – deformation et enveloppes de rupture residuelle et de pic. [1].....	27
Figure 2.2 essais de cisaillement annulaires sur des melanges sable – bentonite (d'apres	30
Figure 2.3 principe de l'essai de cisaillement alterne	31
Figure 2.4 schemas de la boite de cisaillement a anneaux solides (a) et de la boite de cisaillement a anneaux separees (b) (sadrekarimi et olson, 2009).....	32
Figure 2.5 (a) photo de l'appareil de lagatta 1970 (b) conteneur d'echantillon de l'appareil de lagatta.	33
Figure 2.6 appareil de cisaillement annulaire de bishop	34
Figure 2.7 photo de l'appareil ubc	35
Figure 2.8 illustrant le frottement mural cause par l'extrusion de sol dans un appareil de type bromhead (meehan et al, 2007).....	37

Figure 2.9 photos de la pierre poreuse originale (a gauche) et de la pierre poreuse modifiée (a droite) (meehan et al., 2007)	38
Figure 2.10 a) variation du coefficient de frottement résiduel en fonction de la contrainte normale effective ; (b) enveloppe de rupture résiduelle (d'après hawkins & privett)	42
Figure 2.11 effet de la vitesse rapide sur la résistance résiduelle (d'après lemos et al, 1985). 44	
Figure 2.12 enveloppes de rupture résiduelle déterminées à partir de boîtes de cisaillement de	46
Figure 2.13 corrélation entre la résistance résiduelle et la fraction argileuse.	48
Figure 2.14 relation entre l'angle de frottement résiduel et le rapport de la limite de plasticité sur la limite de liquidité (suzuki et al., 2005)	49

CHAPITRE 3 Essais expérimentaux

Figure 3.1 Vue générale de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead.....	51
Figure 3.2 les anneaux de confinement (à gauche : plateau supérieur, à droite : plateau inférieur).....	52
Figure 3.3 Vue de côté de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead.....	53
Figure 3.4 Vue en plan de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead	54
Figure 3.7 Une quantité de la poudre de caoutchouc.	56
Figure 3.5 Sable normalisé.....	56
Figure 3.6 La kaolinite de la chine	56
Figure 3.8 Courbe de l'analyse granulométrique de la poudre de caoutchouc	57
Figure 3.9 L'emplacement de l'échantillon dans son conteneur avant l'essai.....	58
Figure 3.10 Position des cellules de charge par rapport au bras de torsion	59
Figure 3.11 Fenêtre du logiciel d'acquisition DATACOM	60
Figure 3.12 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement du témoin (Etat non saturé)... 65	
Figure 3.13 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle du témoin (Etat non saturé).....	66
Figure 3.14 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement du témoin (Etat saturé).....	68
Figure 3.15 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle du témoin (Etat saturé).....	69
Figure 3.16 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement de E2 (état non saturé)	72
Figure 3.17 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E2 (état non saturé)	73
Figure 3.18 Courbes contrainte cisaillement-Déplacement, E2 (état saturé)	75
Figure 3.19 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E2 (état saturé)	76
Figure 3.20 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E3 (état non saturé)	79

Figure 3.21 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E3 (état non saturé) 80

Figure 3.22 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E3 (état saturé) 82

Figure 3.23 Enveloppes de rupture au pic et résiduel, E3 (état saturé)..... 83

Figure 3.24 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E4 (état non saturé) 86

Figure 3.25 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E4 (état non saturé) 87

Figure 3.26 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E4 (état saturé) 89

Figure 3.27 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E4 (état saturé) 90

Figure 3.28 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E5 (état non saturé) 93

Figure 3.29 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E5 (état non saturé) 94

Figure 3.30 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E5 (Etat saturé) 96

Figure 3.31 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E5 (état saturé) 97

Figure 3.32 Variation de l'angle de frottement interne de pic et résiduel à l'état non saturé en fonction de pourcentage de la poudre de caoutchouc..... 98

Figure 3.33 Cohésion de pic et résiduelle à l'état non saturé en fonction de la poudre de caoutchouc..... 99

Figure 3.34 L'angle de frottement interne de pic et résiduel en fonction de la poudre de caoutchouc à l'état saturé 100

Figure 3.35 Cohésion de pic et résiduelle en fonction de la poudre de caoutchouc à l'état saturé 101

Figure 3.36 Angle de frottement interne de pic et résiduel en fonction de pourcentage de caoutchouc à l'état saturé et non saturé..... 102

Figure 3.37 Cohésion de pic et résiduelle en fonction de pourcentage de caoutchouc à l'état saturé et non saturé..... 103

ANNEXE A

Figure A.1 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), témoin saturé... 110

Figure A.2 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), témoin saturé. 111

Figure A.3 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), témoin saturé. 111

Figure A.4 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), témoin non saturé 112

Figure A.5 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), témoin non saturé 112

Figure A.6 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), témoin non saturé	113
Figure A.7 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E2/A saturé.....	113
Figure A.8 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E2/B saturé...	114
Figure A.9 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E2/C saturé....	114
Figure A.10 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E2/A non saturé	115
Figure A.11 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E2/B non saturé	115
Figure A.12 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E2/C non saturé	116
Figure A.13 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E3/A saturé....	116
Figure A.14 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E3/B saturé..	117
Figure A.15 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E3/C saturé..	117
Figure A.16 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E3/A non saturé	118
Figure A.17 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E3/B non saturé	118
Figure A.18 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E3/C non saturé	119
Figure A.19 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E4/A saturé....	119
Figure A.20 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E4/B saturé..	120
Figure A.21 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E4/C saturé..	120
Figure A.22 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E4/A non saturé	121
Figure A.23 courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E4/B non saturé	121
Figure A.24 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E4/C non saturé	122
Figure A.25 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E5/A saturé....	122
Figure A.26 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E5/B saturé..	123
Figure A.27 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E5/C saturé..	123

Figure A.28 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E5/A non saturé	124
Figure A.29 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E5/B non saturé	124
Figure A.30 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E5/C non saturé	125

ANNEXE B

Figure B.1 Photo du témoin dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 50,66 (kPa), état non saturé.....	126
Figure B.2 Photo du témoin dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 101,32 (kPa), état non saturé.....	127
Figure B.3 Photo de l'E5 (PC 20%) dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 101,32 (kPa), état non saturé.....	127
Figure B.4 Vue proche de la surface de rupture après cisaillement de l'E5 sous un contrainte normale donnée.....	128
Figure B.5 Photo de l'E4 (PC 15%) dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 101,32 (kPa), état saturé.....	128
Figure B.6 Photo de l'E5 (PC 20%) dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 202,65 (kPa), état saturé.....	129
Figure B.7 Photo de l'E (PC 10%) dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 202,65 (kPa), état saturé.....	129

Liste des tableaux

CHPITRE 1 Résistance au cisaillement des sols

Tableau 1.1 Type d'essai selon la nature du sol.....	12
--	----

CHAPITRE 2 Etude bibliographique sur la résistance au cisaillement résiduelle

Tableau 2.1 Un tableau comparatif des appareils de cisaillement annulaires décrits ci-dessus	36
---	----

CHAPITRE 3 Essais expérimentaux

Tableau 3.1 Résultats de l'essai 01 de cisaillement E1/A N.S.....	63
Tableau 3.2 Résultats de l'essai 02 de cisaillement E1/B N.S.....	63
Tableau 3.3 Résultats de l'essai 03 de cisaillement E1/C N.S.....	64
Tableau 3.4 Contraintes de cisaillement du témoin (Etat non saturé).....	65
Tableau 3.5 Résultats de l'essai de cisaillement E1 N.S.....	66
Tableau 3.6 Résultats de l'essai 01 de cisaillement. E1/A S.....	67
Tableau 3.7 Résultats de l'essai 02 de cisaillement. E1/B S.....	67
Tableau 3.8 Résultats de l'essai 03 de cisaillement. E1/C S.....	68
Tableau 3.9 Contraintes de cisaillement du témoin (Etat saturé).....	69
Tableau 3.10 Résultats de l'essai de cisaillement du témoin (Etat saturé).....	69
Tableau 3.11 Résultats de l'essai 01 de cisaillement. E2/A N.S.....	70
Tableau 3.12 Résultats de l'essai 02 de cisaillement. E2/B N.S.....	71
Tableau 3.13 Résultats de l'essai 03 de cisaillement. E2/C N.S.....	71
Tableau 3.14 Contraintes de cisaillement, E2 (état non saturé).....	72
Tableau 3.15 Résultats de l'essai de cisaillement E2 non saturé.....	73
Tableau 3.16 Résultats de l'essai 01 de cisaillement. E2/A S.....	74
Tableau 3.17 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E2/B S.....	74
TABLEAU 3.18 RESULTATS DE L'ESSAI 03 DE CISAILLEMENT. E2/C S.....	75
Tableau 3.19 Contraintes de cisaillement, E2 (état saturé).....	76
Tableau 3.20 Résultats de l'essai de cisaillement, E2 (état saturé).....	76
Tableau 3.21 Résultats de l'essai 01 de cisaillement. E3/A (état non saturé).....	77
Tableau 3.22 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E3/B (état non saturé).....	77
Tableau 3.23 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E3/C (état non saturé).....	78
Tableau 3.24 Contraintes de cisaillement, E3 (état non saturé).....	79

Tableau 3.25 Résultats de l'essai de cisaillement, E3 (état non saturé).....	80
Tableau 3.26 Résultats de l'essai 01 de cisaillement, E3/A (état saturé).....	80
Tableau 3.27 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E3/B (état saturé).....	81
Tableau 3.28 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E3/C (état saturé).....	82
Tableau 3.29 Contraintes de cisaillement, E3 (état saturé).....	83
Tableau 3.30 Résultats de l'essai de cisaillement, E3 (état saturé).....	83
Tableau 3.31 Résultats de l'essai 01 de cisaillement, E4/A (état non saturé).....	84
Tableau 3.32 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E4/B (état non saturé).....	84
Tableau 3.33 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E4/C (état non saturé).....	85
Tableau 3.34 Contraintes de cisaillement, E4 (état non saturé).....	86
Tableau 3.35 Résultats de l'essai de cisaillement, E4 (état non saturé).....	87
Tableau 3.36 Résultats de l'essai 01 de cisaillement. E4/A (état saturé).....	87
Tableau 3.37 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E4/B (état saturé).....	88
Tableau 3.38 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E4/C (état saturé).....	88
Tableau 3.39 Contraintes de cisaillement, E4 (état saturé).....	89
Tableau 3.40 Résultats de l'essai de cisaillement, E4 (état saturé).....	90
Tableau 3.41 Résultats de l'essai 01 de cisaillement, E5/A (état non saturé).....	91
Tableau 3.42 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E5/B (état non saturé).....	91
Tableau 3.43 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E5/C (état non saturé).....	92
Tableau 3.44 Contraintes de cisaillement, E5 (état non saturé).....	93
Tableau 3.45 Résultats de l'essai de cisaillement. E5 (état non saturé).....	94
Tableau 3.46 Résultats de l'essai 01 de cisaillement, E5/A (état saturé).....	94
Tableau 3.47 Résultats de l'essai 02 de cisaillement. E5/B (état saturé).....	95
Tableau 3.48 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E5/C (Etat saturé).....	96
Tableau 3.49 Contraintes de cisaillement, E5 (Etat saturé).....	97
Tableau 3.50 Résultats de l'essai de cisaillement, E5 (état saturé).....	97
Tableau 3.51 Paramètres de résistance au cisaillement de pic et résiduels à l'état non saturé.	103
Tableau 3.52 Paramètres de résistance au cisaillement de pic et résiduels à l'état saturé.....	104

Notations

H	Force horizontale
V	Force verticale
N	Effort normal
R	Force inclinée
T	Force tangentielle
C	cohésion du sol
F_x	Force selon l'axe des abscisses X
F_y	Force selon l'axe des ordonnées Y
s, t	Coordonnées de Lambe
p,q	Coordonnées de Cambridge
K	Rapport de σ_3/σ_1
U	Pression interstitielle
A	Section de l'échantillon soumis à un essai de cisaillement
CD	Essai dans des conditions consolidées et drainées
CU	Essai dans des conditions consolidées et non drainées
UU	Essai dans des conditions non consolidées non drainées
CP	Contre pression
Q_c	La Résistance à la pénétration
Q_s	Effort de frottement latéral local
PC	Poudre de caoutchouc
E_1	Echantillon témoin (75% sable+ 25% kaolinite)
E_2	Echantillon de témoin + 5% PC
E_3	Echantillon de témoin + 10% PC
E_4	Echantillon de témoin + 15% PC
E_5	Echantillon de témoin + 20% PC
dh	Déplacement horizontal
dv	Déplacement vertical
F_1, F_2	Forces mesurées par les cellules de charge
a	Rayon moyen
r_1, r_2	Rayon inférieur et extérieur respectivement de l'échantillon

T	Couple de torsion
L	Distance entre les axes des deux cellules de charge
P	Charge appliquée sur l'échantillon
N.S	Etat non saturé
S	Etat saturé
CF	Fraction argileuse
NC	Sol normalement consolidé
SC	Sol surconsolidé
I_p	Indice de plasticité
W_p	Limite de plasticité
W_l	Limite de liquidité
W	Poids du bloc

Symboles

φ'_p	Angle de frottement interne effectif au pic
C'_p	Cohésion effective au pic du sol
φ'_r	Angle de frottement interne effectif résiduel
C'_r	Cohésion effective résiduelle du sol
σ'_n	Contrainte normale effective
τ_r	Résistance au cisaillement résiduelle
τ_{\max}	Contrainte de cisaillement maximale
τ_{lim}	Contrainte de cisaillement limite
α	Angle d'inclinaison
σ_α	Contrainte normale selon l'angle α
τ_α	Contrainte tangentielle selon l'angle α
σ_x	Contrainte selon X

σ_y	Contrainte selon Y
σ_1	Contrainte principale majeure
σ_2	Contrainte principale intermédiaire
σ_3	Contrainte principale mineure
ε	Déformation
ε_1	Déformation axiale

INTRODUCTION GENERALE

A fin de réduire le nombre de pneus usés qui sont abandonnés dans la nature, nous avons essayé de valoriser ces déchets sous forme de poudre de caoutchouc utilisés dans les sols compactés. Ces derniers rentrent dans la construction des couches de forme des routes et des remblais légers derrière les murs de soutènement.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'effet du pourcentage de la poudre de caoutchouc (des pneus usagés) et ainsi l'effet de la saturation sur la résistance au cisaillement résiduelle.

Le mémoire comprend trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à la présentation du concept de la rupture du sol. Le comportement mécanique de ce sol est contrôlé par sa résistance au cisaillement, et son étude est réalisée en utilisant le critère de Mohr-Coulomb. Nous avons aussi présenté quelques essais en laboratoire et en place qui servent à déterminer les paramètres de cisaillement du sol.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude bibliographique sur la résistance au cisaillement résiduelle. Celle-ci représente la résistance disponible le long d'une surface de rupture qui se forme dans les sols. Elle est donc une donnée nécessaire à toute étude quand le sol contient des plans de glissement suite à des mouvements importants. En outre, nous avons présenté quelques appareils utilisés pour déterminer cette résistance. Les facteurs affectant cette dernière et enfin son application dans les problèmes de stabilités des pentes ou les terrains en éboulement sont présentés dans ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous avons décrit l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead. Les résultats expérimentaux obtenus lors des essais en laboratoire à l'aide de cet appareil sont exposés en détails.

Ce mémoire est achevé par une conclusion générale et perspectives, deux annexes, et des références bibliographiques.

1.1 Introduction

Le comportement mécanique d'un sol est en grande partie contrôlé par la détermination des paramètres de cisaillement (angle de frottement interne et cohésion). Ces paramètres de cisaillement rentrent dans le calcul des ouvrages géotechniques, à savoir le calcul de la capacité portante des sols pour les fondations, le calcul de poussées et butées des terres derrière les structures de soutènement et le calcul de stabilité des ouvrages en terre (talus, remblai, barrages en terre).

Par ailleurs, différents dispositifs expérimentaux existent tant au laboratoire qu'en place, pour définir la résistance au cisaillement d'un sol. Nous étudierons ici quelques essais de laboratoire et in-situ les plus courants.

1.2 Définition de la rupture du sol

La définition de la rupture dans un sol ne pose pas seulement un problème de choix de la cinématique de la rupture, mais il faut également définir à quel moment se produit la rupture dans les essais qui servent à mesurer la résistance à la rupture du sol, que l'on appelle habituellement résistance au cisaillement.

En pratique, la rupture d'une éprouvette du sol (ou du sol autour de la sonde de mesure, dans le cas des essais en place) s'apprécie d'après les déformations du sol: on trace en cours d'essai la courbe représentant la variation de la déformation du sol (déformation axiale de l'éprouvette triaxiale, déplacement relatif des demi-boîtes de cisaillement, expansion volumique de la sonde pressiométrique, rotation du scissomètre) en fonction de la sollicitation qui l'a produite (déviateur dans l'essai de compression à l'appareil triaxial, contrainte de cisaillement dans l'essai de cisaillement à la boîte, pression dans la sonde pressiométrique, couple appliqué au scissomètre).

Ces courbes ont, suivant la nature et l'état du sol, l'une des deux allures représentées sur la **figure 1.1**.

- la courbe I présente un maximum. On admet que ce maximum τ_{max} correspond à l'état de rupture, la déformation continuant de croître au-delà de ε_I alors que la sollicitation appliquée diminue ou, au mieux, reste constante.

- la courbe II a une allure asymptotique : on définit arbitrairement la rupture à une valeur maximale de la déformation (τ_{lim}) correspondant à ε_{II}), au-delà de laquelle le comportement de l'ouvrage est incompatible avec sa destination.

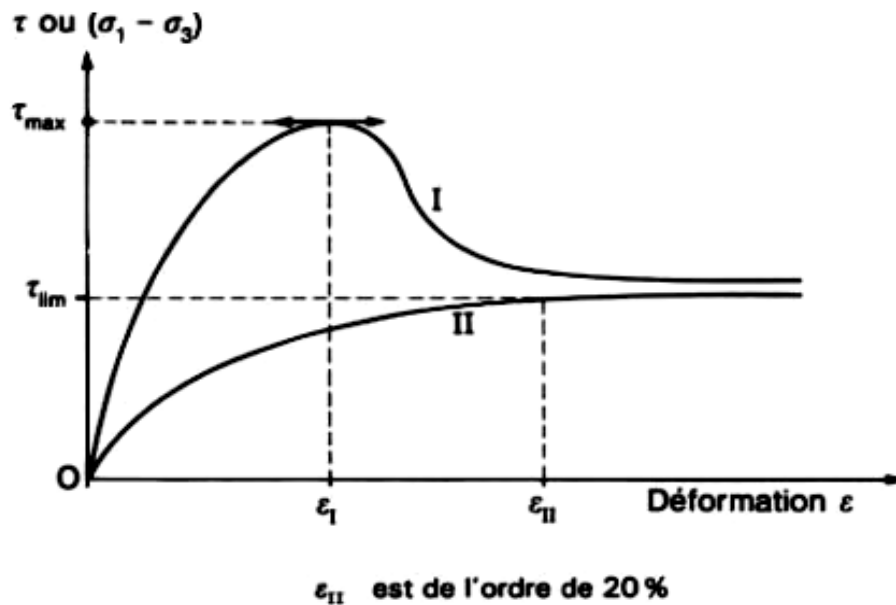


Figure 1.1 Courbe contrainte déformation.

1.3 Modes de rupture

On peut distinguer deux types de comportements fondamentaux dans les sols. A ces deux types de comportements sont associées deux types de modes de rupture, il s'agit :

- **Sols de type A** : c'est le comportement du sable lâche, et celui de l'argile normalement consolidée ou légèrement surconsolidée ($OCR \leq 2$). Le comportement typique est un "strain-hardening" et le sol atteint l'état critique à la fin.
- **Sols de type B** : c'est le comportement du sable dense et celui de l'argile surconsolidée ($OCR > 2$). La réponse du sol est telle que la contrainte tangentielle augmente très rapidement vers une valeur de pic τ_p à très faible déformation, et par la suite le comportement est un «strain-softening». Ce comportement en strain-softening correspond généralement à des zones de plastification localisées appelées «shear band». A l'état ultime, le sol atteint un état critique.
- **Sols de type B'** : A ce dernier type de comportement, on pourrait associer le comportement de quelques argiles surconsolidées pour lesquelles l'orientation des particules argileuses suit une certaine direction lors du cisaillement. Ce comportement est de type B'. Concernant ce

type de sol, le comportement est essentiellement de type résiduel, en ce sens que de grandes déformations peuvent être engendrées et dues à la nature des particules, leurs formes plates, etc.

L'état critique est atteint par le massif de sol quand pendant le cisaillement, il n'y a plus aucune variation de volume du massif de sol et aussi quand il n'y a plus de variation de la résistance au cisaillement. La résistance au cisaillement en ce stade est appelée résistance au cisaillement critique ou résiduelle τ_c et l'indice des vides est appelée indice des vides critique e_c . La **figure 1.2** montre les différents modes de rupture.

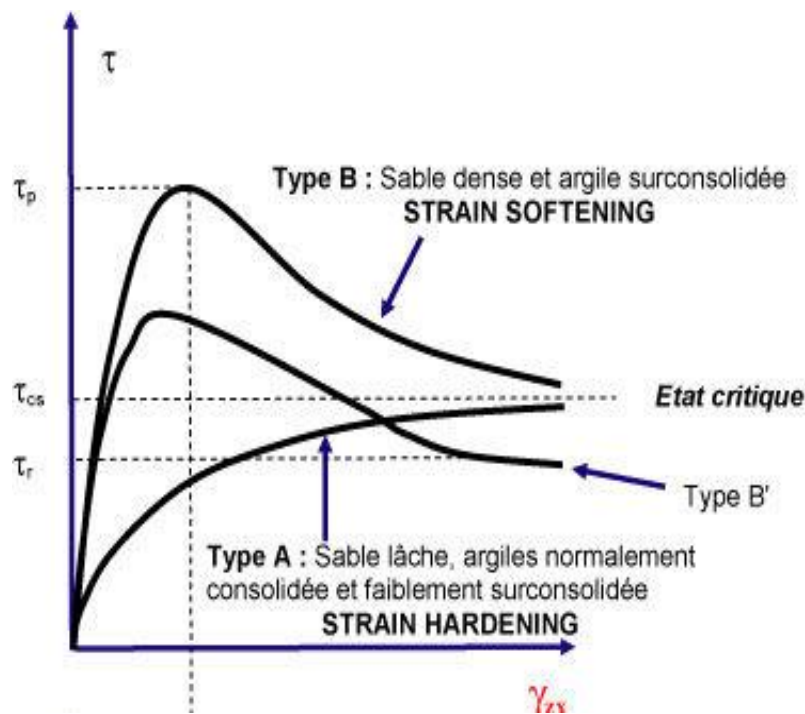


Figure 1.2 Courbes contrainte déformation de différents modes de rupture

1.4 Critère de rupture

En géotechnique, la théorie de Mohr-Coulomb est utilisée pour définir la résistance au cisaillement des sols et des roches à différents états de contrainte effective.

1.4.1 Etat de contrainte

Lorsqu'une force horizontale H est appliquée sur un bloc de poids W mis sur un plan horizontal, cela génère une réaction R inclinée d'angle α (**figure 1.3**). Ce dernier augmente si

la force horizontale augmente jusqu'à ce que le glissement soit éminent, donc l'angle α atteint sa valeur limite φ . Dans ce cas si la force horizontale augmente et l'angle φ reste constant. Le bloc ayant atteint sa résistance maximale au cisaillement. La **figure 1.4** présente l'état de contrainte en un point.

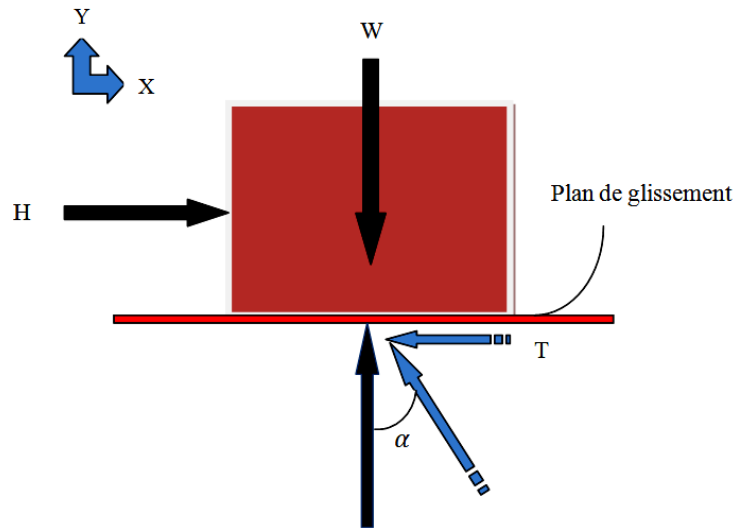


Figure 1.3 Modèle de cisaillement simple

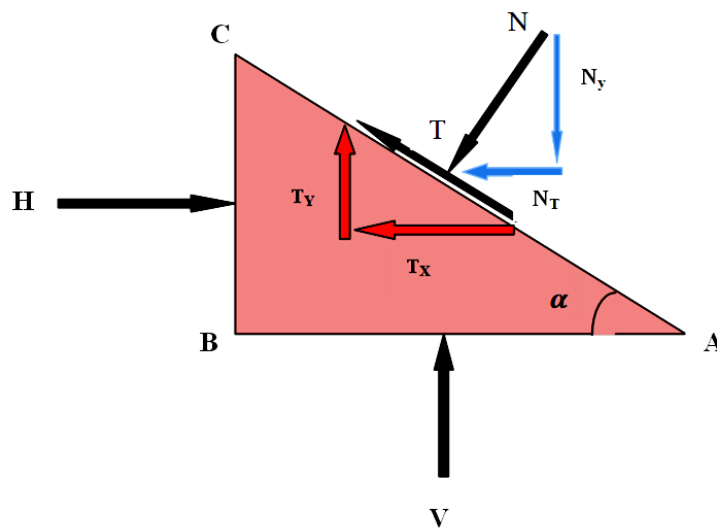


Figure 1.4 Etat de contrainte en un point

A l'équilibre

Somme des forces selon x :

$$\sum F_x = H - N \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - T \cos \alpha = 0, \text{ avec } \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \sin \alpha \quad (1.1)$$

$$\sum F_x = H - N \sin \alpha - T \cos \alpha = 0 \quad (1.2)$$

Somme des forces selon y :

$$\sum F_y = V - N \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + T \sin \alpha = 0, \text{ avec } \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \cos \alpha \quad .$$

$$\sum F_y = V - N \cos \alpha + T \sin \alpha = 0 \quad (1.3)$$

En termes de contraintes

$$\begin{cases} \sigma_x \sin \alpha - \sigma_\alpha \sin \alpha - \tau_\alpha \cos \alpha = 0 \\ \sigma_y \cos \alpha - \sigma_\alpha \cos \alpha - \tau_\alpha \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

On résout ce système pour σ_α et τ_α

- Premièrement pour σ_α

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha \quad (1.5)$$

- Deuxièmement pour τ_α :

$$\tau_\alpha = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \sin 2\alpha \quad (1.6)$$

$$\begin{cases} \left(\sigma_\alpha - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right) = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \cos 2\alpha \\ \tau_\alpha = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \sin 2\alpha \end{cases}$$

$$\left(\sigma_\alpha - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_\alpha^2 = \left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2$$

En termes de contraintes principales on obtient :

$$\left(\sigma_\alpha - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)^2 + \tau_\alpha^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 \rightarrow \text{Equation d'un cercle} \begin{cases} \text{Rayon} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) \\ \text{Centre} = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, 0\right) \end{cases}$$

Ce cercle est appelé cercle de Mohr, avec σ_1 et σ_3 contraintes principales.

1.4.2 Hypothèse de rupture de Mohr

Selon Otto MOHR (1900) on peut définir le critère de rupture comme suit :

La contrainte de cisaillement sur un plan de rupture à la rupture est fonction unique de la contrainte normale sur ce plan.

$$\tau_{ff} = f(\sigma_{ff}) \quad (1.7)$$

τ_{ff} : La résistance au cisaillement du matériau.

σ_{ff} : La contrainte normale.

Cette relation peut être représentée dans le plan des contraintes comme le montre la **figure 1.5** elle sépare la zone dans laquelle les matériaux considérés comme stables de celle où ils sont instables. Le matériau est à l'équilibre limite lorsque l'enveloppe de rupture est tangente aux cercles de Mohr.

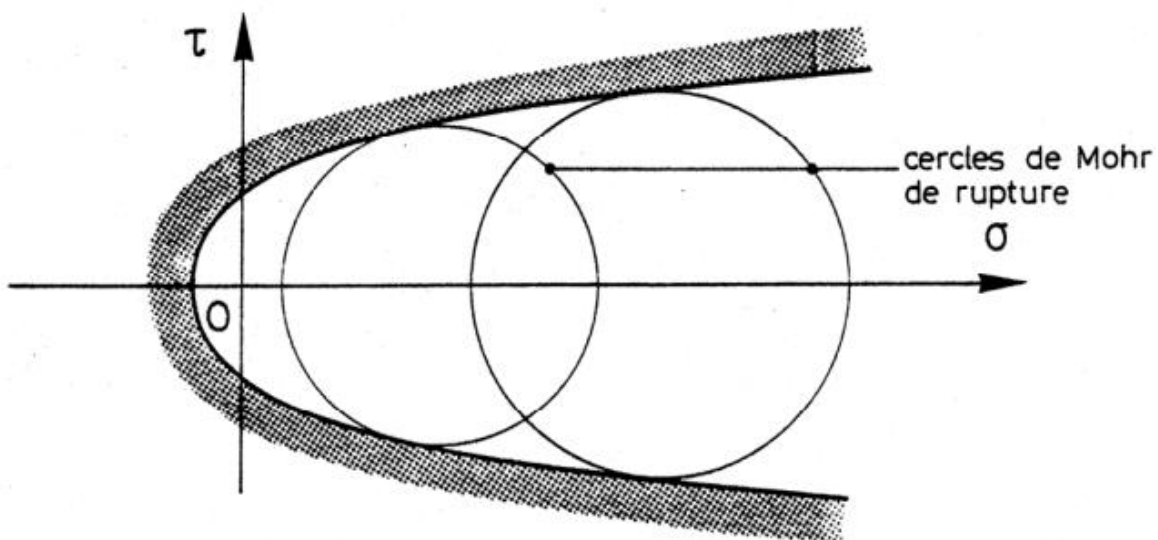


Figure 1.5 Courbe intrinsèque selon Mohr

1.4.3 Représentations de coulomb

Expérimentalement, il a été montré que:

- les deux demi-droites sont symétriques par rapport à σ (**figure 1.6**)
- pour les sols pulvérulents : les droites passent par l'origine
- pour les sols cohérents : existence d'une résistance au cisaillement sous contrainte normale nulle

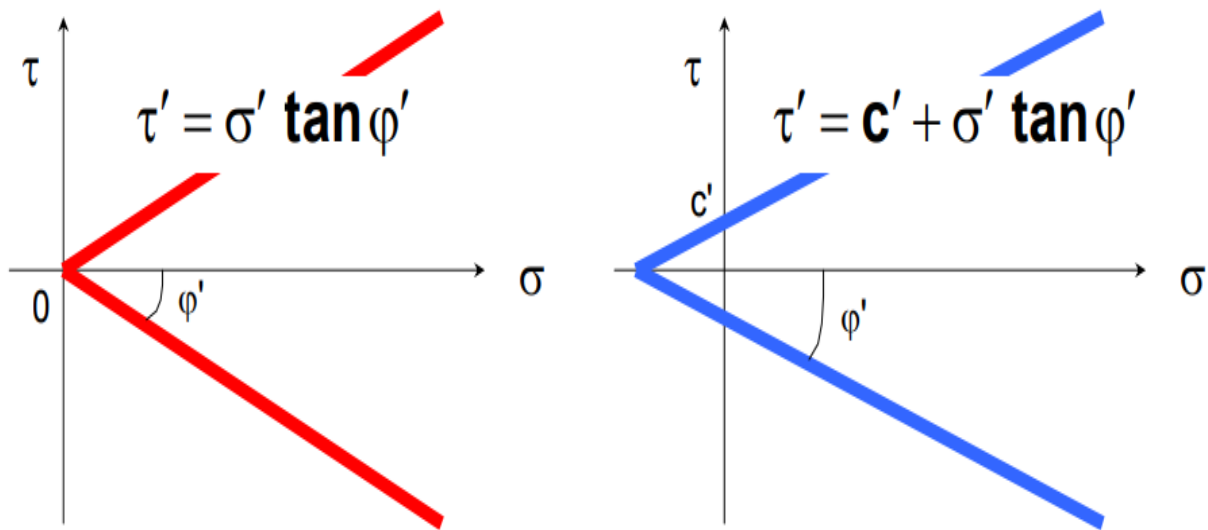


Figure 1.6 Courbes intrinsèques selon Coulomb pour sol pulvérulent et sol cohérent

Où σ et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement, et c et φ sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement interne du matériau.

Le critère est aussi exprimé avec une fonction qu'on appelle fonction de charge.

$$f(\sigma_1, \sigma_3) = 2C \cos \varphi - (\sigma_1 - \sigma_3) + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi = 0 \quad (1.8)$$

Si $f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$, rupture du sol.

Si $f(\sigma_1, \sigma_3) < 0$, stabilité de sol (domaine élastique).

Si $f(\sigma_1, \sigma_3) > 0$, on ne peut rien dire.

Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice sur l'hexagone irrégulier de Mohr-Coulomb comme le montre la **figure 1.7**.

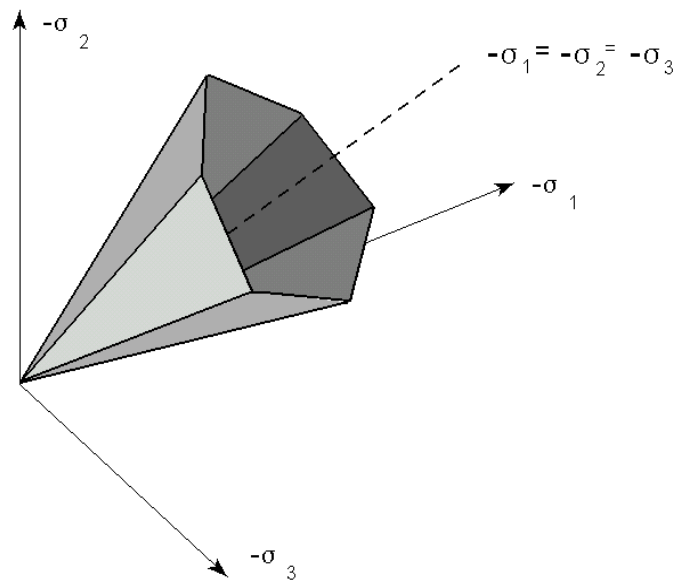


Figure 1.7 Représentation du critère de Mohr-Coulomb dans l'espace des contraintes

1.4.4 Représentations de Lambe et de Cambridge. Chemins de contraintes

Lorsqu'on veut représenter les états de contraintes s'exerçant en un point, on est conduit à abandonner la représentation de Mohr qui deviendrait rapidement illisible.

Deux représentations sont alors couramment utilisées en mécanique des sols, à savoir :

1. Représentation de Lambe ;
2. Représentation de Cambridge.

Dans la représentation de Lambe, on substitue au cercle de Mohr les grandeurs :

- $s = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3)$
- $t = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)$

(Noter que cela revient, en restant dans le plan de Mohr, à remplacer le cercle par son point sommital).

Dans la représentation de Cambridge, on choisit les deux grandeurs suivantes :

- $p = \frac{1}{3} (\sigma_1 + 2 \sigma_3)$ contrainte moyenne
- $q = \sigma_1 - \sigma_3$ déviateur

La **figure 1.8** représente des exemples de chemins de contraintes, dans des conditions axisymétriques.

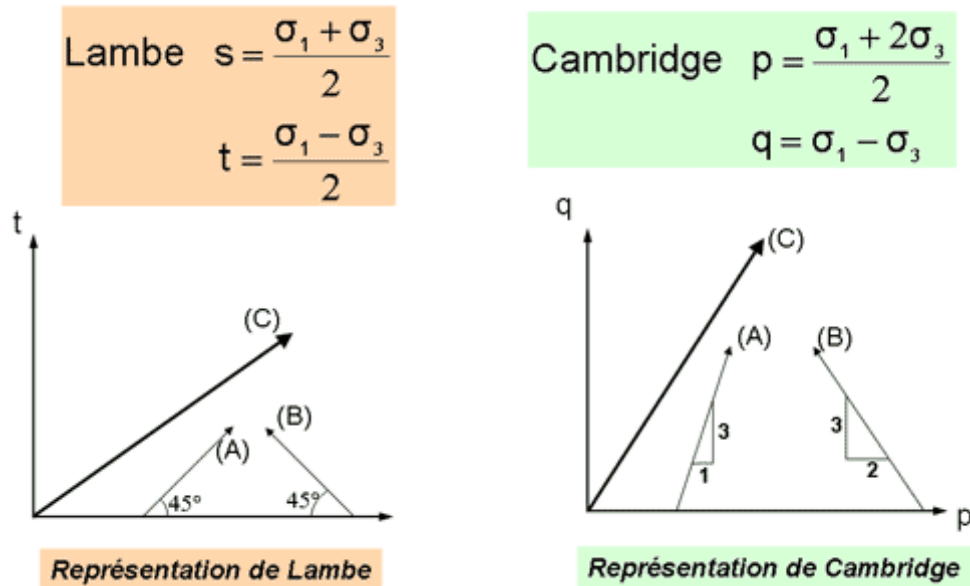


Figure 1.8 Exemple de trois chemins de contraintes en conditions axisymétriques

A : $\sigma_3 = \text{constante}$

B : $\sigma_1 = \text{constante}$

C : $K = \sigma_3 / \sigma_1 = \text{constante}$

1.4.5 Contraintes totales et contraintes effectives

Différents systèmes de contraintes sont utilisés pour l'étude des problèmes de mécanique des sols. Dans les sols saturés, on distingue classiquement:

- les contraintes totales σ ;
- les pressions interstitielles u ;
- les contraintes effectives σ' .

Dans la représentation de Mohr, les cercles de Mohr en contraintes effectives se déduisent des cercles de Mohr en contraintes totales par une translation d'amplitude égale à la pression interstitielle u , parallèlement à l'axe des contraintes normales (**figure 1.9 a**). On a en effet :

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1.9)$$

$$\tau' = \tau \quad (1.10)$$

Dans les représentations de Lambe et de Cambridge, les points et les chemins de contraintes effectives se déduisent également des états et chemins de contraintes totales par une translation de u parallèlement à l'axe des s (ou des p). Des exemples de chemins de contraintes totales et effectives sont représentés sur la **figure 1.9, (b) et (c)**. Ces exemples illustrent l'existence des relations :

$$s' = s - u \tag{1.11}$$

$$t' = t \tag{1.12}$$

Et

$$p' = p - u \tag{1.13}$$

$$q' = q \tag{1.14}$$

Dans les sols secs, la pression interstitielle est nulle et l'on utilise un seul système de contraintes. En l'absence de modèle mieux adapté, on analyse la résistance au cisaillement en termes de contraintes totales.

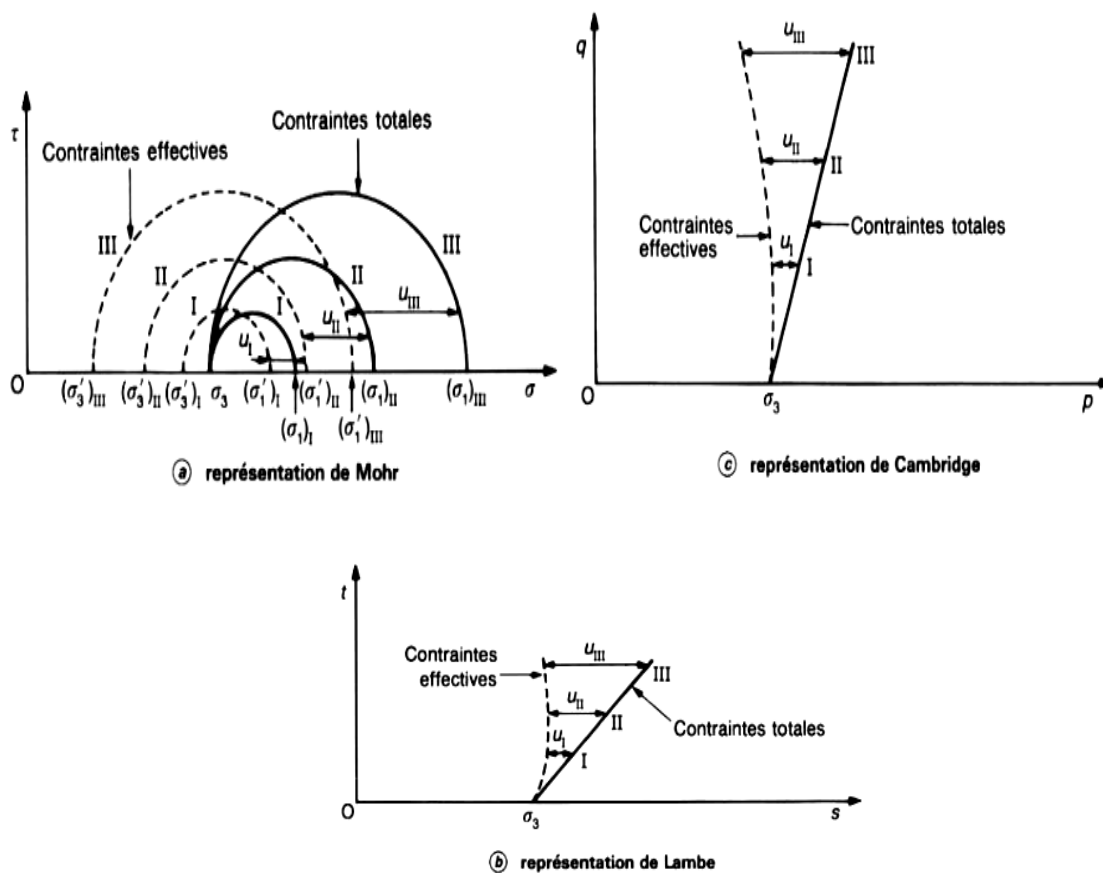


Figure 1.9 Contraintes totales et contraintes effectives

1.5 Comportement drainé et non drainé

On distingue, de ce point de vue, deux grands types de comportement du sol :

- le comportement drainé ;
- le comportement non drainé.

Le comportement drainé ou non drainé dépend de la nature du sol, de son origine, de sa formation géologique, de sa structure, de ses conditions de chargement, etc...

1.5.1 Comportement drainé

On parle de comportement drainé d'un sol lorsque l'application de l'effort vérifie l'une des conditions suivantes :

- la vitesse de cisaillement est suffisamment lente, compte tenu de la perméabilité du sol et de la longueur du chemin de drainage, pour n'induire aucune surpression interstitielle dans l'éprouvette du sol.
- les surpressions interstitielles éventuelles se soient dissipées au moment où l'on veut étudier le comportement du sol.

1.5.2 Comportement non drainé

À l'opposé, dans le comportement non drainé, le chargement est assez rapide, compte tenu de la perméabilité du sol (ou de son coefficient de consolidation) et de la longueur du chemin de drainage, pour provoquer l'apparition de surpressions interstitielles qui ne peuvent se dissiper pendant la période considérée. Dans les essais de laboratoire, on reproduit cette situation en interdisant l'écoulement de l'eau interstitielle hors de l'éprouvette, ce qui impose la constance du volume du sol, quand il est saturé. En l'absence de drainage et de variation de volume, les composantes normales des contraintes induites dans le milieu par l'application de l'effort sont transmises presque intégralement à la phase liquide, sans modification notable des contraintes normales effectives dans le squelette. Les caractéristiques de cisaillement du sol dans un comportement non drainé sont dites caractéristiques non drainées.

1.5.3 Détermination des caractéristiques drainé et non-drainés en laboratoire

Les caractéristiques de cisaillement des sols sont déterminées en laboratoire sur des éprouvettes prélevées dans des carottes de sol ou préparées spécialement à cette fin, dans le cas des matériaux de remblai ou des sols que l'on ne sait pas prélever à l'état intact (sables,

graviers, etc.). Les conditions d'application des contraintes s'efforcent de reproduire le caractère drainé ou non drainé du comportement du sol en jouant sur deux facteurs :

- l'existence ou l'absence de possibilités de drainage ;
- la vitesse de l'essai.

1.5.4 Calcul à long terme et à court terme

Les caractéristiques de cisaillement des sols sont exploitées dans deux types principaux de calculs de stabilité :

- Les calculs dits à court terme, qui correspondent à une situation faisant immédiatement suite à l'application rapide d'un effort et à laquelle sont associées les caractéristiques non drainées. Ces calculs sont habituellement effectués en contraintes totales dans les sols fins (pour les sols perméables inclus dans le calcul, on utilise simultanément les caractéristiques drainées et les contraintes effectives). Les termes « rapide » ou « lent » caractérisant l'application de l'effort sont appréciés par référence à la vitesse de consolidation.
- Les calculs dits à long terme, qui correspondent à l'une des situations suivantes, auxquelles sont associées les caractéristiques drainées :
 - Application lente de l'effort (par rapport à la vitesse de dissipation des surpressions interstitielles).
 - Délai suffisant pour la dissipation des surpressions interstitielles après une application rapide de l'effort.

Le **tableau 1.1** montre le type de calcul selon la nature du sol.

Tableau 1.1 Type d'essai selon la nature du sol

Type de sol	Perméabilité	Type de calcul	Caractéristiques	Contraintes induites	Pression interstitielle induite	Drainage
Sol pulvérulent ou grenu	Forte à moyenne	Longe terme	Drainées	Effectives	$U=0$	Autorisé
	Faible	Long terme et court terme	Drainées	Effectives	$U=0$	Autorisé
Sol fin	Faible à très faible		Non drainées	Totales	$U \neq 0$	Autorisé ou empêché

1.6 Les essais géotechniques

Parce la résistance au cisaillement est une donnée nécessaire dans tous les problèmes de stabilité des sols (stabilité des pentes, étude des fondations et ouvrages de soutènement), il y a plusieurs essais que se soit en laboratoire ou en place pour la déterminer.

1.6.1 Essais en laboratoire

Plusieurs types d'essais sont utilisés pour déterminer en laboratoire la résistance au cisaillement des sols, on cite ici les plus utilisés:

- les essais à l'appareil triaxial de révolution.
- les essais de cisaillement direct à la boîte.
- les essais de cisaillement direct alterné à la boîte.

1.6.1.1 Essais de cisaillement direct à la boîte

Les essais de cisaillement sur des surfaces de rupture prédéfinies sont les plus anciens des essais de cisaillement utilisés en mécanique des sols. Jusqu'aux années 30, ils étaient les seuls essais possibles. En particulier, il est déconseillé d'effectuer des essais non drainés à la boîte de cisaillement.

Le principe de l'essai est simple (**figure 1.10**) on applique une force N verticale au sommet de l'éprouvette qui crée une contrainte normale sur un plan horizontal. Dans un second temps, on exerce sur la demi-boîte supérieure un effort horizontal qui va provoquer le déplacement relatif des deux demi-boîtes,

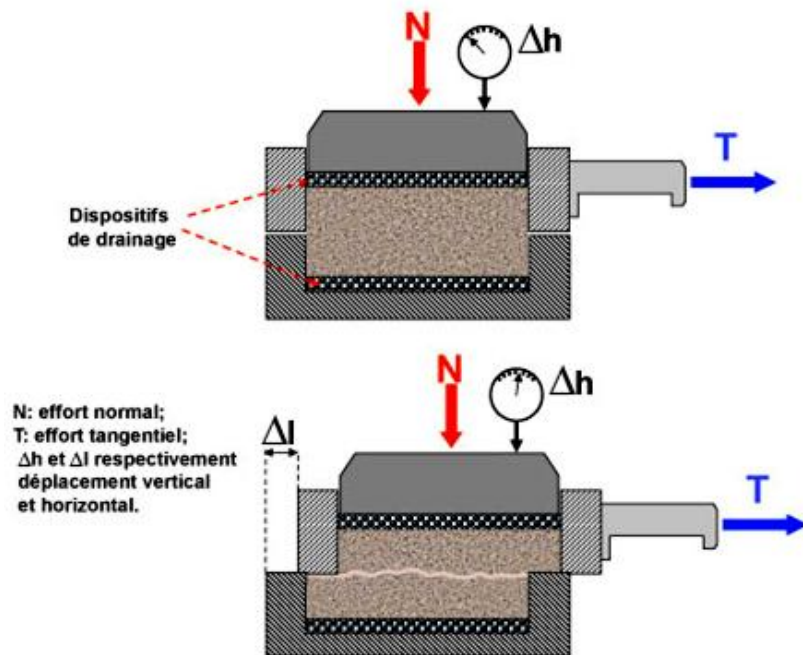


Figure 1.10 Principe de l'essai de cisaillement direct

Au cours de l'essai, on mesure :

- l'effort normal N ;
- l'effort de cisaillement T ;
- le déplacement horizontal du châssis mobile, de l'ordre du centimètre dans les essais courants ;
- le déplacement vertical du piston dans le châssis supérieur. Les déplacements sont mesurés au moyen de comparateurs à cadran ou de capteurs de déplacements.

✓ Exploitation des résultats

L'objectif de l'exploitation des résultats est de construire la courbe intrinsèque représentant le critère de plasticité du sol. Comme on connaît la surface de rupture, on peut reporter directement sur le diagramme de Mohr (σ, τ) les valeurs des contraintes normale et tangentielle lors de la rupture (pic de la courbe « effort-déformation » ou valeur limite conventionnelle). Afin d'exécuter tout ce qui est indiqué ci-dessus, il faut :

- tracer la courbe « effort de cisaillement-déplacement relatif des demi-boîtes » (voir **figure 1.11**)
- calculer la contrainte normale σ , supposée uniforme :

$$\sigma = N/A \quad (1.15)$$

avec A aire de la section de l'éprouvette ;

- calculer la contrainte tangentielle τ , supposée uniforme :

$$\tau = T/A \quad (1.16)$$

En règle générale, on ne corrige pas la valeur de l'aire A pour tenir compte du déplacement relatif des demi-boîtes. Si l'on doit le faire, il faut tenir compte du frottement du sol sur le métal des demi-boîtes. En reproduisant l'essai sur plusieurs éprouvettes, pour différentes valeurs de la contrainte normale σ , on peut construire point par point la courbe intrinsèque comme le montre la **figure 1.12**.

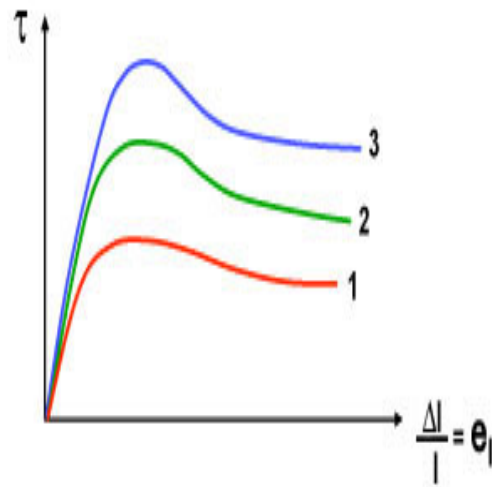


Figure 1.11 Courbe effort de cisaillement-déplacement relatif de demi boîtes

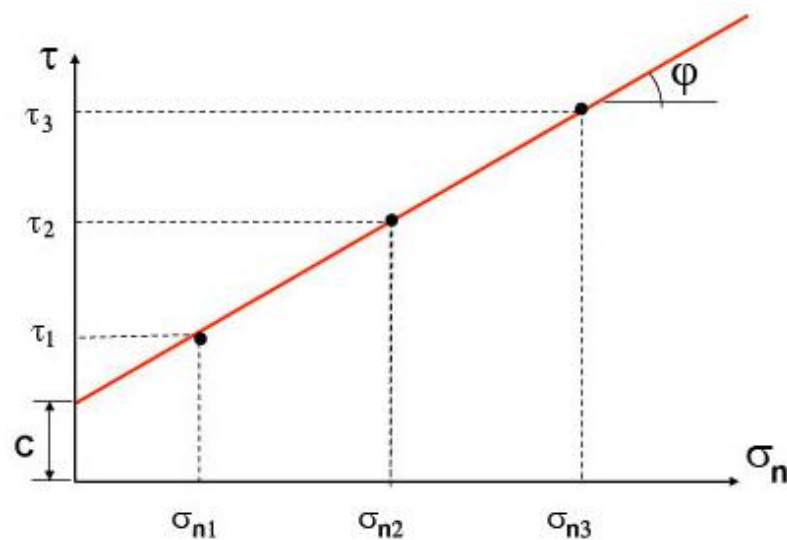


Figure 1.12 Résultats d'un essai de cisaillement direct dans le plan de Mohr

1.6.1.2 Essais à l'appareil triaxial de révolution

Dans cet essai, l'éprouvette de sol est placée dans une cellule dite « triaxiale ». L'éprouvette cylindrique d'un élancement h/d au moins égal à 2, h désignant la hauteur et d le diamètre (figure 1.13). A la base et au sommet de l'éprouvette sont disposées des plaques drainantes reliées à l'extérieur à des dispositifs permettant soit d'assurer le drainage et de connaître les variations de volume, soit de mesurer la pression interstitielle dans l'éprouvette.

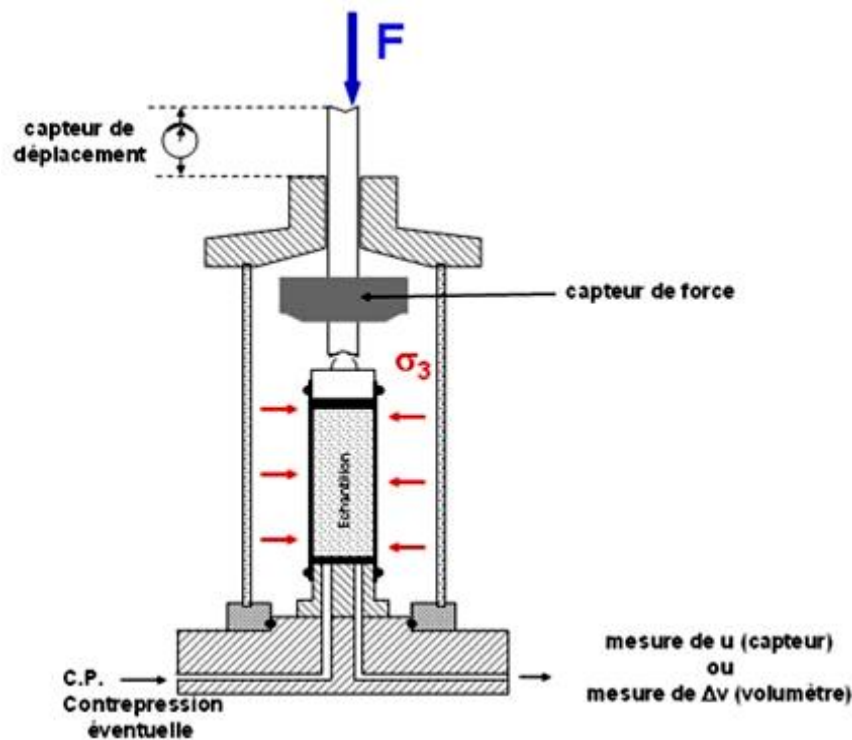


Figure 1.13 Principe de l'appareil triaxial de révolution

Les contraintes sont transmises à l'éprouvette de deux manières. Il y a d'une part une pression de confinement $\sigma_3 = \sigma_r$ existant dans la chambre triaxiale générée par un dispositif de mise en pression et d'autre part, on applique un effort axial F qui crée un déviateur de contrainte axial ($\sigma_1 - \sigma_3$) ; la contrainte σ_1 est généralement mesurée par un capteur situé au sommet de l'éprouvette.

De plus, on mesure la variation de hauteur de l'éprouvette Δh qui donne la déformation axiale $\Delta h/h = \varepsilon_1$.

Enfin, on peut imposer au sein de l'éprouvette une contrepression (CP) qui a pour but de réaliser une bonne saturation de celle-ci.

La mesure de σ_3 , l'application éventuelle de CP, la connaissance de $(\sigma_1 - \sigma_3)$ et la mesure de la pression interstitielle u permettent de déterminer à chaque instant l'état de contraintes totales et l'état de contraintes effectives existant dans l'éprouvette.

Le principe de l'essai consiste en général à appliquer tout d'abord un état de contrainte isotrope avec $(\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_r)$, pondéré éventuellement de la contrepression CP. A ce stade, deux possibilités sont envisageables :

- soit on permet le drainage de l'éprouvette et sa consolidation, ce qui entraîne une modification dans l'état de l'éprouvette se traduisant par une variation de l'indice des vides,
- soit on interdit ce drainage et on mesure la pression interstitielle se développant dans l'éprouvette, dans ce cas, l'état de l'éprouvette ne se modifie pas si l'on suppose qu'elle est initialement saturée.

▪ Types d'essais

Différentes modalités d'essais peuvent être définies, selon que les phases successives de l'essai sont exécutées avec ou sans drainage. On distingue les principaux types d'essais suivants :

—essais non consolidés-non drainés (UU) : la première étape de l'essai est effectuée à drainage fermé, de même que le cisaillement ;

—essais consolidés-non drainés (CU) : au cours de l'étape de consolidation, le drainage est ouvert et l'on attend que les contraintes effectives deviennent égales aux contraintes totales appliquées (surpressions interstitielles nulles). Au cours de l'étape de cisaillement, le drainage est fermé et l'on peut, si nécessaire, mesurer la pression interstitielle pendant le chargement jusqu'à la rupture (on parle alors d'essais CU avec mesure de u) ;

—essais consolidés-drainés (CD) : la première étape est identique à celle des essais CU. Le cisaillement est exécuté en condition de drainage ouvert, en augmentant la charge suffisamment lentement pour que la surpression interstitielle reste négligeable tout au long de l'essai.

▪ Représentation de Mohr. Courbe intrinsèque

Les essais de cisaillement à l'appareil triaxial sont traditionnellement exploités en utilisant la représentation de Mohr pour les états de contraintes totales ou effectives.

On en déduit le cercle de Mohr correspondant à l'état limite considéré (σ_1, σ_3) . Les cercles de Mohr correspondant aux états de contraintes précédant la rupture sont situés

entre l'axe des contraintes normales et la courbe intrinsèque. A partir de cette représentation on peut définir les paramètres de cisaillement C et φ .

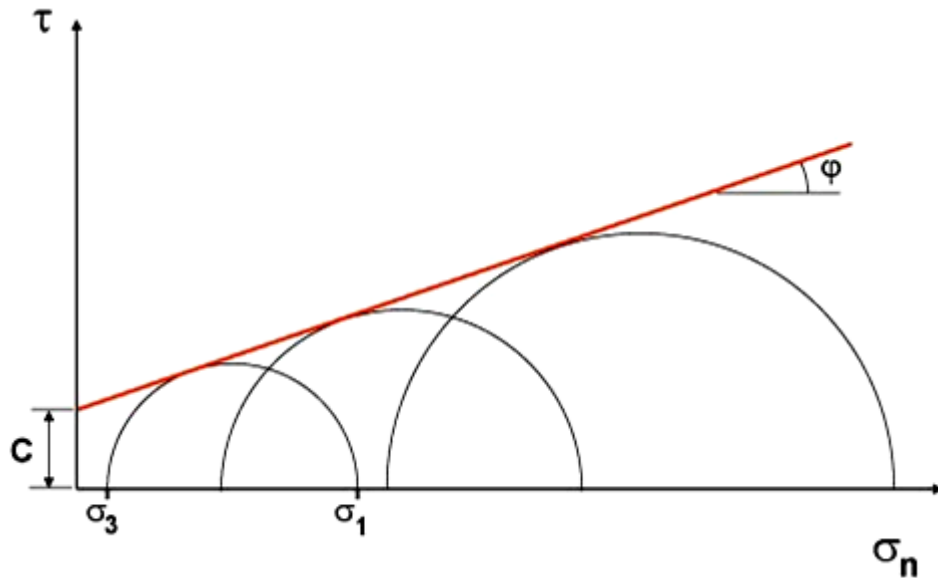


Figure 1.14 Résultats d'un essai triaxial dans le plan de Mohr

1.6.1.3 Essais de cisaillement direct alterné à la boîte

Les essais de cisaillement direct alterné à la boîte ont été dérivés des essais de cisaillement direct à la boîte pour caractériser le frottement sur les surfaces de rupture dans les pentes naturelles, dans le cas où les deux massifs de sol en contact ont subi un déplacement relatif important.

▪ Appareillage

Le matériel nécessaire à l'essai comporte :

— une boîte de cisaillement de forme carrée, identique à celle de l'essai décrit au dessus
Comme l'essai est long et n'est réalisé que sur des sols argileux, la bonne saturation de l'éprouvette nécessite que la boîte soit immergée dans une enceinte pleine d'eau ;

— une machine de cisaillement, assurant les fonctions suivantes :

- transmission de l'effort normal vertical N par un système de poids et leviers ou au moyen d'un vérin,
- déplacement horizontal alterné de la demi-boîte inférieure à vitesse constante,

- liaison de la demi-boîte supérieure avec le bâti de la machine par l'intermédiaire d'un dispositif de mesure de l'effort de cisaillement T

- **Procédure d'essai et résultats**

L'essai est effectué sur des éprouvettes saturées, dans des conditions drainées, c'est-à-dire avec une vitesse de déplacement relatif des demi-boîtes très faible, adaptée à la perméabilité du sol. Il comporte deux phases :

- une phase de consolidation sous l'effort normal N ;

- puis une phase de cisaillement alterné d'amplitude constante, prolongée jusqu'à ce que l'effort de cisaillement T se stabilise. Pour chaque sol testé, on exécute au moins trois essais, pour trois valeurs de l'effort normal N. L'exploitation des résultats est identique à celle de l'essai de cisaillement direct à la boîte : on reporte sur un diagramme de Mohr (σ, τ) les valeurs des contraintes normale et tangentielle déduites des valeurs de N et T en fin d'essai :

$$\sigma = N/A$$

$$\tau = T/A$$

avec A aire de la section de l'éprouvette, sans correction pour tenir compte du déplacement.

1.6.2 Essais in-situ

Trois types d'essais en place sont au dessous pour déterminer la résistance au cisaillement des sols :

- les essais au scissomètre de chantier ;
- les essais au pénétromètre statique ;
- les essais au pressiomètre de Ménard

L'essai au scissomètre de chantier est l'essai de référence pour déterminer la résistance au cisaillement non drainé des sols fins cohérents de faible consistance (sols mous). Les deux autres types d'essais ne sont pas utilisés de façon systématique, mais peuvent servir à déterminer la résistance au cisaillement non drainé du sol dans son état naturel, soit par corrélation (pénétromètre statique), soit directement (pressiomètre).

1.6.2.1 Essais au scissomètre de chantier

- **Appareillage**

Le scissomètre de chantier comporte :

- un moulinet cruciforme de hauteur H et de diamètre D, que l'on introduit dans le sol jusqu'au niveau où l'on veut exécuter la mesure ;

— un train de tiges concentriques dans lequel la tige intérieure sert à transmettre le couple de torsion jusqu'au niveau du moulinet, tandis que la tige extérieure est utilisée pour fonder le moulinet et protéger la tige intérieure ;

— un dispositif permettant à la fois d'appliquer une rotation à vitesse constante et de mesurer le couple correspondant. Ce dispositif est constitué d'un bâti d'ancrage et d'un système de mise en rotation.

▪ **Procédure d'essai**

L'essai consiste à imposer une rotation au moulinet et à mesurer la résistance du sol en fonction de cette rotation. La courbe « couple-rotation » obtenue passe normalement par un pic. Au-delà du pic, la résistance à la rotation diminue puis tend vers une asymptote, qu'il est utile de déterminer. Pour cette raison, la rotation est poursuivie pendant quelques tours au-delà du maximum du couple mesuré en tête des tiges. Le domaine d'utilisation du scissomètre de chantier est limité aux sols fins, cohérents, peu consistants. La modification des dimensions du moulinet permet d'élargir le domaine d'utilisation de ce type d'essai.

▪ **Résultats**

Comme le scissomètre de laboratoire, le cisaillement se produit dans des conditions non drainées, la rupture se produit simultanément sur toute la surface extérieure du volume cylindrique découpé dans le sol par la rotation du moulinet et la résistance du sol y a partout la même valeur. L'exploitation des résultats est alors très simple :

On divise le moment mesuré en tête du train de tiges par un coefficient géométrique constant pour trouver la valeur de la résistance au cisaillement τ . On détermine deux valeurs de la résistance au cisaillement : au pic de la courbe « couple-rotation » (résistance du sol intact) et à l'asymptote (résistance du sol remanié).

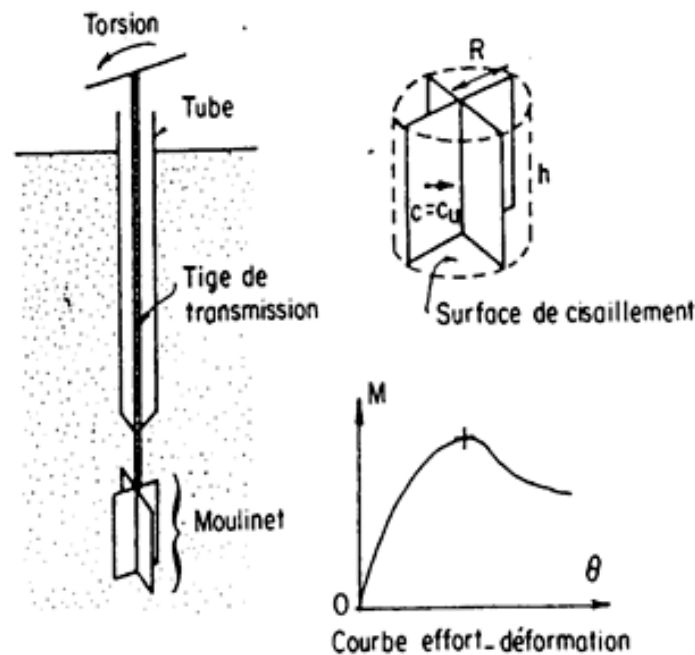


Figure 1.15 Principe de l'essai au scissomètre

1.6.2.2 Essais au pénétromètre statique

Le principe de l'essai est extrêmement simple. Il consiste à enfoncer verticalement dans le sol, sans choc, ni vibration, ni rotation, à vitesse constante imposée, une pointe munie d'un cône en partie inférieure par l'intermédiaire d'un train de tige qui l'est solidaire et à mesurer la résistance à la pénétration de ce cône. (figure 1.16)

▪ Appareillage

L'exécution d'essais de pénétration statique nécessite :

- une pointe conique et un train de tiges ;
- un système de fonçage (vérin et système de réaction) ;
- un système de mesure de l'effort exercé par le sol sur la pointe conique (et éventuellement du frottement latéral sur la partie cylindrique de la pointe derrière le cône et/ou de la pression interstitielle près de la pointe, dans le cas du piézopénétromètre ou piézocône). Il existe de nombreux types de pénétromètres statiques, qui diffèrent par le principe de pénétration, le dispositif de mesure de l'effort Q_c , le diamètre de la pointe et l'effort maximal d'enfoncement.

▪ Procédure d'essai

La pointe conique est foncée dans le sol à vitesse lente et constante et l'on mesure l'effort de réaction Q_c sur le cône de surface de base A_c . Si l'appareillage comprend un dispositif de mesure directe du frottement latéral exercé par le sol sur un élément de tube

(manchon de frottement), on mesure aussi l'effort Q_s nécessaire pour enfoncer le manchon de frottement, de surface latérale A_s .

▪ Résultats

À chaque niveau dans le sondage pénétrométrique, on détermine la résistance de cône Q_c égale à :

$$q_c = Q_c/A_c \quad (1.17)$$

et éventuellement le frottement latéral unitaire :

$$f_s = Q_s/A_s \quad (1.18)$$

L'essai au pénétromètre statique ne permet pas de déterminer directement la résistance au cisaillement du sol. Ses résultats sont utilisés directement pour la caractérisation des sols et le calcul des fondations. Néanmoins, pour les sols fins cohérents, on peut utiliser des corrélations pour déterminer la résistance au cisaillement non drainé.

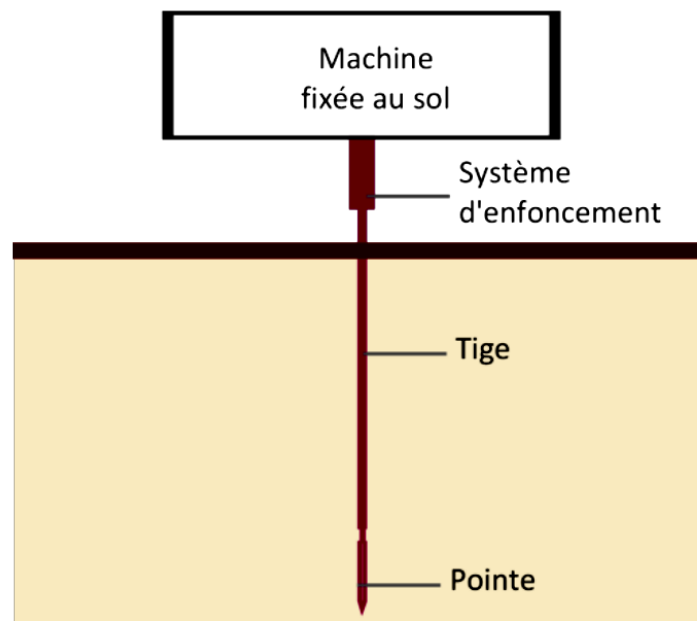


Figure 1.16 Pénétromètre statique

🚧 Domaine d'application

- _ Sols fins et sols grenus
- _ Recommandé par l'USG dans les calculs de la capacité portante
- _ Bonne approche qualitative dans les calculs de tassement
- _ Essai plus rapide que l'essai pressiométrique
- _ Possibilité de multiplier les points de sondages sur un terrain
- _ Essai donnant des résultats plus satisfaisant que l'essai pénétrométrique dynamique

✚ Limites de l'essai

- _ Non adapté aux sols hétérogènes ou durs
- _ Aucune identification visuelle du sol. L'identification se fait par abaque.
- _ Il est préférable de réaliser un sondage carotté en complément
- _ Risque de refus sur une couche dure lamellaire

1.6.2.3 Essais au pressiomètre de MENARD

Le principe consiste à introduire dans le forage une sonde de mesure équipée d'une membrane en caoutchouc dilatable radialement par injection de fluide sous pression.

La **figure 1.17** montre le principe de l'essai préssiométrique.

On mesure à l'aide du contrôleur pression volume, le champ de déformation du sol en fonction des contraintes cylindriques imposées et du temps. De même, on note également le "fluage", c'est-à-dire la différence entre la déformation finale et la déformation à 30s.

L'ensemble des résultats des mesures peut se traduire par deux courbes.

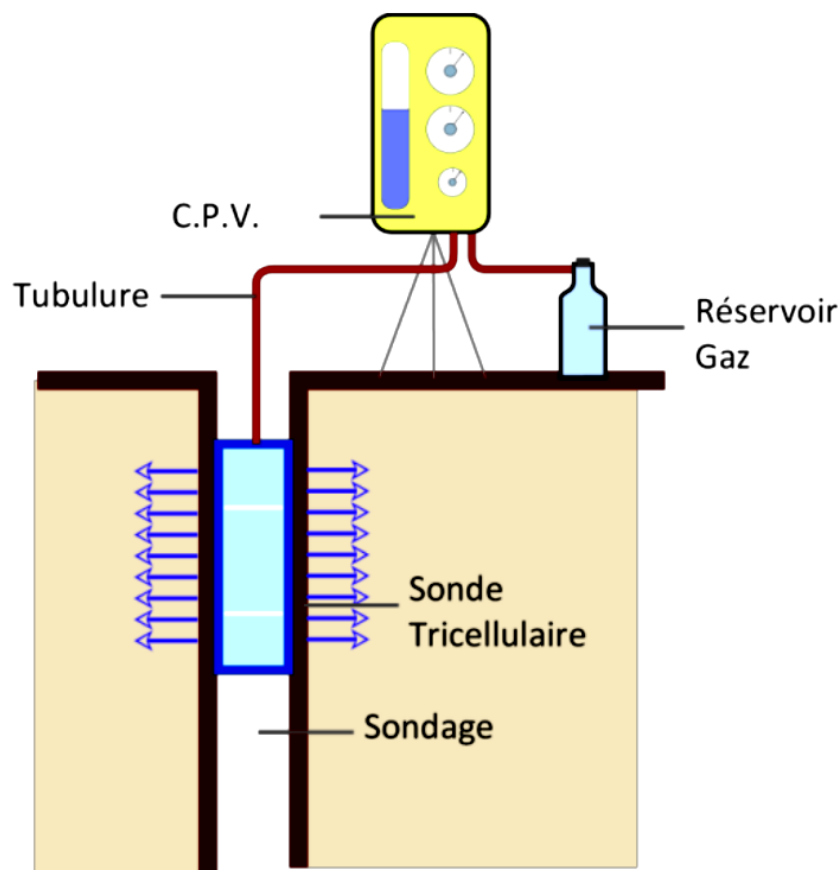


Figure 1.17 Principe de l'essai préssiométrique

- ✓ La courbe préssiométrique avec en abscisses les pressions et en ordonnées les déformations volumétriques en fin de palier.
- ✓ Une courbe dite de "fluage" avec en abscisse les pressions et en ordonnées les déformations de fluage correspondantes

L'analyse assez complexe de l'essai préssiométrique se fait à partir de ces trois valeurs (E , p_f , p_i)

Domaine d'application et limite de l'essai

- _ Peut être réalisé dans tous les types de sols, saturés ou non
- _ Peut être réalisé dans les remblais
- _ Recommandé par l'USG dans les calculs de tassements et capacité portante
- _ Adaptable à tous types de sols Précision de l'essai Optimisation des valeurs de capacité portante
- _ Seul essai qui sollicite le sol in situ des petites aux grandes déformations pour permettre un véritable calcul de tassements

Limites de l'essai

- _ Essai long à réaliser et ne pouvant pas être multiplié sur le site sans un coût élevé
- _ Valeur de l'essai dépendant de la qualité du forage

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on définit la rupture d'un sol et différents types de rupture qu'on peut rencontrer. En mécanique des sols le critère le plus utilisé est le critère de Mohr-Coulomb pour déterminer les paramètres de cisaillement d'un sol. Ce critère se traduit par la fameuse équation :

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

Telle que C est la cohésion et φ est l'angle de frottement.

A la suite nous avons défini quelques essais en laboratoire et en place qui permettent de déterminer la résistance au cisaillement des sols.

2.1 Introduction

La résistance résiduelle drainée des sols cohérents est une propriété importante en géotechnique. Son rôle est de définir la perte de résistance notamment dans les argiles fissurées. Elle représente également la résistance disponible le long des surfaces de cisaillement qui se forment dans les sols cohérents. Elle devient une donnée nécessaire pour évaluer le risque dû à la rupture progressive dans les problèmes de stabilité en général, faire une conception des murs de soutènements et enfin étudier le comportement des terrains en éboulement. Le développement des connaissances sur la résistance résiduelle amène à comprendre les mécanismes de base dans les problèmes de géotechnique de l'ingénieur.

Tiedman (1937) et Haefeli (1938,1939) ont été les premiers chercheurs intéressés à la résistance au cisaillement résiduelle des argiles dans les années trente. Elle a été définie par Haefeli en 1951 en insistant sur son importance pratique comme le résidu de la résistance au cisaillement dans la courbe contrainte-déformation.

Ensuite plusieurs autres chercheurs ont montré un intérêt portant sur la résistance au cisaillement comme :

Skempton (1964) qui a démontré que la résistance au cisaillement d'un certain nombre de glissements de terrain à la rupture est proche de la résistance résiduelle drainée, et que la résistance résiduelle peut être atteinte dans les talus qui ont subi auparavant d'importants mouvements.

Bjerrum (1967) a décrit la résistance résiduelle comme étant la résistance ultime acquise par un échantillon cisailé au-delà de la rupture et conservant une valeur constante pour des déformations supplémentaires.

La Gatta (1970) a défini la résistance au cisaillement comme étant la résistance au cisaillement atteinte par un sol après une déformation continue sous un état constant de contraintes effectives et d'indice des vides.

2.2 La résistance au pic et résiduelle

Quand un sol, présentant un comportement fragile, subit un cisaillement dans des conditions drainées, sa résistance augmente progressivement et atteint pour des déplacements relativement faibles, une résistance maximale appelée résistance de pic ou maximum. Les essais de cisaillement au laboratoire sont fréquemment arrêtés une fois ce pic atteint.

Cependant, la poursuite du cisaillement entraîne éventuellement une diminution de la résistance au cisaillement pour atteindre une valeur stable qui reste constante même pour des

déplacements supplémentaires importants. Cette valeur limite est la résistance au cisaillement résiduelle qui peut être beaucoup plus petite que la résistance au pic. La figure 2.1 montre deux courbes typiques contrainte de cisaillement-déformation dans le cas des argiles normalement consolidée et surconsolidées, ainsi que les enveloppes de ruptures au pic et résiduelle correspondantes.

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

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

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

Et la résistance résiduelle par l'équation :

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

Où,

σ'_n : Contrainte effective normale,

c'_p et φ'_p : Cohésion effective et angle de frottement interne effectif correspondant au pic,

c'_r et φ'_r : Cohésion effective et angle de frottement interne effectif correspondant à l'état résiduel.

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

$$\tau_r = \sigma'_n \operatorname{tg} \varphi'_r$$

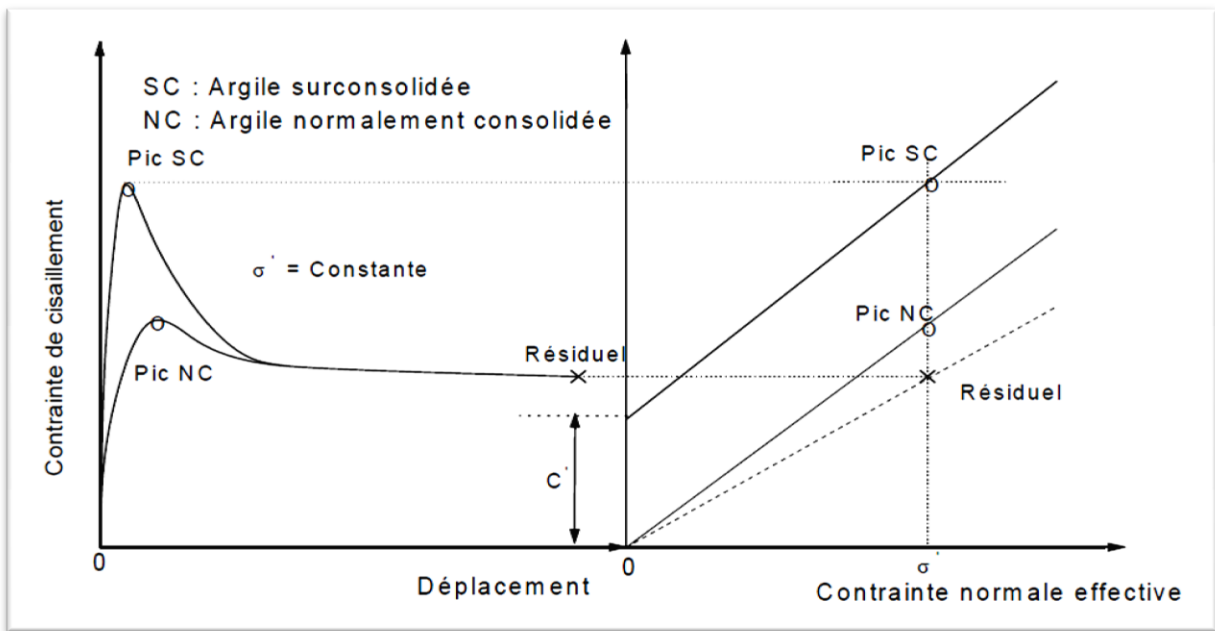


Figure 2.1 Courbes typiques contrainte de cisaillement – déformation et enveloppes de rupture résiduelle et de pic. [1]

2.3 Mécanisme de rupture résiduelle

Plusieurs chercheurs ont essayé de comprendre et d'étudier les mécanismes régissant la résistance résiduelle des sols cohérents en utilisant une multitude de techniques expérimentales.

D'après Skempton (1964), le comportement post pic des sols surconsolidés est dû à une augmentation de la teneur en eau ainsi qu'au développement de minces bandes au domaines dans lesquels les particules plates sont orientées le long d'une surface de cisaillement qui a une épaisseur d'environ 20 μm . Associés à cette dernière, il y avait plusieurs domaines secondaires au sein d'une matrice argileuse, pas nécessairement parallèle à la surface de cisaillement et pouvant atteindre une épaisseur de 25,4 mm. Au delà de cette zone, il n'y avait pratiquement aucune orientation des particules. Et que l'orientation complète des particules argileuses ne peut avoir lieu dans les échantillons contenant des grains de quartz. C'est la raison pour laquelle la résistance résiduelle des argiles limoneuses est plus grande que celle contenant une grande quantité de minéraux d'argile.

Pour Skempton & Petley (1967), les surfaces de glissements polies (striations) sont dues à l'orientation des particules et que ces caractéristiques indiquent que l'état résiduel est atteint.

Morgestern & Tchalenko (1967), en étudiant la microstructure de zones de cisaillement d'argiles cisailées au laboratoire, ont pu montrer qu'une intense orientation de particules a lieu, surtout pour les échantillons prélevés de glissements naturels. Deux types de structures induites ont été observés, une famille de plans de cisaillement continus dans la direction de cisaillement et des plans inclinés par rapport aux plans continus.

Le fait qu'une augmentation de la quantité de limon ou de sable est susceptible d'entraîner une diminution de la valeur de l'indice de plasticité d'après Kanji & Wolle (1977). De ce fait, l'interférence des particules granulaires au cisaillement résiduel est plus grande.

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

Lupini et al. (1981) ont conduit des essais de cisaillement annulaires sur des argiles mélangées artificiellement. Ils ont proposé trois modes de comportement résiduel illustrés dans la figure 2.2 :

- ✓ **Le mode turbulent** c'est-à-dire en même temps le roulement et la translation a lieu dans les argiles contenant une forte proportion de particules rondes, ainsi que dans les argiles ayant un important coefficient de frottement inter-particules. Les particules de dimensions importantes contrôleraient également l'arrangement final des particules du sol. Ce mode est caractérisé par des angles de frottement interne résiduels importants.
- ✓ **Le mode glissant** se produit dans les argiles pour lesquelles la teneur en particules plates de faible frottement, c'est-à-dire dont les caractéristiques d'interaction sont faibles, est importante. Dans les argiles montrant un tel mode de comportement, une

surface bien définie de particules argileuses fortement orientées se développe. Par conséquent les angles de frottement interne résiduel sont relativement faibles.

- ✓ **Le mode transitoire** fait l'objet de deux types de comportements de cisaillement résiduel précédents et de produit lorsque les proportions de particules plates et rondes sont du même ordre. Des surfaces de cisaillement orientées et discontinues ainsi que des poches de sols sans orientation particulières contenus dans une épaisse zone de cisaillement caractérisent ce mode.

Skempton (1985) a renforcé le point de vue de Lupini et al (1981), concernant la dépendance du mécanisme de résistance résiduelle sur la proportion relative des particules plates et rondes et l'existence des trois modes de comportement de résistance au cisaillement résiduelle.

Fraction argileuses > 50 % de particules plates : l'effet de l'orientation des particules est très important et la résistance résiduelle est contrôlée alors essentiellement par le glissement des minéraux d'argiles.

Fraction argileuses < 20 % à 25 % : la mobilisation de la résistance résiduelle est due presque entièrement à la dilatance dans le cas des sols surconsolidés. Elle est dans ce cas légèrement inférieure à la valeur de pic.

50 % > Fraction argileuses > 25 % : le sol montre un mode de cisaillement transitoire qui dépend du pourcentage de particules d'argiles et de leur nature.

Dans une note technique, Mesri et Cepeda-Diaz (1986) fournissent un complément à l'étude de Skempton (1985). Ils réalisent des essais de cisaillement direct avec allers-retours sur des échantillons d'argile reconstitués dans lequel le plan de cisaillement a été prédécoupé. Au cours de l'interprétation de leurs résultats, ils expliquent que l'orientation des particules d'argiles le long de la surface de cisaillement provoque la chute de la résistance de la valeur au pic à la valeur résiduelle. Ils ont indiqué aussi que le concept de la résistance résiduelle a un sens uniquement pour les sols contenant des particules ayant une forme plate. La diminution de la résistance est due en premier lieu au fait que la pression de contact entre particules pour l'interaction face-face est plus petite que l'interaction côté-face qui correspond à un arrangement aléatoire.

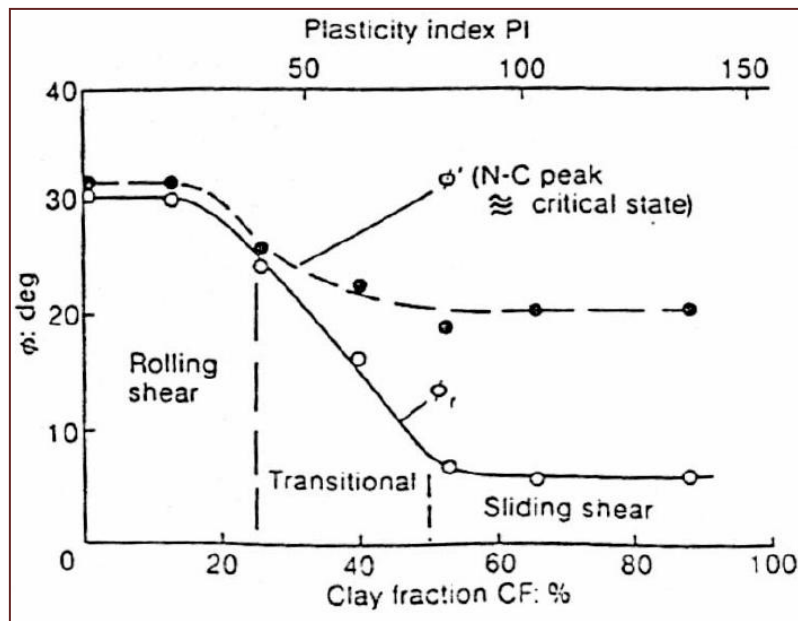


Figure 2.2 Essais de cisaillement annulaires sur des mélanges sable – bentonite (d’après Lupini et al, 1981)

2.4 Mesure de la résistance au cisaillement résiduelle.

Il y a plusieurs méthodes pour mesurer la résistance au cisaillement résiduelle des sols cohérents. Elles peuvent être classées en deux catégories :

- essais impliquant des échantillons contenant des surfaces de cisaillement naturelles, comme l’essai de cisaillement direct et l’essai triaxial drainé;
- essais sur des échantillons avec des surfaces de cisaillement prédécoupées, comme l’essai de cisaillement alterné et l’essai de cisaillement annulaire.

Il est maintenant établi que l’appareil de cisaillement annulaire fournit le meilleur moyen d’étudier la résistance au cisaillement des sols en grands déplacements. Cette machine a été conçue pour surmonter certains problèmes rencontrés avec la boîte de cisaillement alterné dont le principal inconvénient est la variation de la surface au cours du cisaillement, ce qui entraîne une distribution des contraintes de cisaillement qui n’est pas uniforme. De plus, le changement du sens de cisaillement à chaque alternance provoque un réarrangement des particules le long de la surface de cisaillement provoquant ainsi un pic secondaire à chaque alternance. Le principe de cet essai alterné est illustré dans la figure 2.3

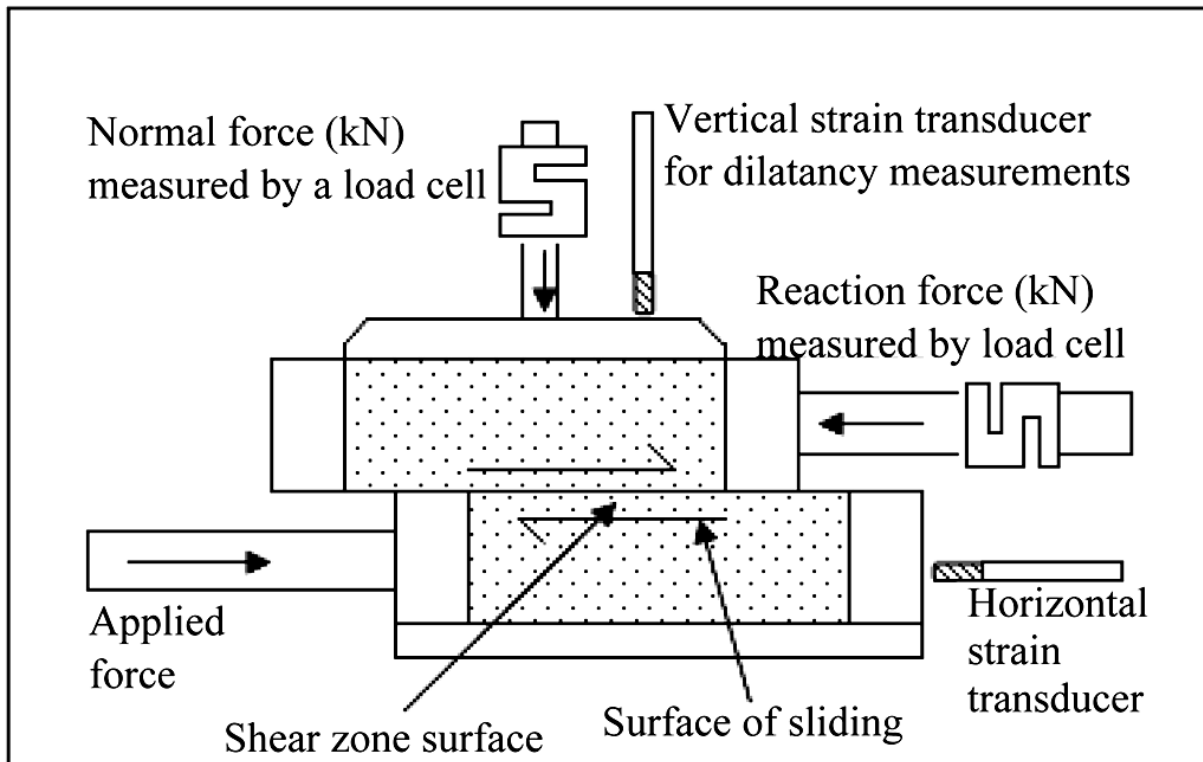


Figure 2.3 Principe de l'essai de cisaillement alterné

Le premier appareil de cisaillement rotatif a été développé par l'American Society of Civil Engineering (A.S.C.E., 1917; d'après Hvorslev, 1939). Il s'agit d'un échantillon confiné dans un contenant cylindrique sur lequel est appliquée une charge verticale et sous lequel tourne un disque nervuré au diamètre inférieur à celui de l'échantillon. De façon similaire, d'autres auteurs ont mis au point des appareils employant des échantillons ayant une section transversale en forme de disque (Streck, 1928; Franzius et al., 1929; Langer, 1938; d'après Hvorslev, 1939). Cette configuration entraîne un problème important. Pour l'ensemble de ces appareils, la distribution des contraintes ainsi que les changements de volume lors du déroulement de l'essai ne sont pas uniformes. Selon Hvorslev (1939), les contraintes de cisaillement et les changements de volume croissent radialement, partant d'une valeur nulle au centre de l'échantillon et allant jusqu'à une valeur maximale aux abords de celui-ci.

Afin de pallier à cet inconvénient, d'autres auteurs ont employé des échantillons ayant une section transversale en forme d'anneau (Gruner et Haefeli, 1934; Cooling et Smith, 1936; Hvorslev, 1936-1937-1939; Tiedemann, 1937; Haefeli, 1938; d'après Hvorslev, 1939). En considérant la distribution des contraintes de cisaillement et des changements de volume proposée par Hvorslev (1939), l'écart de la valeur d'un paramètre entre un point situé sur le

diamètre intérieur d'un anneau et un autre situé sur son diamètre extérieur est moindre que celle observée entre le centre d'un disque dans lequel l'anneau s'inscrit et le même diamètre extérieur. De cette façon, l'utilisation d'un échantillon de forme annulaire a pour effet de diminuer la variabilité du paramètre. Elle permet donc de diminuer les effets de la non-uniformité des contraintes de cisaillement appliquées sur la section transversale de l'échantillon et des changements de volumes qui s'y opèrent.

Indépendamment de la section transversale de l'échantillon utilisé, certains appareils conçus à cette époque partagent un autre problème reconnu à son tour par Hvorslev (1939). En effet, les conceptions employant une paire d'anneaux solides pour confiner l'échantillon (A.S.C.E., 1917; Streck, 1928; Franzius et al, 1929; Cooling et Smith, 1936; Hvorslev, 1936; d'après Hvorslev, 1939) engendrent tous un plan de rupture situé à proximité de l'interface entre le sol et la surface en rotation. À cet endroit, les dentelures mises en place pour entraîner le sol peuvent remanier localement l'échantillon. La résistance résiduelle mesurée y est dans ce cas potentiellement sous-estimée. C'est pourquoi sont introduits les paires d'anneaux divisés (Gruner et Haefeli, 1934; Hvorslev, 1937-1939; Tiedemann, 1937; Haefeli, 1938; Langer, 1938; d'après Hvorslev, 1939). En séparant en deux les anneaux intérieurs et extérieurs, la rupture est forcée de se produire au centre de l'échantillon, loin de la zone où le sol est potentiellement remanié par les dentelures de la surface en rotation. Le schéma présenté à la figure 2.4 illustre ces deux façons de confiner l'échantillon.

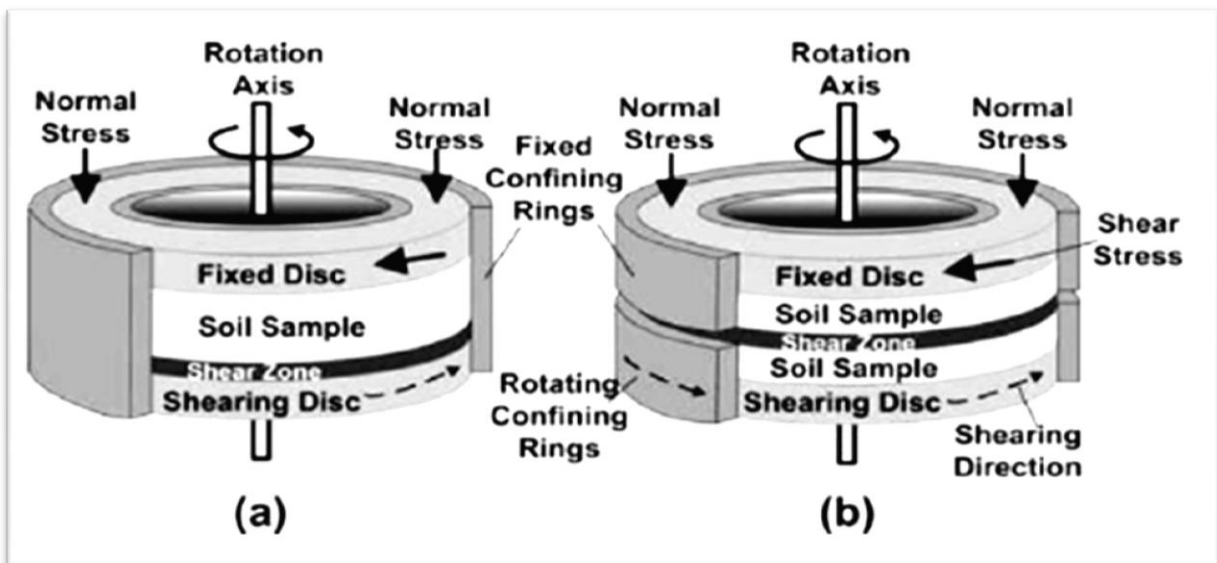
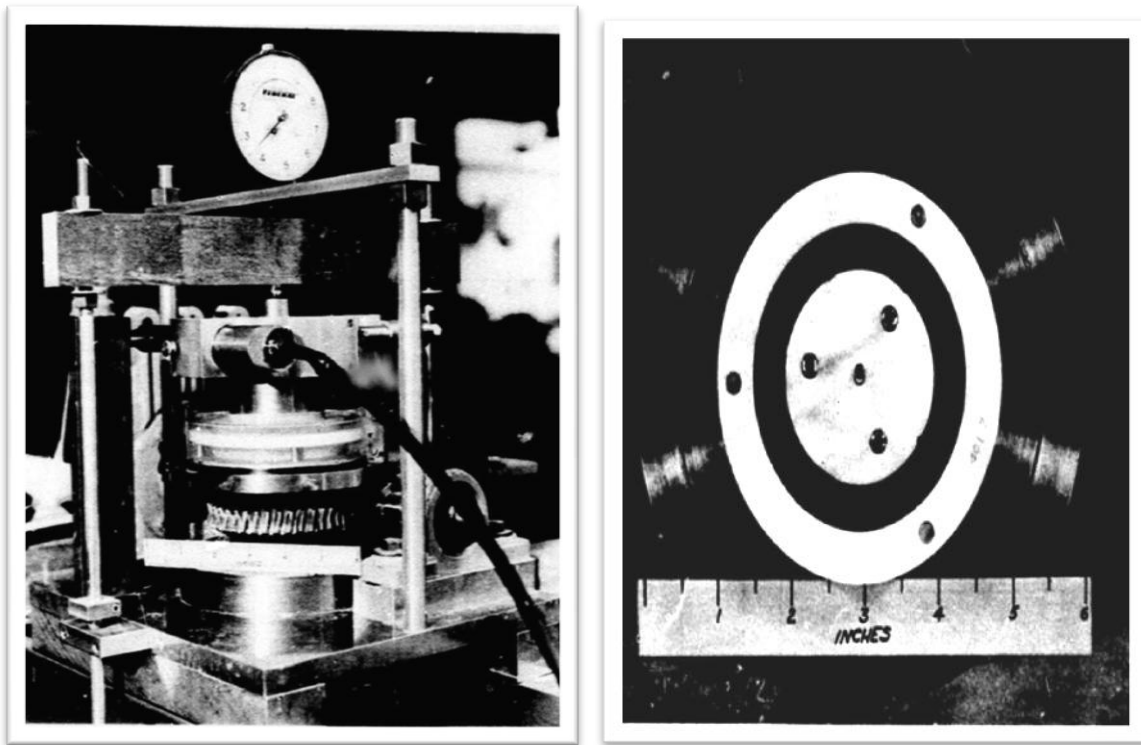


Figure 2.4 Schémas de la boîte de cisaillement à anneaux solides (a) et de la boîte de cisaillement à anneaux séparés (b) (Sadrekarimi et Olson, 2009).

Au début des années 1970, LaGatta observe que le plateau qui définit la résistance au cisaillement résiduelle n'est pas atteint la plupart du temps. Il met donc au point, en collaboration avec l'université Harvard, un appareil de cisaillement rotatif pour mener à bout ses recherches. Cet appareil sera désigné comme étant l'appareil Harvard. Une photo de cet appareil et son conteneur d'échantillon sont présentés à la figure 2.5



(a)

(b)

Figure 2.5 (a) Photo de l'appareil de LaGatta 1970 (b) conteneur d'échantillon de l'appareil de LaGatta.

Le dispositif à déformation contrôlée (strain-controlled) qu'il conçoit permet de tester des échantillons au diamètre extérieur de 7,11 cm à la fois de forme circulaire ou annulaire avec un diamètre intérieur de 5,08 cm et une épaisseur qui varie entre 0,1 cm et 2,5 cm. LaGatta pouvait investiguer les sources d'erreurs dans la mesure de la résistance au cisaillement résiduelle grâce à son appareil.

Près d'une année plus tard, Bishop et son équipe de chercheurs provenant de l'Imperial College et du Norwegian Geotechnical Institute développent un appareil de cisaillement annulaire encore utilisé fréquemment aujourd'hui pour déterminer la résistance

au cisaillement résiduelle drainée des argiles. Une photo de cet appareil est présentée à la figure 2.6. Il s'agit d'un appareil à déformation contrôlée (strain-controlled).

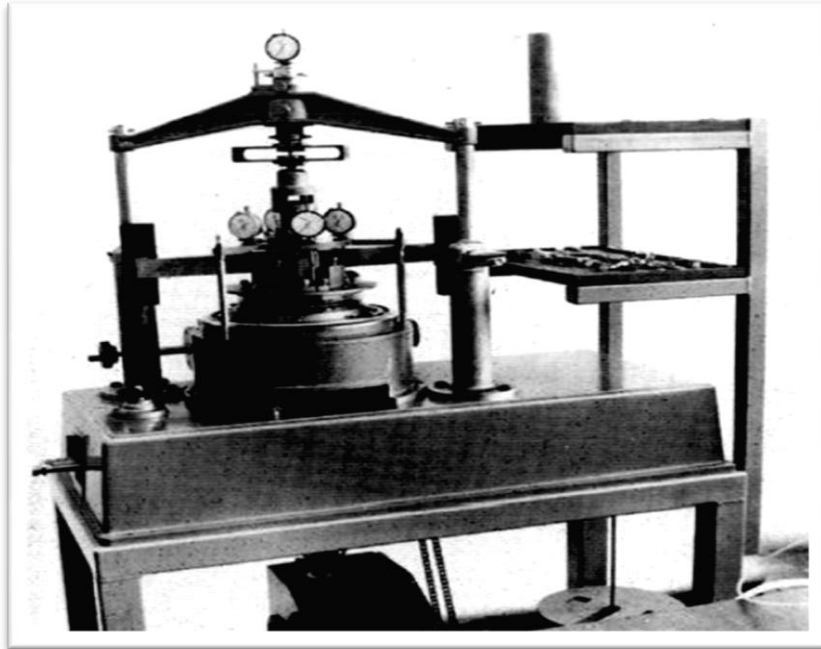


Figure 2.6 Appareil de cisaillement annulaire de Bishop

En 1979, Bromhead met sur le marché ce qui deviendra l'appareil de cisaillement annulaire à l'utilisation commerciale la plus répandue. Une description plus détaillée de cet appareil sera réalisée dans le chapitre trois qui suit.

Visant aussi à mettre au point un appareil de cisaillement annulaire plus pratique que ceux déjà disponibles, Bosdet (1980) développe pour le compte de " University of British Columbia" un nouveau dispositif. Une photo de cet appareil est présentée à la figure 2.7

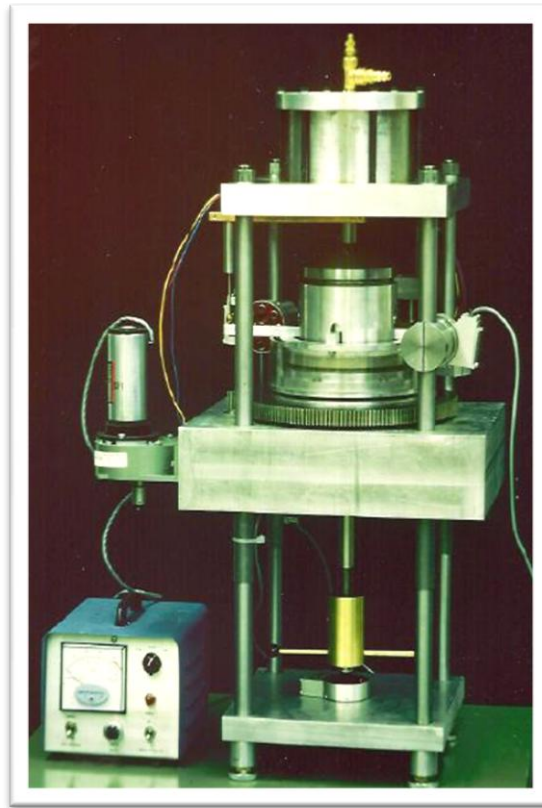


Figure 2.7 Photo de l'appareil UBC

Les appareils décrits jusqu'à maintenant permettent de réaliser des essais de cisaillement annulaire dans des conditions drainées. Or, l'étude de certains phénomènes, comme celui de la stabilité sismique des talus argileux ou encore celui de la rupture progressive, nécessite la détermination des valeurs de résistances au pic et résiduelle non-drainées. Stark et Contreras (1996), de la University of Illinois, modifient l'appareil Bromhead pour mettre au point un appareil de cisaillement annulaire à volume constant.

L'appareil ULaval est un appareil de cisaillement annulaire plus récent (2018) dont la boîte de cisaillement est séparée en son centre, ce qui permet d'imposer le plan de cisaillement au centre de l'échantillon.

En conclusion, l'évolution de l'appareil de cisaillement annulaire nous a permis d'améliorer à chaque fois les caractéristiques de ceci à fin de prédire un comportement exact de l'échantillon à étudier. Le tableau 2.1 présente une comparaison entre les différents appareils de cisaillement annulaire de sa première apparition jusqu'à nos jours.

Tableau 2.1 Un tableau comparatif des appareils de cisaillement annulaires décrits ci-dessus.

Caractéristique	Harvard (LaGatta, 1970)	NGI (Bishop et al., 1971)	Bromhead (Bromhead, 1979)	UBC (Bosdet, 1980)	Illinois (Strak et Contreras, 1996)	Ulaval (2018)
<i>Type d'essai</i>	Déformations contrôlées	Déformations contrôlées	Déformations contrôlées	Déformations contrôlées	Déformations contrôlées	Déformations contrôlées
<i>Condition d'essai</i>	Drainé	Drainé	Drainé	Drainé	Volume constant	Volume constant
<i>Position du plan</i>	Centre ou haut	Centre	Haut	Centre	Haut	Centre
<i>Configuration des anneaux</i>	Séparés ou solides	Séparés	Solides	Séparés	Solides	Séparés
<i>Interface sol/pierre poreuse</i>	n.d	Ailettes	Texturée	Texturée	Dents de scie	Ailettes
<i>Capteurs de pression interstitielle</i>	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
<i>Principe de découpe</i>	Dispositif indépendant	Anneaux	Dispositif indépendant	Anneaux	Anneaux	Anneaux
<i>Epaisseur de l'échantillon</i>	1 à 25 mm	19,05 mm	5 mm	19,05 mm	10 mm	20 mm
<i>Diamètre inférieur de l'échantillon</i>	50, 8 mm	44,45 mm	70 mm	44,45 mm	70 mm	70 mm
<i>Diamètre extérieur de l'échantillon</i>	71,1 mm	69,85 mm	100 mm	69,85 mm	100 mm	100 mm

2.5 Améliorations apportées à l'appareillage de mesure et à la procédure de test

Le principal inconvénient que voient plusieurs chercheurs dans la mesure de la résistance résiduelle à l'aide de l'appareil de cisaillement annulaire, est le frottement mural, aussi appelé « *wall friction* » ou « *side friction* ». Ce phénomène, illustré à la figure 2.8 se

produit lorsque la pierre poreuse supérieure s'introduit dans le contenant de l'échantillon. Il se définit comme étant le frottement qui existe entre les parois du contenant de l'échantillon et celles de la pierre poreuse. Plus la pierre poreuse s'enfonce dans le contenant de l'échantillon, plus la magnitude du frottement mural est importante. Ce frottement contribue à faire augmenter la résistance au cisaillement apparente du sol testé. Le frottement mural a aussi pour effet de diminuer la contrainte verticale appliquée sur l'échantillon (LaGatta, 1970; Bishop et al., 1971). Afin de résoudre ce problème Meehan et al. (2007) ont apporté un certains nombres de modifications à l'appareillage et à la procédure de l'essai.

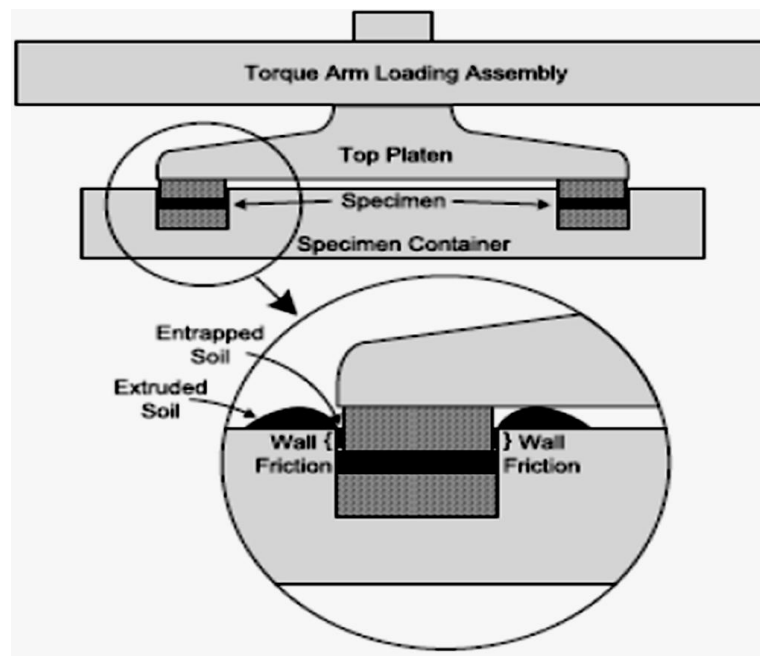


Figure 2.8 illustrant le frottement mural causé par l'extrusion de sol dans un appareil de type Bromhead (Meehan et al, 2007)

2.5.1 A l'appareillage de mesure

Ils ont proposé des modifications à la pierre poreuse supérieure. Ils font tailler sur le pourtour de celle-ci un biseau à 45°, ce qui a pour effet de réduire la surface en contact avec les parois du contenant de l'échantillon. La figure 2.9 présente une photo permettant de comparer la pierre poreuse originale à celle ayant été modifiée. De ce fait, la magnitude du frottement mural est réduite à un seuil où ses effets sur la mesure de la résistance au cisaillement et sur la contrainte verticale appliquée sont négligeables

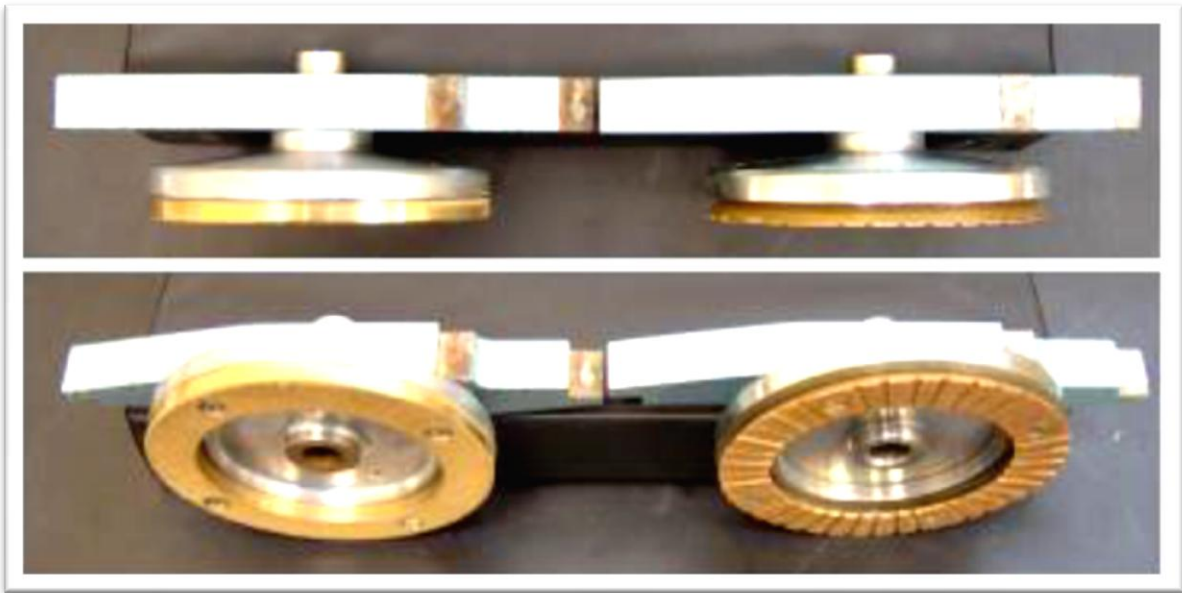


Figure 2.9 Photos de la pierre poreuse originale (à gauche) et de la pierre poreuse modifiée (à droite) (Meehan et al., 2007)

2.5.2 A la méthodologie

Bien qu'on ne peut pas éliminer les sources d'intrusion complètement, Meehan et al. (2007) ont apporté un certains nombres de modifications à la procédure de test à fin de réduire la profondeur générale d'intrusion du plateau supérieure dans le conteneur de l'échantillon. Ces modifications sont les suivantes :

- On doit préconsolider les spécimens dans un consolidomètre à un effort normal de 345 (kPa) avant l'emplacement dans le conteneur d'échantillon. Cette étape permet d'avoir une teneur en eau plus faible de l'échantillon pour but de réduire la quantité é de consolidation de ce dernier.
- Les spécimens ne sont pas prédécoupés. Bien que, l'extrusion du sol et l'intrusion du plateau supérieur se résultent de la surface de rupture créée dans un cisaillement lent, sa magnitude est significativement inférieure à celle observé lors d'un cisaillement plus rapide.
- Chaque essai est réalisé en une seule étape «single stage». En testant un nouvel échantillon à chaque contrainte normale, il était possible d'éviter l'effet de l'extrusion du sol et l'intrusion du plateau supérieur accumulé, qui se produit à la seconde et troisième contrainte normale dans les essais à plusieurs étapes «multistage».

2.6 Facteurs affectant la résistance résiduelle

Il existe plusieurs facteurs qui peuvent influencer sur la résistance résiduelle des sols cohérents :

2.6.1 Influence de la procédure de préparation des échantillons et de la structure initiale

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

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

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

LaGatta (1970) a montré que la procédure de préparation de l'échantillon ne semble pas avoir un effet sur la résistance résiduelle de l'argile de Londres, la schiste de Pepper et le schiste de Cucurasha mis à l'essai dans un appareil de cisaillement rotationnel en utilisant soit un échantillon annulaire soit un échantillon sous forme de disque. Cependant, la résistance résiduelle d'échantillons de schistes argileux surconsolidés est légèrement supérieure à celle obtenue lorsqu'ils sont normalement consolidés.

Bishop et al. (1971) ont démontré que des valeurs presque identiques de la résistance résiduelle ont été déterminées sur des échantillons remaniés et intact en utilisant l'appareil de cisaillement développé conjointement par l'Imperial Collège et le Norwegian Geotechnical Institute. Ils ont démontré également, à la suite d'essais de cisaillement annulaire réalisés sur des argiles de Weald et Londres que φ_r' est indépendante de son historique de consolidation.

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

Townsend & Gilbert (1973, 1974, 1976) ont conclu à la suite d'essais de cisaillement annulaires sur des échantillons intacts, remaniés et prédécoupés que l'angle de frottement interne résiduel est indépendant de la méthode de préparation des échantillons et de la densité. Concernant l'historique des contraintes et l'ordre d'application des charges, d'après les recherches effectuées, il semblerait que l'angle de frottement interne n'est généralement pas affecté par ces deux facteurs, également. Selon ces deux auteurs, l'ordre d'application des contraintes normales n'a pas d'effet significatif sur les valeurs des résistances résiduelles obtenues à partir d'essais de cisaillement directs. Une conclusion similaire a été avancée également par Petley (1966) et Garga (1970).

2.6.2 Influence de l'amplitude des contraintes normales

Plusieurs auteurs ont confirmé d'après leurs expérimentations que l'angle de frottement interne résiduel dépend généralement de l'amplitude des contraintes normales et de ce fait l'enveloppe de résistance résiduelle obtenue est courbée. Cependant le degré de dépendance de ϕ'_r par rapport à la contrainte normale varie en fonction du type de matériau. Kenney (1965, 1967) a rapporté à ce sujet que les résultats d'essais de cisaillement alterné indiquent que ϕ'_r pour le schiste de Bearpaw varie légèrement avec la contrainte normale alors que des essais similaires sur le schiste de Pepper montrent une dépendance plus marquée de ϕ'_r par rapport à σ'_n . Il a suggéré en outre que les sols contenant une grande proportion de montmorillonite ont des valeurs de ϕ'_r qui varient en fonction de σ'_n , par contre les sols composés de lourds minéraux non argileux ont un comportement différent.

Skempton & Petley (1967) ont indiqué que les valeurs de ϕ'_r tendent à se stabiliser pour des contraintes normales supérieures à 200kN/m^2 pour les argiles d'Atterfield, Weald et Londres. Bishop et al. (1971) ont étudié l'influence de la contrainte normale sur l'angle de frottement interne résiduel des argiles de Londres bleue et brune et l'argile de Weald ainsi que des schistes argileuses d'Amérique du nord en utilisant un appareil de cisaillement annulaire. Pour l'argile de Londres bleue, ils ont trouvé qu'elle est relativement indépendante de l'amplitude des contraintes. D'autre part, l'argile de Londres brune, l'argile de Weald et les schistes argileux présentaient des enveloppes de rupture résiduelle courbées. Pour les schistes argileuses, Townsend & Gilbert (1976) sont arrivés à la conclusion que ϕ'_r ne dépend pas du niveau de contrainte normale pour $\sigma'_n > 150\text{ kN/m}^2$. Cependant un sable limoneux de mica du Brésil a montré une légère dépendance pour des contraintes normales basses. Ils ont attribué la diminution de ϕ'_r avec une augmentation de la contrainte normale à l'augmentation possible

du degré d'orientation des particules argileuses. Cette hypothèse a été confirmée par Cotecchia & Federico (1980) qui ont déduit à partir d'une étude microscopique que l'orientation des particules des surfaces de cisaillement qui se sont formées à la suite d'essais de cisaillement alterné sur une argile plastique, est plus importante quand les sols sont soumis à des cisaillement sous de hautes contraintes normales.

Privett (1980) a mis en évidence que φ'_r est susceptible de varier de 9° en augmentant la contrainte effective de 27kN/m^2 à 615kN/m^2 .

Lupini (1980) a rapporté des résultats d'essais de cisaillement annulaires effectués sur une large gamme de sols naturels. Ces résultats ont montré une diminution du coefficient de frottement, τ/σ'_n , qui est plus prononcée pour les contraintes effectives normales basses. D'après Lawrence (1984), le degré de courbure de l'enveloppe de rupture résiduelle pour de faibles contraintes normales (jusqu'à 150kN/m^2) dépend des propriétés intrinsèques des constituants du sol considéré. De plus la courbure est plus prononcée lorsque σ'_n tend vers zéro.

Des essais de cisaillement annulaire rapportés par Hawkins et Privett (1985) ont permis à ces auteurs de conclure également que l'angle de frottement interne résiduel est dépendant du niveau de contrainte. Comme indiqué sur la figure 2.10, l'augmentation de l'amplitude des contraintes a pour effet de stabiliser le sol vis à vis du coefficient de frottement résiduel dans le sens où ce dernier diminue progressivement puis tend à se stabiliser pour des valeurs de σ'_n de plus en plus importantes. La valeur constante atteinte est appelée " la plus basse résistance résiduelle ". Une fois cette valeur obtenue l'enveloppe de rupture obtenue est dite " complète ".

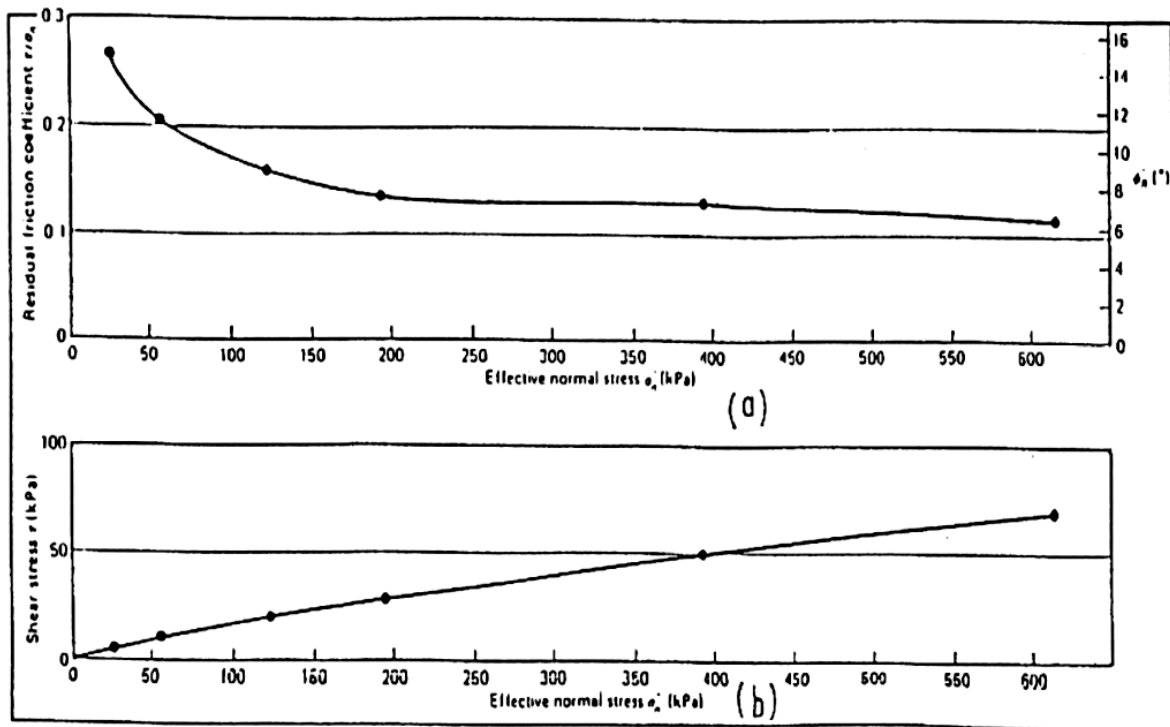


Figure 2.10 a) Variation du coefficient de frottement résiduel en fonction de la contrainte normale effective ; (b) Enveloppe de rupture résiduelle (d'après Hawkins & Privett)

2.6.3 Influence de la vitesse de cisaillement

Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de la vitesse de cisaillement sur la résistance au cisaillement résiduelle depuis 1966 comme Petley et Garga (1970) qui ont montré que cette dernière augmente de 4% lorsque la vitesse de cisaillement varie dans un domaine allant de $4 \cdot 10^{-5}$ mm/mn ou elle augmentait de $2,5 \cdot 10^{-5}$ à $2,5 \cdot 10^{-1}$ mm/mn dans l'appareil IC/NGI. En revanche, un nombre de chercheurs comme LaGatta (1970), Ramiah et al (1970) et Blondeau & Pilot (1971) ont démontré que la vitesse de cisaillement ne semble pas avoir d'effet sur la résistance résiduelle.

Lemos et al (1985) ont montré, à la suite d'essais de cisaillement annulaire, que si une surface de cisaillement est formée par cisaillement lent drainé, un cisaillement rapide supplémentaire entraîne le comportement typique suivant (Figure 2.11) :

(a) Il y a un seuil initial de résistance immédiate mobilisée sur la surface de cisaillement à un déplacement pratiquement négligeable. Le seuil de résistance qui est largement plus grand que la résistance résiduelle lente dépend de la vitesse de cisaillement. Cette augmentation de résistance peut être due à la pression interstitielle négative passagère, générée par la tendance du sol à se dilater.

(b) Il y a souvent une augmentation supplémentaire de la résistance sur la surface de cisaillement jusqu'à une valeur maximale, la résistance au pic rapide qui dépend aussi de la vitesse de cisaillement. Cette augmentation de la résistance est associée à une dilatation du sol dans la zone de cisaillement et le changement de la structure de la zone de cisaillement formée à l'état résiduel lent.

(c) La résistance est alors susceptible de descendre à une valeur minimale avec des déplacements supplémentaires, la résistance minimale rapide: cette dernière peut être égale (effet neutre de la vitesse), supérieure (effet positif de la vitesse) ou inférieure (effet négatif de la vitesse) à la résistance au cisaillement lente.

(d) Si, après le cisaillement rapide d'un sol qui montre un mode de cisaillement glissant ou transitoire, la surface de cisaillement est testée lentement, une résistance de pic initiale lente plus grande que la résistance résiduelle drainée lente est mesurée, indiquant que le cisaillement rapide entraîne des désordres dans la surface de cisaillement. La figure 2.11 montre l'effet de la vitesse rapide sur la résistance résiduelle (d'après Lemos et al, 1985)

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

- un effet positif pour les sols présentant une résistance résiduelle rapide supérieure à la résistance résiduelle lente ;
- un effet neutre pour les sols ayant une résistance résiduelle rapide constante et égale à la résistance résiduelle lente, et ce indépendamment de la vitesse de cisaillement ;
- un effet négatif pour les sols présentant une chute importante de la résistance résiduelle rapide qui devient inférieure à la résistance résiduelle lente pour des vitesses de cisaillement supérieures à une valeur critique.

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

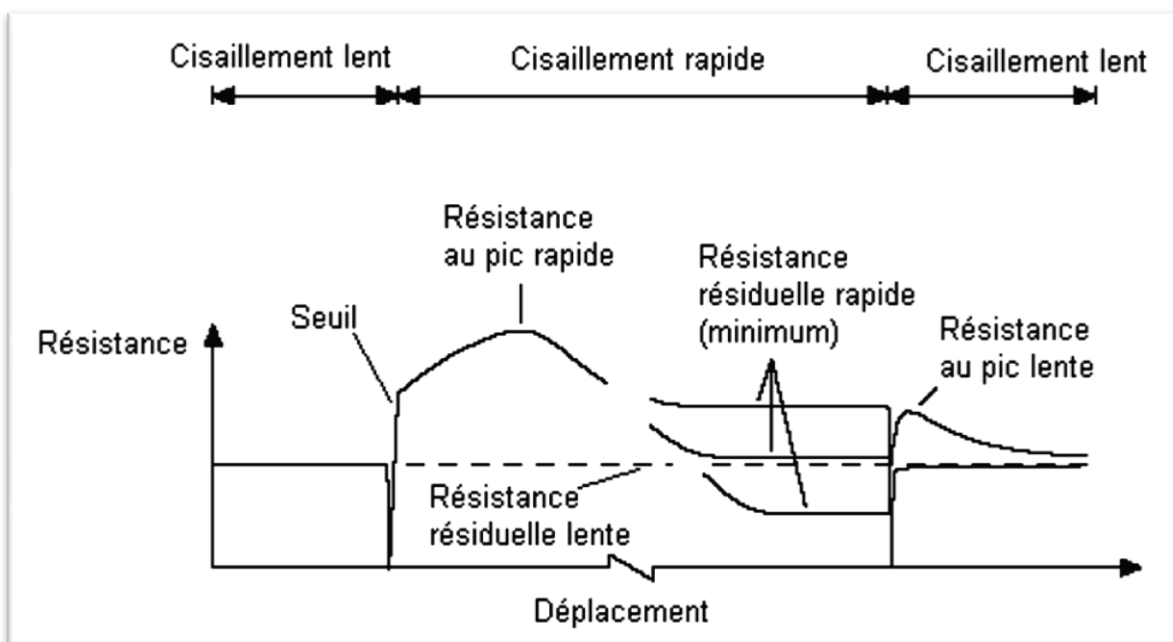


Figure 2.11 Effet de la vitesse rapide sur la résistance résiduelle (d'après Lemos et al, 1985)

2.6.4 Influence du type d'appareil d'essai

Les études de plusieurs chercheurs ont permis de conclure que la résistance résiduelle est affectée par le type d'appareillage et la procédure expérimentale utilisée.

L'appareil triaxial a des limitations pour l'étude des résistances au cisaillement des sols cohérents dans le domaine des grands déplacements (Hemann & Wolfskill, 1966 ; La Gatta, 1970 ; Bishop et al, 1970 ; Blondeau & Josseume, 1976 ; etc).

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

Ainsi, Hermann & Wolfskill (1966) ont étudié l'effet de l'appareillage en soumettant des échantillons à des essais de cisaillement annulaire, alterné et triaxial; ces derniers essais

avec et sans pré-découpage des échantillons. Les résultats obtenus ont permis de montrer que les essais triaxiaux donnaient les plus grandes valeurs alors que pour les deux autres essais les valeurs mesurées étaient comparables.

Selon Bishop et al, (1971), les valeurs de l'angle de frottement interne résiduel pour des échantillons intacts de l'argile de Londres obtenus au moyen de l'appareil IC/NGI étaient de 13% à 58% inférieures à ceux données par l'essai de cisaillement alterné. Ce résultat est attribué à la perturbation de l'orientation des particules sur la surface de glissement et le changement dans la direction des contraintes principales dans l'essai de cisaillement alterné. Ceci est dû au changement du sens de cisaillement à chaque alternance, de ce fait empêchant la résistance résiduelle d'être complètement mobilisée. Dans le cas du schiste de Cucarasha, les valeurs de φ'_r données par les deux appareils étaient pratiquement identiques. Townsend & Gilbert (1973, 1974, 1976) ont présenté des essais comparatifs annulaires, alternés et rotationnels sur différents schistes argileuses. Ils ont mis en évidence le fait que pour les échantillons avec des plans prédécoupés, les essais de cisaillement annulaire et alterné donnaient des résultats en bonne conformité.

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

Hutchinson et al. (1980) ont trouvé que les valeurs de φ'_r données par l'essai de cisaillement alterné étaient jusqu'à 7° supérieures à ceux mesurées au moyen de l'appareil de cisaillement annulaire pour des échantillons soumis à de faibles contraintes normales effectives. Dans le but d'étudier l'effet de l'équipement d'essai sur la résistance résiduelle, Hawkins & Privett (1985) ont mis à l'essai des échantillons remaniés dans des boîtes de cisaillement alternées de 60 mm et 100 mm de côté et dans l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 2.12.

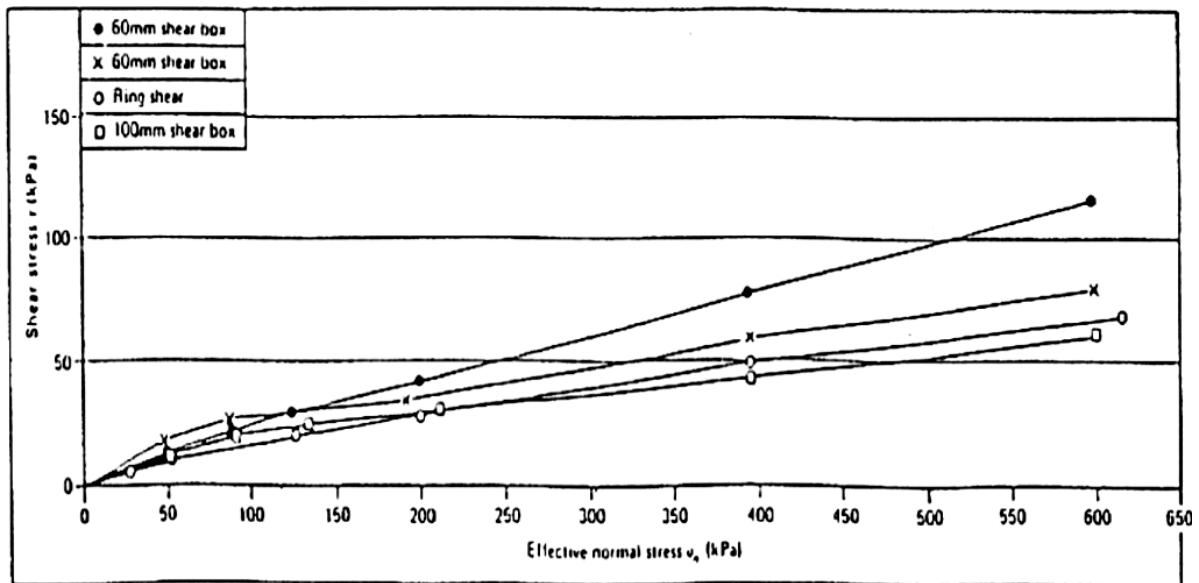


Figure 2.12 Enveloppes de rupture résiduelle déterminées à partir de boîtes de cisaillement de 60 et 100 mm et l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead (d'après Hawkins & Privett, 1985)

Comme on peut le noter, il y a une bonne corrélation entre les valeurs de ϕ'_r obtenues dans les deux machines pour différents niveaux de contraintes normales. Dans le cas de la boîte de cisaillement alternée de 60 mm, cependant, les valeurs de ϕ'_r obtenues sont plus grandes. Concernant le facteur temps et la reproductibilité, l'enveloppe de rupture peut être définie dans beaucoup moins de temps dans l'appareil de cisaillement annulaire et les résultats obtenus dans cette machine sont plus reproductibles.

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

2.6.5 La résistance résiduelle en fonction de quelques paramètres géotechniques

La recherche sur la résistance résiduelle ne s'est pas limitée qu'à l'explication du mécanisme derrière sa mobilisation. Elle s'est étendue aussi à l'étude des corrélations qui existent entre la résistance résiduelle et différents paramètres comme la minéralogie, la granulométrie et les limites de consistances des matériaux testés.

2.6.5.1 La minéralogie et la forme des particules

Plusieurs autres chercheurs comme Bjerrum (1967) et Kenny (1967) ont confirmé que la proportion relative des minéraux d'argile par rapport aux minéraux massifs, la forme des particules, la nature et les propriétés de frottement des minéraux constituant le sol sont d'une importance primordiale.

Lorsque les sols avec une quantité significative de particules plates (minces feuillets entourés de films d'eau adsorbée) sont soumis à un cisaillement jusqu'à l'état résiduel, une surface de cisaillement dans laquelle il y'a peu ou pas d'enchevêtrement se forme à cause de la réorientation de ces minéraux dans la direction de cisaillement.

Skempton (1964, 1985), Lupini et al. (1981) et Mesri et Cepeda-Diaz (1986), Suzuki et al. (2005) observent que la résistance résiduelle diminue bel et bien suite à une diminution de la quantité de particules de taille argileuse. Or, ils stipulent que la corrélation entre la quantité de particules de taille argileuse et la résistance résiduelle proposée est bonne seulement lorsque la minéralogie du sol comprend de la smectite, un des minéraux argileux dont les particules sont plates.

2.6.5.2 L'indice de plasticité

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

2.6.5.3 Fraction argileuse

Il existe une différence entre la quantité de particules de minéralogie argileuse, ou « *clay fraction* », et la quantité de particules de taille argileuse, ou « *clay-size fraction* ». Les particules de taille argileuse ne sont pas toutes de minéralogie argileuse. Les particules de minéralogie argileuse, c'est-à-dire les minéraux de la famille des phyllosilicates, comme par exemple l'illite, la kaolinite et la smectite (ou montmorillonite), ont comme particularité d'être plates. Les particules de taille argileuse, mais d'une autre minéralogie, ne le sont pas nécessairement. Comme la résistance résiduelle dépend de l'alignement des particules selon une direction préférentielle dictée par le cisaillement, cette distinction est importante.

Une corrélation entre la résistance résiduelle et la fraction argileuse d'après Skempton (1964), Borowika (1955) et Blondeau & (1976), montré à la figure 2.13

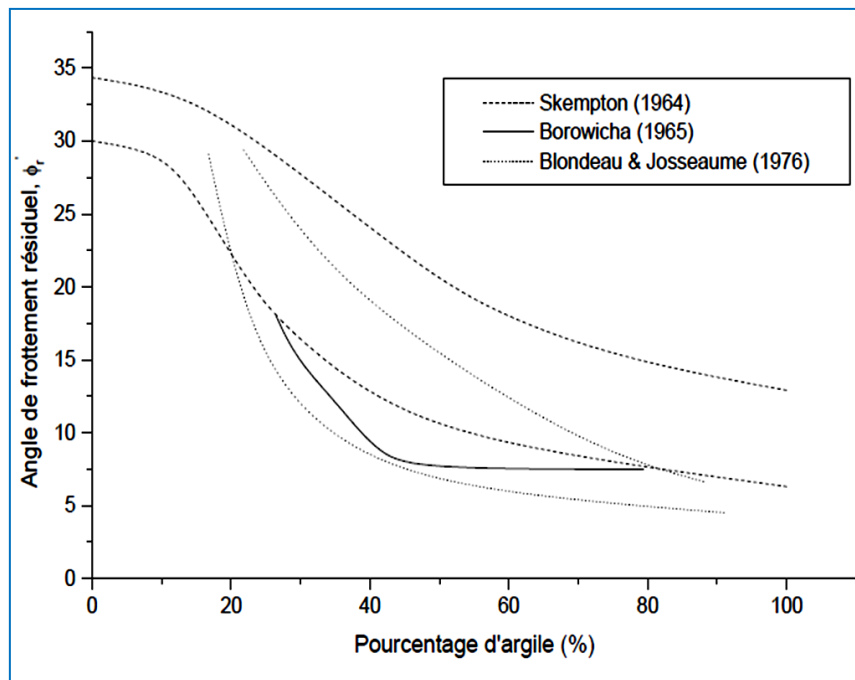


Figure 2.13 Corrélation entre la résistance résiduelle et la fraction argileuse.

2.6.5.4 Limite de plasticité et limite de liquidité

Suziki et al. (2005) montrent aussi que les sols dans lesquels domine la quantité de smectite présentent aussi des corrélations entre la résistance résiduelle et la limite de liquidité, l'indice de plasticité, le ratio de la limite de plasticité sur la limite de liquidité (figure 2.14) ainsi que l'activité. Parmi toutes les propriétés caractéristiques étudiées, c'est le ratio de la limite de plasticité sur la limite de liquidité qui corrèle le mieux avec la résistance résiduelle. D'autres chercheurs ont aussi observé le lien entre l'angle de frottement résiduel et les limites de consistance.

À partir de résultats d'essais de cisaillement direct avec allers-retours et d'essais de cisaillement annulaire, Dewoolkar et Huzjak (2005) publient des corrélations entre l'angle de frottement résiduel et la limite de liquidité et l'indice de plasticité. Ils considèrent ces corrélations valides seulement lorsque les échantillons sont préparés selon la même méthodologie.

En comparant des valeurs de résistance résiduelle drainée obtenues à l'aide d'essai de cisaillement direct avec allers-retours, d'essai triaxial et d'essai de cisaillement annulaire, Bayin et al. (2013) obtiennent eux aussi que la résistance résiduelle diminue lorsque la limite de liquidité et l'indice de plasticité augmente.

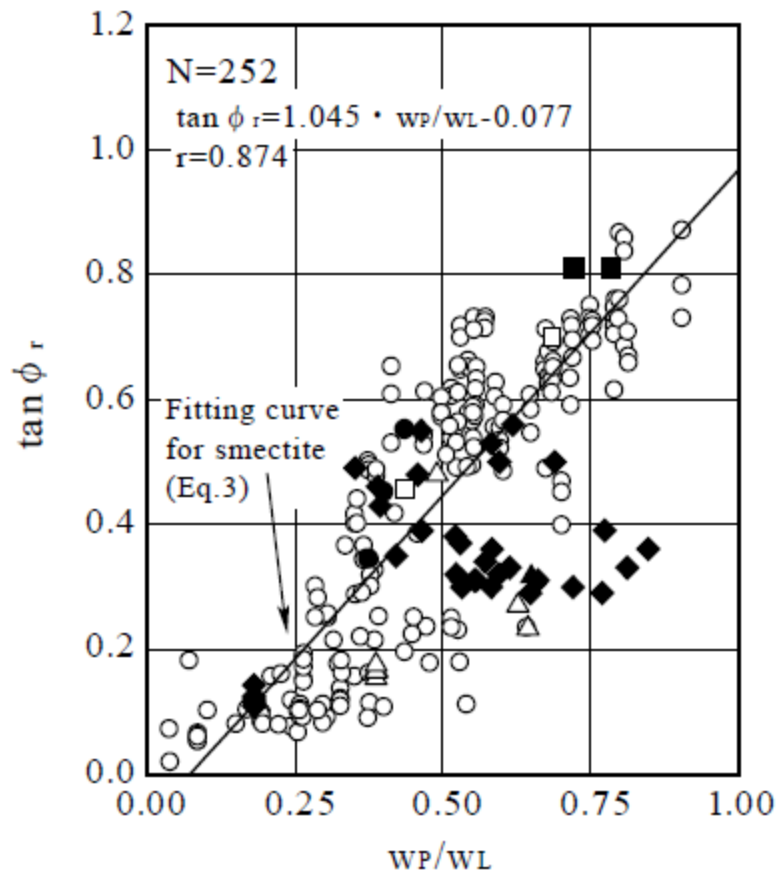


Figure 2.14 Relation entre l'angle de frottement résiduel et le rapport de la limite de plasticité sur la limite de liquidité (Suzuki et al., 2005)

2.7 Applications de la résistance résiduelle

Skempton (1964) suggère que s'il y a déjà eu rupture dans une pente, tout mouvement subséquent sur le même plan de rupture est contrôlé par la résistance résiduelle de l'argile qui la compose. Il appuie cette hypothèse en montrant que les très faibles valeurs de résistance mobilisée lors de certains glissements de terrain, obtenues par des essais de cisaillement direct sur des échantillons prélevés le long de leur surface de rupture, avoisinent les valeurs de résistance résiduelle mesurées à l'aide d'essais de cisaillement direct avec allers-retours sur des échantillons intacts. Ainsi, il démontre l'intérêt de l'étude de la résistance résiduelle pour les problèmes de stabilité de pente. Dans son article de 1985, il présente des cas de glissements de terrain pour lesquels des rétro-analyses ont été effectuées afin de déterminer la résistance au cisaillement mobilisée lors de ces événements.

2.8 Conclusion

Cette étude bibliographique a pour objet de clarifier le concept de la résistance au cisaillement résiduelle. Des travaux de recherche menés sur les appareils de mesure de celle-ci, et sur les différents facteurs qui l'influent, sont depuis les années trente jusqu'au nos jours.

3.1 Introduction

On présente dans ce chapitre les dispositifs expérimentaux utilisés et les matériaux étudiés, aussi les résultats obtenus lors d'essais en Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique de recherche à l'université 8 Mai 1945 Guelma. Ces essais sont conduits à l'aide de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead (figure 3.1) à fin de mesurer la résistance au cisaillement résiduelle.



Figure 3.1 Vue générale de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead.

3.2 Appareil de cisaillement annulaire de Bromhead

Les essais au laboratoire sont réalisés à l'aide de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead.

3.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de base de l'appareil consiste à appliquer une force normale centrée, se traduisant par une contrainte normale sur un anneau. Cet anneau agit sur l'échantillon de sol qui est en suite soumis à une contrainte de cisaillement. L'essai réalisé est à contrainte normale constante. Dans ces conditions, la charge normale appliquée à l'échantillon demeure constante durant le processus de cisaillement.

3.2.2 Description

Bromhead est un appareil à déformation contrôlée (strain-controlled) qui permet de cisailer des échantillons de forme annulaire ayant un diamètre extérieur, un diamètre intérieur et une épaisseur de 100 mm, 70 mm et 5 mm respectivement confinés radialement entre deux anneaux de confinement. Ces derniers étant solides sont montrés à la figure 3.2, le plan de rupture se situe au milieu de l'échantillon (Bromhead, 1979). L'étape de consolidation dépend de la nature du sol et de la longueur du chemin de drainage. De plus, les pressions interstitielles se dissipent rapidement au niveau du plan de rupture puisque celui-ci est situé près du dessus de l'échantillon (Meehan et al, 2006). Le drainage de l'échantillon est assuré à travers deux plateaux de bronze entre lesquels il est comprimé verticalement. La charge verticale est appliquée à l'échantillon par l'intermédiaire d'un bras de levier porteur de poids avec un rapport de 1 à 10. La contrainte verticale maximale pouvant être appliquée est de 1000 (kPa).



Figure 3.2 les anneaux de confinement (à gauche : plateau supérieur, à droite : plateau inférieur)

Les principales caractéristiques de l'appareil sont schématisées dans les figures 3.3 et 3.4.

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

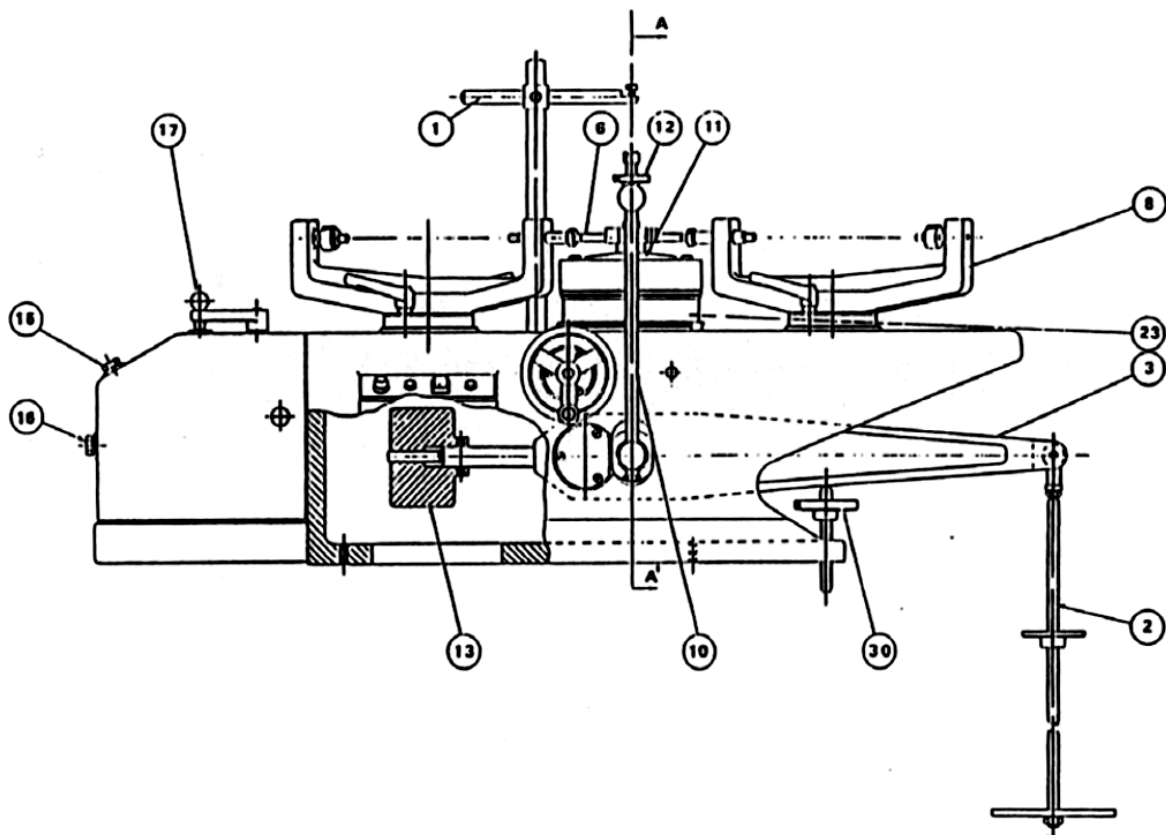


Figure 3.3 Vue de côté de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead

Légende

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

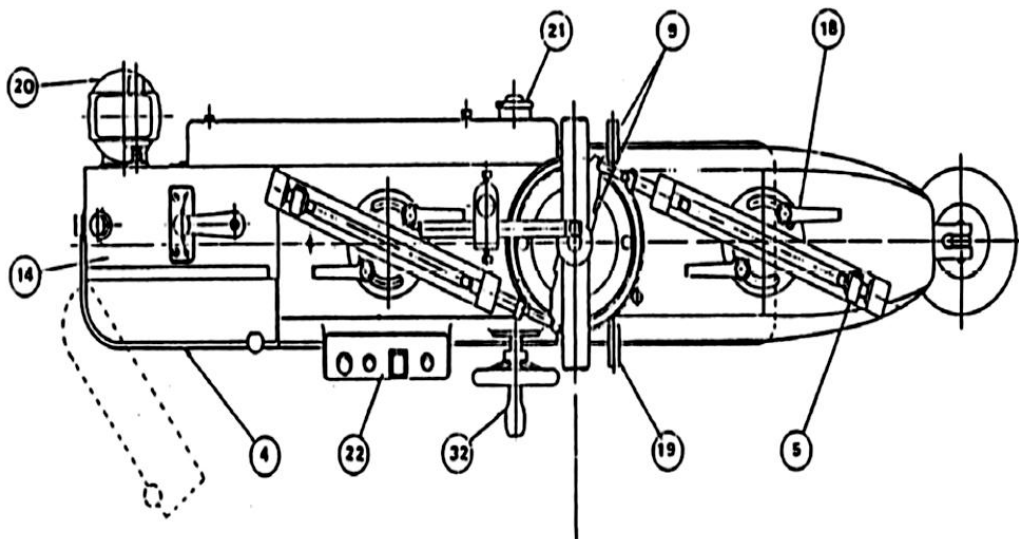


Figure 3.4 Vue en plan de l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead

Le mouvement circulaire du conteneur de l'échantillon est produit par un moteur électrique accouplé à une boîte de vitesse à rapports interchangeables qui est solidaire d'un engrenage à vis sans fin. Les anneaux dynamométriques sont munis de comparateurs ainsi que de capteurs de déplacements. Le plateau supérieur reste stationnaire par la réaction d'un bras de torsion sur une paire d'anneaux dynamométriques. Alors que le sol en contact avec le plateau poreux inférieur est forcé de subir une rotation avec le conteneur d'échantillon, la

partie supérieure de l'échantillon s'oppose à tout mouvement de rotation jusqu'à ce que, éventuellement, les contraintes à l'intérieur de la masse de sol provoquent une rupture par cisaillement. Les cellules de charge servent à mesurer le couple de torsion subi par l'échantillon à la rotation. La déformation verticale (tassement) est enregistrée par un capteur de déplacement placé sur le haut du bras de mise en charge durant la phase de consolidation et de cisaillement.

3.3 Matériaux étudiés

La caractérisation des matériaux à étudier est une tâche indispensable pour l'interprétation des résultats d'essais mécaniques et la compréhension des phénomènes en jeu.

Le choix des matériaux à mettre à l'essai s'est porté sur cinq types d'échantillon :

- ✓ Un sable argileux (75% sable + 25% kaolinite) : le mélange de deux sols a été effectué par malaxage manuel à l'état sec tout d'abord, puis à une teneur en eau de 4% de la quantité entière.

Le même sable argileux avec différents pourcentage de la poudre de caoutchouc :

- ✓ PC 5%, (E2)
- ✓ PC 10%, (E3)
- ✓ PC 15%, (E4)
- ✓ PC 20%, (E5)

La fraction de sable normalisé utilisée dans ce travail est celle qui est passée du tamis de 710 μm et retenue sur le tamis de 500 μm . Ce sable est produit de la Société Nouvelle de Littoral (SNL), installée à LEUATE, (France). (figure 3.6)

La kaolinite ou l'argile de chine est une argile industrielle très pure utilisée dans la fabrication de la porcelaine. C'est une argile plastique constituée essentiellement de kaolinite associée à d'autres minéraux tels que feldspath, mica et quartz, et elle est de couleur blanche. (figure 3.5)

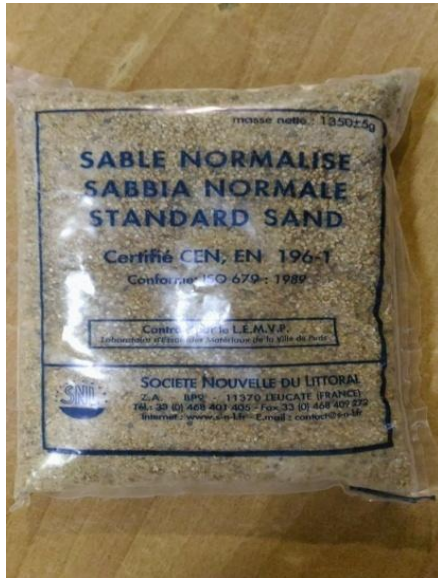


Figure 3.5 Sable normalisé

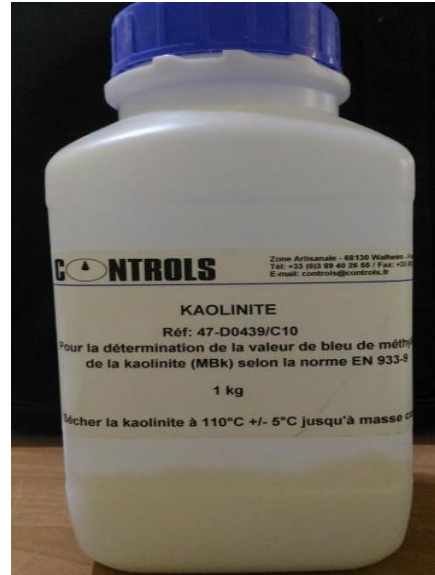


Figure 3.6 La kaolinite de la chine

La poudre de caoutchouc utilisée provenant d'une entreprise spécialisée dans la fabrication de granulat de caoutchouc à partir des pneus non réutilisés. Algérie-"Douib Recyclage Caoutchouc". La figure 3.7 montre la poudre utilisée dans les essais.



Figure 3.7 Une quantité de la poudre de caoutchouc.

On a réalisé l'analyse granulométrique de la poudre de caoutchouc selon la norme

NF P 94040. La figure 3.8 présente la courbe granulométrique de cette dernière.

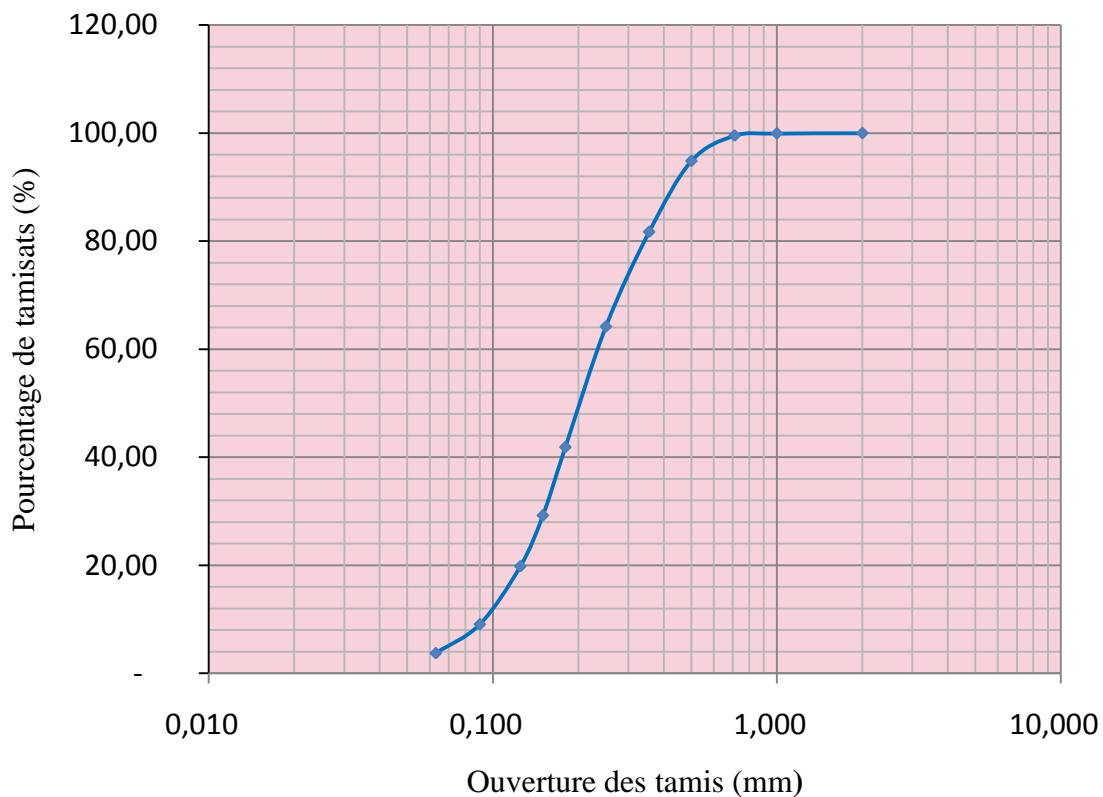


Figure 3.8 Courbe de l'analyse granulométrique de la poudre de caoutchouc

3.4 Préparation de l'échantillon

Il n'y a pas de difficulté particulière lors de la préparation de l'échantillon du sol pour les essais de cisaillement annulaire réalisés au moyen de l'appareil de Bromhead. La résistance résiduelle est une propriété du sol remanié, pratiquement, on ne peut pas préparer des échantillons intacts pour les essais de cisaillement annulaires. La structure initiale du sol n'a pas d'effet sur la résistance résiduelle du sol. De ce fait un échantillon dans un état remanié est utilisé. Il est déposé par petites quantités dans le volume annulaire. Il est ensuite arasé en utilisant une spatule flexible en acier. La figure 3.9 montre l'échantillon dans son conteneur.



Figure 3.9 L'emplacement de l'échantillon dans son conteneur avant l'essai

Après avoir placé le conteneur en position dans les supports de guidage, le plateau supérieur est glissé sur l'axe de centrage. Les points d'appui des anneaux avec les capteurs de forces sont positionnés de façon à ce qu'ils soient situés à une distance de 150 mm sur le bras de torsion. Il est nécessaire également de parfaire l'angle droit entre les axes des cellules de charge et bras de torsion, comme indiqué sur la figure 3.10. Les poids appropriés sont placés sur le support (2) et le balancier (3) est mis en position horizontale. Le capteur de déplacement est alors placé sur le haut du contre-écrou de blocage (12) du bras de mise en charge. Pour garder l'échantillon saturé, la chambre en plexiglas est remplie d'eau distillée (état saturé). La consolidation peut être alors initiée.

L'état des échantillons étudiés après la réalisation de l'essai est montré aux figures de **l'annexe B** à la fin de ce mémoire



Figure 3.10 Position des cellules de charge par rapport au bras de torsion

3.5 Procédure expérimentale

Après l'achèvement de l'étape de consolidation, le cisaillement est alors initié. Il est conduit jusqu'à ce que la résistance au cisaillement atteigne une valeur constante, c'est à dire la résistance résiduelle. La vitesse de cisaillement utilisée dans nos essais est de 10degrés/minute. Plusieurs types d'essais de cisaillement annulaires peuvent être conduits. Des essais peuvent impliquer des changements de contraintes normales effectives aussi bien sur le même échantillon « multi-stages » que sur différents échantillons « single-stage ». Dans les essais à une seule phase, chaque échantillon subit une seule étape de cisaillement sous une contrainte normale effective donnée.

Les courbe de consolidation de nos essais en laboratoire sont annexées à la fin de ce mémoire (**annexe A**)

3.6 Acquisition de données

L'acquisition de données se fait à l'aide du logiciel d'acquisition DATACOM développé par la compagnie Controls. (figure 3.11)

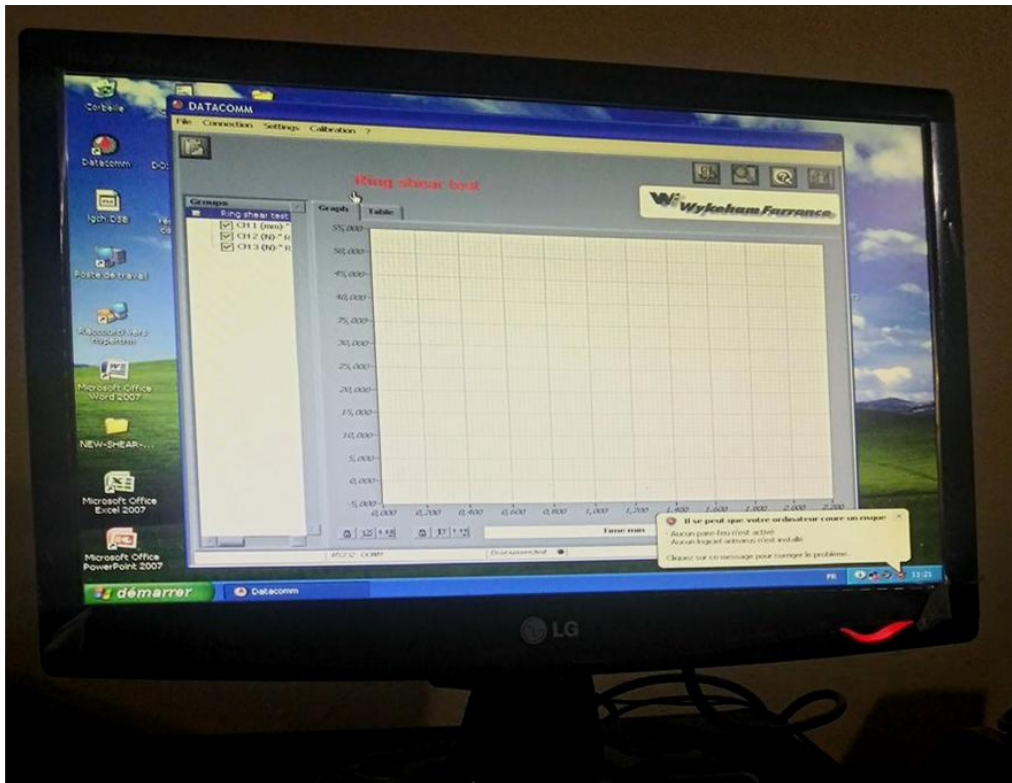


Figure 3.11 Fenêtre du logiciel d'acquisition DATACOM

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

- le déplacement horizontal (ou déplacement relatif tangentiel), dh ,
- le déplacement vertical (ou déplacement relatif normal), dv ,
- la contrainte de cisaillement, τ .

Le déplacement horizontal à tout instant est donné par le logiciel par suite de la multiplication de la vitesse de cisaillement par le temps à partir du début de l'essai. Les mesures du déplacement vertical sont effectuées à l'aide d'un capteur de déplacement. Ce dernier, fixé sur un support, est en contact d'un contre-écrou de blocage. La contrainte de cisaillement est déterminée à partir des forces $F1$ et $F2$ qui sont mesurées par deux capteurs de forces fixés aux cellules de charge. Le capteur de déplacement, ainsi que les deux capteurs de forces ont été préalablement étalonnés.

3.7 Calculs et résultats

Dans ce qui suit nous allons montrer les étapes de calculs et résultats obtenus.

3.7.1 Calculs

En considérant une distribution uniforme de la contrainte normale, le déplacement est calculé en considérant un rayon moyen a donné par :

$$a = \frac{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 dr}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{2(r_2^3 - r_1^3)}{3(r_2^2 - r_1^2)} \quad (3.1)$$

Où

r_1 et r_2 sont les rayons inférieur et extérieur de l'échantillon, tels que :

$$r_1 = 34,73 \text{ mm}$$

$$r_2 = 49,38 \text{ mm}$$

Le couple de torsion transmis est donné par :

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

$$T = \tau \times \pi (r_2^2 - r_1^2) \times \frac{2(r_2^3 - r_1^3)}{3(r_2^2 - r_1^2)} \quad (3.2)$$

$$\text{Par conséquent, } T = \frac{2}{3} \pi (r_2^3 - r_1^3) \tau \quad (3.3)$$

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

$$L = 119 \text{ (mm)}$$

$$T = \frac{(F_1 + F_2)L}{2} \quad (3.4)$$

Où :

F_1 et F_2 sont les forces mesurées par cellules de charge

✓ A partir des équations (3.3) et (3.4), la contrainte de cisaillement a pour équation :

$$\tau = \frac{3(F_1 + F_2)L}{4\pi(r_2^3 - r_1^3)} \quad (3.5)$$

Exemple :

$$\tau = \frac{3(F_1 + F_2)L}{4\pi(r_2^3 - r_1^3)} = \frac{3(39,30 + 36,30) \times 119}{4\pi(49,38^3 - 34,73^3)} = 34,90 \text{ kPa}$$

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

$$\sigma'_n = \frac{P}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (3.6)$$

Où P est la charge appliquée sur l'échantillon.

Exemple :

$$\sigma'_n = \frac{P}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{2 \times 9,81 \times 10}{\pi(49,38^2 - 34,73^2)} = 50,66 \text{ kPa}$$

✓ Le déplacement horizontal pour un seul degré de rotation est donné par :

$$dh = \left(\frac{\pi}{180}\right) \left(\frac{r_1 + r_2}{2}\right) \quad (3.7)$$

Exemple :

Avec une vitesse de cisaillement de 10 degrés/minute, la deuxième lecture correspond aux 2 minutes depuis le commencement du cisaillement. Le nombre de degré donc est :

$$\text{Rotation} = 2 \times 10 = 20^\circ$$

$$dh = \text{Rotation} \times \left(\frac{\pi}{180}\right) \left(\frac{r_1 + r_2}{2}\right) = 20 \left(\frac{\pi}{180}\right) \left(\frac{34,37 + 49,38}{2}\right) = 14,69 \text{ mm}$$

3.7.2 Analyse des résultats

Dans cette partie nous avons présenté les résultats pour les essais de chaque échantillon étudié.

3.7.2.1 Sable argileux (75% sable + 25% kaolinite)

L'essai réalisé sur cet échantillon est considéré comme témoins par rapport au quatre échantillons contenant différentes teneurs en poudre de caoutchouc. Pour cela, deux états sont considérés, à savoir l'état non saturé et l'état saturé respectivement.

➤ Etat non saturé

Les résultats de cisaillement pour trois spécimens du même échantillon. Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions (état non saturé).

• Essai 01

Après la mise en place de l'échantillon sur l'appareil de cisaillement, l'essai a fourni les résultats dans le tableau 3.1, pour une contrainte normale appliquée de 50,66 (kPa)

Tableau 3.1 Résultats de l'essai 01 de cisaillement E1/A N.S

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.01	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,02	7,35	0,49	39,30	36,30	34,90
2,00	00.00.02.00	2,00	20,02	14,69	0,66	41,20	37,40	36,28
3,00	00.00.03.00	3,01	30,05	22,05	0,77	41,70	37,20	36,42
4,00	00.00.04.00	4,00	40,04	29,37	0,86	42,50	36,20	36,33
5,00	00.00.05.00	5,01	50,05	36,72	0,93	42,60	35,70	36,14
6,00	00.00.06.00	6,01	60,06	44,06	0,99	44,50	34,40	36,42
7,00	00.00.07.00	7,00	70,01	51,36	1,03	43,30	34,90	36,10
8,00	00.00.08.00	8,00	80,02	58,70	1,08	45,70	32,00	35,87
9,00	00.00.09.00	9,01	90,05	66,06	1,12	47,60	28,90	35,31
10,00	00.00.10.00	10,00	100,01	73,37	1,17	47,90	29,00	35,50
11,00	00.00.11.00	11,00	110,02	80,71	1,19	48,90	28,10	35,54

• Essai 02

Dans le deuxième essai, la contrainte normale appliquée est de 101,32 kPa, Le tableau 3.2 montre les résultats de cisaillement de cet essai.

Tableau 3.2 Résultats de l'essai 02 de cisaillement E1/B N.S

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,02	7,35	0,46	74,70	74,00	68,64
2,00	00.00.02.00	2,00	20,02	14,69	0,58	76,90	77,20	71,13
3,00	00.00.03.00	3,00	30,03	22,03	0,65	74,60	81,00	71,83
4,00	00.00.04.00	4,01	40,05	29,38	0,72	71,40	80,80	70,26
5,00	00.00.05.00	5,00	50,04	36,71	0,77	67,50	85,60	70,67
6,00	00.00.06.00	6,00	60,02	44,03	0,82	64,40	90,40	71,46
7,00	00.00.07.00	7,00	70,00	51,35	0,87	62,50	90,40	70,58
8,00	00.00.08.00	8,00	80,02	58,70	0,90	61,10	91,80	70,58

9,00	00.00.09.00	9,00	90,03	66,05	0,95	58,20	92,20	69,42
10,00	00.00.10.00	10,00	100,04	73,39	0,97	60,40	92,30	70,49
11,00	00.00.11.00	11,00	110,01	80,71	1,01	60,00	88,90	68,73

• Essai 03

Dans le troisième essai la contrainte normale appliquée est de 202,65 (kPa), Le tableau 3.3 montre les résultats de cisaillement de l'essai 03.

Tableau 3.3 Résultats de l'essai 03 de cisaillement E1/C N.S

N°	Temps (dd:hh:mm:ss)	Temps (mn)	Rotation (°)	dh (mm)	dv (mm)	F1 (N)	F2 (N)	τ (kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,01	7,34	0,42	92,60	196,50	133,45
2,00	00.00.02.00	2,00	20,02	14,69	0,56	118,60	187,10	141,11
3,00	00.00.03.00	3,00	30,03	22,03	0,63	108,70	196,40	140,83
4,00	00.00.04.00	4,00	40,01	29,35	0,71	124,60	180,60	140,88
5,00	00.00.05.00	5,00	50,04	36,71	0,76	131,20	172,60	140,23
6,00	00.00.06.00	6,00	60,03	44,04	0,81	135,30	167,80	139,91
7,00	00.00.07.00	7,00	70,01	51,36	0,85	130,10	174,60	140,65
8,00	00.00.08.00	8,01	80,05	58,73	0,90	140,60	161,60	139,50
9,00	00.00.09.00	9,00	90,02	66,04	0,93	152,30	152,20	140,56
10,00	00.00.10.00	10,00	100,01	73,37	0,97	154,50	148,70	139,96
11,00	00.00.11.00	11,00	110,04	80,73	1,00	161,50	142,60	140,37

Les courbes de contrainte-déplacement sont illustrées à la figure 3.12

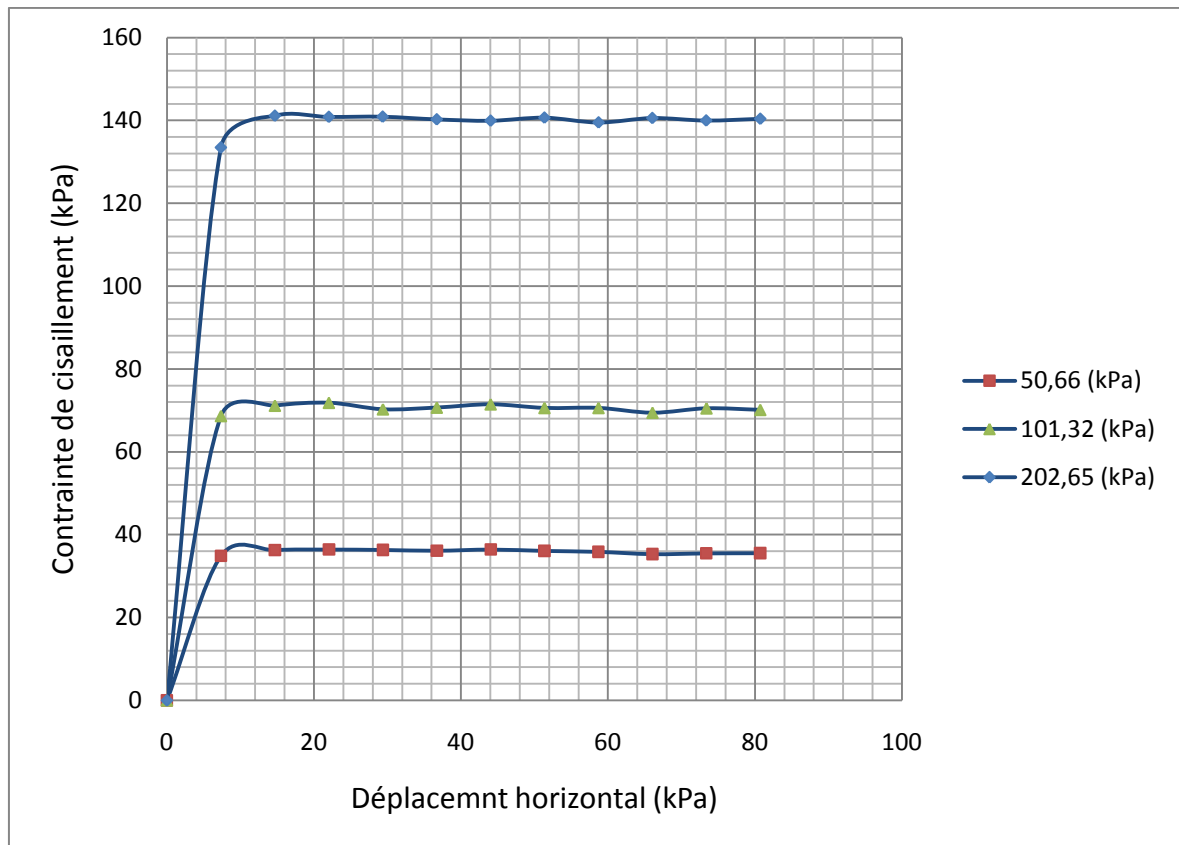


Figure 3.12 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement du témoin (Etat non saturé).

Le tableau 3.4 résume l'ensemble des contraintes de cisaillement obtenus aux essais témoins non saturés.

Tableau 3.4 Contraintes de cisaillement du témoin (Etat non saturé).

N°	σ (kPa)	τ pic (kPa)	τ résiduelle (kPa)
1	50,66	36,41	35,90
2	101,32	71,81	70,45
3	202,65	141,11	140,32

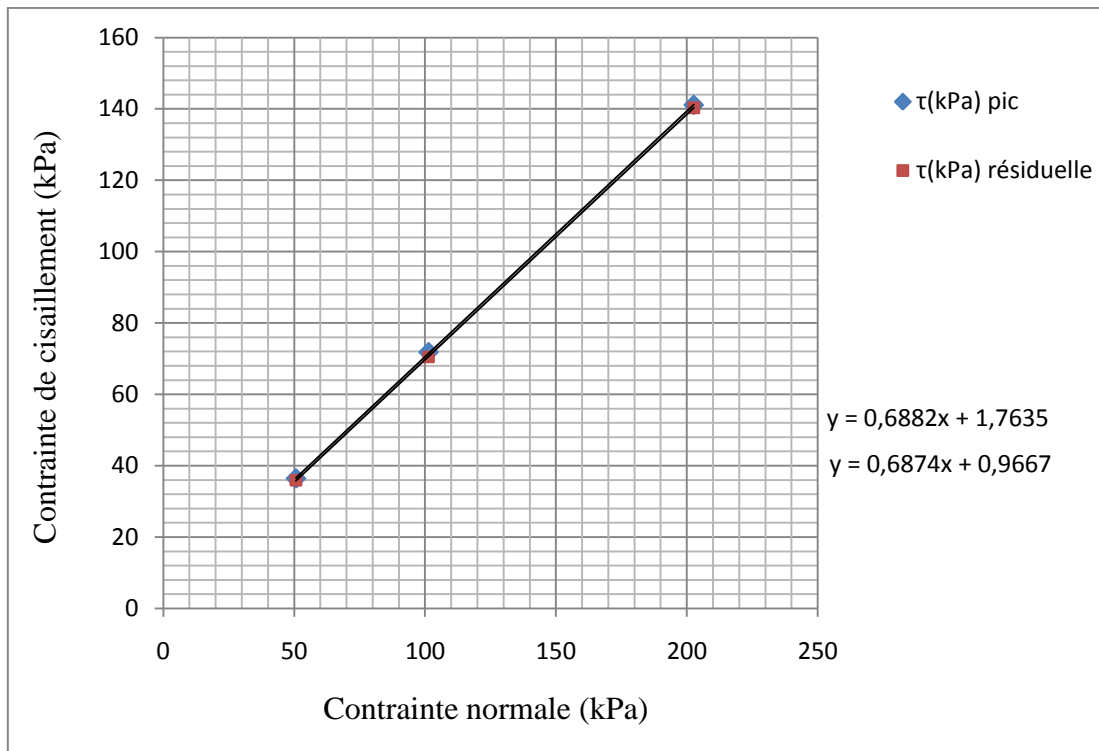


Figure 3.13 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle du témoin (Etat non saturé)

La figure 3.13 représente les enveloppes de rupture au pic et résiduelle pour les essais témoins non saturé.

Le tableau 3.5 montre les valeurs finales de l'angle de frottement et la cohésion au pic et résiduelle déterminées.

Tableau 3.5 Résultats de l'essai de cisaillement E1 N.S

φ'_p (°)	c'_p (kPa)	φ'_r (°)	c'_r (kPa)
34,53	1,76	34,50	0,97

➤ Etat saturé

Les résultats de cisaillement sont déduits de l'essai sur trois spécimens du même échantillon. Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions (état saturé).

• Essai 01

Après la mise en place de l'échantillon sur l'appareil de cisaillement, l'essai a fourni les résultats du tableau 3.6, pour une contrainte normale appliquée de 50,66 (kPa).

Tableau 3.6 Résultats de l'essai 01 de cisaillement. E1/A S

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,03	7,36	0,39	23,50	52,80	35,22
2,00	00.00.02.00	2,00	20,01	14,68	0,50	23,00	57,90	37,34
3,00	00.00.03.00	3,01	30,05	22,05	0,54	23,80	57,60	37,57
4,00	00.00.04.00	4,00	40,03	29,37	0,57	22,50	57,93	37,13
5,00	00.00.05.00	5,00	50,01	36,69	0,59	24,00	56,80	37,30
6,00	00.00.06.00	6,00	60,04	44,05	0,60	24,60	56,30	37,34
7,00	00.00.07.00	7,00	70,02	51,37	0,63	23,00	57,60	37,21
8,00	00.00.08.00	8,00	80,00	58,69	0,64	25,80	54,60	37,11
9,00	00.00.09.00	9,00	90,03	66,05	0,65	23,80	57,00	37,30
10,00	00.00.10.00	10,00	100,01	73,37	0,66	31,00	50,00	37,39
11,00	00.00.11.00	11,00	110,00	80,70	0,67	30,20	50,60	37,30

• Essai 02

Dans le deuxième essai, la contrainte normale appliquée est de 101,32 (kPa), Le tableau 3.7 montre les résultats de cisaillement de cet essai.

Tableau 3.7 Résultats de l'essai 02 de cisaillement. E1/B S

N°	Time	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,00	7,34	0,43	50,00	90,90	65,04
2,00	00.00.02.00	2,00	20,02	14,69	0,55	60,30	93,70	71,09
3,00	00.00.03.00	3,00	30,03	22,03	0,61	67,50	89,60	72,52
4,00	00.00.04.00	4,00	40,04	29,37	0,64	71,70	85,50	72,56
5,00	00.00.05.00	5,00	50,01	36,69	0,67	74,20	82,80	72,47
6,00	00.00.06.00	6,00	60,02	44,03	0,70	80,00	79,10	73,44
7,00	00.00.07.00	7,00	70,01	51,36	0,71	83,70	74,70	73,12
8,00	00.00.08.00	8,00	80,01	58,70	0,73	84,50	74,30	73,30
9,00	00.00.09.00	9,01	90,06	66,07	0,75	85,40	73,80	73,49
10,00	00.00.10.00	10,01	100,06	73,41	0,77	86,50	72,40	73,35
11,00	00.00.11.00	11,00	110,00	80,70	0,78	80,50	76,60	72,52

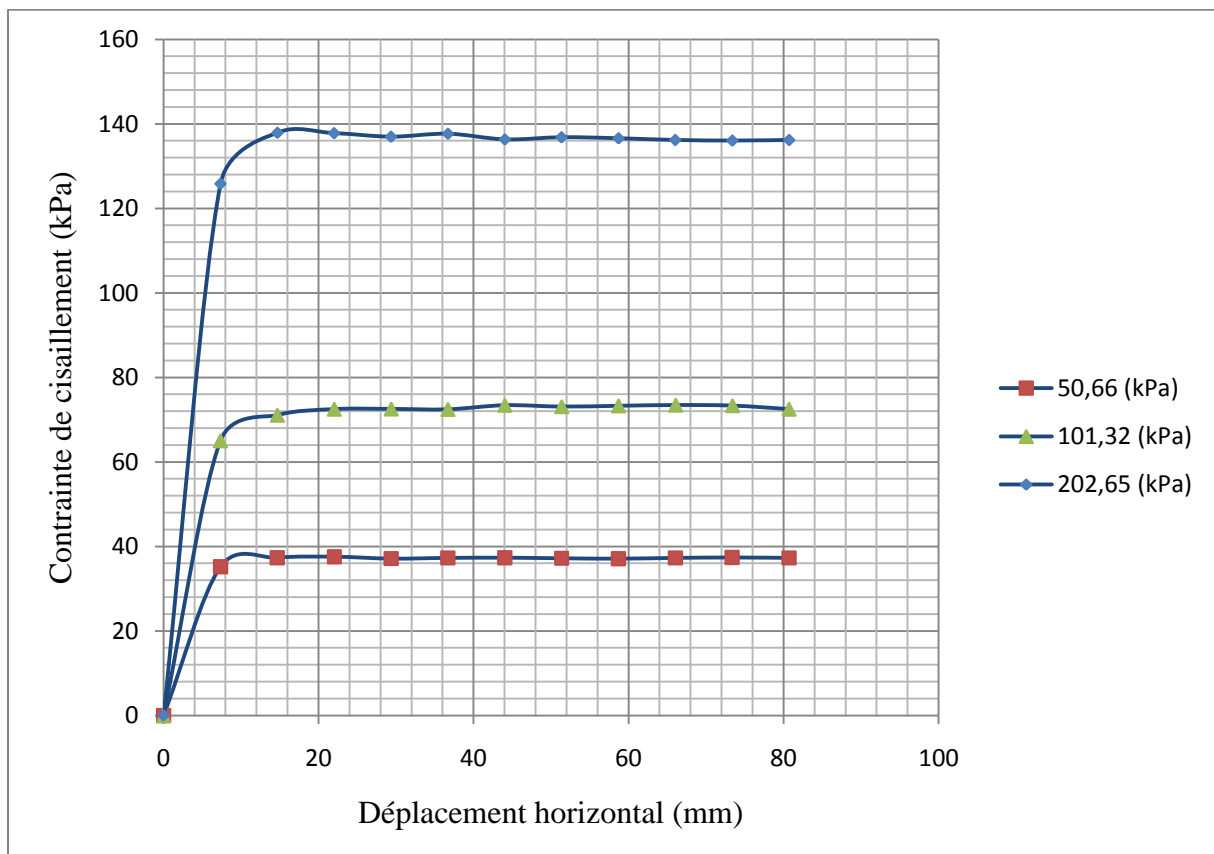
• Essai 03

Dans le troisième essai la contrainte normale appliquée est de 202,65 (kPa), Le tableau 3.8 montre les résultats de cisaillement de l'essai 03.

Tableau 3.8 Résultats de l'essai 03 de cisaillement. E1/C S

N°	Temps	Temps	Rotaion	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,03	7,36	0,40	111,60	161,00	125,83
2,00	00.00.02.00	2,00	20,04	14,70	0,52	125,40	173,30	137,88
3,00	00.00.03.00	3,00	30,01	22,02	0,60	120,00	178,50	137,79
4,00	00.00.04.00	4,00	40,01	29,35	0,65	121,50	175,20	136,96
5,00	00.00.05.00	5,00	50,03	36,70	0,70	122,50	175,70	137,65
6,00	00.00.06.00	6,00	60,04	44,05	0,73	123,00	172,30	136,31
7,00	00.00.07.00	7,00	70,00	51,35	0,76	126,40	170,00	136,82
8,00	00.00.08.00	8,00	80,03	58,71	0,79	125,50	170,40	136,59
9,00	00.00.09.00	9,00	90,00	66,03	0,82	123,50	171,50	136,17
10,00	00.00.10.00	10,00	100,04	73,39	0,84	125,30	169,40	136,03
11,00	00.00.11.00	11,00	110,03	80,72	0,88	128,30	166,70	136,17

Les courbes de contrainte-déplacement sont montrées à la figure 3.14

**Figure 3.14** Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement du témoin (Etat saturé)

Le tableau 3.9 résume l'ensemble des contraintes de cisaillement obtenus aux essais témoins saturés.

Tableau 3.9 Contraintes de cisaillement du témoin (Etat saturé)

N°	σ (kPa)	τ Pic (kPa)	τ Résiduelle (kPa)
1	50,66	37,57	37,26
2	101,32	73,44	73,15
3	202,65	137,88	136,72

La figure 3.15 représente les enveloppes de rupture au pic et résiduelle pour les essais témoins saturés.

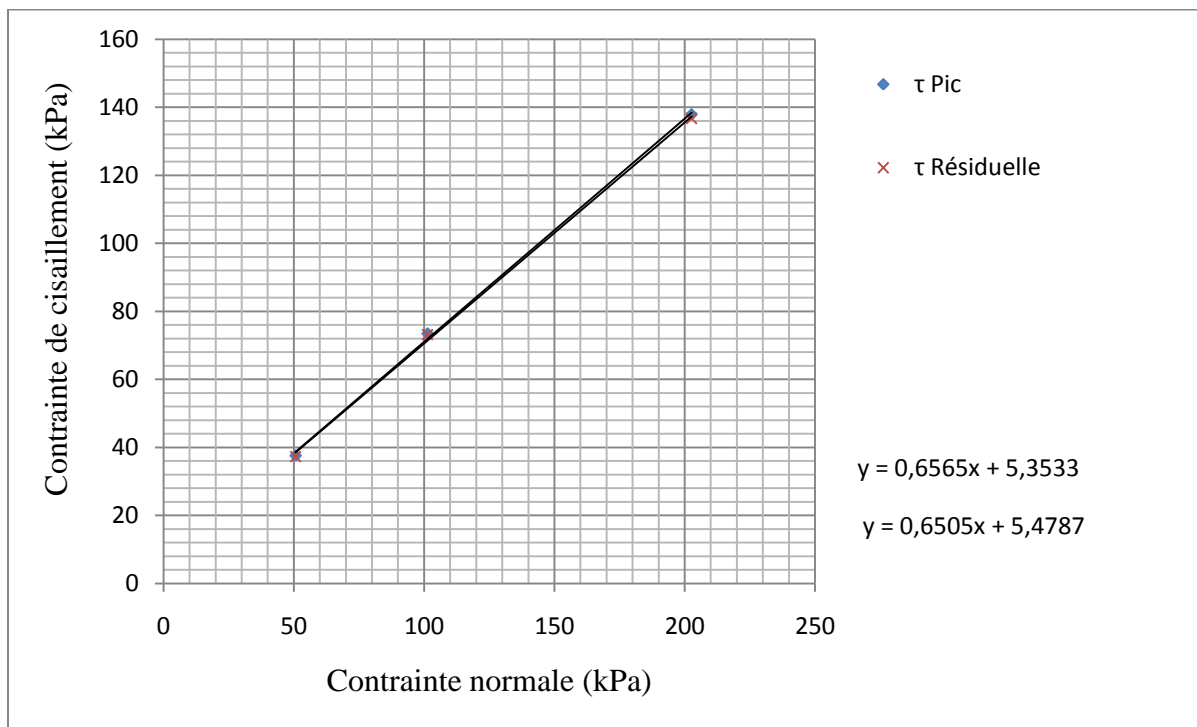


Figure 3.15 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle du témoin (Etat saturé)

Le tableau 3.10 montre les valeurs finales de l'angle de frottement et la cohésion au pic et résiduelle déterminées.

Tableau 3.10 Résultats de l'essai de cisaillement du témoin (Etat saturé)

φ'_p (°)	c'_p (kPa)	φ'_r (°)	c'_r (kPa)
33,28	5,35	33,04	5,48

3.7.2.2 PC 5%

Les essais sont réalisés sur un échantillon composé de témoins plus 5% de la poudre de caoutchouc. Pour cela, deux états sont considérés, à savoir l'état non saturé et l'état saturé respectivement.

➤ Etat non saturé

Nous présentons les résultats de cisaillement pour les trois spécimens du même échantillon. Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions (état non saturé).

• Essai 01

Après la mise en place de l'échantillon sur l'appareil de cisaillement, l'essai a fourni les résultats du tableau 3.11, pour une contrainte normale appliquée de 50,66 kPa.

Tableau 3.11 Résultats de l'essai 01 de cisaillement. E2/A N.S

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,03	7,36	0,39	34,80	39,50	34,30
2,00	00.00.02.00	2,00	20,04	14,70	0,53	32,30	44,70	35,54
3,00	00.00.03.00	3,00	30,01	22,02	0,64	28,70	47,60	35,22
4,00	00.00.04.00	4,00	40,02	29,36	0,72	24,40	51,00	34,80
5,00	00.00.05.00	5,00	50,02	36,70	0,78	23,80	51,70	34,85
6,00	00.00.06.00	6,00	60,03	44,04	0,84	22,30	52,90	34,71
7,00	00.00.07.00	7,00	70,01	51,36	0,88	20,60	52,90	33,93
8,00	00.00.08.00	8,00	80,00	58,69	0,95	23,00	50,70	34,02
9,00	00.00.09.00	9,00	90,04	66,06	0,98	20,90	52,70	33,97
10,00	00.00.10.00	10,00	100,03	73,38	1,02	23,00	51,50	34,39
11,00	00.00.11.00	11,00	110,01	80,71	1,06	23,90	49,70	33,97

• Essai 02

Dans le deuxième essai, la contrainte normale appliquée est de 101,32 kPa, Le tableau 3.12 montre les résultats de cisaillement de cet essai.

Tableau 3.12 Résultats de l'essai 02 de cisaillement. E2/B N.S

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,04	7,37	0,36	64,50	78,60	66,06
2,00	00.00.02.00	2,00	20,01	14,68	0,49	54,00	96,00	69,24
3,00	00.00.03.00	3,00	30,03	22,03	0,57	61,20	84,70	67,35
4,00	00.00.04.00	4,00	40,01	29,35	0,64	57,20	90,40	68,13
5,00	00.00.05.00	5,00	50,04	36,71	0,71	53,80	93,20	67,86
6,00	00.00.06.00	6,00	60,02	44,03	0,75	52,30	94,20	67,62
7,00	00.00.07.00	7,00	70,04	51,38	0,81	53,70	94,30	68,32
8,00	00.00.08.00	8,00	80,02	58,70	0,85	52,70	96,40	68,82
9,00	00.00.09.00	9,00	90,04	66,06	0,88	62,20	85,20	68,04
10,00	00.00.10.00	10,00	100,01	73,37	0,92	54,30	95,10	68,96
11,00	00.00.11.00	11,00	110,04	80,73	0,95	57,90	91,40	68,92

• Essai 03

Dans le troisième essai la contrainte normale appliquée est de 202,65 kPa, Le tableau 3.13 montre les résultats de cisaillement de l'essai 03.

Tableau 3.13 Résultats de l'essai 03 de cisaillement. E2/C N.S

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,01	7,34	0,42	121,70	176,40	137,60
2,00	00.00.02.00	2,00	20,03	14,69	0,54	121,40	175,70	137,14
3,00	00.00.03.00	3,00	30,02	22,02	0,61	123,60	172,00	136,45
4,00	00.00.04.00	4,00	40,04	29,37	0,67	121,90	173,60	136,40
5,00	00.00.05.00	5,00	50,04	36,71	0,73	122,60	170,80	135,43
6,00	00.00.06.00	6,00	60,03	44,04	0,77	121,50	174,40	136,59
7,00	00.00.07.00	7,00	70,03	51,38	0,82	119,50	175,90	136,36
8,00	00.00.08.00	8,00	80,03	58,71	0,84	120,90	174,30	136,26
9,00	00.00.09.00	9,00	90,02	66,04	0,89	123,00	172,10	136,22
10,00	00.00.10.00	10,00	100,02	73,38	0,91	127,50	168,50	136,63
11,00	00.00.11.00	11,00	110,02	80,71	0,95	125,20	170,10	136,31

Les courbes contrainte-déplacement sont présentés à la figure 3.16

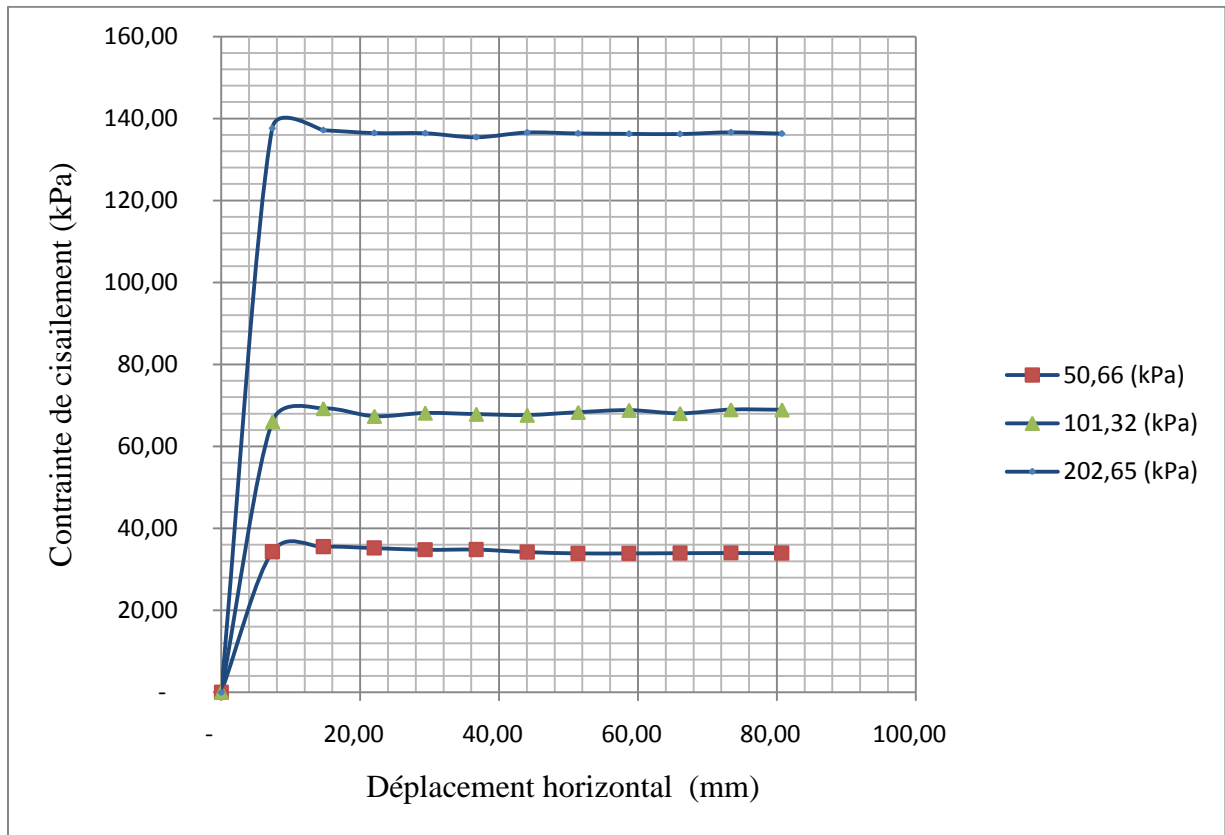


Figure 3.16 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement de E2 (état non saturé)

Le tableau 3.14 résume l'ensemble des contraintes de cisaillement obtenus aux essais réalisés sur l'échantillon E2 (PC 5%) non saturés.

Tableau 3.14 Contraintes de cisaillement, E2 (état non saturé)

N°	σ (kPa)	τ Pic (kPa)	τ Résiduelle (kPa)
1	50,66	35,54	34,33
2	101,32	69,24	68,22
3	202,65	137,6	136,38

La figure 3.17 représente les enveloppes de rupture au pic et résiduelle pour les essais de E2 non saturé.

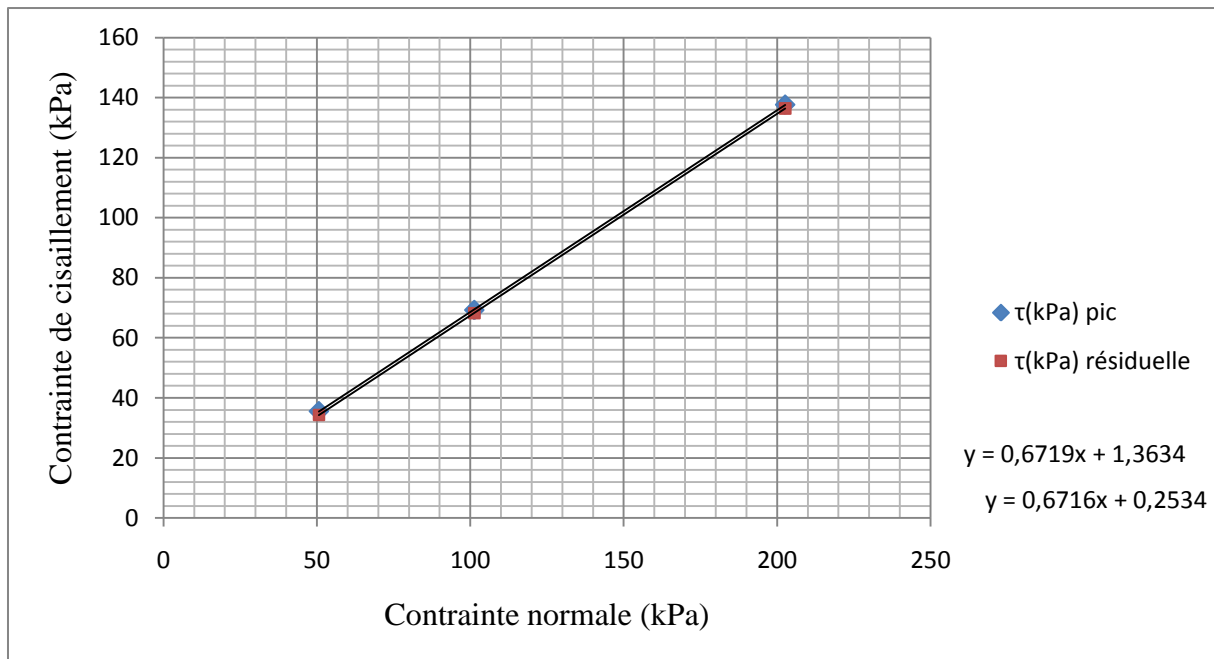


Figure 3.17 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E2 (état non saturé)

Le tableau 3.15 montre les valeurs finales de l'angle de frottement et la cohésion au pic et résiduelle qui sont déterminés.

Tableau 3.15 Résultats de l'essai de cisaillement E2 non saturé

φ'_p (°)	c'_p (kPa)	φ'_r (°)	c'_r (kPa)
33,9	1,36	33,89	0,25

➤ Etat saturé

Les résultats de cisaillement pour trois spécimens du même échantillon. Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions (Etat saturé).

• Essai 01

Après la mise en place de l'échantillon sur l'appareil de cisaillement, l'essai a fourni les résultats de tableau 3.16 pour une contrainte normale appliquée de 50,66 (kPa).

Tableau 3.16 Résultats de l'essai 01 de cisaillement. E2/A S

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,04	7,37	0,45	30,90	41,20	33,28
2,00	00.00.02.00	2,00	20,02	14,69	0,55	33,20	45,30	36,24
3,00	00.00.03.00	3,01	30,05	22,05	0,62	32,30	46,30	36,28
4,00	00.00.04.00	4,00	40,01	29,35	0,89	41,60	37,40	36,47
5,00	00.00.05.00	5,00	50,04	36,71	0,89	41,60	37,40	36,47
6,00	00.00.06.00	6,00	60,01	44,02	0,89	41,60	37,40	36,47
7,00	00.00.07.00	7,00	70,03	51,38	0,89	41,60	37,40	36,47
8,00	00.00.08.00	8,01	80,05	58,73	0,89	41,60	37,40	36,47
9,00	00.00.09.00	9,00	90,02	66,04	0,89	41,60	37,40	36,47
10,00	00.00.10.00	10,00	100,03	73,38	0,89	41,60	37,40	36,47
11,00	00.00.11.00	11,00	110,01	80,71	0,89	41,60	37,40	36,47

• Essai 02

Dans le deuxième essai, la contrainte normale appliquée est de 101,32 (kPa), Le tableau 3.17 montre les résultats de cisaillement de cet essai.

Tableau 3.17 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E2/B S

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,03	7,36	0,42	68,40	74,40	65,92
2,00	00.00.02.00	2,00	20,00	14,67	0,55	67,40	80,40	68,22
3,00	00.00.03.00	3,00	30,04	22,04	0,55	66,30	79,40	67,26
4,00	00.00.04.00	4,01	40,05	29,38	0,55	67,40	78,40	67,30
5,00	00.00.05.00	5,00	50,01	36,69	0,55	57,10	90,00	67,90
6,00	00.00.06.00	6,00	60,03	44,04	0,55	65,40	80,40	67,30
7,00	00.00.07.00	7,00	70,02	51,37	0,55	66,40	80,00	67,58
8,00	00.00.08.00	8,00	80,01	58,70	0,55	65,40	80,40	67,30
9,00	00.00.09.00	9,01	90,07	66,08	0,55	68,00	77,40	67,12
10,00	00.00.10.00	10,00	100,00	73,36	0,55	70,00	76,00	67,39
11,00	00.00.11.00	11,01	110,07	80,75	0,74	66,40	80,40	67,76

• Essai 03

Dans le troisième essai la contrainte normale appliquée est de 202,65 (kPa), Le tableau 3.18 montre les résultats de cisaillement de l'essai 03.

Tableau 3.18 Résultats de l'essai 03 de cisaillement. E2/C S

N°	Temps (dd:hh:mm:ss)	Temps (mn)	Rotation (°)	dh (mm)	dv (mm)	F1 (N)	F2 (N)	τ (kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,02	7,35	0,44	124,20	150,80	126,94
2,00	00.00.02.00	2,00	20,02	14,69	0,55	126,30	174,10	138,67
3,00	00.00.03.00	3,00	30,03	22,03	0,62	134,20	165,70	138,43
4,00	00.00.04.00	4,00	40,04	29,37	0,68	133,00	162,40	136,36
5,00	00.00.05.00	5,01	50,05	36,72	0,72	135,90	162,10	137,56
6,00	00.00.06.00	6,00	60,01	44,02	0,76	136,60	160,40	137,10
7,00	00.00.07.00	7,00	70,02	51,37	0,80	137,00	159,50	136,87
8,00	00.00.08.00	8,00	80,03	58,71	0,83	138,00	160,00	137,56
9,00	00.00.09.00	9,00	90,04	66,06	0,85	139,40	159,20	137,83
10,00	00.00.10.00	10,00	100,04	73,39	0,87	158,20	140,00	137,65
11,00	00.00.11.00	11,00	110,02	80,71	0,90	157,20	140,00	137,19

La figure 3.17 montre les courbes contrainte-déplacement pour E2 à l'état saturé.

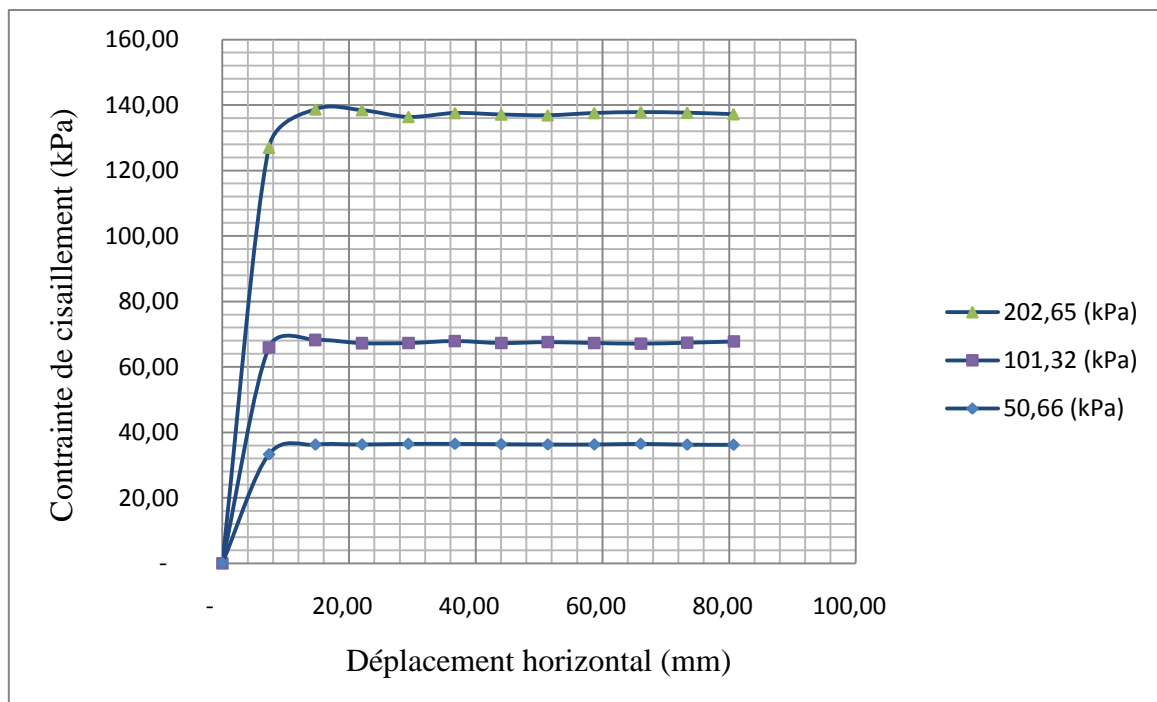


Figure 3.18 Courbes contrainte cisaillement-Déplacement, E2 (état saturé)

Le tableau 3.19 résume l'ensemble des contraintes de cisaillement obtenus aux essais réalisés sur l'échantillon E2 (PC 5%) saturé.

Tableau 3.19 Contraintes de cisaillement, E2 (état saturé)

N°	σ (kPa)	τ Pic (kPa)	τ Résiduelle (kPa)
1	50,66	36,47	36,33
2	101,32	68,22	67,43
3	202,65	138,67	137,39

La figure 3.19 représente les enveloppes de rupture au pic et résiduelle pour les essais de E2 saturé.

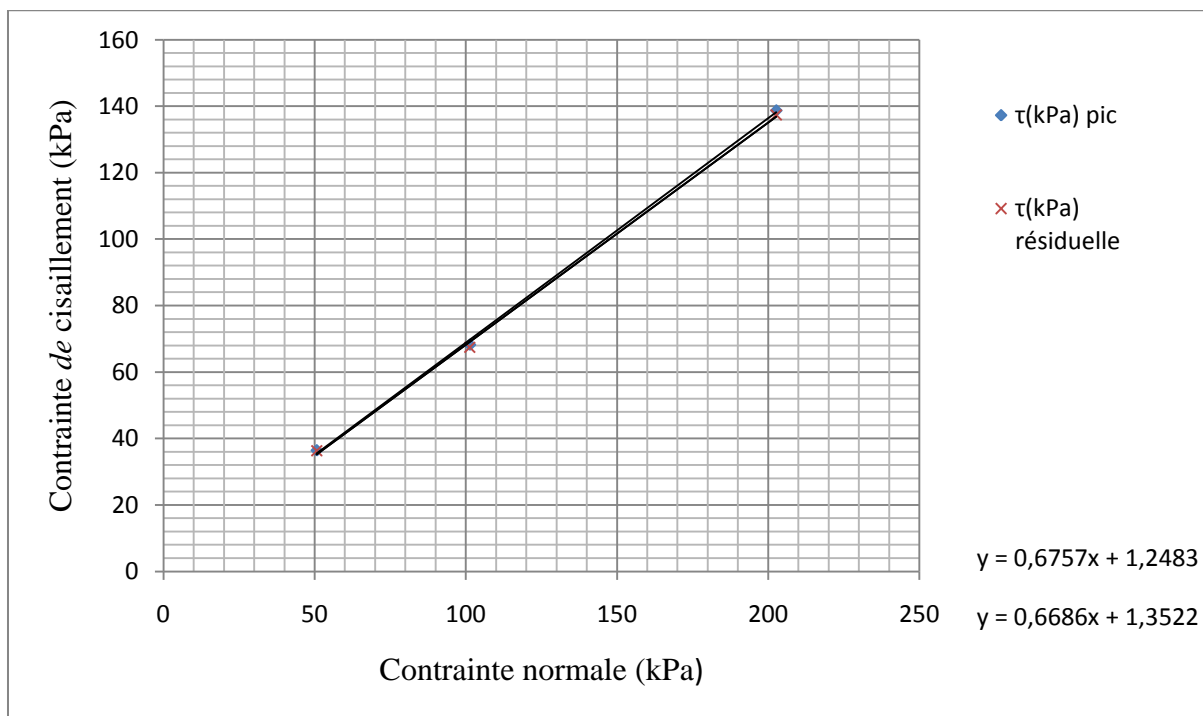


Figure 3.19 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E2 (état saturé)

Le tableau 3.20 montre les valeurs finales de l'angle de frottement et la cohésion au pic et résiduels qui sont déterminés.

Tableau 3.20 Résultats de l'essai de cisaillement, E2 (état saturé)

φ'_p (°)	c'_p (kPa)	φ'_r (°)	c'_r (kPa)
34,04	1,25	33,77	1,35

3.7.2.3 PC 10 %

Les essais sont réalisés sur un échantillon composé de témoins plus 10% de la poudre de caoutchouc. Pour cela, deux états sont considérés, à savoir l'état non saturé et l'état saturé respectivement.

➤ Etat non saturé

Les résultats de cisaillement pour trois spécimens du même échantillon. Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions (non saturé).

• Essai 01

Après la mise en place de l'échantillon sur l'appareil de cisaillement, l'essai a fourni les résultats sous forme du tableau 3.21, la contrainte normale appliquée est de 50,66 (kPa).

Tableau 3.21 Résultats de l'essai 01 de cisaillement. E3/A (état non saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,00	7,34	0,31	40,50	34,20	34,47
2,00	00.00.02.00	2,00	20,04	14,70	0,47	40,50	35,60	35,12
3,00	00.00.03.00	3,00	30,01	22,01	0,59	40,70	35,90	35,35
4,00	00.00.04.00	4,00	40,04	29,37	0,69	41,10	35,90	35,54
5,00	00.00.05.00	5,00	50,01	36,69	0,78	40,50	36,20	35,40
6,00	00.00.06.00	6,00	60,04	44,04	0,85	39,90	35,80	34,94
7,00	00.00.07.00	7,00	70,00	51,35	0,91	40,00	33,90	34,10
8,00	00.00.08.00	8,00	80,03	58,71	0,97	38,30	35,90	34,24
9,00	00.00.09.00	9,00	90,02	66,04	1,03	37,70	36,20	34,10
10,00	00.00.10.00	10,00	100,04	73,39	1,08	37,80	35,70	33,92
11,00	00.00.11.00	11,00	110,02	80,71	1,12	38,30	35,80	34,20

• Essai 02

Dans le deuxième essai, la contrainte normale appliquée est de 101,32 (kPa), Le tableau 3.22 montre les résultats de cisaillement de cet essai.

Tableau 3.22 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E3/B (état non saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-

1,00	00.00.01.00	1,00	10,01	7,34	0,30	63,90	80,50	66,64
2,00	00.00.02.00	2,00	20,01	14,68	0,44	65,70	81,20	67,79
3,00	00.00.03.00	3,00	30,02	22,02	0,57	71,10	76,30	68,02
4,00	00.00.04.00	4,01	40,05	29,38	0,66	72,70	73,30	67,38
5,00	00.00.05.00	5,00	50,03	36,70	0,75	76,60	70,40	67,84
6,00	00.00.06.00	6,00	60,04	44,04	0,80	70,30	76,10	67,56
7,00	00.00.07.00	7,01	70,05	51,39	0,87	74,70	72,00	67,70
8,00	00.00.08.00	8,00	80,01	58,69	0,92	76,10	69,00	66,96
9,00	00.00.09.00	9,00	90,02	66,04	0,98	77,10	68,50	67,19
10,00	00.00.10.00	10,00	100,02	73,37	1,02	78,70	67,30	67,38
11,00	00.00.11.00	11,00	110,03	80,72	1,06	78,70	65,30	66,46

• Essai 03

Dans le troisième essai, la contrainte normale appliquée est de 202,65 (kPa). Le tableau 3.23 montre les résultats de cisaillement de l'essai 03.

Tableau 3.23 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E3/C (état non saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,03	7,36	0,28	114,20	169,60	130,97
2,00	00.00.02.00	2,00	20,04	14,70	0,44	112,60	175,40	132,91
3,00	00.00.03.00	3,00	30,01	22,01	0,55	112,50	175,60	132,96
4,00	00.00.04.00	4,00	40,03	29,37	0,64	109,30	176,50	131,90
5,00	00.00.05.00	5,01	50,05	36,72	0,70	109,30	178,20	132,68
6,00	00.00.06.00	6,00	60,01	44,02	0,77	104,90	179,30	131,16
7,00	00.00.07.00	7,00	70,01	51,36	0,84	105,00	180,10	131,57
8,00	00.00.08.00	8,00	80,03	58,71	0,88	104,60	178,00	130,42
9,00	00.00.09.00	9,00	90,03	66,04	0,93	108,60	175,70	131,20
10,00	00.00.10.00	10,00	100,03	73,38	0,97	111,00	170,70	130,00
11,00	00.00.11.00	11,01	110,05	80,73	1,01	117,60	167,60	131,62

La figure 3.20 montre les courbes contrainte-déplacement pour E3 à l'état non saturé.

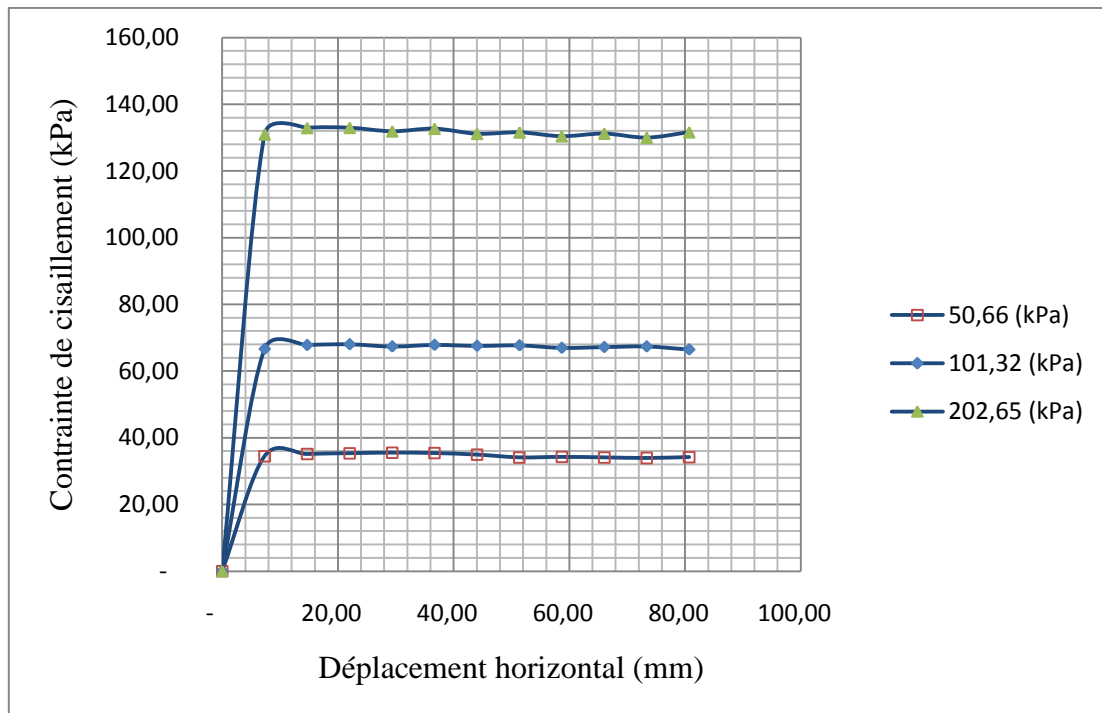


Figure 3.20 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E3 (état non saturé)

Le tableau 3.24 résume l'ensemble des contraintes de cisaillement obtenus aux essais réalisés sur l'échantillon E3 (PC 10%) non saturé.

Tableau 3.24 Contraintes de cisaillement, E3 (état non saturé)

N°	σ (kPa)	τ Pic (kPa)	τ Résiduelle (kPa)
1	50,66	35,54	34,41
2	101,32	68,02	67,31
3	202,65	132,96	131,32

La figure 3.21 représente les enveloppes de rupture au pic et résiduelle pour les essais de E3 non saturé.

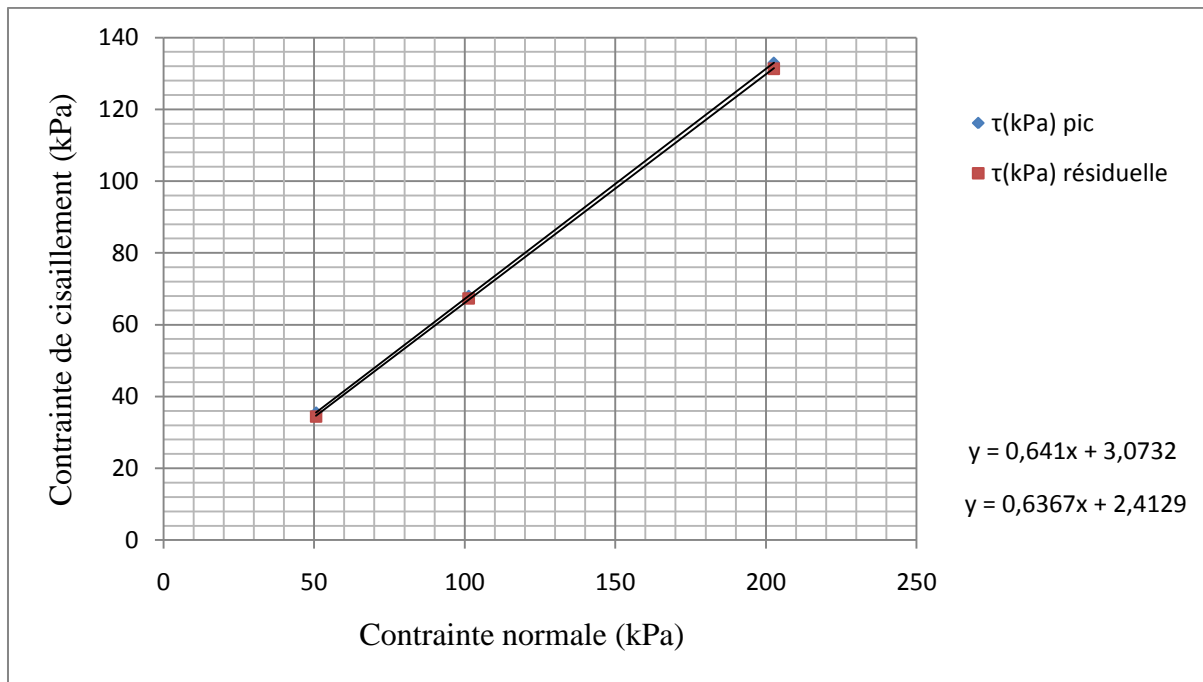


Figure 3.21 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E3 (état non saturé)

Le tableau 3.25 montre les valeurs finales de l'angle de frottement et la cohésion au pic et résiduels qui sont déterminées.

Tableau 3.25 Résultats de l'essai de cisaillement, E3 (état non saturé)

φ'_p (°)	c'_p (kPa)	φ'_r (°)	c'_r (kPa)
32,66	3,07	32,48	2,41

➤ Etat saturé

Les résultats de cisaillement pour trois spécimens du même échantillon. Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions (état saturé).

• Essai 01

Après la mise en place de l'échantillon sur l'appareil de cisaillement, l'essai a fourni les résultats montrés dans le tableau 3.26, pour une contrainte normale appliquée de 50,66 (kPa).

Tableau 3.26 Résultats de l'essai 01 de cisaillement, E3/A (état saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-

1,00	00.00.01.00	1,00	10,01	7,34	0,40	32,90	37,10	32,30
2,00	00.00.02.00	2,01	20,05	14,71	0,57	32,40	39,10	33,00
3,00	00.00.03.00	3,00	30,03	22,03	0,74	32,40	39,10	33,00
4,00	00.00.04.00	4,00	40,02	29,36	0,82	32,00	40,00	33,23
5,00	00.00.05.00	5,00	50,02	36,69	0,90	32,60	40,10	33,55
6,00	00.00.06.00	6,00	60,03	44,04	0,97	29,00	44,00	33,69
7,00	00.00.07.00	7,00	70,04	51,38	1,02	34,20	39,20	33,87
8,00	00.00.08.00	8,00	80,00	58,69	1,08	32,70	40,20	33,64
9,00	00.00.09.00	9,00	90,01	66,03	1,12	31,80	40,80	33,50
10,00	00.00.10.00	10,00	100,02	73,37	1,16	36,20	36,30	33,46
11,00	00.00.11.00	11,00	110,03	80,72	1,20	36,30	35,60	33,18

• Essai 02

Dans le deuxième essai, la contrainte normale appliquée est de 101,32 (kPa), Le tableau 3.27 montre les résultats de cisaillement de cet essai.

Tableau 3.27 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E3/B (état saturé)

N°	Temps (dd:hh:mm:ss)	Temps (mn)	Rotation (°)	dh (mm)	dv (mm)	F1 (N)	F2 (N)	τ (kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,03	7,36	0,38	68,00	69,30	63,38
2,00	00.00.02.00	2,00	20,04	14,70	0,51	68,80	70,10	64,12
3,00	00.00.03.00	3,00	30,04	22,04	0,62	69,90	71,10	65,09
4,00	00.00.04.00	4,01	40,05	29,38	0,69	70,30	70,20	64,86
5,00	00.00.05.00	5,00	50,01	36,69	0,76	70,00	70,80	64,99
6,00	00.00.06.00	6,00	60,02	44,03	0,81	70,20	69,20	64,35
7,00	00.00.07.00	7,00	70,03	51,38	0,86	70,60	70,10	64,95
8,00	00.00.08.00	8,00	80,04	58,72	0,91	71,10	69,60	64,95
9,00	00.00.09.00	9,00	90,04	66,06	0,94	70,50	70,20	64,95
10,00	00.00.10.00	10,00	100,00	73,36	0,99	70,00	70,20	64,72
11,00	00.00.11.00	11,00	110,02	80,71	1,03	70,30	70,20	64,86

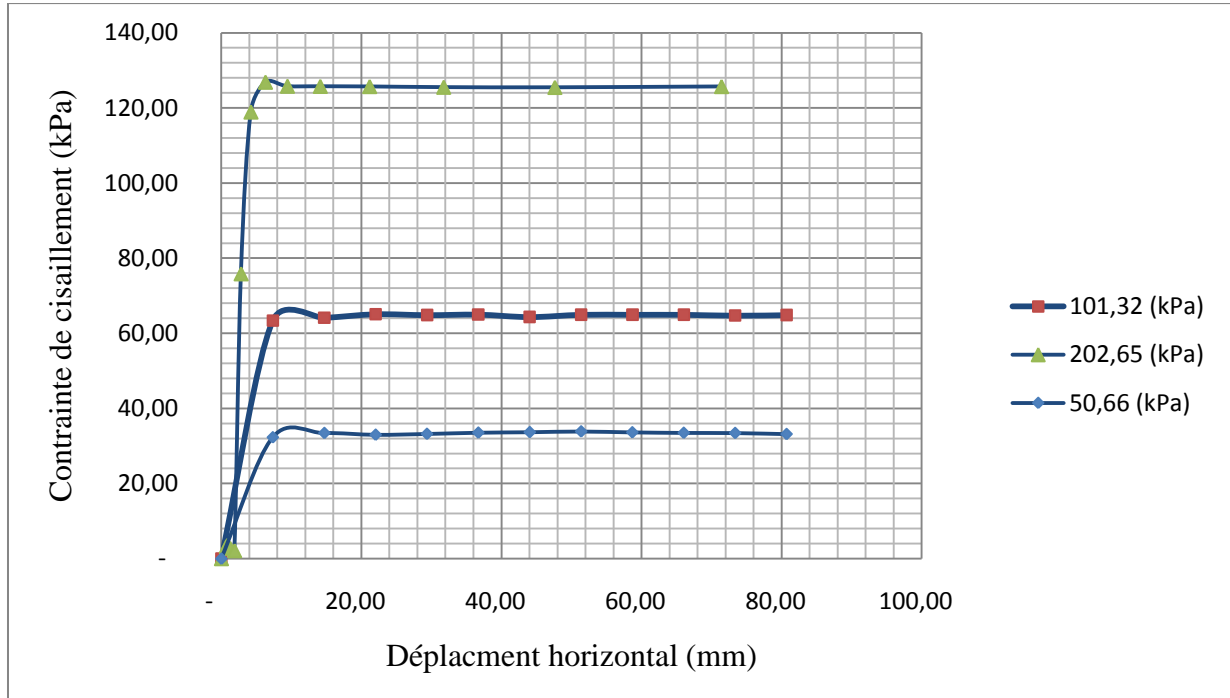
• Essai 03

Dans le troisième essai la contrainte normale appliquée est de 202,65 (kPa), Le tableau 3.28 montre les résultats de cisaillement de l'essai 03.

Tableau 3.28 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E3/C (état saturé)

N°	Temps (dd:hh:mm:ss)	Temps (mn)	Rotation (°)	dh (mm)	dv (mm)	F1 (N)	F2 (N)	τ (kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	0,01	-	-	-
1,00	00.00.00.06	0,09	0,94	0,69	0,01	-	7,00	3,23
2,00	00.00.00.07	0,12	1,15	0,84	0,01	0,10	7,60	3,55
3,00	00.00.00.10	0,17	1,70	1,25	0,01	0,10	5,90	2,77
4,00	00.00.00.15	0,26	2,56	1,88	0,01	0,30	4,30	2,12
5,00	00.00.00.23	0,38	3,83	2,81	0,11	79,80	84,50	75,84
6,00	00.00.00.34	0,58	5,75	4,22	0,21	122,60	135,00	118,91
7,00	00.00.00.51	0,86	8,57	6,29	0,29	130,00	144,80	126,85
8,00	00.00.01.17	1,29	12,85	9,43	0,35	129,20	143,30	125,79
9,00	00.00.01.55	1,92	19,24	14,11	0,42	124,00	148,40	125,74
10,00	00.00.02.53	2,89	28,85	21,17	0,51	130,70	141,60	125,69
11,00	00.00.04.20	4,33	43,26	31,74	0,61	130,60	141,30	125,51
12,00	00.00.06.29	6,49	64,90	47,61	0,73	133,30	138,50	125,46
13,00	00.00.09.44	9,73	97,34	71,41	0,87	136,70	135,60	125,69

La figure 3.22 montre les courbes contrainte-déplacement pour E3 à l'état saturé.

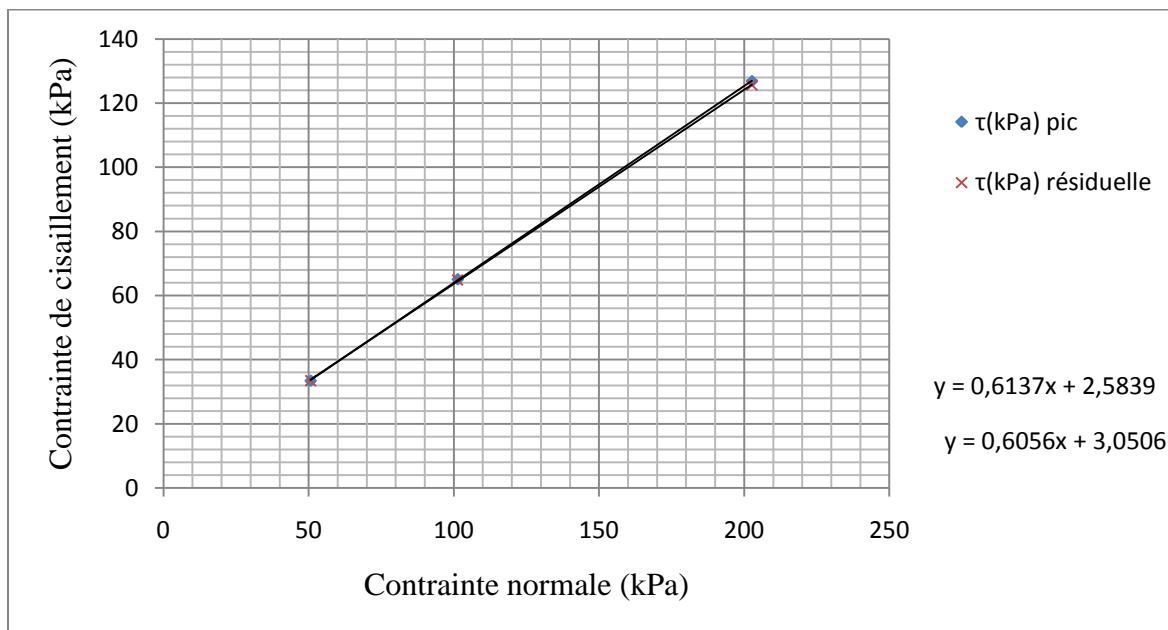
**Figure 3.22** Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E3 (état saturé)

Le tableau 3.29 résume l'ensemble des contraintes de cisaillement obtenus aux essais réalisés sur l'échantillon E3 (PC 10%) saturé.

Tableau 3.29 Contraintes de cisaillement, E3 (état saturé)

N°	σ (kPa)	τ Pic (kPa)	τ Résiduelle (kPa)
1	50,66	33,46	33,46
2	101,32	65,09	64,83
3	202,65	126,85	125,65

La figure 3.23 représente les enveloppes de rupture au pic et résiduelle pour les essais de E3 saturé.

**Figure 3.23** Enveloppes de rupture au pic et résiduel, E3 (état saturé)

Le tableau 3.30 montre les valeurs finales de l'angle de frottement et la cohésion au pic et résiduels qui sont déterminés.

Tableau 3.30 Résultats de l'essai de cisaillement, E3 (état saturé)

φ'_p (°)	c'_p (kPa)	φ'_r (°)	c'_r (kPa)
31,53	2,58	31,20	3,05

3.7.2.4 PC 15%

Les essais sont réalisés sur un échantillon composé de témoins plus 15% de la poudre de caoutchouc. Pour cela, deux états sont considérés, à savoir l'état non saturé et l'état saturé respectivement.

➤ Etat non saturé

Les résultats de cisaillement sont pour trois spécimens du même échantillon. Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions (état non saturé).

• Essai 01

Après la mise en place de l'échantillon sur l'appareil de cisaillement, l'essai a fourni les résultats montrés dans le tableau 3.31, pour une contrainte normale appliquée de 50,66 (kPa).

Tableau 3.31 Résultats de l'essai 01 de cisaillement, E4/A (état non saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,03	7,36	0,20	35,80	38,50	34,29
2,00	00.00.02.00	2,00	20,01	14,68	0,30	34,80	42,30	35,58
3,00	00.00.03.00	3,00	30,00	22,01	0,38	36,70	38,60	34,75
4,00	00.00.04.00	4,00	40,04	29,37	0,46	34,60	41,30	35,03
5,00	00.00.05.00	5,00	50,04	36,71	0,50	39,20	37,90	35,58
6,00	00.00.06.00	6,00	60,03	44,04	0,55	38,30	38,50	35,44
7,00	00.00.07.00	7,01	70,05	51,39	0,61	37,50	38,20	34,94
8,00	00.00.08.00	8,00	80,02	58,70	0,63	34,90	41,30	35,17
9,00	00.00.09.00	9,00	90,01	66,03	0,69	37,70	38,10	34,98
10,00	00.00.10.00	10,00	100,01	73,37	0,72	35,20	41,60	35,44
11,00	00.00.11.00	11,01	110,05	80,73	0,76	38,80	38,10	35,49

• Essai 02

Dans le deuxième essai, la contrainte normale appliquée est de 101,32 (kPa), Le tableau 3.32 montre les résultats de cisaillement de cet essai.

Tableau 3.32 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E4/B (état non saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,01	7,34	0,29	86,10	62,20	68,44
2,00	00.00.02.00	2,00	20,01	14,68	0,41	83,50	62,80	67,52
3,00	00.00.03.00	3,01	30,05	22,04	0,49	82,60	64,40	67,84
4,00	00.00.04.00	4,00	40,03	29,37	0,55	80,30	65,00	67,06
5,00	00.00.05.00	5,00	50,00	36,68	0,61	84,40	62,80	67,93
6,00	00.00.06.00	6,00	60,03	44,04	0,67	81,90	65,20	67,89
7,00	00.00.07.00	7,00	70,04	51,38	0,70	81,80	63,10	66,87
8,00	00.00.08.00	8,01	80,05	58,72	0,74	85,60	60,10	67,24
9,00	00.00.09.00	9,01	90,05	66,06	0,78	85,40	58,40	66,36

10,00	00.00.10.00	10,00	100,00	73,36	0,81	85,20	58,20	66,18
11,00	00.00.11.00	11,00	110,01	80,70	0,84	90,80	52,50	66,13

• Essai 03

Dans le troisième essai, la contrainte normale appliquée est de 202,65 (kPa). Le tableau 3.33 montre les résultats de cisaillement de l'essai 03.

Tableau 3.33 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E4/C (état non saturé)

N°	Temps (dd:hh:mm:ss)	Temps (mn)	Rotation (°)	dh (mm)	dv (mm)	F1 (N)	F2 (N)	τ (kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,01	7,34	0,27	127,70	156,90	131,34
2,00	00.00.02.00	2,00	20,03	14,69	0,34	126,20	165,20	134,48
3,00	00.00.03.00	3,00	30,02	22,02	0,39	125,50	163,20	133,23
4,00	00.00.04.00	4,01	40,05	29,38	0,44	128,20	158,70	132,40
5,00	00.00.05.00	5,00	50,04	36,71	0,48	124,70	165,90	134,11
6,00	00.00.06.00	6,00	60,02	44,03	0,52	119,50	168,40	132,86
7,00	00.00.07.00	7,00	70,01	51,36	0,54	130,50	159,40	133,79
8,00	00.00.08.00	8,00	80,03	58,71	0,58	127,40	161,30	133,23
9,00	00.00.09.00	9,00	90,01	66,03	0,60	130,10	158,00	132,96
10,00	00.00.10.00	10,00	100,04	73,39	0,62	135,80	153,20	133,37
11,00	00.00.11.00	11,00	110,02	80,71	0,64	132,30	157,90	133,93

La figure 3.24 montre les courbes contrainte-déplacement pour E4 à l'état non saturé.

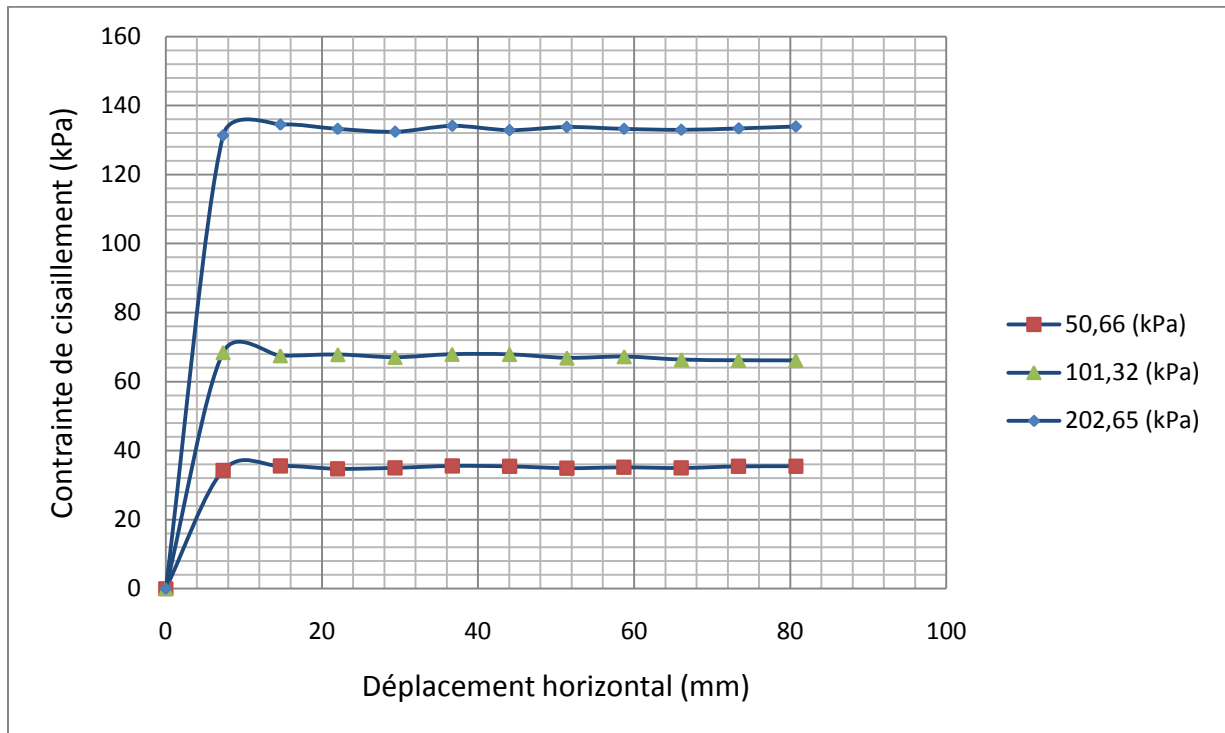


Figure 3.24 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E4 (état non saturé)

Le tableau 3.34 résume l'ensemble des contraintes de cisaillement obtenus aux essais réalisés sur l'échantillon E4 (PC 15%) non saturé.

Tableau 3.34 Contraintes de cisaillement, E4 (état non saturé)

N°	σ (kPa)	τ Pic (kPa)	τ Résiduelle (kPa)
1	50,66	35,58	35,20
2	101,32	67,84	66,96
3	202,65	134,48	133,32

La figure 3.25 représente les enveloppes de rupture au pic et résiduelle pour les essais de E4 non saturé.

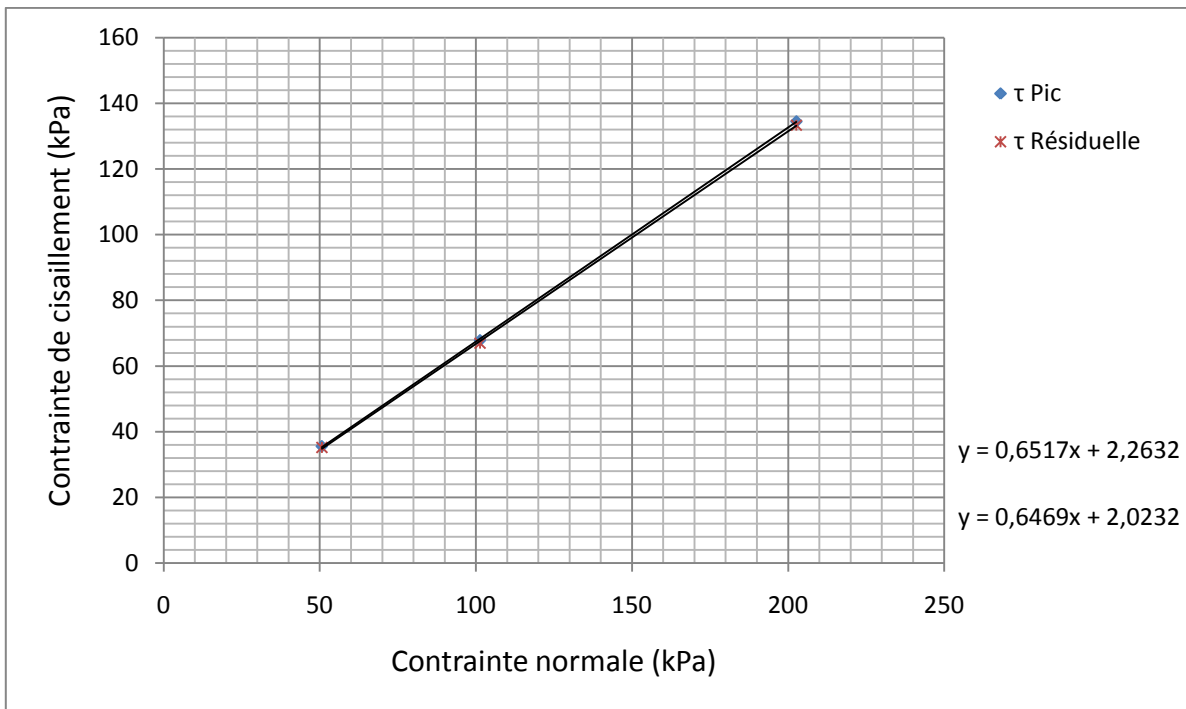


Figure 3.25 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E4 (état non saturé)

Le tableau 3.35 montre les valeurs finales de l'angle de frottement et la cohésion au pic et résiduels qui sont déterminés.

Tableau 3.35 Résultats de l'essai de cisaillement, E4 (état non saturé)

φ'_p (°)	c'_p (kPa)	φ'_r (°)	c'_r (kPa)
33,10	2,26	32,90	2,02

➤ Etat saturé

Les résultats de cisaillement sont pour trois spécimens du même échantillon. Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions (état saturé).

• Essai 01

Après la mise en place de l'échantillon sur l'appareil de cisaillement, l'essai a fourni les résultats montrés au tableau 3.36, pour une contrainte normale appliquée de 50,66 (kPa).

Tableau 3.36 Résultats de l'essai 01 de cisaillement. E4/A (état saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,03	7,36	0,26	37,70	34,80	33,46

2,00	00.00.02.00	2,00	20,04	14,70	0,32	44,80	32,40	35,63
3,00	00.00.03.00	3,00	30,04	22,04	0,37	41,10	36,00	35,58
4,00	00.00.04.00	4,00	40,03	29,37	0,39	46,01	30,92	35,50
5,00	00.00.05.00	5,00	50,03	36,70	0,43	46,90	30,10	35,54
6,00	00.00.06.00	6,00	60,03	44,04	0,46	51,40	25,40	35,44
7,00	00.00.07.00	7,00	70,00	51,35	0,48	50,01	26,50	35,31
8,00	00.00.08.00	8,00	80,00	58,69	0,50	46,50	29,50	35,07
9,00	00.00.09.00	9,00	90,00	66,02	0,52	41,20	34,10	34,75
10,00	00.00.10.00	10,00	100,03	73,38	0,54	42,60	32,20	34,52
11,00	00.00.11.00	11,00	110,03	80,72	0,55	38,40	36,50	34,57

• Essai 02

Dans le deuxième essai, la contrainte normale appliquée est de 101,32 (kPa), Le tableau 3.37 montre les résultats de cisaillement de cet essai.

Tableau 3.37 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E4/B (état saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.01	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,01	7,34	0,26	60,40	86,70	67,89
2,00	00.00.02.00	2,01	20,07	14,72	0,31	64,10	90,30	71,25
3,00	00.00.03.00	3,01	30,06	22,05	0,35	61,70	90,20	70,10
4,00	00.00.04.00	4,01	40,05	29,38	0,36	60,20	92,40	70,42
5,00	00.00.05.00	5,00	50,01	36,69	0,38	58,60	94,60	70,70
6,00	00.00.06.00	6,00	60,00	44,01	0,41	60,50	93,30	70,98
7,00	00.00.07.00	7,01	70,06	51,39	0,43	62,30	90,70	70,61
8,00	00.00.08.00	8,00	80,04	58,72	0,43	63,10	90,70	70,98
9,00	00.00.09.00	9,00	90,03	66,04	0,44	62,70	90,22	70,57
10,00	00.00.10.00	10,00	100,03	73,38	0,45	69,20	83,50	70,47
11,00	00.00.11.00	11,00	110,02	80,71	0,46	76,20	76,40	70,42

• Essai 03

Dans le troisième essai la contrainte normale appliquée est de 202,65 (kPa), Le tableau 3.38 montre les résultats de cisaillement de l'essai 03.

Tableau 3.38 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E4/C (état saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-

1,00	00.00.01.00	1,00	10,03	7,36	0,27	119,20	163,40	130,42
2,00	00.00.02.00	2,00	20,04	14,70	0,33	132,30	164,60	137,02
3,00	00.00.03.00	3,00	30,02	22,02	0,36	132,60	162,60	136,23
4,00	00.00.04.00	4,00	40,04	29,37	0,39	126,00	169,00	136,14
5,00	00.00.05.00	5,01	50,05	36,72	0,41	129,20	166,90	136,65
6,00	00.00.06.00	6,00	60,04	44,04	0,43	131,00	164,70	136,46
7,00	00.00.07.00	7,00	70,04	51,38	0,44	131,10	164,00	136,19
8,00	00.00.08.00	8,00	80,04	58,72	0,46	134,40	162,00	136,79
9,00	00.00.09.00	9,00	90,01	66,03	0,47	136,60	158,40	136,14
10,00	00.00.10.00	10,00	100,01	73,37	0,48	137,80	157,50	136,28
11,00	00.00.11.00	11,01	110,05	80,73	0,50	138,80	156,50	136,28

La figure 3.26 montre les courbes contrainte-déplacement pour E4 à l'état saturé.

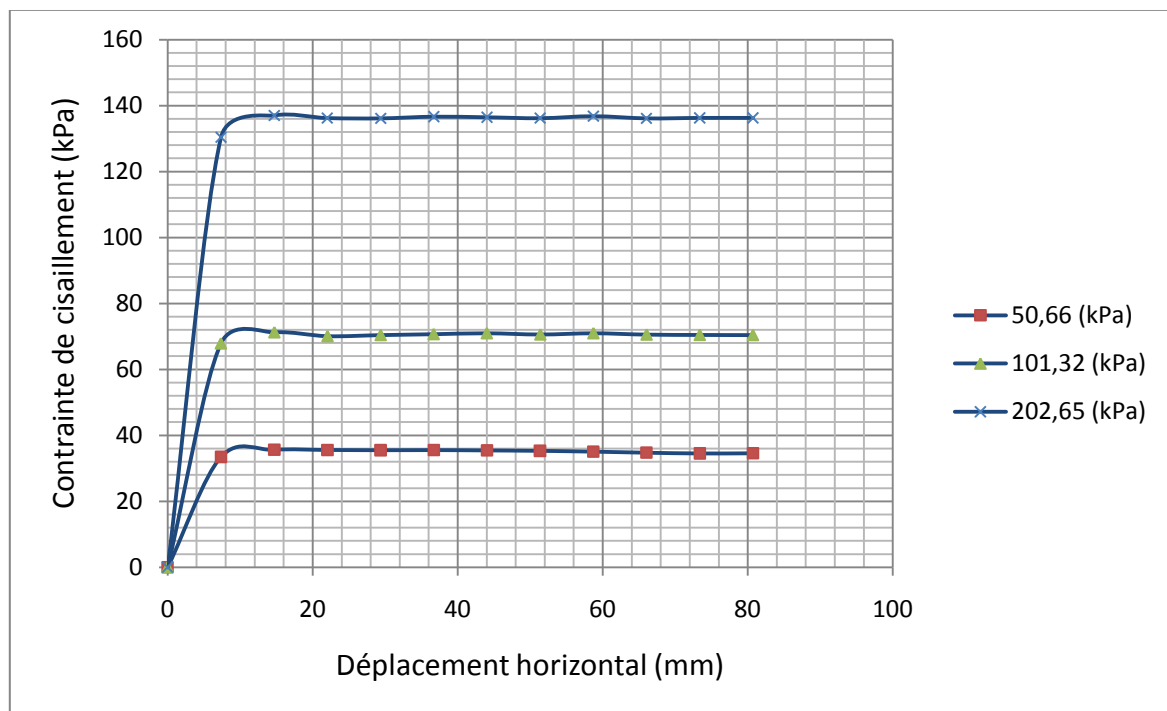


Figure 3.26 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E4 (état saturé)

Le tableau 3.39 résume l'ensemble des contraintes de cisaillement obtenus aux essais réalisés sur l'échantillon E4 (PC 15%) saturé.

Tableau 3.39 Contraintes de cisaillement, E4 (état saturé)

N°	σ (kPa)	τ Pic (kPa)	τ Résiduelle (kPa)
1	50,66	35,63	35,14
2	101,32	71,25	70,58
3	202,65	137,02	136,35

La figure 3.27 représente les enveloppes de rupture au pic et résiduelle pour les essais de E4 saturé.

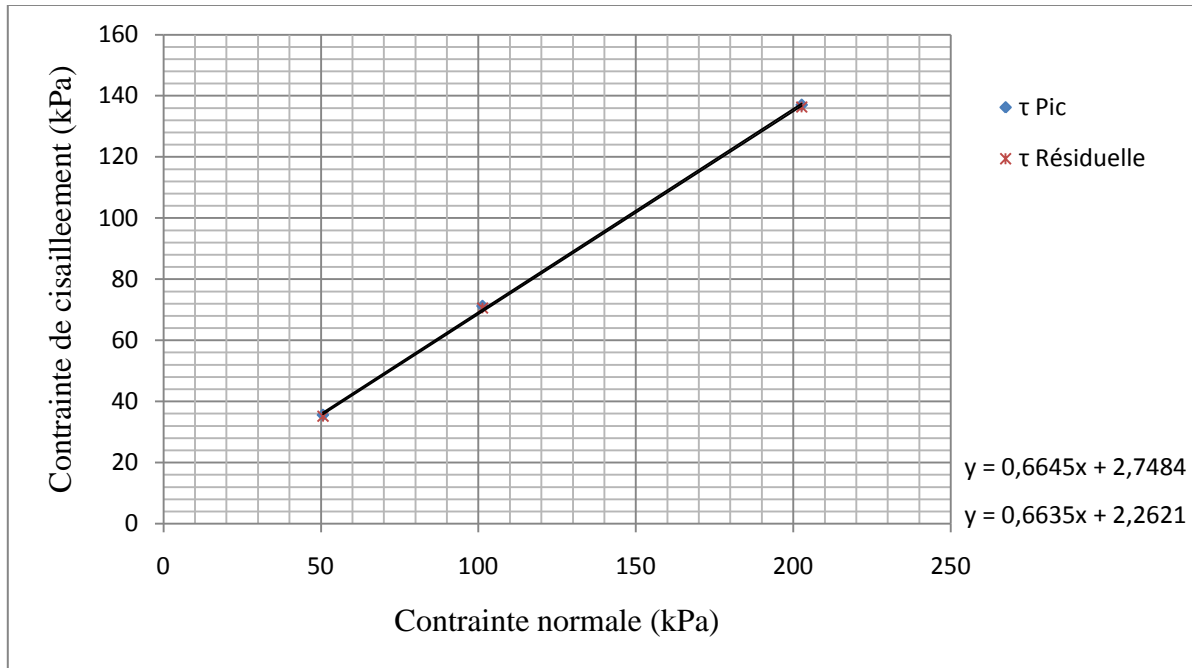


Figure 3.27 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E4 (état saturé)

Le tableau 3.40 montre les valeurs finales de l'angle de frottement et la cohésion au pic et résiduels qui sont déterminés.

Tableau 3.40 Résultats de l'essai de cisaillement, E4 (état saturé)

φ'_p (°)	c'_p (kPa)	φ'_r (°)	c'_r (kPa)
33,6	2,74	33,56	2,26

3.7.2.5 PC 20 %

Les essais sont réalisés sur un échantillon composé de témoins plus 20 % de la poudre de caoutchouc. Pour cela, deux états sont considérés, à savoir l'état non saturé et l'état saturé respectivement.

➤ Etat non saturé

Les résultats de cisaillement sont pour trois spécimens du même échantillon. Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions (état non saturé).

• Essai 01

Après la mise en place de l'échantillon sur l'appareil de cisaillement, l'essai a fourni les résultats montrés au tableau 3.41, pour une contrainte normale appliquée de 50,66 (kPa).

Tableau 3.41 Résultats de l'essai 01 de cisaillement, E5/A (état non saturé)

N°	Temps (dd:hh:mm:ss)	Temps (mn)	Rotation (°)	dh (mm)	dv (mm)	F1 (N)	F2 (N)	τ (kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,02	7,35	0,23	39,20	35,40	34,44
2,00	00.00.02.00	2,00	20,04	14,70	0,33	35,20	44,60	36,84
3,00	00.00.03.00	3,00	30,01	22,01	0,54	40,20	37,30	35,77
4,00	00.00.04.00	4,00	40,03	29,37	0,45	37,70	40,60	36,14
5,00	00.00.05.00	5,00	50,02	36,69	0,49	36,50	42,10	36,28
6,00	00.00.06.00	6,00	60,03	44,04	0,45	37,70	40,60	36,14
7,00	00.00.07.00	7,00	70,03	51,37	0,58	31,50	48,10	36,74
8,00	00.00.08.00	8,00	80,04	58,72	0,61	29,10	49,60	36,33
9,00	00.00.09.00	9,00	90,01	66,03	0,65	28,40	50,40	36,37
10,00	00.00.10.00	10,01	100,05	73,39	0,67	28,90	49,60	36,24
11,00	00.00.11.00	11,00	110,04	80,72	0,69	28,30	49,90	36,10

• Essai 02

Dans le deuxième essai, la contrainte normale appliquée est de 101,32 (kPa), Le tableau 3.42 montre les résultats de cisaillement de cet essai.

Tableau 3.42 Résultats de l'essai 02 de cisaillement, E5/B (état non saturé)

N°	Temps (dd:hh:mm:ss)	Temps (mn)	Rotation (°)	dh (mm)	dv (mm)	F1 (N)	F2 (N)	τ (kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,04	7,37	0,26	66,00	77,80	66,38
2,00	00.00.02.00	2,00	20,00	14,67	0,36	66,40	81,00	68,04
3,00	00.00.03.00	3,01	30,05	22,04	0,44	63,00	84,00	67,86
4,00	00.00.04.00	4,00	40,03	29,37	0,49	59,40	88,50	68,27
5,00	00.00.05.00	5,00	50,00	36,68	0,55	63,60	84,50	68,36
6,00	00.00.06.00	6,00	60,01	44,02	0,59	64,10	83,60	68,18
7,00	00.00.07.00	7,00	70,03	51,37	0,64	66,40	80,30	67,72
8,00	00.00.08.00	8,00	80,03	58,71	0,67	61,90	85,70	68,13

9,00	00.00.09.00	9,00	90,00	66,02	0,72	66,40	80,10	67,62
10,00	00.00.10.00	10,00	100,02	73,37	0,76	66,80	81,20	68,32
11,00	00.00.11.00	11,00	110,01	80,70	0,78	70,80	76,30	67,90

• Essai 03

Dans le troisième essai la contrainte normale appliquée est de 202,65 (kPa), Le tableau 3.43 montre les résultats de cisaillement de l'essai 03.

Tableau 3.43 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E5/C (état non saturé)

N°	Temps (dd:hh:mm:ss)	Temps (mn)	Rotation (°)	dh (mm)	dv (mm)	F1 (N)	F2 (N)	τ (kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,02	7,35	0,25	140,20	149,30	133,63
2,00	00.00.02.00	2,00	20,04	14,70	0,35	137,20	152,90	133,91
3,00	00.00.03.00	3,01	30,08	22,07	0,41	132,60	159,80	134,97
4,00	00.00.04.00	4,00	40,04	29,37	0,47	136,00	154,40	134,05
5,00	00.00.05.00	5,00	50,01	36,69	0,51	134,00	157,20	134,42
6,00	00.00.06.00	6,01	60,07	44,07	0,55	130,50	160,40	134,28
7,00	00.00.07.00	7,00	70,04	51,38	0,59	138,10	152,50	134,14
8,00	00.00.08.00	8,01	80,08	58,75	0,62	129,30	160,10	133,59
9,00	00.00.09.00	9,00	90,04	66,05	0,65	126,90	162,90	133,77
10,00	00.00.10.00	10,00	100,00	73,36	0,69	130,20	160,10	134,00
11,00	00.00.11.00	11,00	110,04	80,72	0,70	128,10	161,40	133,63

La figure 3.28 montre les courbes contrainte-déplacement pour E5 à l'état non saturé.

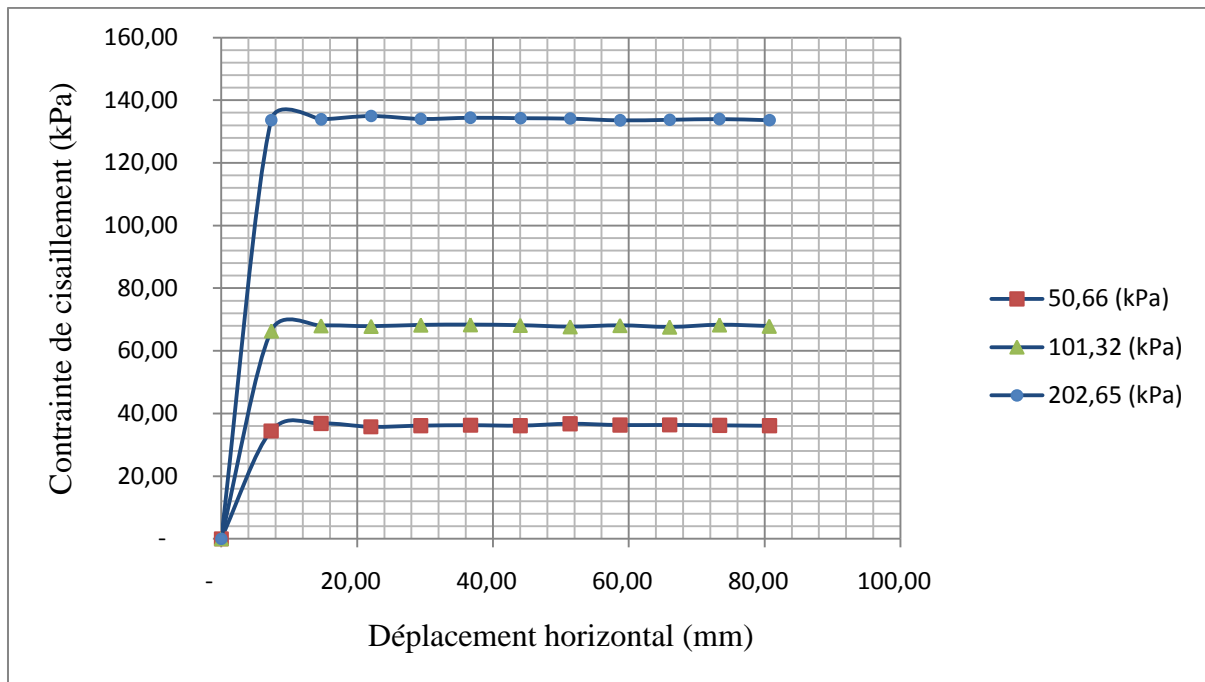


Figure 3.28 Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E5 (état non saturé)

Le tableau 3.44 résume l'ensemble des contraintes de cisaillement obtenus aux essais réalisés sur l'échantillon E5 (PC 20%) non saturé.

Tableau 3.44 Contraintes de cisaillement, E5 (état non saturé)

N°	σ (kPa)	τ Pic (kPa)	τ Résiduelle (kPa)
1	50,66	36,84	36,24
2	101,32	68,04	68,04
3	202,65	134,97	133,99

La figure 3.29 représente les enveloppes de rupture au pic et résiduelle pour les essais de E5 non saturé.

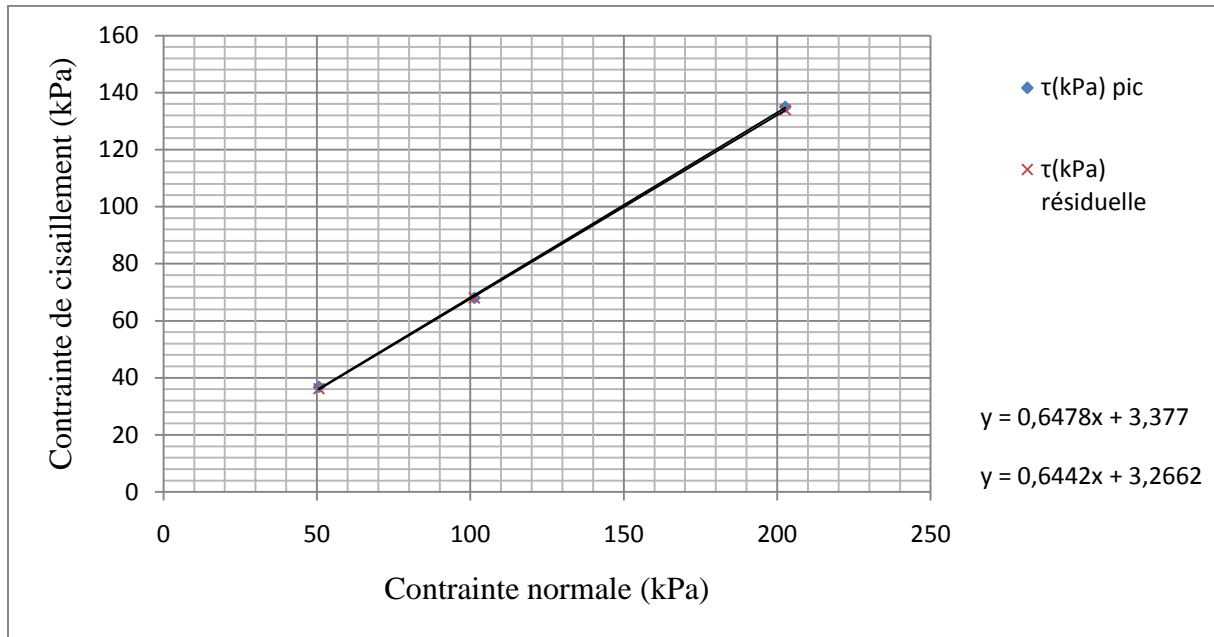


Figure 3.29 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E5 (état non saturé)

Le tableau 3.45 montre les valeurs finales de l'angle de frottement et la cohésion qui sont déterminés.

Tableau 3.45 Résultats de l'essai de cisaillement. E5 (état non saturé)

φ'_p (°)	c'_p (kPa)	φ'_r (°)	c'_r (kPa)
32,94	3,37	32,79	3,26

➤ **Saturé**

Les résultats de cisaillement sont pour trois spécimens du même échantillon. Les essais sont réalisés dans les mêmes conditions (saturé).

• **Essai 01**

Après la mise en place de l'échantillon sur l'appareil de cisaillement, l'essai a fourni les résultats montrés sous forme de tableau 3.46, pour une contrainte normale appliquée de 50,66 (kPa).

Tableau 3.46 Résultats de l'essai 01 de cisaillement, E5/A (état saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)

-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,00	7,34	0,09	37,50	37,80	34,76
2,00	00.00.02.00	2,00	20,04	14,70	0,17	30,70	42,50	33,79
3,00	00.00.03.00	3,00	30,04	22,04	0,26	32,10	40,50	33,51
4,00	00.00.04.00	4,00	40,03	29,37	0,32	30,70	42,50	33,79
5,00	00.00.05.00	5,00	50,04	36,71	0,38	35,80	36,00	33,14
6,00	00.00.06.00	6,01	60,05	44,05	0,42	32,10	39,50	33,05
7,00	00.00.07.00	7,00	70,00	51,35	0,47	30,80	41,60	33,42
8,00	00.00.08.00	8,00	80,00	58,69	0,51	26,50	45,20	33,10
9,00	00.00.09.00	9,00	90,01	66,03	0,55	36,50	35,00	33,00
10,00	00.00.10.00	10,00	100,01	73,37	0,57	25,50	46,30	33,14
11,00	00.00.11.00	11,00	110,01	80,70	0,62	31,00	40,60	33,05

• Essai 02

Dans le deuxième essai, la contrainte normale appliquée est de 101,32 (kPa), Le tableau 3.47 montre les résultats de cisaillement de cet essai.

Tableau 3.47 Résultats de l'essai 02 de cisaillement. E5/B (état saturé)

N°	Temps	Temps	Rotation	dh	dv	F1	F2	τ
Lecture	(dd:hh:mm:ss)	(mn)	(°)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,01	7,343	0,21	71,10	71,00	65,59
2,00	00.00.02.00	2,00	20,03	14,69	0,28	74,50	73,10	68,13
3,00	00.00.03.00	3,00	30,01	22,01	0,33	70,70	76,80	68,09
4,00	00.00.04.00	4,00	40,03	29,37	0,37	74,80	72,60	68,04
5,00	00.00.05.00	5,00	50,00	36,68	0,39	72,00	74,90	67,81
6,00	00.00.06.00	6,00	60,02	44,03	0,42	72,60	75,10	68,18
7,00	00.00.07.00	7,00	70,04	51,38	0,44	77,50	70,60	68,36
8,00	00.00.08.00	8,00	80,01	58,69	0,46	72,30	75,10	68,04
9,00	00.00.09.00	9,00	90,03	66,04	0,48	70,40	75,10	67,16
10,00	00.00.10.00	10,01	100,05	73,39	0,50	73,80	72,60	67,58
11,00	00.00.11.00	11,00	110,04	80,72	0,53	77,40	69,80	67,95

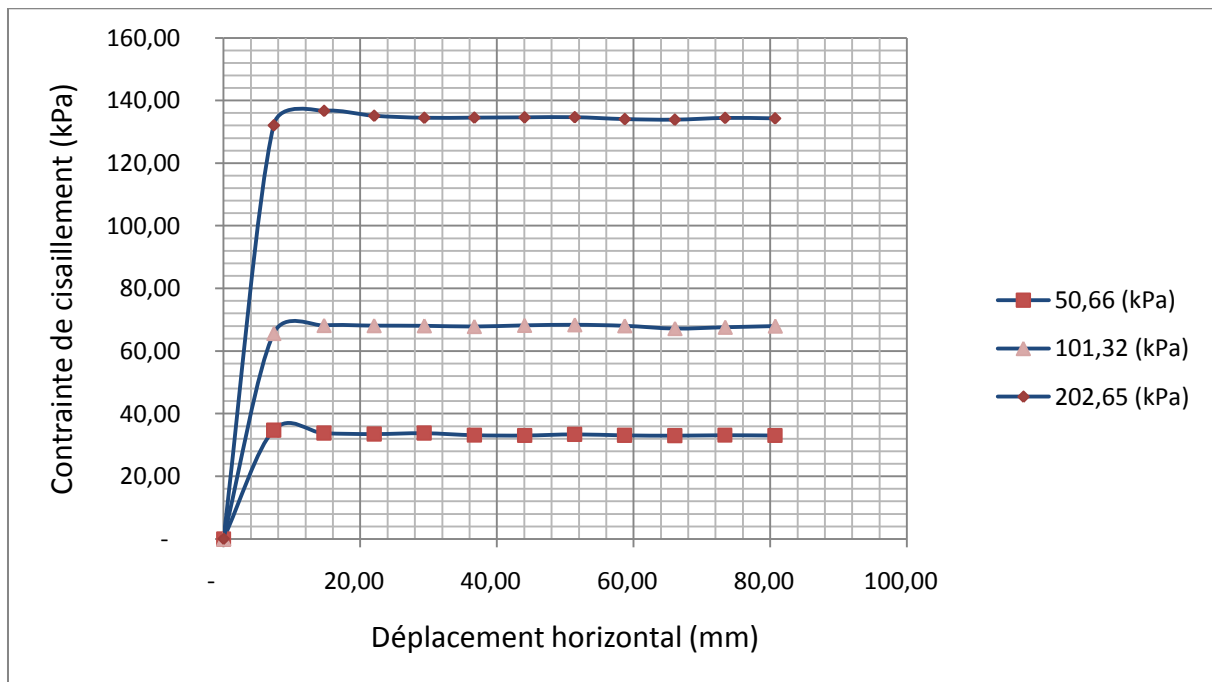
• Essai 03

Dans le troisième essai la contrainte normale appliquée est de 202,65 (kPa), Le tableau 3.48 montre les résultats de cisaillement de l'essai 03.

Tableau 3.48 Résultats de l'essai 03 de cisaillement, E5/C (Etat saturé)

N°	Temps (dd:hh:mm:ss)	Temps (mn)	Rotation (°)	dh (mm)	dv (mm)	F1 (N)	F2 (N)	τ (kPa)
-	00.00.00.00	-	-	-	-	-	-	-
1,00	00.00.01.00	1,00	10,01	7,34	0,24	143,80	142,30	132,06
2,00	00.00.02.00	2,01	20,05	14,71	0,31	148,50	147,60	136,68
3,00	00.00.03.00	3,00	30,04	22,04	0,35	150,90	141,80	135,11
4,00	00.00.04.00	4,00	40,04	29,37	0,38	150,50	140,80	134,46
5,00	00.00.05.00	5,00	50,02	36,69	0,42	150,60	140,80	134,51
6,00	00.00.06.00	6,00	60,04	44,04	0,44	150,90	140,70	134,60
7,00	00.00.07.00	7,01	70,05	51,39	0,46	150,90	140,80	134,65
8,00	00.00.08.00	8,00	80,04	58,72	0,49	149,60	140,80	134,05
9,00	00.00.09.00	9,00	90,02	66,04	0,51	149,20	140,80	133,86
10,00	00.00.10.00	10,01	100,05	73,39	0,52	150,90	140,30	134,42
11,00	00.00.11.00	11,00	110,02	80,71	0,53	150,10	140,80	134,28

La figure 3.30 montre les courbes contrainte-déplacement pour E5 à l'état saturé.

**Figure 3.30** Courbes contrainte de cisaillement-Déplacement, E5 (Etat saturé)

Le tableau 3.49 résume l'ensemble des contraintes de cisaillement obtenus aux essais réalisés sur l'échantillon E5 (PC 20%) saturé.

Tableau 3.49 Contraintes de cisaillement, E5 (Etat saturé)

N°	σ (kPa)	τ Pic (kPa)	τ Résiduelle (kPa)
1	50,66	34,76	33,30
2	101,32	68,13	67,91
3	202,65	136,68	134,36

La figure 3.31 représente les enveloppes de rupture au pic et résiduelle pour les essais de E5 saturé.

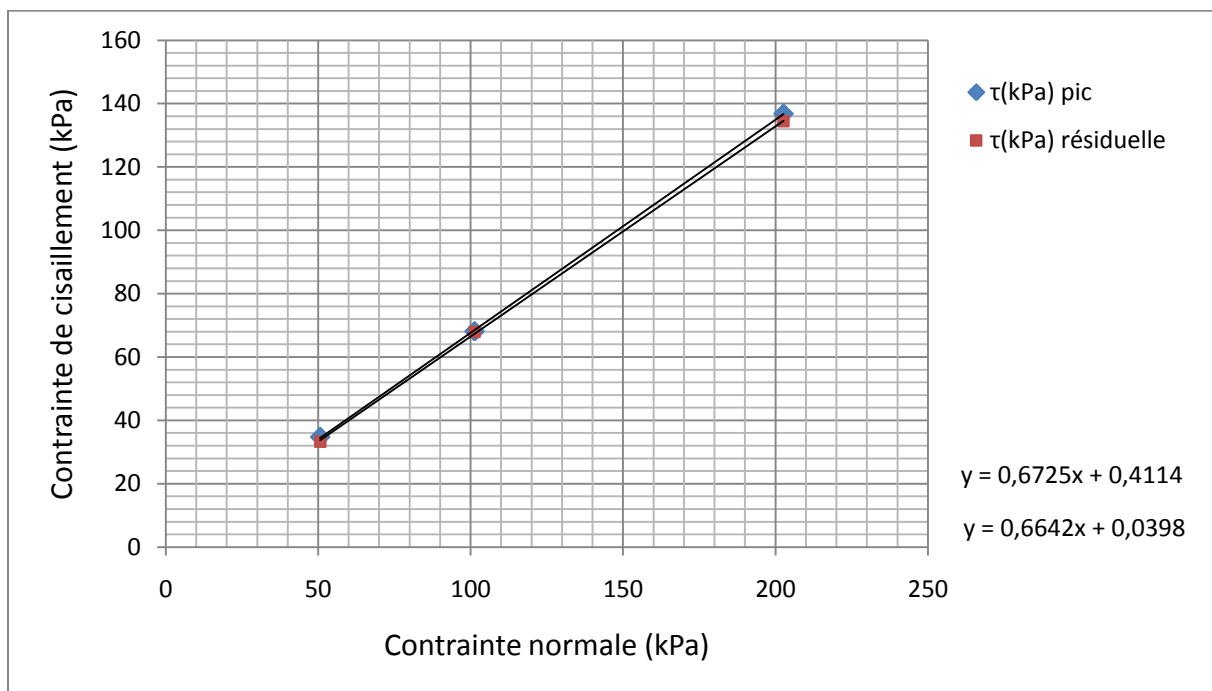


Figure 3.31 Enveloppes de rupture au pic et résiduelle, E5 (état saturé)

Le tableau 3.50 montre les valeurs finales de l'angle de frottement et la cohésion qui sont déterminées.

Tableau 3.50 Résultats de l'essai de cisaillement, E5 (état saturé)

ϕ'_p (°)	c'_p (kPa)	ϕ'_r (°)	c'_r (kPa)
33,92	0,41	33,60	0,04

3.8 Commentaires sur les résultats

Les résultats finaux des paramètres de cisaillement (angle de frottement interne et cohésion) soit au pic ou résiduel sont résumé sous forme des histogrammes suivants :

▪ **Premier histogramme** montre la variation de l'angle de frottement de pic et résiduel pour les cinq types d'échantillon étudiés à l'état non saturé comme le montre la figure 3.32.

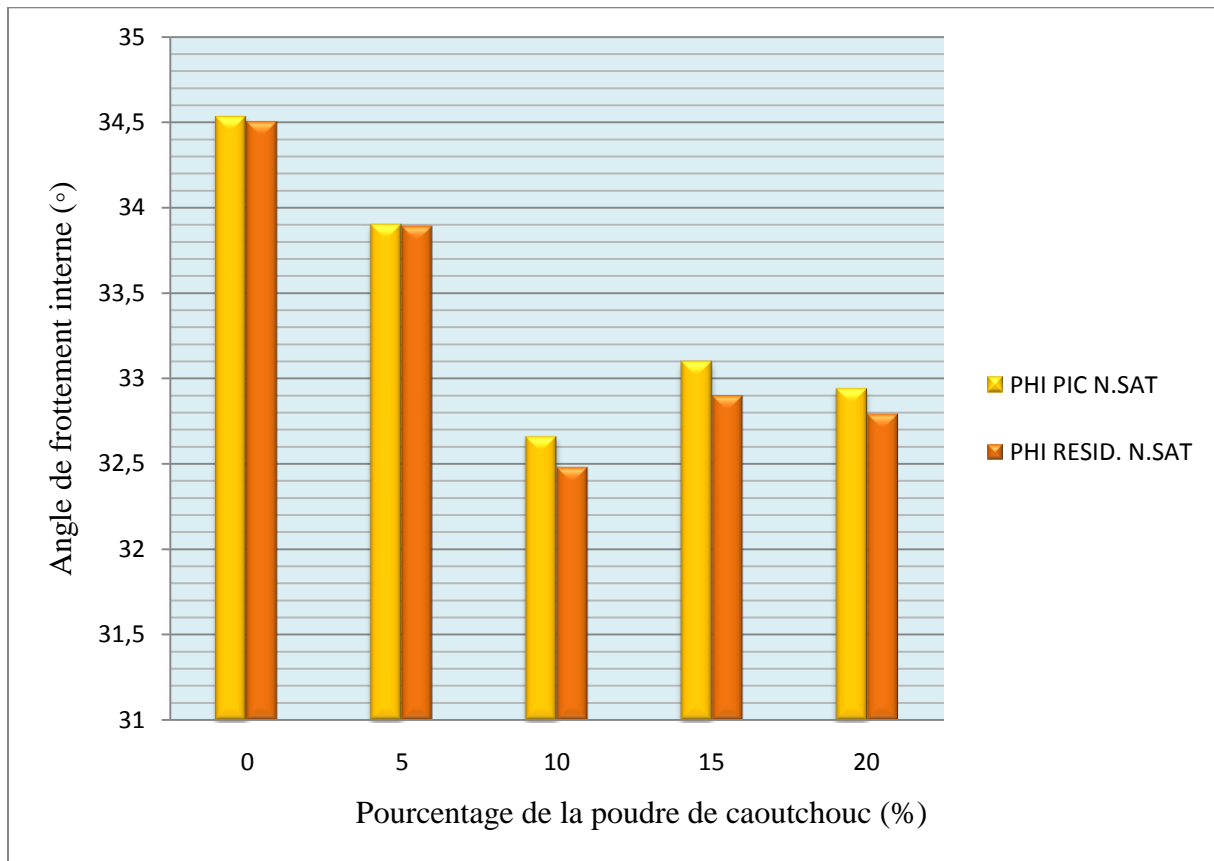


Figure 3.32 Variation de l'angle de frottement interne de pic et résiduel à l'état non saturé en fonction de pourcentage de la poudre de caoutchouc

Commentaire :

A l'état non saturé, l'angle de frottement au pic et résiduel sont pratiquement identiques pour les essais témoins et les essais avec 5% de poudre de caoutchouc. Par contre pour les pourcentages 10%, 15%, et 20% l'angle de frottement résiduel est relativement faible par rapport à celui au pic.

Il est à noter que l'ajout de la poudre de caoutchouc a légèrement diminuer l'angle de frottement au pic et résiduel.

▪ **Deuxième histogramme** montre la variation de la cohésion de pic et résiduelle pour les cinq types d'échantillon étudiés à l'état non saturé comme le montre la figure 3.33.

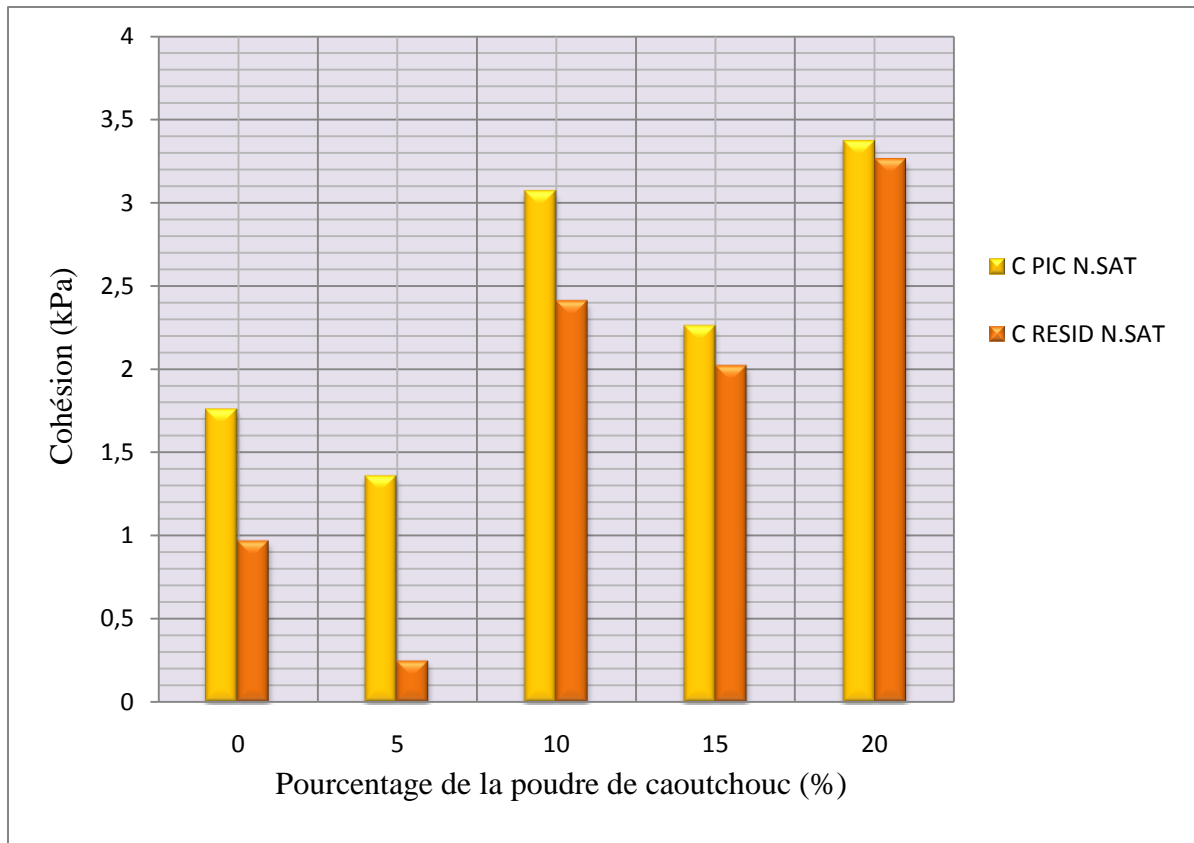


Figure 3.33 Cohésion de pic et résiduelle à l'état non saturé en fonction de la poudre de caoutchouc

Commentaire

A l'état non saturé, une faible diminution de la cohésion résiduelle par rapport à la cohésion de pic pour les essais témoins, les essais de 5% et 10% de poudre de caoutchouc.

La cohésion résiduelle décroît légèrement pour les essais de 15% et 20% de poudre de caoutchouc par rapport à la cohésion de pic.

L'ajout de poudre de caoutchouc pour les pourcentages 10%, 15% et 20 % a nettement amélioré la cohésion de pic et résiduelle.

Au contraire l'ajout de 5% de poudre a faiblement diminué la cohésion de pic et a relativement diminué la cohésion résiduelle.

▪ **Troisième histogramme** montre la variation de l'angle de frottement de pic et résiduelle pour les cinq types d'échantillon étudiés à l'état saturé comme le montre la figure 3.34.

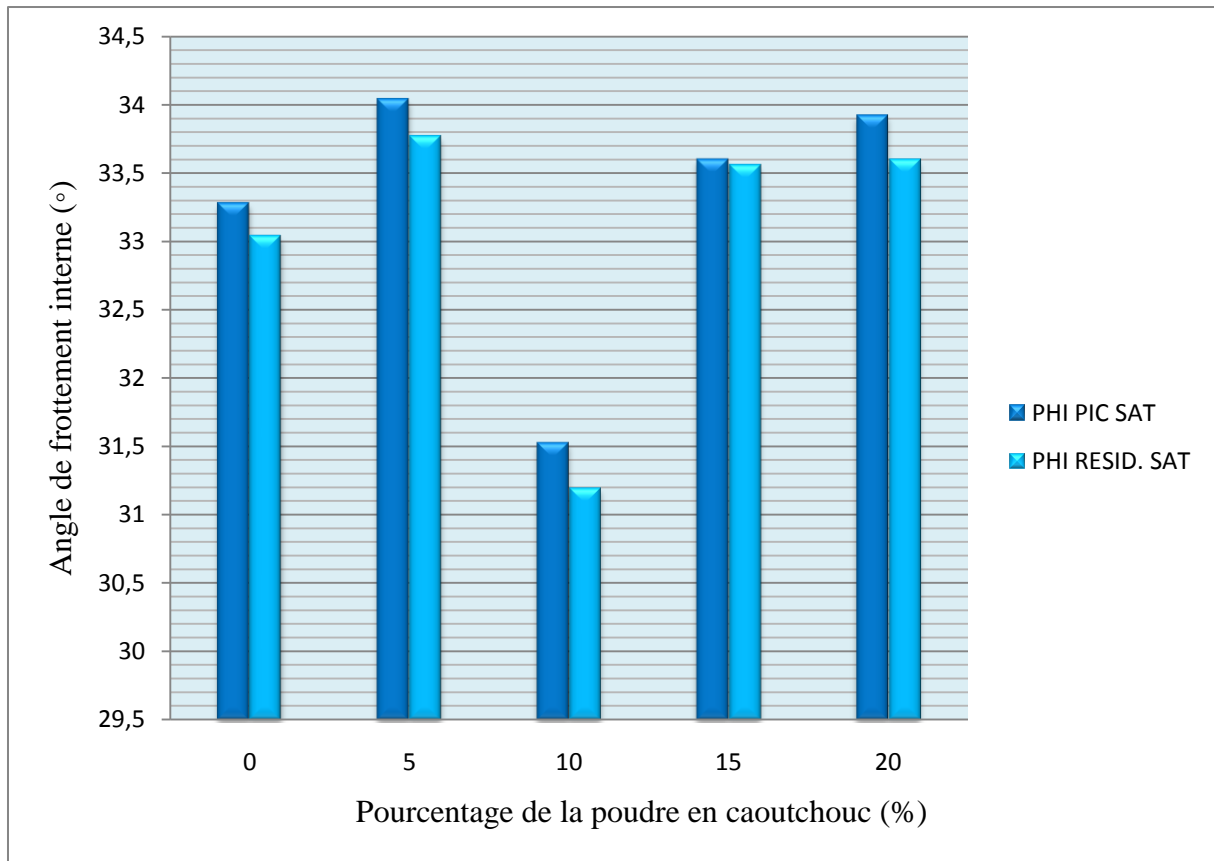


Figure 3.34 L'angle de frottement interne de pic et résiduel en fonction de la poudre de caoutchouc à l'état saturé

Commentaire :

A l'état saturé, l'angle de frottement résiduel diminue pour les essais témoins, essais de 5%, 10% et 20% de poudre de caoutchouc par rapport à l'angle de frottement de pic, mais il est identique avec l'angle de frottement de pic pour les essais de 15% de poudre de caoutchouc.

Il est à noter que la variation de l'angle de frottement au pic et résiduel est aléatoire concernant les différents pourcentages de poudre de caoutchouc utilisés.

▪ **Quatrième histogramme** montre la variation de la cohésion de pic et résiduelle pour les cinq types d'échantillon étudiés à l'état saturé comme le montre la figure 3.35.

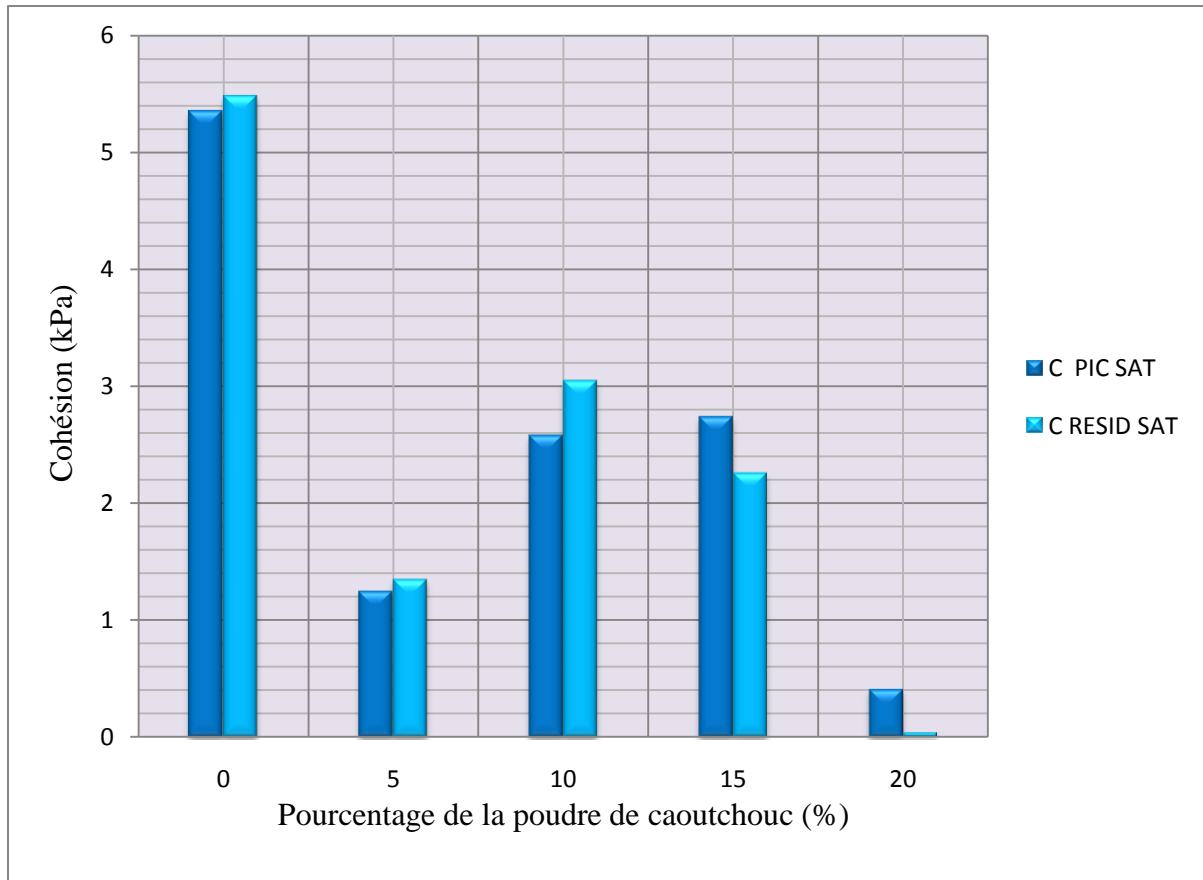


Figure 3.35 Cohésion de pic et résiduelle en fonction de la poudre de caoutchouc à l'état saturé

Commentaire :

A l'état saturé, la différence entre la cohésion de pic et résiduelle est très faible pour les différents pourcentages de poudre de caoutchouc, à maximum de cohésion est atteint pour un pourcentage de 10% de celle-ci.

▪ Synthèse

La figure 3.36 montre que la saturation a nettement diminué l'angle de frottement pour les essais témoins et les essais à 10% de poudre de caoutchouc.

Pour les essais à 5% de poudre de caoutchouc, La saturation a un effet relativement négligeable sur la variation de l'angle de frottement.

Par contre, pour les essais de 15% et 20% de poudre de caoutchouc la saturation a un effet positif sur l'angle de frottement.

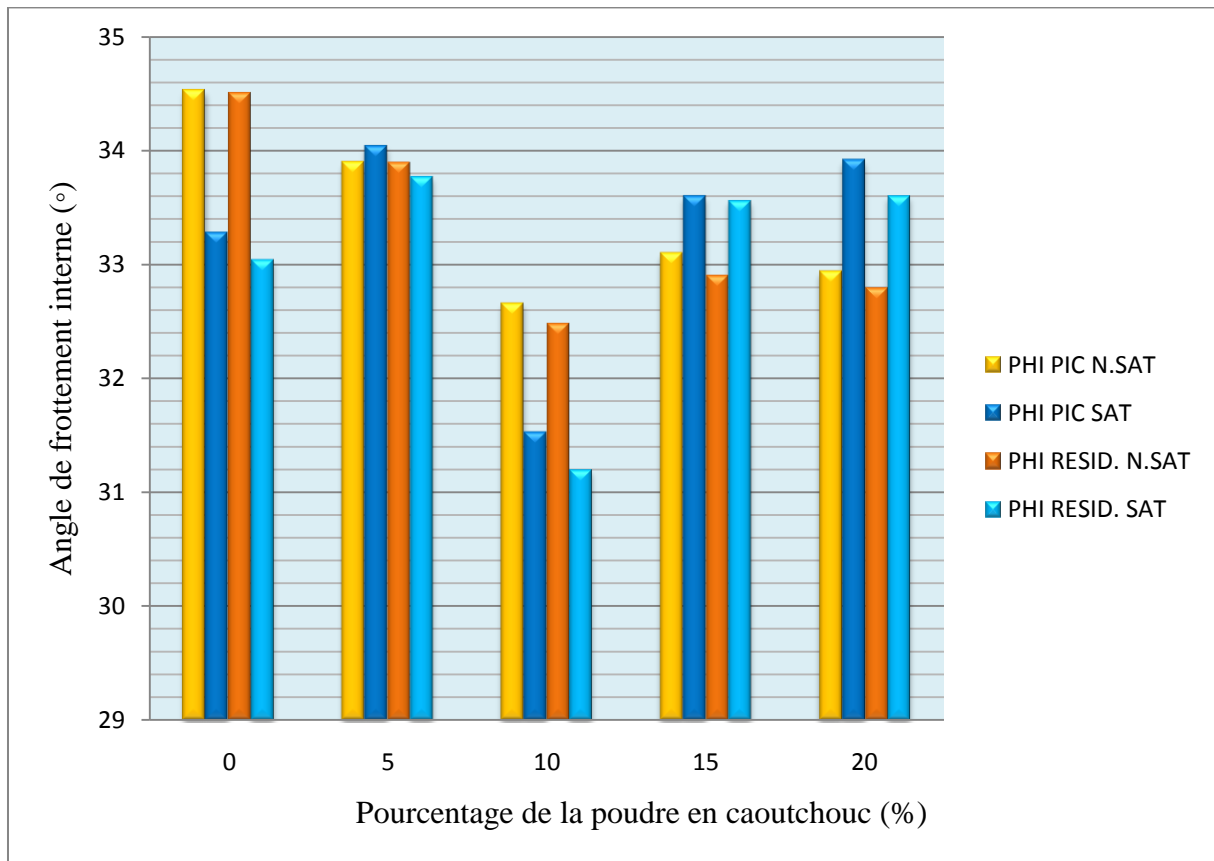


Figure 3.36 Angle de frottement interne de pic et résiduel en fonction de pourcentage de caoutchouc à l'état saturé et non saturé

La figure 3.37 montre que la saturation a un effet positif sur la cohésion pour les essais témoin. Pour les pourcentages de caoutchouc de 5%, 10% et 15% la saturation a un effet relativement négligeable sur la variation de la cohésion. Par contre la saturation a nettement diminué la cohésion avec le pourcentage de poudre de caoutchouc de 20%.

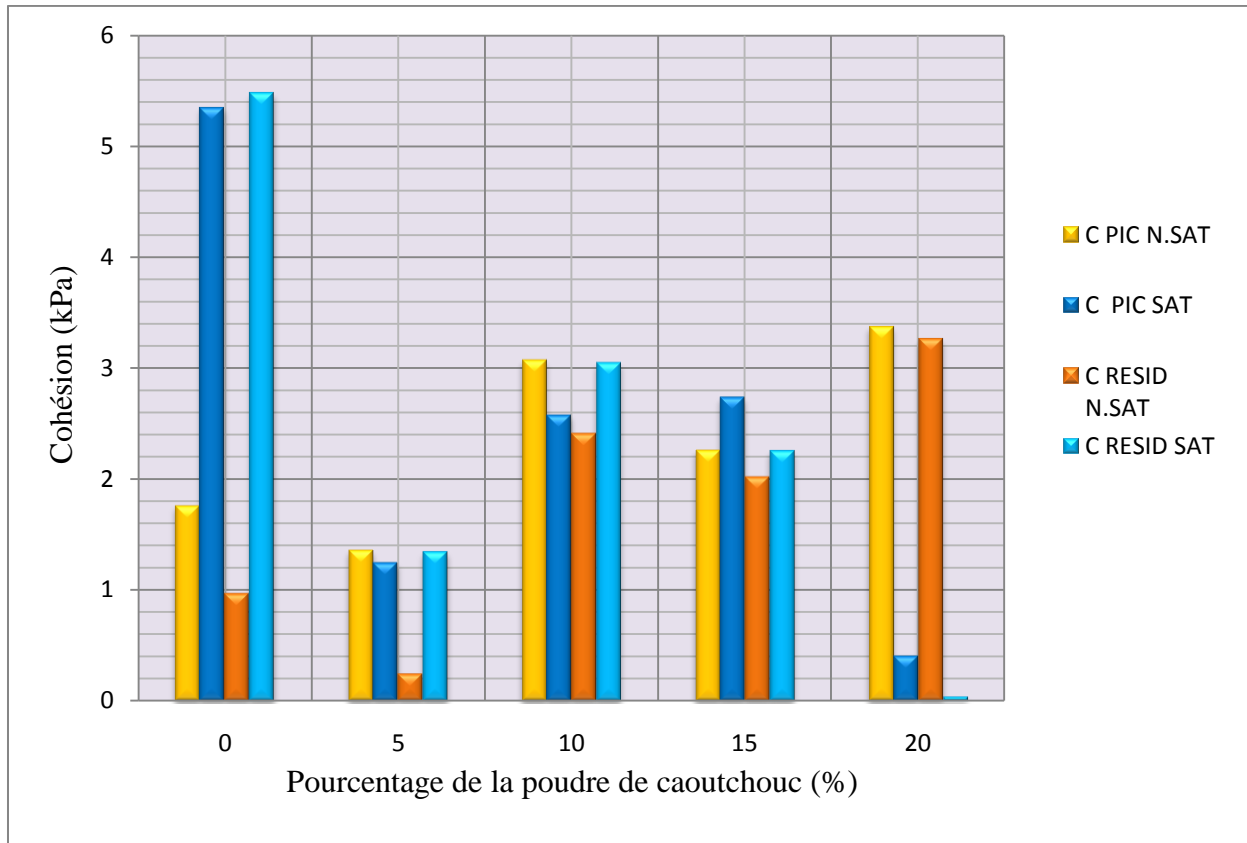


Figure 3.37 Cohésion de pic et résiduelle en fonction de pourcentage de caoutchouc à l'état saturé et non saturé

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead disponible au niveau du laboratoire (LGCH). Des essais de cisaillement ont été réalisés sur 5 types d'échantillon témoin, PC 5%, PC 10%, PC 15%, et PC 20%. Nous avons pu déterminer les paramètres de cisaillement à l'état saturé et l'état non saturé, (Tableau 3.51 et tableau 3.52)

Tableau 3.51 Paramètres de résistance au cisaillement de pic et résiduels à l'état non saturé.

Echantillons	φ'_p (°)	c'_p (kPa)	φ'_r (°)	c'_r (kPa)
1-Témoin	34,53	1,76	34,5	0,97
2- PC 5%	33,9	1,36	33,89	0,25
3-PC 10%	32,66	3,07	32,48	2,41
4-PC 15%	33,1	2,26	32,9	2,02
5- PC 20%	32,94	3,37	32,79	3,26

Etat non saturé

Tableau 3.52 Paramètres de résistance au cisaillement de pic et résiduels à l'état saturé.

Echantillons	ϕ'_p (°)	c'_p (kPa)	ϕ'_r (°)	c'_r (kPa)
1-Témoin	33,28	5,35	33,04	5,48
2- PC 5%	34,04	1,25	33,77	1,35
3-PC 10%	31,53	2,58	31,2	3,05
4-PC 15%	33,6	2,74	33,56	2,26
5- PC 20%	33,92	0,41	33,6	0,04

Etat saturé

Conclusion générale et perspectives

L'étude visée d'être réalisée au début de ce mémoire est achevée avec succès.

Conclusion générale

Les résultats déduits des essais réalisés au laboratoire de recherche (LGCH) de notre université nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ A l'état non saturé
 - L'ajout de la poudre de caoutchouc a légèrement diminué l'angle de frottement au pic et résiduel.
 - L'ajout de 10%,15% et 20 % de la poudre de caoutchouc a nettement amélioré la cohésion au pic et résiduelle.
- ✓ A l'état saturé
 - La variation de l'angle de frottement au pic et résiduel est aléatoire concernant les différents teneurs en poudre de caoutchouc utilisée.
 - La différence entre la cohésion au pic et résiduelle est très faible pour les différents teneurs en poudre de caoutchouc.

Finalement, pour les essais de 15% et 20% de poudre de caoutchouc, la saturation a un effet positif sur l'angle de frottement, mais elle a un effet relativement négligeable sur la variation de la cohésion pour les teneurs en caoutchouc de 5%, 10% et 15%.

Perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire de Master a éclairé le chemin de futures recherches telles que :

- Détermination des paramètres de cisaillement du même sol utilisé dans notre étude mais avec l'ajout du ciment.
- Détermination des paramètres de cisaillement, pour des sols fins mélangés avec du caoutchouc granulé.
- Détermination du potentiel d'affaissement sur le sol utilisé dans notre étude.
- Modélisation de l'essai de cisaillement annulaire.

Articles et thèses

1- Thèse doctorat ; contribution à l'étude de la résistance au cisaillement à l'interface sol cohérent matériau solide dans le domaine des grands déplacements. Fraid Hammoud

Tiedemann, B. (1937). Uber die schbfestigkeit bindiger Boden. Bautechnik 15, N° 30 & 33, 400-403 & 433-435.

Haefeli, R. (1938). Mechanische Eigenschaften von Lockergestein. Schweiz; Bauzg 111, 299-303.

Haefeli, R. (1951). Investigation and measurement of the shear strength of saturated cohesive soils. Géotechnique 2, N° 3, 186 -207.

Skempton, A. W. (1964). Long term stability of clay. Géotechnique 14, N° 2, 77-108.

Bjerrum L. (1967). Progressive failure in slope of overconsolidated clay and clay shale. JI Am. Soc. Civ. Engrs. 65, SM5, Part 1, 1-49.

La Gatta, D. P. (1970). Residual strength of clays and clay shales by rotation shear tests. Harvard Soils Mechanics series, N°86, Cambridge, Massachussets, Université de Harvard (USA).

Skempton, A. W & Petly, D. J. (1967). The strength along structural discontinuities in stiff clays. Pro. Geotechnical Conf., Oslo 2, NGI, 29-46.

N. R. Morgenstern, and J. S. Tchalenko (1967). Microscopic Structures in Kaolin Subjected to Direct Shear. Vol 17(4), pp. 309–328

Kanji, M. A. & Wolle, C. M.(1977). Residual strength : new testing and microstructure. Comptes rendus 9^{ème} con. int. méc. sols, Tokyo 1,153-154.

Lupini. J. F. (1981). The residual strength of soils. Thèse de PhD. Université de Londres (Angleterre).

Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory A. W. Skempton
VOL 35(1), pp. 3–18

Mesri, G. & Cepeda-Diaz, A. F. (1986). Residual shear strength of clays and clay shales.
Géotechnique 36, N°2, 269-274.

HVORSLEV, M. J. (1939). *Torsion shear tests and their place in the determination of the shearing resistance of soils*. Proceedings of ASTM symposium on shear testings of soils, Vol. 39, p. 999-1022.

SADREKARIMI, A. et OLSON, S. M. (2009). *A new ring shear device to measure the large displacement shearing behavior of sands*. Geotechnical Testing Journal, Vol. 32, No. 3, 12 p.

LAGATTA, D. P. (1970). *Residual strength of clays and clay-shales by rotation shear tests*. Harvard Soil Mechanics Series, No. 86, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 204 p.

BISHOP, A. W., GREEN, G. E., GARGA, V. K., ANDRESEN, A., et BROWN, J. D. (1971). *A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength*. Géotechnique, Vol. 21, No. 4, p. 273-328.

BROMHEAD, E. N. (1979). *A simple ring shear apparatus*. Ground Engineering, Vol. 12, No. 5, p. 40-44.

BOSDET, B. W. (1980). *The UBC ring shear device*. Mémoire de maîtrise, University of British Columbia, Vancouver, Colombie-Britannique, 110 p.

Meehan, C. L., Brandon, T. L., and Duncan, J., "Measuring Drained Residual Strengths in the Bromhead Ring Shear," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 30, No. 6, 2007, pp. 466-47

Kenney, T. C. (1965). Direct shear tests on samples of Pepper and Bearpaw shales. Rapport interne F24-13.01, NGI, Oslo, Norway.

Ramiah, B. K., Dayalou, N. K & Purushothamaraj, P. (1970). Influence of chemicals on residual strength of silty clay. *Soils and foundations* 10, 25-36.

Townsend, F. C. & Gilbert, P .A. (1973). Tests to measure residual strengths of some clay shales. *Géotechnique* 23, N° 2, 261-271.

Townsend, F. C. & Gilbert, P .A. (1974). Engineering properties of clay shales, Report 2 : Residual strength and classification indexes of clay shales. Technical report S-71-6, Soils and pavement laboratory, US Army Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg (USA).

Townsend, F. C. & Gilbert, P .A. (1976). Effects of specimen type on the residual strength of clays and clayshales. STP 599, ASTM, Philadelphia (USA), 43-65.

Petly, D. J. (1966). The shear strength of soils at large strains. Thèse de PhD. Université de Londres (Angleterre).

Garga, V. K. (1970). Shear strength under large strains and the effect of sample size on the consolidation of fissured clay. Thèse de PhD, Université de Londres (Angleterre).

Cottechia, V. & Federico, A. (1980). On the dependancy of drained residual shear strength on normal effective stress. Proc. 14th Ital. Geotech. Conf., Florence, Special session on progress on the knowledge of slope movements in Italy.

Privett, K. D. (1980). The engineering geology slopes in the south costwolds. Thèse de PhD. Université de Bristol (Angleterre).

SUZUKI, M., TSUZUKI, S. et YAMAMOTO, T. (2005). *Phsysical and chemical index proprieties of residual strength of various soils*. Memoir of the Faculty of Engineering of Yamaguchi University, Vol. 54, No. 1, 11 p.

Site internet :

- ✓ http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap9/cas-simples.html
- ✓ <http://slidegur.com/doc/4621760/c216>
- ✓ http://www.geomeca.fr/essais-etude-de-sol_p3978.htm

Courbes de consolidation

La consolidation est l'étape avant cisaillement. L'essai est réalisé sur des échantillons toriques placés dans le conteneur de l'échantillon. On applique une contrainte normale et on mesure la déformation verticale de l'échantillon. Pour chaque charge appliquée il est nécessaire d'attendre une stabilisation (environ une heure dans l'état non saturé et deux heures dans l'état saturé) de celui-ci.

1. Témoin

1.1 Etat saturé

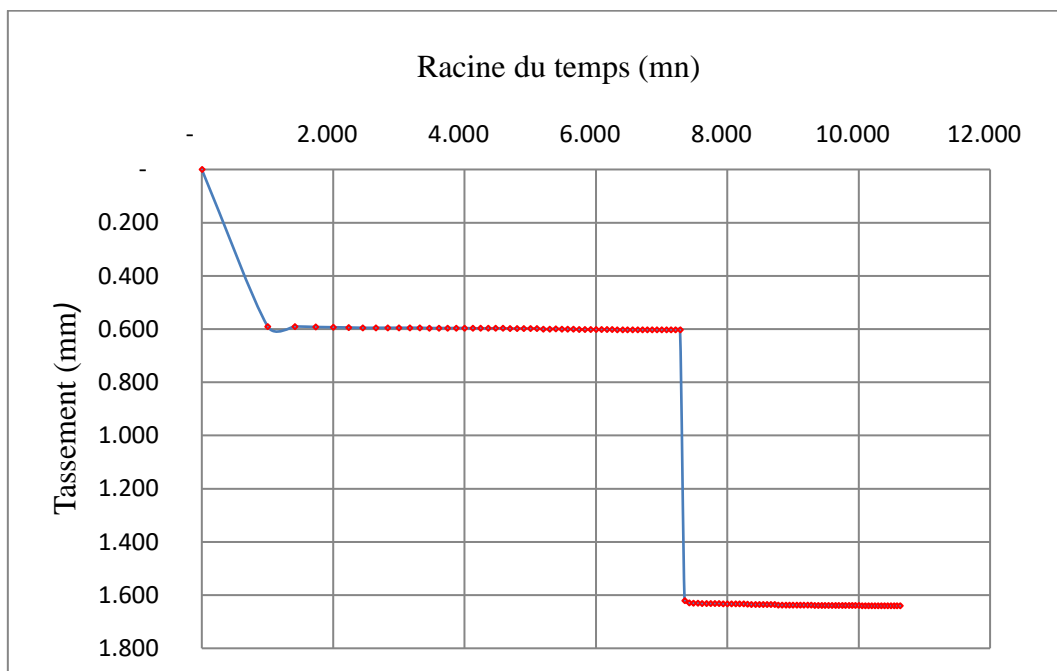


Figure A.1 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), témoin saturé

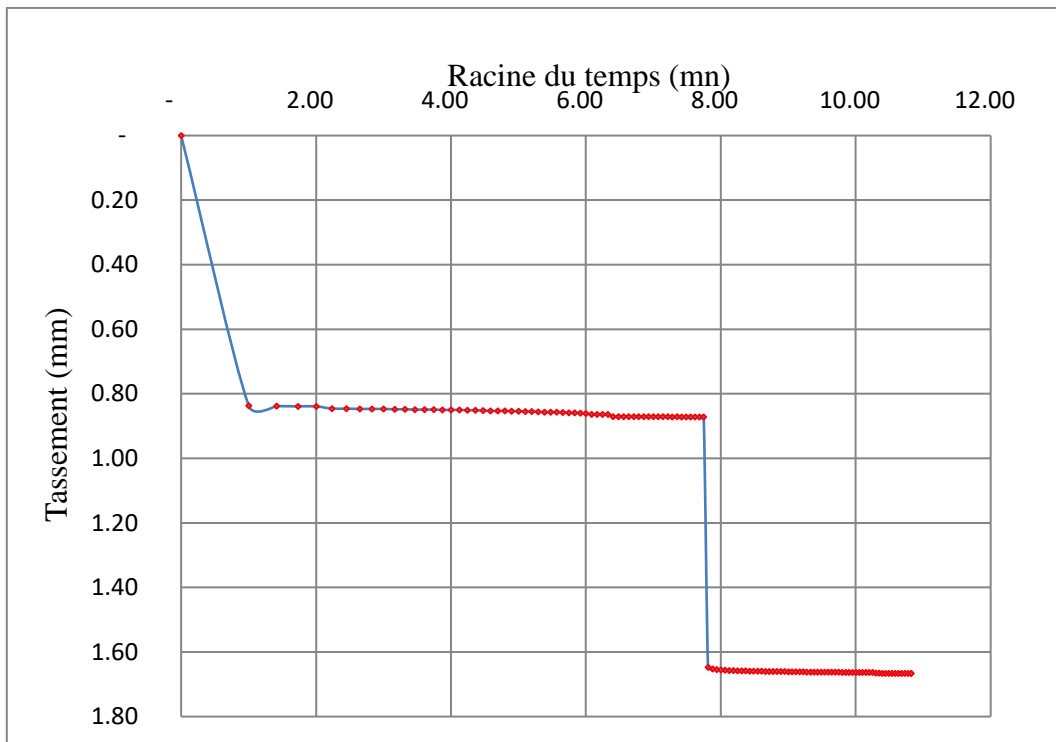


Figure A.2 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), témoin saturé

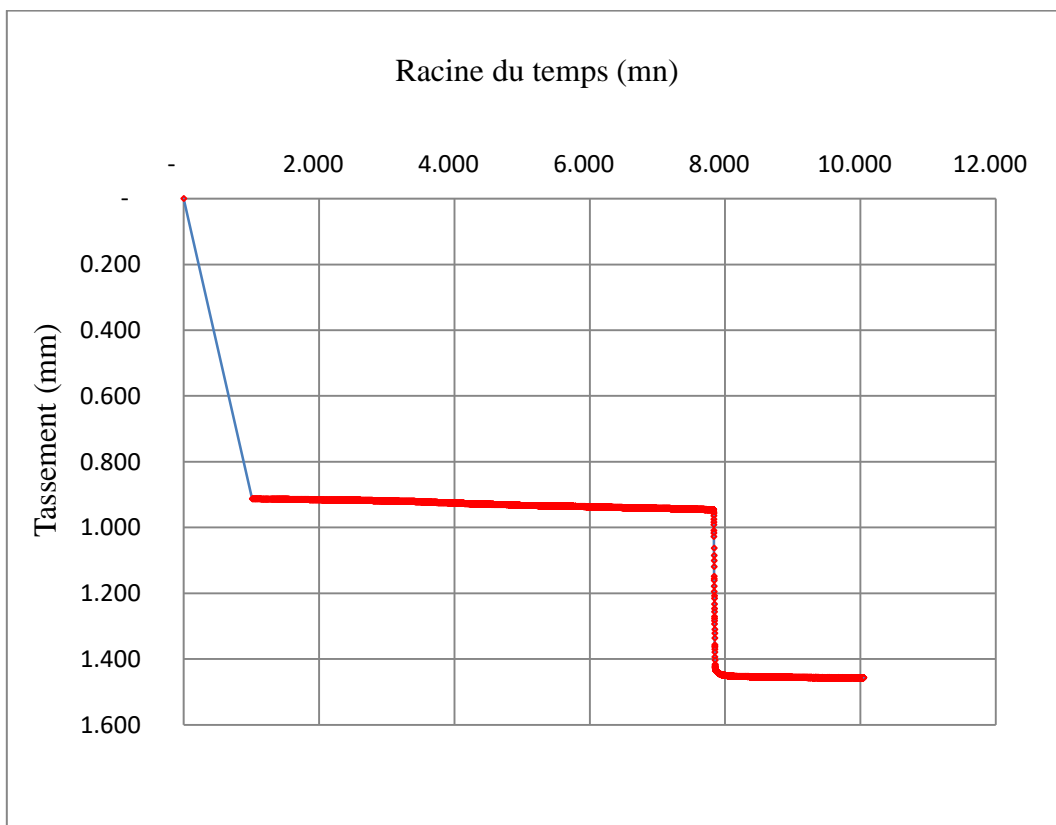


Figure A.3 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), témoin saturé

1.2 Etat non saturé

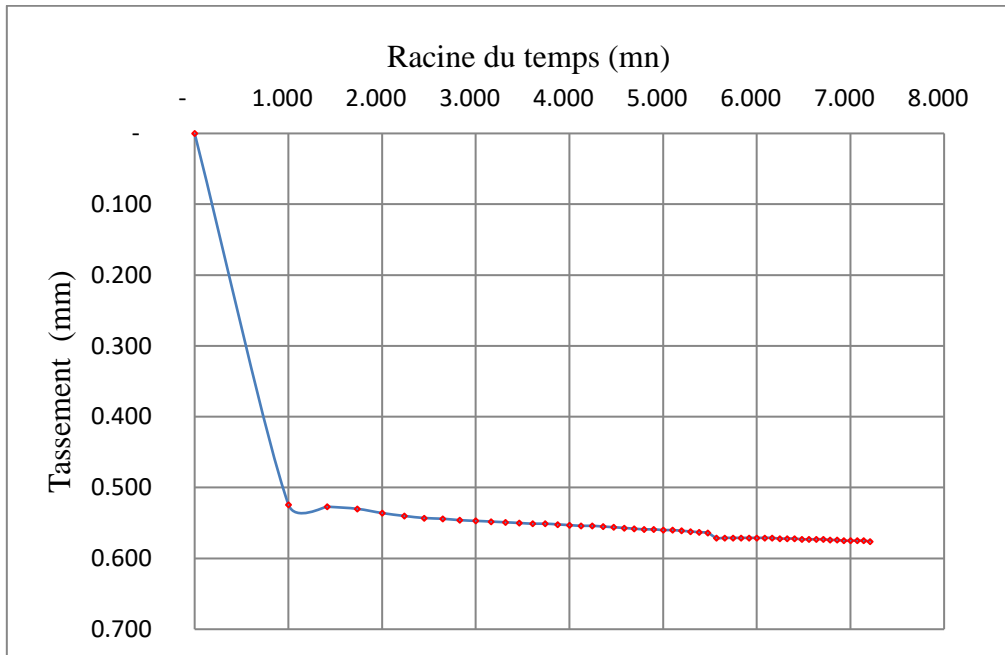


Figure A.4 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), témoin non saturé

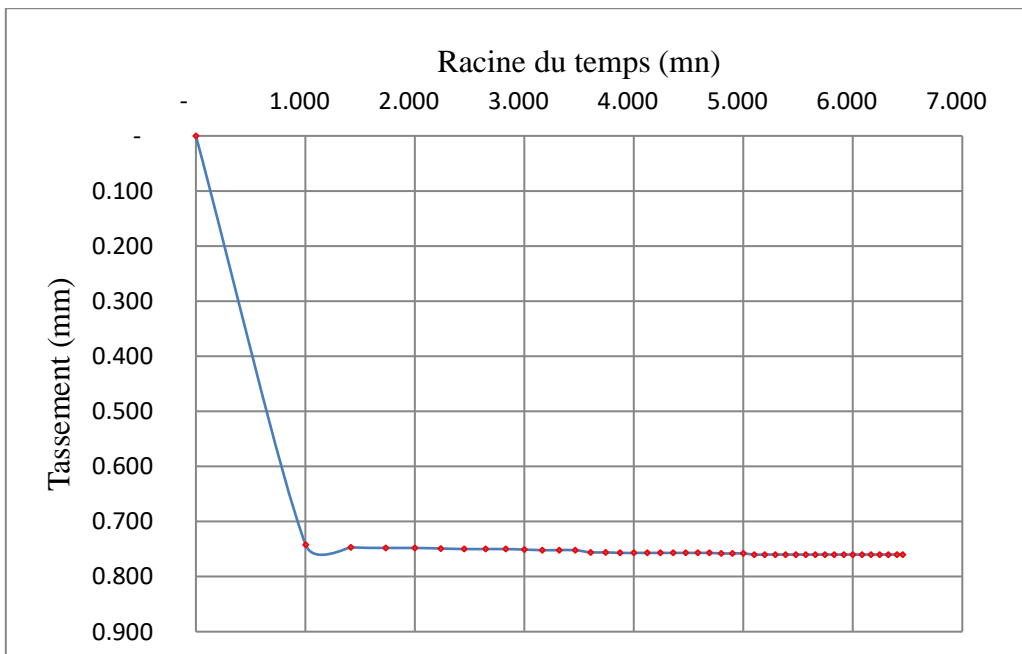


Figure A.5 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), témoin non saturé

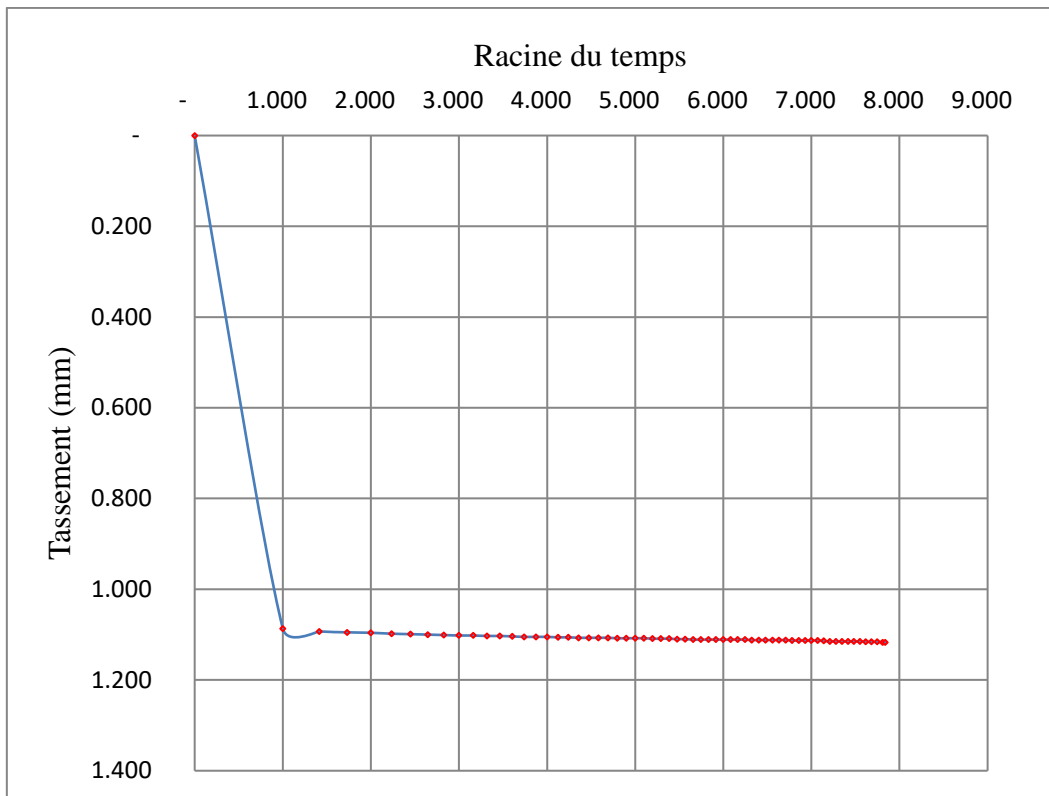


Figure A.6 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), témoin non saturé

2. E2

2.1 Etat saturé

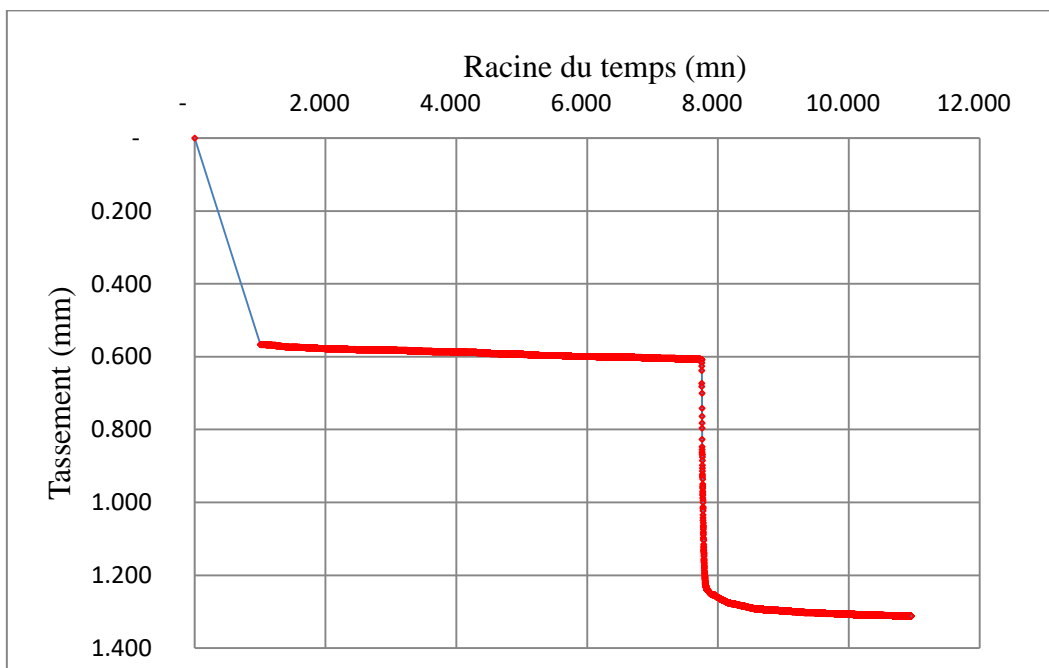


Figure A.7 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E2/A saturé

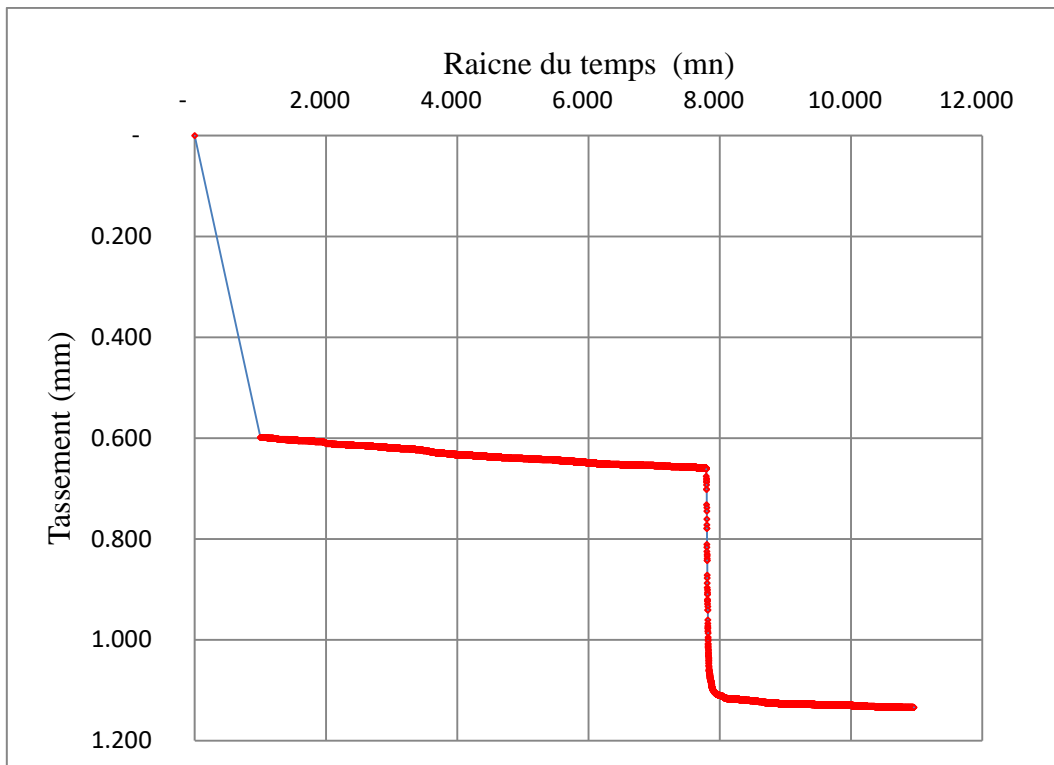


Figure A.8 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E2/B saturé

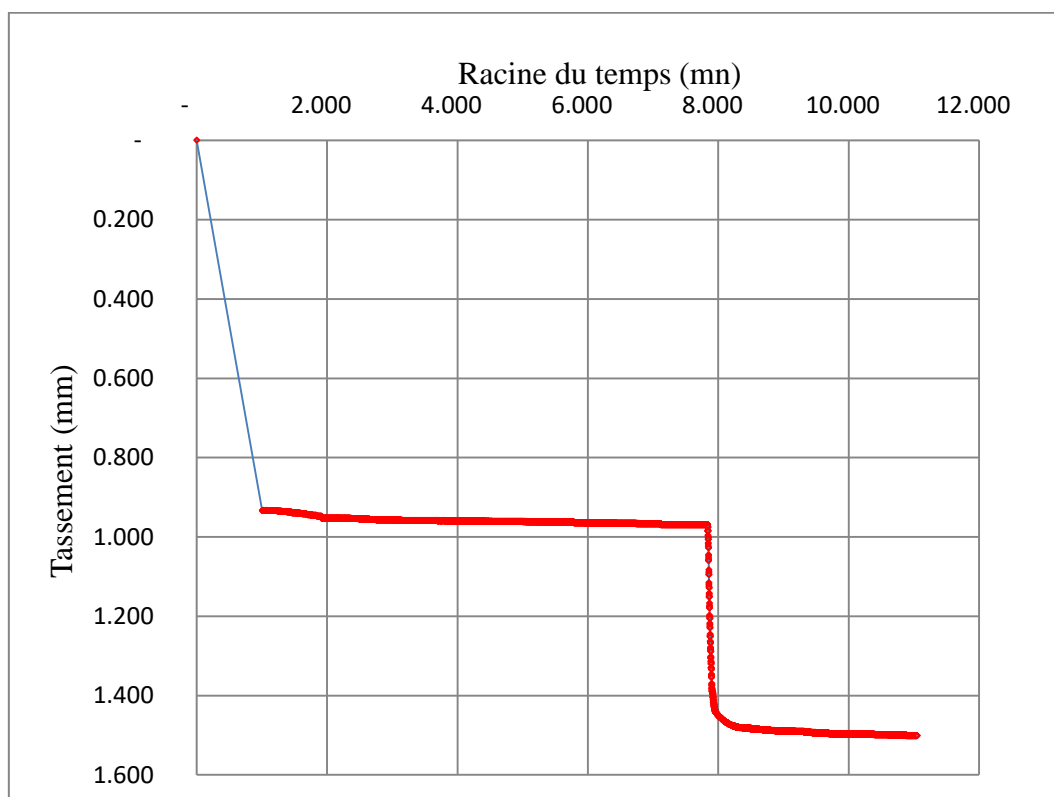


Figure A.9 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E2/C saturé

2.2 Etat sec

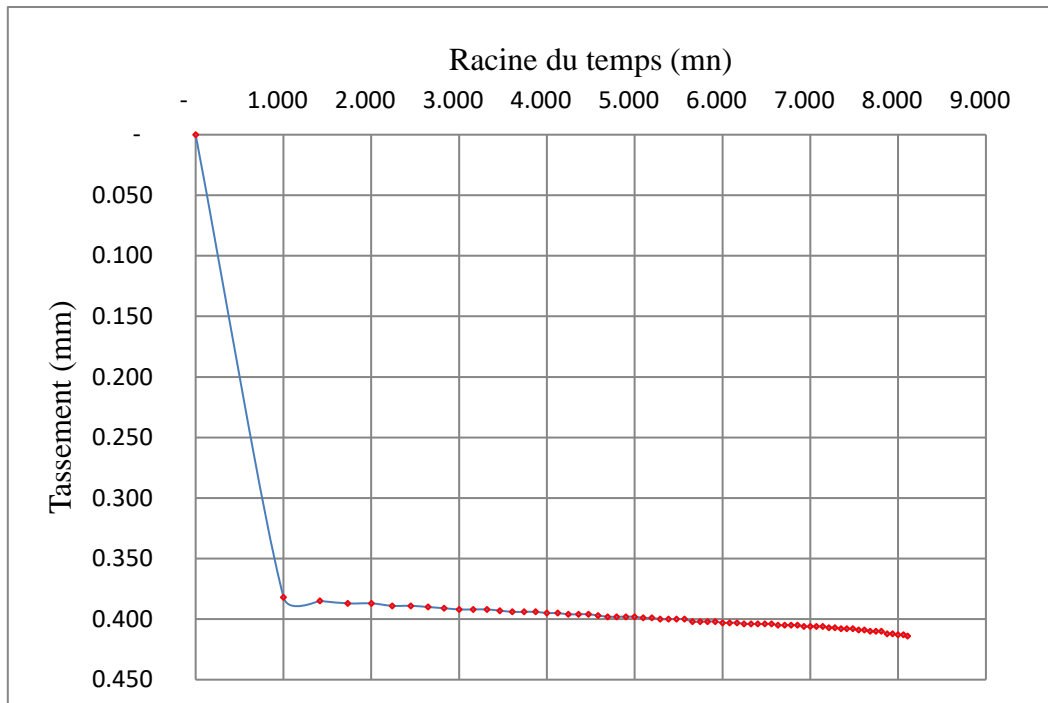


Figure A.10 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E2/A non saturé

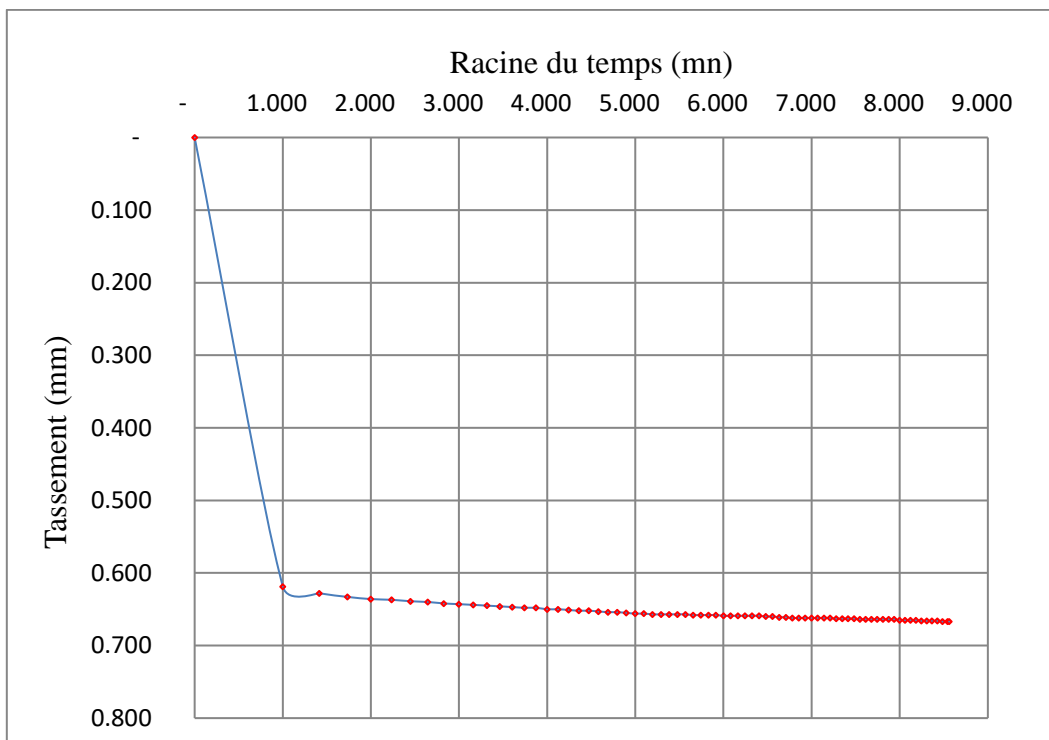


Figure A.11 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E2/B non saturé

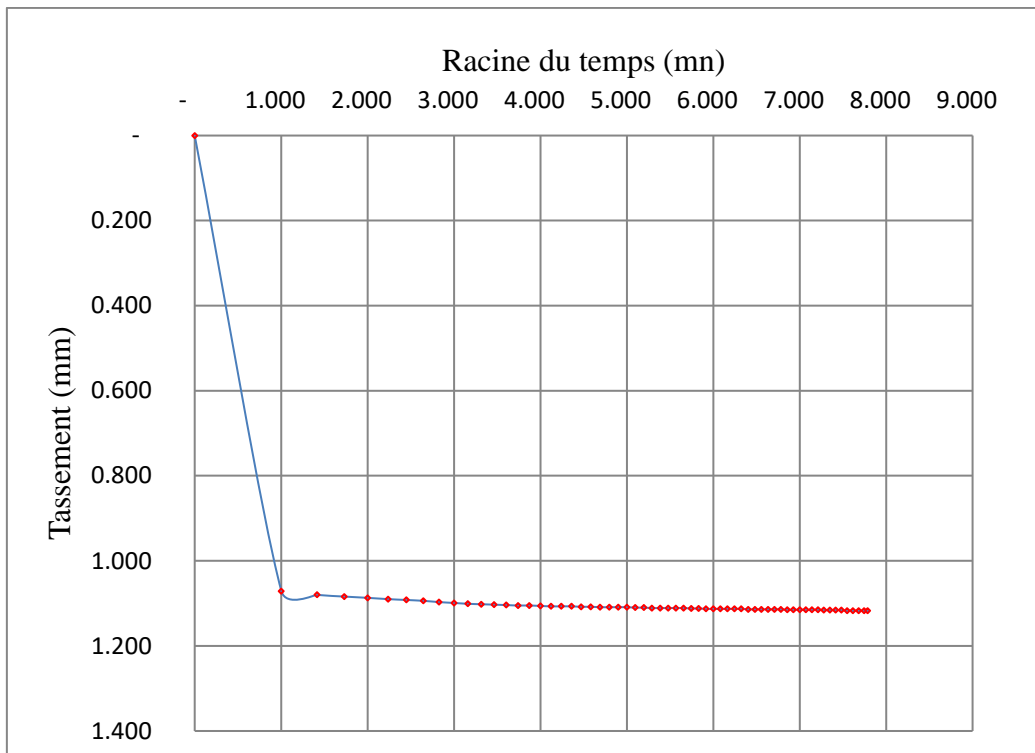


Figure A.12 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E2/C non saturé

3. E3

3.1 Etat saturé

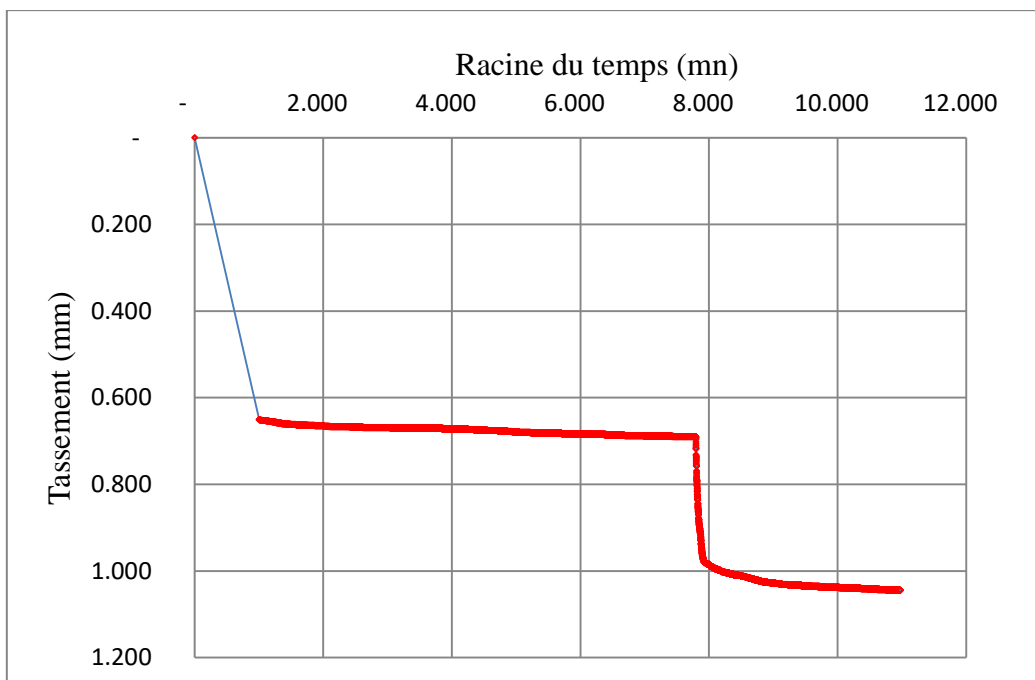


Figure A.13 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E3/A saturé

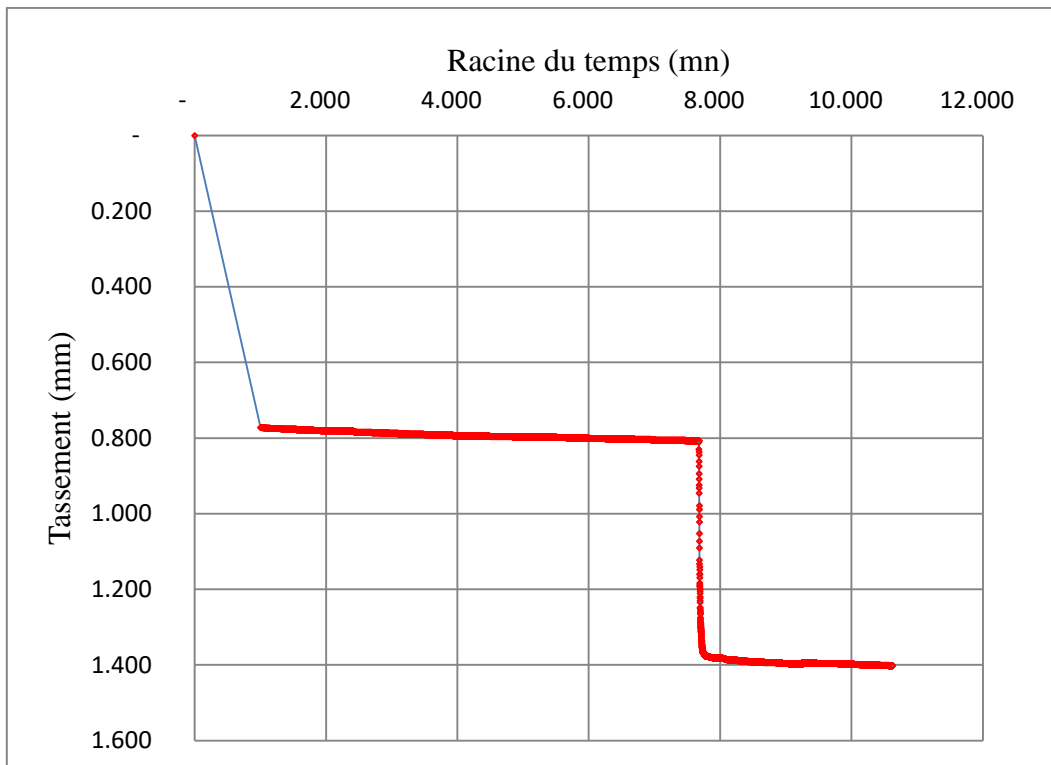


Figure A.14 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E3/B saturé

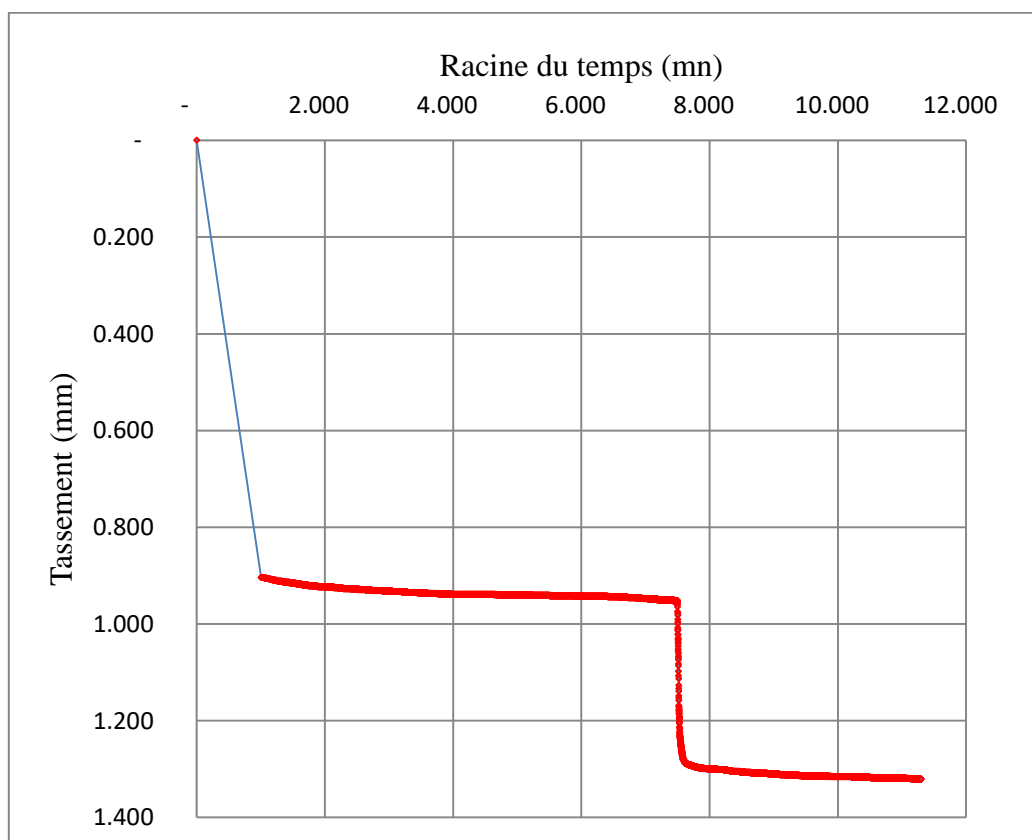


Figure A.15 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E3/C saturé

3.2 Etat non saturé

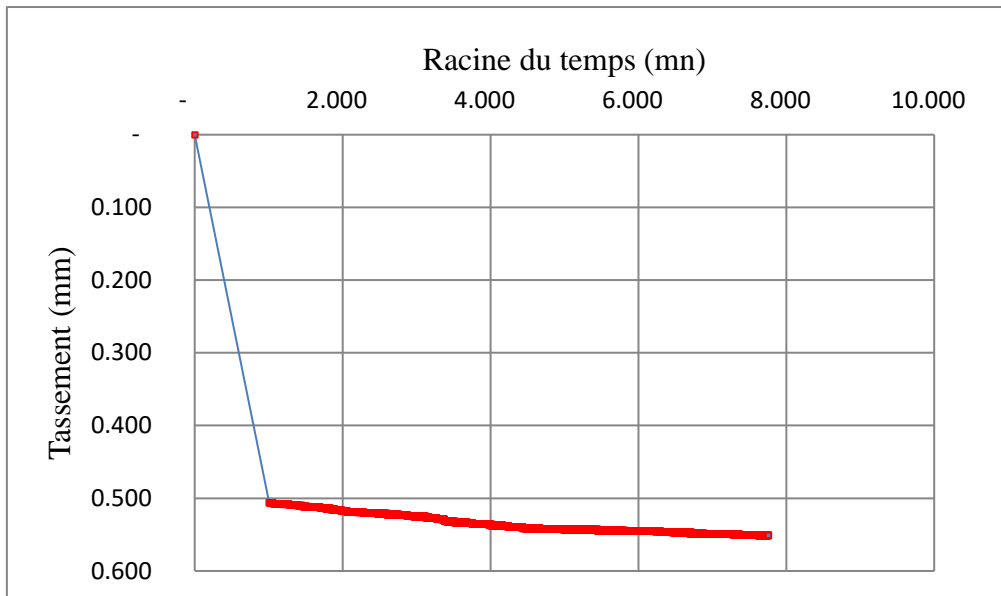


Figure A.16 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E3/A non saturé

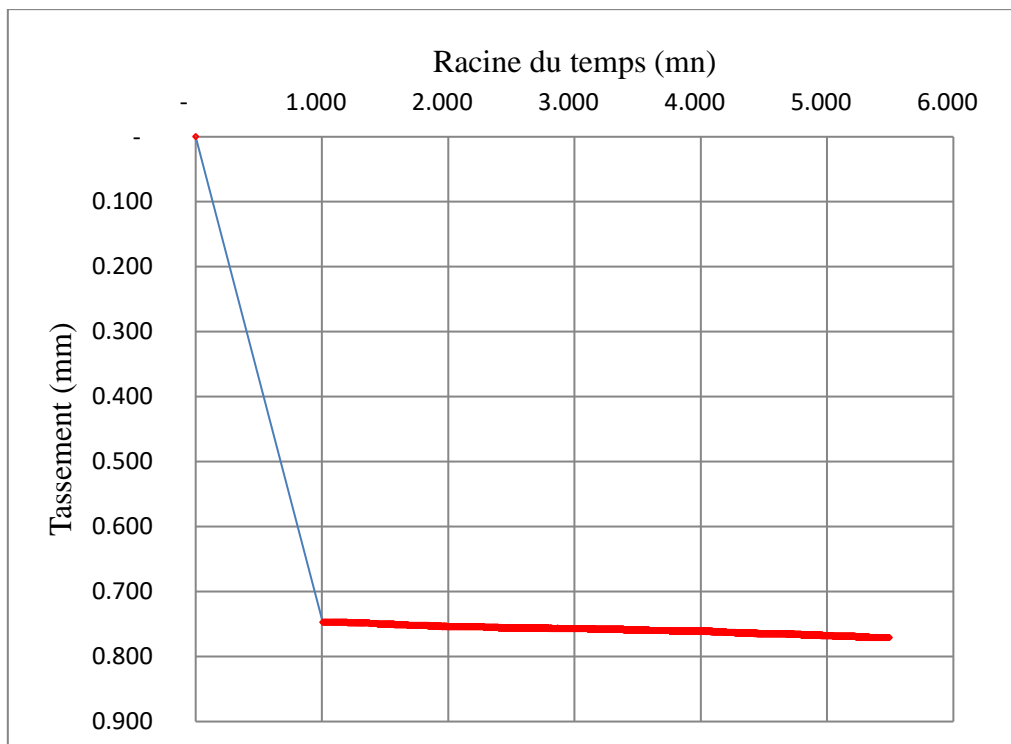


Figure A.17 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E3/B non saturé

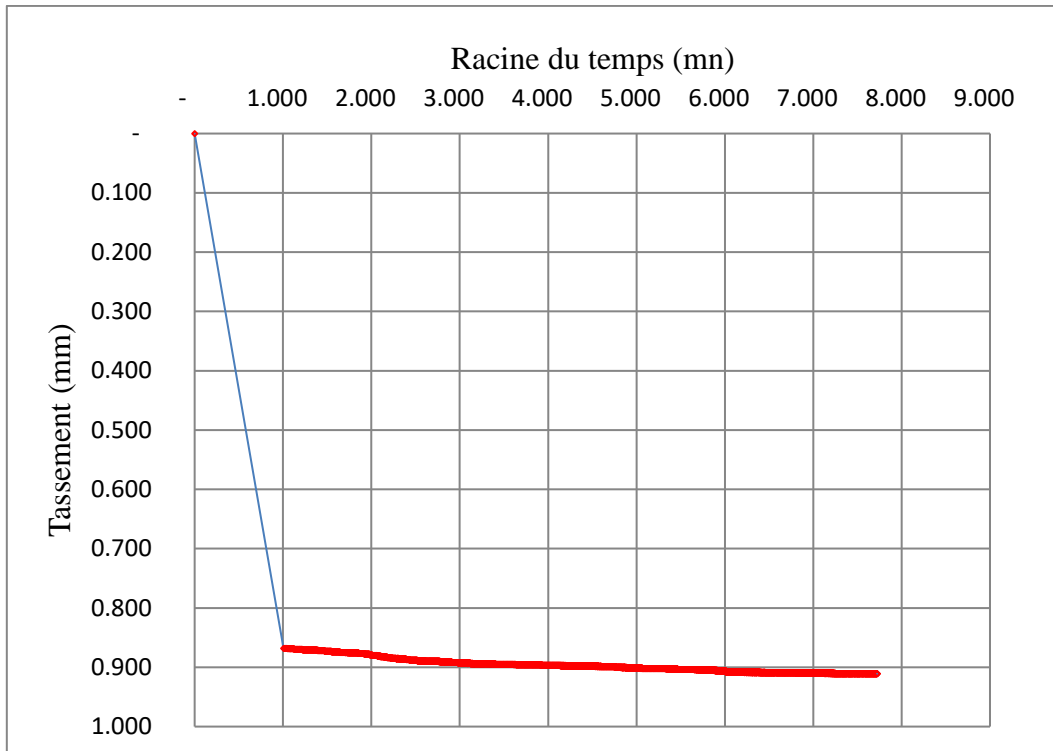


Figure A.18 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E3/C non saturé

4. E4

4.1 Etat saturé

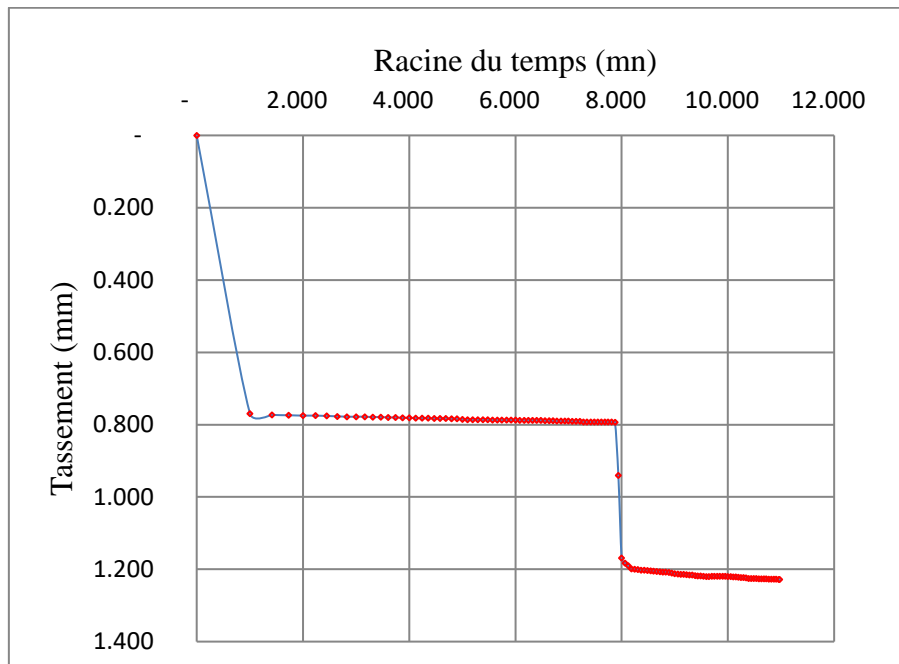


Figure A.19 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E4/A saturé

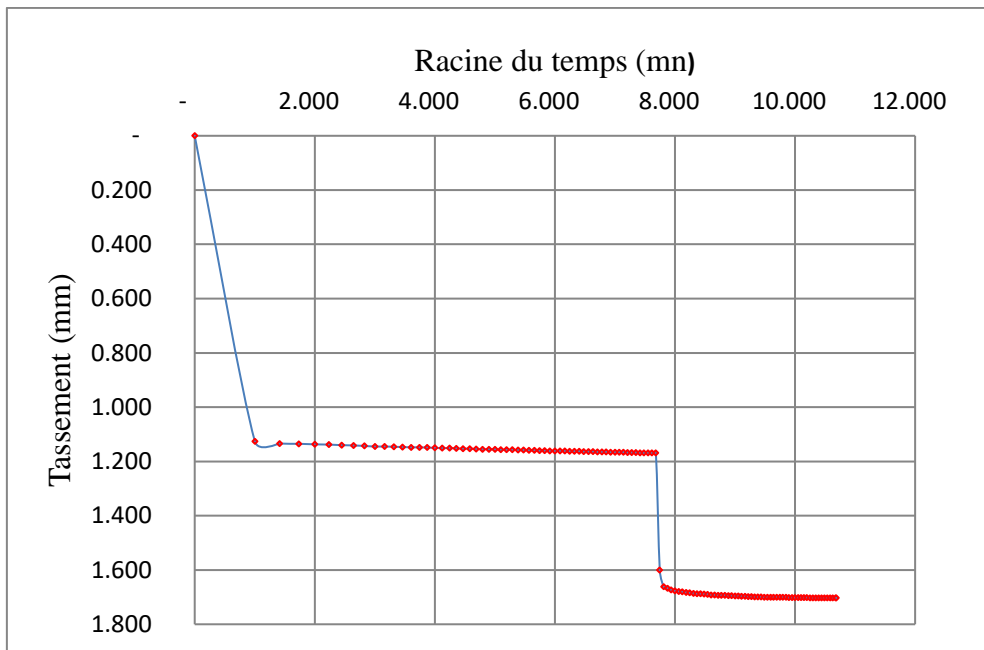


Figure A.20 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E4/B saturé

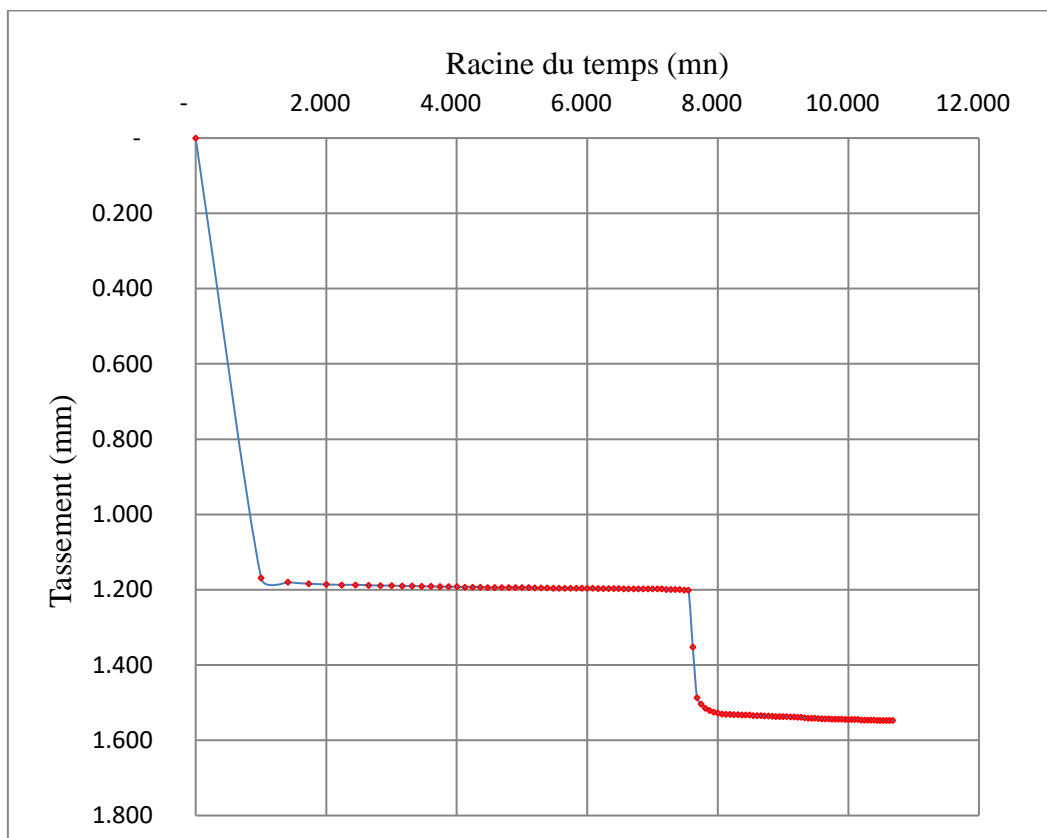


Figure A.21 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E4/C saturé

4.2 Etat non saturé

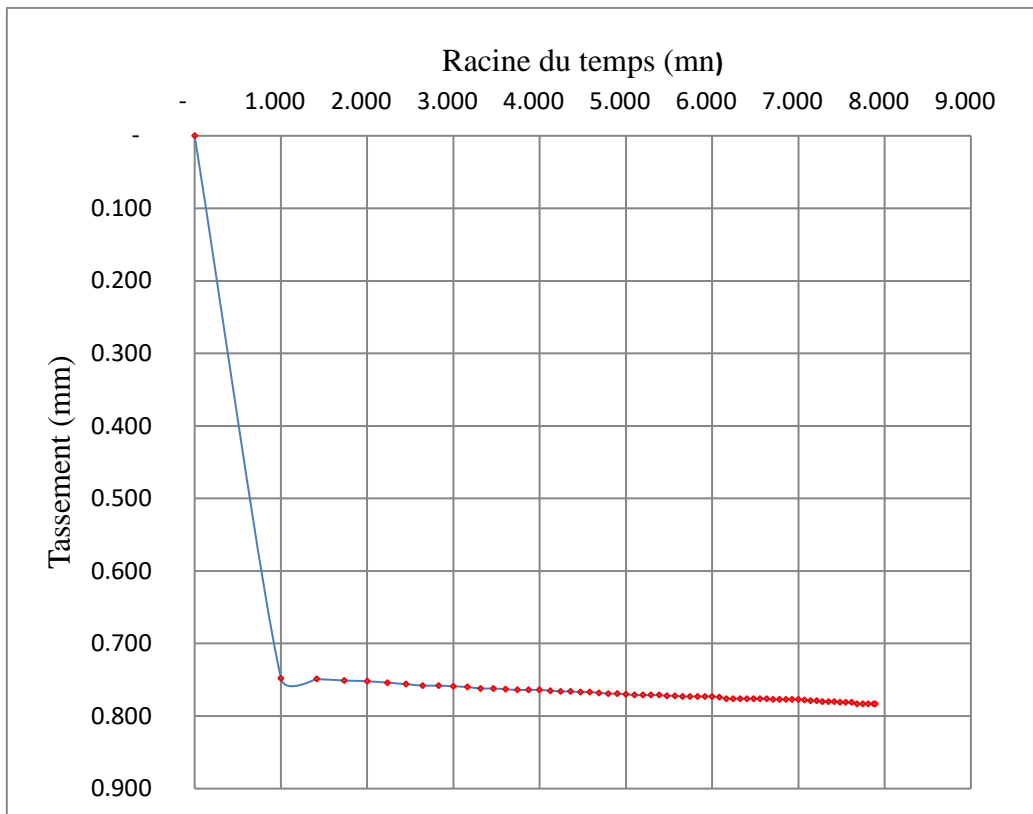


Figure A.22 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E4/A non saturé

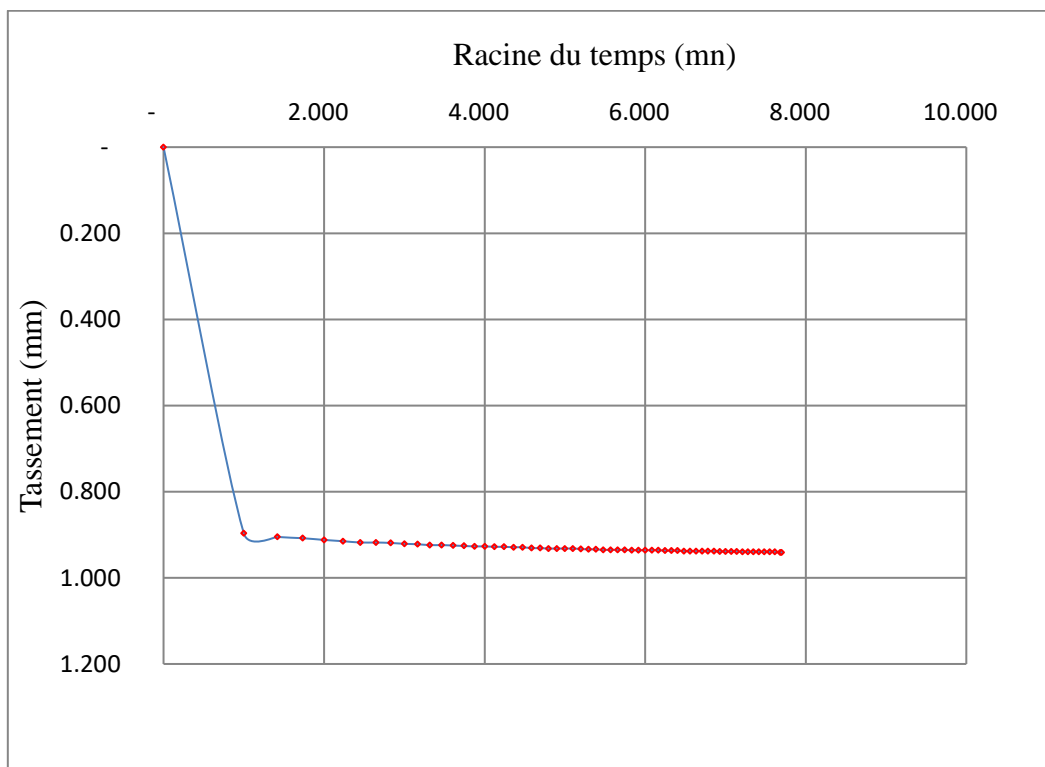


Figure A.23 courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E4/B non saturé

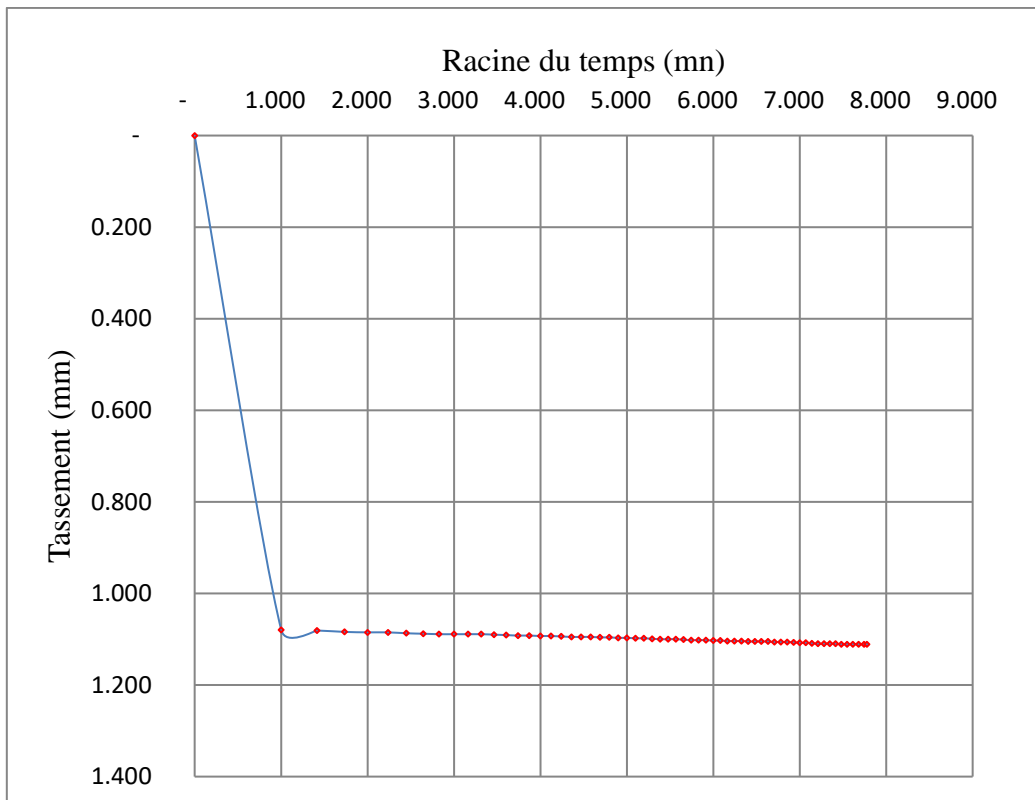


Figure A.24 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E4/C non saturé

5. E5

5.1 Etat saturé

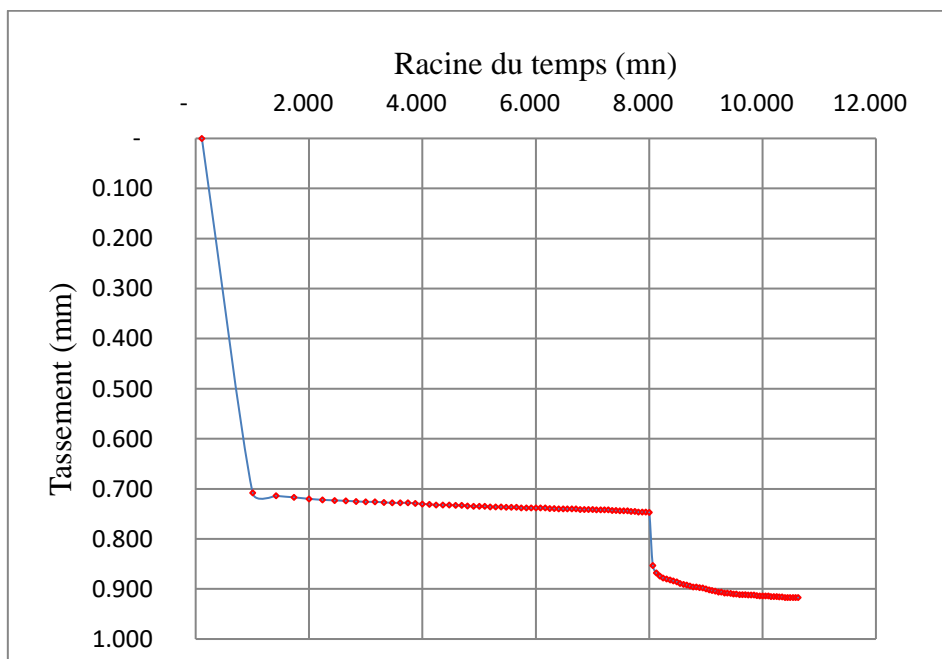


Figure A.25 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E5/A saturé

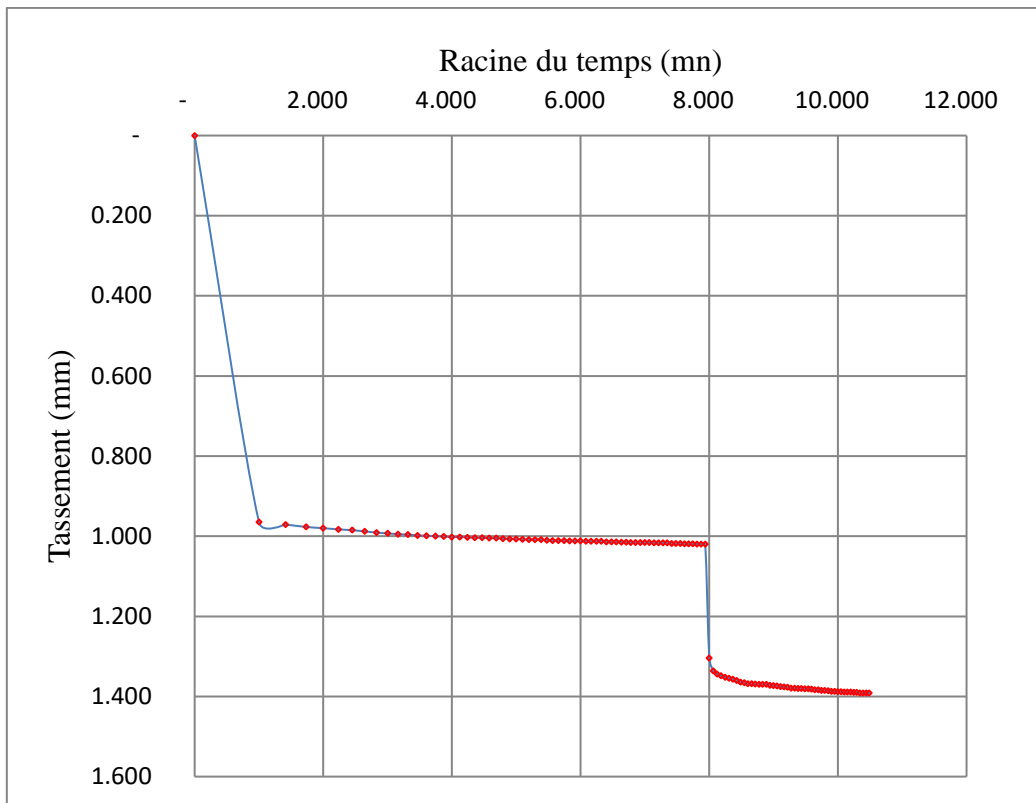


Figure A.26 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E5/B saturé

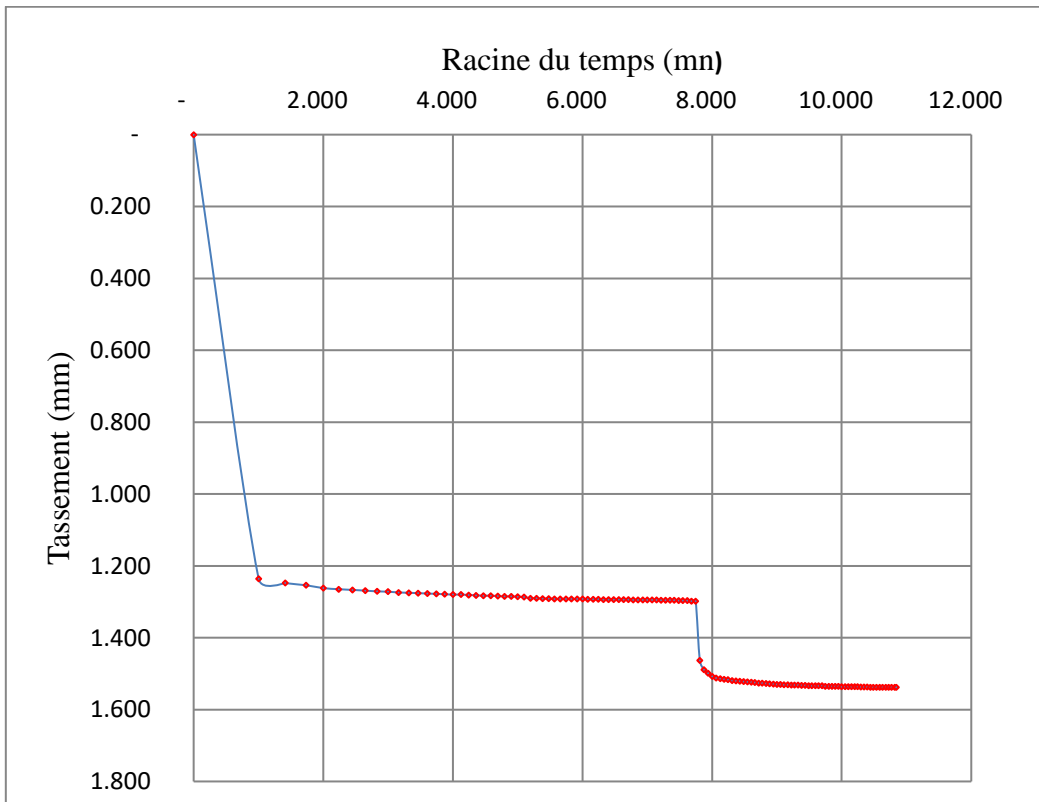


Figure A.27 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E5/C saturé

5.2 Etat non saturé

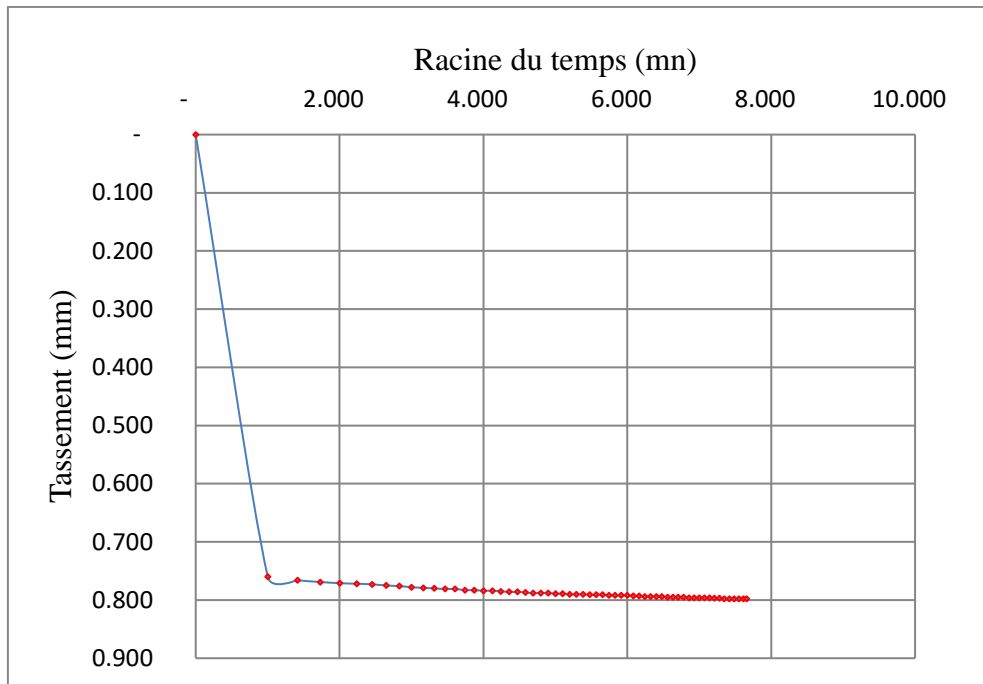


Figure A.28 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 50,66 (kPa), E5/A non saturé

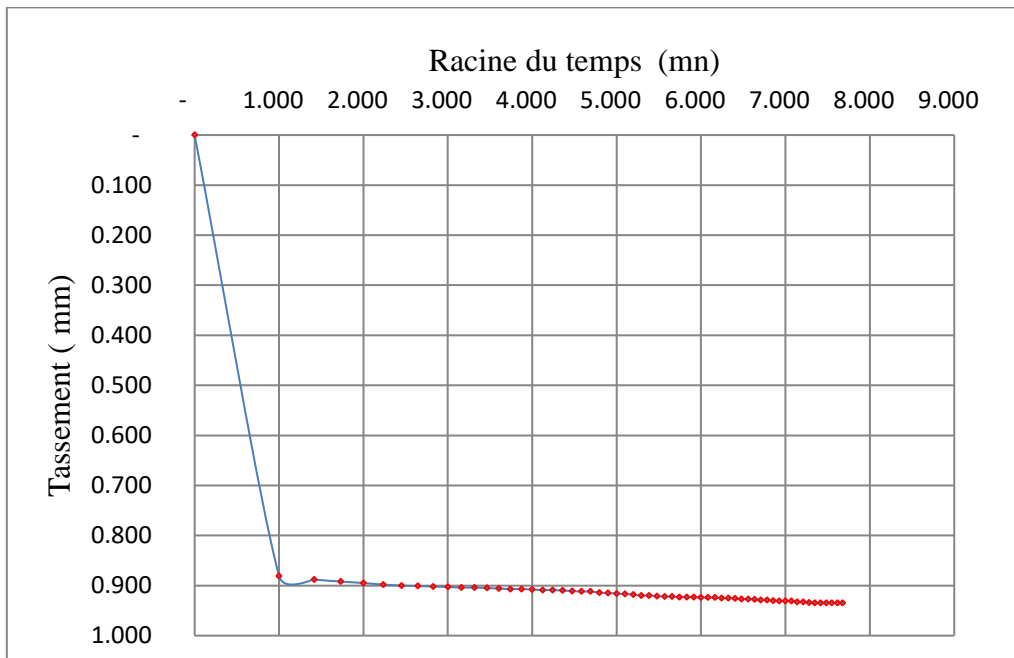


Figure A.29 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 101,32 (kPa), E5/B non saturé

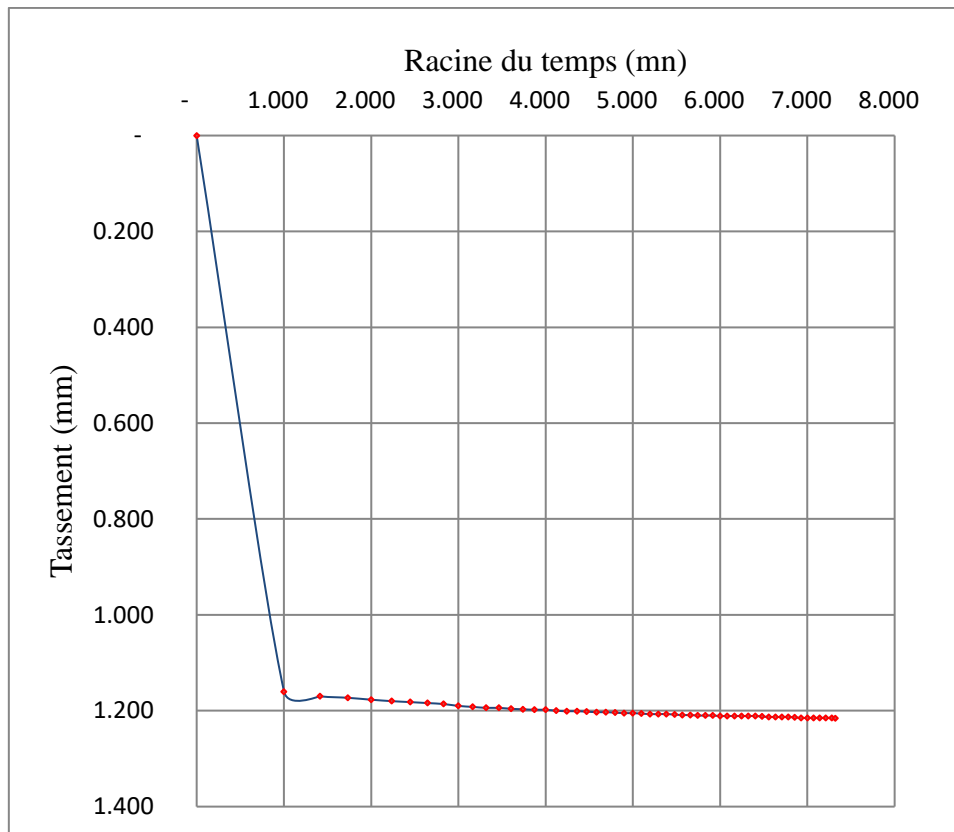


Figure A.30 Courbe de tassement à une contrainte verticale de 202,65 (kPa), E5/C non saturé

Après la réalisation de plusieurs essais de cisaillement annulaire à l'aide de l'appareil de Bromhead, quelques photos des échantillons étudiés sont prises. Elles montrent bien que le cisaillement est produit au niveau du sol lui-même. (figures B1, B2, B3, B4, B5, B6 et B7)



Figure B.1 Photo du témoin dans la boîte de cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 50,66 (kPa), état non saturé



Figure B.2 Photo du témoin dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 101,32 (kPa), état non saturé



Figure B.3 Photo de l'E5 (PC 20%) dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 101,32 (kPa), état non saturé



Figure B.4 Vue proche de la surface de rupture après cisaillement de l'E5 sous un contrainte normale donnée.



Figure B.5 Photo de l'E4 (PC 15%) dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 101,32 (kPa), état saturé



Figure B.6 Photo de l'E5 (PC 20%) dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 202,65 (kPa), état saturé



Figure B.7 Photo de l'E (PC 10%) dans la boîte d cisaillement annulaire après cisaillement à une contrainte normale de 202,65 (kPa), état saturé