

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Hassiba Ben Bouali de Chlef
Faculté De Génie Civil et d'Architecture
Département de Génie Civil

Mémoire de Magister en Génie Civil

Option : Structure et Géotechnique

Présenté par :

Mr. HENADER Abderrahmane

THEME

*Étude et modélisation du comportement thermomécanique des sols
renforcés par géosynthétique (Géogrilles et géotextiles)*

Soutenu le 08 Mai 2014

Devant le jury composé de :

Pr. KASSOUL Amar	Professeur	Université Chlef	Président de jury
Pr. HANIFI Missoum	Professeur	Université Mostaganem	Examineur
Mr. DELLA Nouredine	Maitre de conférences A	Université Chlef	Examineur
Mr. BELKATIR Mostefa	Maitre de conférences A	Université Chlef	Examineur
Mr. LAMRI Belkacem	Maitre de conférences A	Université Chlef	Directeur de thèse

Année universitaire : 2013/2014

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu Clément et Miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

*Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur, Monsieur **LAMRI Belkacem**, maître de conférences à l'université de CHLEF, pour sa patience, et son aide durant ma formation et la préparation de ce mémoire. J'adresse aussi mes remerciements, à Monsieur **MEKKAKIA MAAZA Merouane**, chargé de cours à l'université de CHLEF pour son aide et ses conseils, qui m'a été fort précieux, et monsieur **BEDR Samir** doctorant au centre de recherche de génie civil 'CGS Alger', pour sa coopération à résoudre différents problèmes expérimentaux et numériques.*

Ma profonde gratitude à tous les Enseignants du département de génie civil, qui ont contribué à notre formation.

Mes remerciements s'adressent, également, aux membres du jury, qui m'ont fait le très grand honneur de porter un jugement sur ce travail.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

- ❖ *À la mémoire de ma défunte mère.*
- ❖ *À mon père, mon frère et mes sœurs.*
- ❖ *À toute ma famille en général et particulièrement à mon oncle Tayeb ☺.*

RÉSUMÉ

La compréhension du comportement thermomécanique du sol est nécessaire dans un nombre croissant de problèmes. Les perturbations, que peuvent subir les sols et en particulier les échantillons depuis le carottage à l'arrivée en laboratoire, peuvent être liées aux variations thermiques. Ce mémoire présente une étude expérimentale et modélisation numérique du comportement thermomécanique des sols renforcés par les géosynthétique.

Au premier lieu ,l'étude a est basée sur des essais de cisaillement a la boite qui ont été réalisé sur des échantillons de sable de Chlef (Algérie) renforcé par nappe de géogrille en faisant varier les contrainte normale, la température et la teneur en eau dont l'objectif est de déterminer l'évolution des caractéristiques mécaniques (c et ϕ).En second lieu Une approche théorique par modélisation numérique par éléments finis en utilisant le logiciel Plaxis a été entamée. Les différents résultats obtenus en laboratoire sont également comparés aux résultats obtenus par modélisation numérique.

Mots clés : comportement thermomécanique, sol, géosynthétique, climatique, Modélisation, Plaxis.

ABSTRACT

Understanding the thermo- mechanical behavior of the soil is required in an increasing number of problems. Disruption may be subjected and in particular the soil samples from the coring until arrived in the laboratory can be related to thermal variations. This paper presents an experimental study and numerical modeling of thermo- mechanical behavior of soil reinforced with geosynthetic.

In the first study was based on the shear testing box that were performed on samples of Chlef sand (Algeria) reinforced with a geogrid sheet by varying the compressive stress, the temperature and the water content which aims to determine the evolution of the mechanical properties (c and ϕ). Secondly a theoretical approach by numerical finite element modeling using the Plaxis software has been started. The different results obtained in the laboratory are also compared with results obtained by numerical modeling.

Keywords: Thermo- mechanical Behavior, Soil, Geosynthetic, Climatic Modeling, Plaxis.

ملخص

ان مفهوم السلوك الميكانيكي والحراري للتربة يعد اساسي في عدد متزايد من العوامل التي تؤثر بصفة خاصة على عينات التربة مكان جلبها حتى وصولها الي المخبر وهذه السلوكيات يمكن ان يكون لها صلة بالتغيرات الحرارية.

يتمثل هذا العمل في دراسة تجريبية للسلوك الميكانيكي الحراري للتربة المدعمة بشبكة الالياف البلاستيكية (Géosynthétique)، اعتمدت دراستنا أولا على تجربة القص (Boite de Cisaillement) التي أجريت على عينات من رمل الشلف المدعمة بشبكة الألياف البلاستيكية مع تغيير قوى الضغط مع الأخذ بعين الإعتبار درجة الحرارة و محتوى الماء في التربة بهدف تحديد تطور الخصائص الميكانيكية للتربة ثانيا دراسة نظرية عن طريق النمذجة الرقمية باستخدام العناصر المنتهية ببرنامج بلاكسيس " Plaxis " و مقارنتها بالنتائج المحصل عليها من التجارب المخبرية.

كلمات مفتاحية: السلوك الميكانيكي الحراري، التربة، شبكة الالياف البلاستيكية، المناخ، نمذجة، بلاكسيس.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
DÉDICACE	ii
RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ملخص	v
TABLE DES MATIERES.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS	vi
Introduction générale	1
CHAPITRE 1 : RENFORCEMENT DES SOLS PAR GEOSYNTHETIQUES.....	3
1.1. INTRODUCTION	4
1.2. DIFFÉRENTS TYPES D’INSTABILITÉS	4
1.2.1. Les glissements	4
1.2.2. Les éboulements en terrain rocheux	6
1.2.3. Reptation	7
1.2.4. Les fluages.....	7
1.3. LES DIFFERENT METHODE DE RENFORCEMENT DES SOLS.....	8
1.4. Étude des renforcements des sols par géo synthétiques	10
1.4.1. Géotextiles	11
1.4.2. Produits apparentés	13
• Une géogridle.....	13
1.4.3. Propriétés des géogridles utilisées en renforcement	14
1.5. L’UTILISATION DES GEOSYNTHETIQUES EN ALGERIE	16
1.5.1. CONSTRUCTION d’une route par la technique des géosynthétiques a M’Sila	16
1.5.2. Traitement d’un glissement de terrain sur le CW13 à Tifra willaya de Bejaïa	18
1.5.3. Traitement d’un glissement de terrain sur la RN 12 – willaya de Bejaïa	20
1.6. Conclusion.....	21
CHAPITRE 2 : LE COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES SOLS RENFORCE.....	22
2.1. INTRODUCTION	23
2.2. COMPORTEMENT THERMIQUE Du SOL.....	23
2.2.1. LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DU SOL	23
2.2.2. Effet de la température sur le comportement du sol	25
2.2.3. Effet de la température sur le comportement mécanique	28
2.2.4. Effet de la température sur le comportement élasto-plastique	29
2.2.5. Effet de la température sur le comportement à la rupture ou à l’état critique	31
2.3. APPAREIL TRIAXIAL A HAUTE TEMPERATURE	35
2.4. LES PROPRIETES MECANIQUES DES Géosynthétique.....	36
2.4.1. LES PARAMETRES INFLUENÇANT LES CARACTERISTIQUES DE FROTTEMENT.....	37
2.4.1.1. Influence de la e contrainte normale a une température ambiante	38
2.4.1.2. Influence de la teneur en eau a une température ambiante	39
2.4.2. LE COMPORTEMENT EN TRACTION	40
2.5. COMPORTEMENT THERMIQUE DES GEOSYNTETHIQUES	41
2.5.1. Influence de la température.....	41
2.5.2. Influence de la température sur le fluage des géosynthétique	42
2.6. Les effets du climat sur les chaussé	43
2.6.1 PROPAGATION THERMIQUE DE LA FISSURE.....	43
2.6.2 La réponse à la propagation des fissures	44
2.7. Conclusion.....	47
CHAPITRE 3 : ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE.....	48
3.1. INTRODUCTION	49
3.2. APPAREILLAGE	50
3.2.1. DESCRIPTION DU DISPOSITIF	52
3.2.2. LE CISAILLEMENT D’UN SOL.....	54

3.4. DEROULEMENT DE L'ESSAI	54
3.5. PREPARATION DE L'ESSAI.....	55
3.5.1. MISE EN PLACE DE L'ECHANTILLON DANS LA BOITE	55
3.5.2. MISE EN PLACE DE LA BOITE SUR LA MACHINE.....	55
3.5.3. VITESSE D'ESSAI	56
3.5.4. LECTURES	56
3.6. CALCULS ET RESULTATS.....	56
3.6.1. EFFORT DE CISAILLEMENT	56
3.6.2. DETERMINATION DE LA SURFACE CISAILLEE	56
3.6.3. CONTRAINTE DE CISAILLEMENT.....	57
3.7. PRESENTATION DES RESULTATS	57
3.8. Expression des résultats.....	57
3.9. Effets d'échelle dans les expériences	59
3.10. Courbes Contraintes – Déformations : $\zeta = f(\Delta L)$	60
3.10.1. Courbes $\tau = f(\Delta L)$ du sable à sec a une température de moyenne 17 à 19°.....	61
3.10.2. Courbes $\tau = f(\Delta L)$ du sable en fonction de variation de la teneur en eau a une température de moyenne 17 à 19.....	62
3.10.3. Courbes $\tau = f(\Delta L)$ du sable à sec a une température de moyenne 30 à 36.....	65
3.10.4. Courbes $\tau = f(\Delta L)$ du sable avec variation de la teneur en eau à une température de moyenne 30 à 34.....	66
3.10.5. Courbes $\tau = f(\Delta L)$ du sable avec variation de la teneur en eau et température.....	69
3.10.6. Interprétation des résultats.....	73
3.11. Droites Intrinsèques : $T = f(\Sigma)$.....	74
3.11.1. Courbes $\tau = f(\sigma)$ a une température ambiante de moyenne 17 à 19.....	74
3.11.2. Courbes $\tau = f(\sigma)$ avec variation de teneur en eau	75
3.11.3. Courbes $\tau = f(\sigma)$ avec variation de la température	76
3.12. CONCLUSION.....	78
CHAPITRE 4 : SIMULATION D'ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT	79
4.1. Introduction	80
4.2. Définition des Données	80
4.3. Hypothèses générales.....	81
4.4. Géométrie du modèle.....	81
4.5. Caractéristiques des matériaux.....	81
4.5.1. Propriétés des couches de sols.....	81
4.5.2. Propriétés des éléments de renforcements.....	82
4.6. Maillage et conditions aux limites	83
4.7 Conditions initiales	83
4.7.1 Conditions hydrauliques.....	83
4.7.2 Contraintes initiale	84
4.8. PROCÉDURES DE CALCUL	85
4.8.1 Initiation des contraintes.....	85
4.8.2. Chargement vertical.....	85
4.8.3. Déplacement horizontal	85
4.9. Résultats et interprétation.....	86
4.10 Courbe contrainte déformation résultat plaxis avec résultat des essais de cisaillement.....	87
4.11. Courbe contrainte déformation résultat Plaxis avec variation de la teneur en eau avec deux différentes températures (18 et 30).....	92
4.12. Conclusion.....	97
Conclusion et Recommandation	98
1. Conclusion	98
2. Recommandation	99
Références Bibliographiques	100
Annexe 1	104
Annexe 2	105
Annexe 3	136

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 : Types de glissements en terrains meubles	5
Figure 1. 2 : Types d'éboulements en terrains rocheux (Badre 2008)	6
Figure 1. 3 : Exemple de reptation (Durville.J Sève G.,1996).....	7
Figure 1. 4: Fluage (Badre JANVIER 2008, Exemple de fluage (Durville.J Sève G., 1996).....	7
Figure 1. 5 : Amélioration des sols (Rabah ARAB, 2009).....	8
Figure 1. 6 : Géotextiles (Figure 1a, Bathurst 2007)	12
Figure 1. 7 : Exemple de géotextile non tissé (Baziz. F.2012).....	12
Figure 1. 8: Exemple de géotextile tissé (Baziz. F.2012).....	13
Figure 1. 9: Exemple de géotextile tricoté (Baziz. F.2012).....	13
Figure 1. 10: Géogrilles (Baziz. F.2012).....	14
Figure 1. 11: (a) les géocomposite, (b) Talus renforcé par les géocomposites	15
Figure 1. 12: Un tissé de bandelettes (Baziz. F.2012)	15
Figure 1. 13: les Géomembranes	
Figure 1. 14: Talus renforcé par des mattes.	16
Figure 1. 15: Tracée de la route entre M'Cif et Ain El Khadra Colloque International Sols Non Saturés et Environnement « UNSATlemcen09 » Tlemcen, 27 et 28 Octobre 2009	17
Figure 1. 16: Conception du remblai intégrant les géosynthétiques Colloque International Sols Non Saturés et Environnement UNSATlemcen2009	17
Figure 1. 17: Difficultés de mise en place de la première couche sans géotextile Colloque International Sols Non Saturés et Environnement UNSATlemcen2009.....	18
Figure 1. 18: Mise en place du géotextile et de la géogrille Colloque International Sols Non Saturés et Environnement, UNSATlemcen2009.....	18
Figure 1. 19: Vue du glissement (Arab.R,et al 2009) Premier Symposium Méditerranéen de Géoengineering «SMGE09».....	19
Figure 1. 20: Profil de l'ouvrage et densité de renforcement Premier Symposium Méditerranéen de Géoengineering «SMGE09».....	19
Figure 1. 21: Vues de l'ouvrage en cours de construction et achevé (Arab.R,et al 2009).....	20
Figure 1. 22: Vue de la zone de glissement (Arab.R,et al 2009).....	20
Figure 1. 23: vue de l'ouvrage pendant la phase travaux (Arab.R,et al 2009).....	21
Figure 1. 24: Vue de l'ouvrage achevé (Arab.R,et al 2009).....	21
Figure 2. 1 : Flux de chaleur traversant un élément prismatique de sol. (Anh-Minh, 2005).....	24
Figure 2. 2 : Instrument pour mesurer la conductivité thermique du sol. (Anh-Minh, 2005).....	25
Figure 2. 3 : Variation volumique sous un cycle thermique (Burghinoli et al., 2000).....	27
Figure 2. 4 : Vitesses de déformation axiale (de α /dt) en fonction de la température (Zhang et al., 2007)	28
Figure 2. 5 : Effet de la température sur la limite élastique : résumé des résultats de plusieurs auteurs (Cekerevac et Laloui, 2004)	29
Figure 2. 6 : Les courbes de compression isotrope à différentes températures, essais sur l'argile de Boom (Sultan et al. 2002).....	30
Figure 2. 7 : Surfaces de charge déterminées à partir des essais de cisaillement à différentes. Températures, p'0 = 0,5 MPa, ROC = 2 (Tanaka et al. 1997).....	30
Figure 2. 8 : Modules d'élasticité E obtenus des essais de cisaillement à 25 et 90°C (Cekerevac et Laloui, 2004)	31
Figure 2. 9 : Cisaillement non drainé à différentes températures. A-10 : 80 °C, A-06 : 50 °C, A-03 : 20 °C (De Bruyn et Thimus, 1996)	32
Figure 2. 10 : Comportement de l'argile à Opalinus cisailée à différentes températures. (Zhang et al., 2007).....	32
Figure 2. 11 : Résultats des essais de cisaillement non drainés sur des échantillons (normalement consolidés et sur consolidés) de l'argile naturelle de Bangkok (p'0 = 0,3 MPa) à différentes températures (Abuel-Naga, 2006b). ...	33
Figure 2. 12 : Essais de cisaillement non drainés à différentes températures (Burghinoli et al. 2000)	34
Figure 2. 13 : L'effet de la température sur l'angle de frottement à l'état critique (Cekerevac et Laloui, 2004).....	35
Figure 2. 14 : GDS Appareil triaxial à haute température (GDS-HT).....	36
Figure 2. 15 : Changement de volume du polymère utilisé pour la construction des géosynthétique avec Changement de température (Tanay Karademir, 2011).....	37
Figure 2. 16 : Résultats d'essais de frottement (sable - géotextile non tissé) obtenus à la boîte de Casagrande (LIRIGM; 1996).	38
Figure 2. 17 : Influence de la contrainte normale (Gourc, 1984).....	38
Figure 2. 18 : Influence de la teneur en eau du sol (Chua et al., 1993).....	39
Figure 2. 19 : Différentes raideur (Paulson, 1987)	40
Figure 2. 20 : Influence de la température sur le comportement en traction des géotextiles (Andrawes et al. 1984)....	42
Figure 2. 21 : Mouvements possibles des pointes de la fissure.....	44

Figure 2. 22 : sollicitation thermique sur la propagation des fissure teste de CCRB (centre de recherche routier Belgique) (B. Thesseling et A. Elsing, 2000)	44
Figure 2. 23 : les fissurations vertical dans la nouvelle couche d'enrobé (Montestruque G.E et al, 2000)	45
Figure 2. 24 : (a) : Sollicitation thermique (b) : essai propagation thermique de la fissure (B.Thesseling et A. Elsing, 2000).....	46
Figure 2. 25 : (a) sollicitation due au cisaillement, (b) sollicitation due au moment fléchissant. (Anreas Elsing et Sven Schröer, 2000) (Anreas Elsing et Sven Schröer, 2000).....	46
Figure 2. 26 : (a) Echantillon non renforcé soumis au cisaillement après 90.000 cycles.....	47
(b) : Echantillon renforcé avec HaTelit soumis au cisaillement après 570.000 cycles	47
Figure 2. 27 : Figure II-24 essai de fatigue dynamique (B. Thesseling et A. Elsing,2000)	47
Figure 3. 1: Boîte de cisaillement (laboratoire université Chlef, 2012)	50
Figure 3. 2 : <i>Schéma de la boîte de cisaillement</i> (Paillier C 2007)	51
Figure 3. 3 : <i>détermination de Cet ϕ</i> . (Paillier C 2007).....	51
Figure 3. 4 : Schéma de la boîte de cisaillement (efforts contrôlés). (Paillier C 2007).....	52
Figure 3. 5 : Essai de cisaillement (déformations contrôlées). (Bedr.S,2008).....	53
Figure 3. 6 : Courbe contraint – déformation (Baziz.F,2012).....	53
Figure 3. 7 : plan de MOHR (Paillier C 2007).....	54
Figure 3. 8 : Courbes Contraintes – Déformations sable à sec, sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa. Avec une température 17a19°	61
Figure 3. 9 : Courbes Contraintes – Déformations Dr=90%, w=3% sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.....	62
Figure 3. 10 : Courbes Contraintes – Déformations Dr=90%, w=5% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.....	62
Figure 3. 11 : Courbes Contraintes – Déformations Dr=90%, w=7% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.	63
Figure 3. 12 : Courbes Contraintes – Déformations Dr=15%, w=3% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.	63
Figure 3. 13 : Courbes Contraintes – Déformations Dr=15%, w=5% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.	64
Figure 3. 14 : Courbes Contraintes – Déformations Dr=15%, w=7% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.	64
Figure 3. 15 : Courbes Contraintes – Déformations Dr=90%, et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.....	65
Figure 3. 16 : Courbes Contraintes – Déformations sable à sec et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.....	65
Figure 3. 17 : Courbes Contraintes – Déformations Dr =90%,w=3% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.....	66
Figure 3. 18 : Courbes Contraintes – Déformations Dr =90%, w=5% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.	66
Figure 3. 19 : Courbes Contraintes – Déformations Dr =90%, w=7% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.	67
Figure 3. 20 : Courbes Contraintes – Déformations Dr =15%,w=3% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.....	67
Figure 3. 21 : Courbes Contraintes – Déformations Dr =15%,w=5% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.....	68
Figure 3. 22 : Courbes Contraintes – Déformations Dr =15%, w=7% et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.	68
Figure 3. 23 : Courbes Contraintes – Déformations, w=0% avec température 19 et 34° et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.	69
Figure 3. 24 : Courbes Contraintes – Déformations, w=3% avec température 19 et 34 et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa	70
Figure 3. 25 : Courbes Contraintes – Déformations, w=5% avec température 19 et 34 et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.	71
Figure 3. 26 : Courbes Contraintes – Déformations, w=7% avec température 19 et 34 et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.	72
Figure 3. 27 : Droites Intrinsèques sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa, Sol avec renforcement avec une température moyenne 17a 19°.	74
Figure 3. 28 : Droites Intrinsèques, sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa, a des teneurs en eau variable. Sol avec et sans renforcement avec une température ambiante 17°	75

Figure 3. 29 : Droites Intrinsèques, $\tau = f(\sigma)$ sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa avec variation de la température.....	76
Figure 3. 30 : Évolution de la cohésion(C) en fonction de la teneur avec l'effet de présence de géogridde Enkagrid pro 40.	77
Figure 4. 1 : Profil du modèle à analyser.	80
Figure 4. 2 : Types des Géogriddes utilisés 'Enkagrid pro 40'.	82
Figure 4. 3 : Génération du maillage et les conditions aux limites.	83
Figure 4. 4 : Conditions hydrauliques initiales.....	84
Figure 4. 5 : Conditions contraintes initiales.....	84
Figure 4. 6 : Résultats de l'application de la contrainte verticale.....	86
Figure 4. 7 : Résultats de l'application du déplacement horizontale.....	86
Figure 4. 8 : Résultats de l'application du déplacement horizontale (Courbe).....	87
Figure 4. 9 : courbe contrainte – déformation w= 0% (Résultats Plaxis avec les essais de cisaillement).....	88
Figure 4. 10 : Courbe contrainte – déformation w= 3% (Résultat Plaxis avec les essais de cisaillement)	89
Figure 4. 11 : courbe contrainte – déformation w= 3% (Résultat Plaxis avec les essais de cisaillement)	90
Figure 4. 12 : Courbe contrainte – déformation w= 7% (Résultat Plaxis avec les essais de cisaillement)	91
Figure 4. 13 : courbe contrainte – déformation w= 0 a différente température.....	93
Figure 4. 14 : courbe contrainte – déformation w= 3% à différente température.....	94
Figure 4. 15 : courbe contrainte – déformation w= 5% à différente température.....	95
Figure 4. 16 : Courbe contrainte – déformation w= 7% a différente température.....	96

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1. 1 : Différentes méthode de renforcement des sols (Magnan, 1994)</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 1. 2 : Les principaux types des géosynthétiques (Lamara S, 2011).....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 4. 1 : Propriétés des couches de sols.....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 4. 2 : Propriétés des éléments de renforcement.....</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 4. 3 : Phases de calcul.....</i>	<i>85</i>

Liste des Symboles et Abréviations

- **Lettres Grecques**

φ	Angle de frottement	[°]
φ'	Angle de frottement effectif	[°]
φ'_R	Angle de frottement résiduel	[°]
ψ	Angle de dilatance	[°]
γ	Poid volumique du sol	[kN/m ³]
γ_{sat}	Poid volumique du sol saturé	[kN/m ³]
γ_d	Poid volumique du sol sec	[kN/m ³]
σ	Contraint normale totale	[kPa]
σ'	Contraint normale effective	[kPa]
u	Pression intersitielle	[kPa]
τ	Contrainte de cisaillement	[kPa]

□

- **Lettres Latines**

c	Cohésion	kPa
c'	Cohésion effective	kPa
τ	Résistance au cisaillement non drainé	kPa
w	Teneur en eau	[%]
S_r	Degrés de saturation	[%]
e	Indice des vides	[%]
e_0	Indice des vides initial	[%]
n	Porosité	[%]

Introduction générale

Introduction

Les variations thermiques sont l'une des perturbations, que peuvent subir les sols et en particulier les échantillons depuis l'extraction et le transport à l'arrivée en laboratoire. Il s'avère donc nécessaire de comprendre le comportement thermomécanique du sol dans le domaine géotechnique.

Objectif du Travail Effectue

Ce travail est considéré comme une initiation à la recherche dans le domaine des sols renforcés. L'objectif est de déterminer les principaux effets du climat sur les sols renforcés par géosynthétiques, et de tenter d'estimer le comportement thermomécanique des sols renforcés par expérimentation et modélisation numérique.

Pour obtenir des résultats en laboratoire utilisables pour la prévision du comportement du sol in-situ, il est nécessaire de réaliser ces essais sur des échantillons de sol dont l'état qui approche de celui in situ. Vu les perturbations d'état hydrique, mécanique et thermique que doit supporter le bloc de sol pendant le prelevement et le transport à l'arrivée en laboratoire, cette condition n'est pourtant pas toujours satisfaite a cette effet la compréhension de l'état des échantillons, notamment leur teneur en eau.

Pour étudier le comportement thermo-mécanique des sols renforcés par les géosynthétiques, des nombreux essais ont été effectués à la boîte du cisaillement sur des échantillons du sable Chlef (Algérie) renforcé ou non en faisant varier les contraintes de compression, la teneur en eau et la température.

Nous avons tenté de mettre en évidence le rôle de la température et la teneur en en eau et l'influence sur la résistance au cisaillement des sols renforcés par gepsynthetique .

Plan de Mémoire

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres comme suit :

Une introduction générale concernant le travail effectué est présentée.

Au premier chapitre on présente les différents types d'instabilité et une connaissance générale concernant les géosynthétique et leur application au renforcement.

Le deuxième chapitre introduit une synthèse bibliographique sur les aspects thermomécaniques des sols et les effets du climat sur les sols renforcés.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des essais de cisaillement à la boîte, dont l'objectif est de déterminer l'évolution des caractéristiques mécaniques (c et ϕ) du sol renforcé ou non, en fonction de la teneur en eau et de la variation de la température. Deux axes d'essais de cisaillement ont été effectués à une température ambiante de 17 à 19° et à une plage de température variant de 30 à 36°.

Le quatrième chapitre a été réservé à la simulation numérique de l'essai du cisaillement avec le code de calcul Plaxis. L'interprétation des résultats fait également appel aux résultats d'essais réalisés en laboratoire avec lesquels les résultats numériques obtenus dans le cadre de ce mémoire sont comparés.

Enfin, une conclusion générale et des recommandations ont été présentées à la fin de ce mémoire.

*Chapitre 1 : Renforcement des Sol
par les Géosynthétiques*

1.1. INTRODUCTION

Pour combattre les effets dévastateurs des catastrophes naturelles (les séismes, les grands glissements, les inondations,...), il est nécessaire de mener des techniques de prévention, ces catastrophes naturelles sont amplifiées lorsque le sol a été soumis aux différents types d'instabilités. (CCR, 1999; Guiton, 1998). Pour cette raison on renforce le sol soit pour limiter ses déformations d'une sollicitation, soit pour faire augmenter la capacité du sol à supporter des déformations élevées.

1.2. DIFFÉRENTS TYPES D'INSTABILITÉS

De nombreuses classifications des mouvements d'instabilités qui affectent les sols ont été faites selon différents critères, on présente ci-dessous l'un de ces classifications proposées par COLAS et PILOT en 1976 qui est basé sur la nature des matériaux et le type de déplacement.

- **Les glissements en terrain meuble** : est introduit par la déformation d'une surface de rupture le long de laquelle se produisent les déplacements ;
- **Les éboulements en terrain rocheux** : engendrés par le détachement rapide, en général le long de discontinuités préexistantes, d'une masse de rocher qui se disloque lors de sa propagation vers le pied du versant ;
- **Les coulées boueuses** : assimilables à l'écoulement d'un fluide visqueux charriant des éléments de tailles diverses sur des distances parfois importantes ;
- **Les fluages** : qui sont des déformations plastiques du talus, sans rupture. Ces types d'instabilité ou mouvement de talus instable.

1.2.1. Les glissements

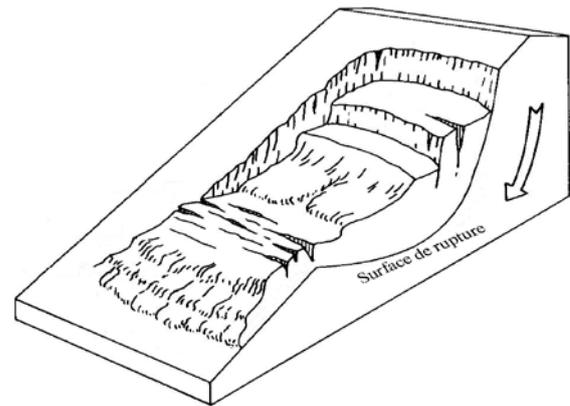
Les glissements de terrain sont des phénomènes qui affectent le plus fréquemment les ouvrages de génie civil, Ils sont provoqués le plus souvent par la présence ou les écoulements des eaux dans le sol. Ils se produisent lorsque les contraintes de cisaillement, dues aux forces, telles que le poids, excèdent la résistance du sol le long de la surface de rupture.

Des principales grandes catégories de glissement sont définies selon la forme de la surface de rupture.

- **Glissements rotationnels** : à surface de rupture à peu près circulaire (Figure II.1(a));
- **Glissements plans** : dont la surface de rupture est plane dans sa grande partie (figure II.1(b));
- **Glissements composites** : avec une ou plusieurs surfaces de rupture de forme complexe.



(a)

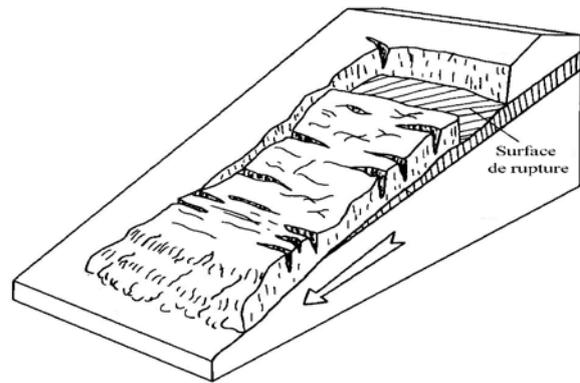


(b)

(a) Rotationnel (BADRE, JANVIER 2008 RN 11, DAMOUS, ALGÉRIE), (b) Glissement rotationnel (Durville J.L., Sève G., 1996).



(a)



(b)

(a) Plans (BEDR, MAI 2007, RN 11 TÉNÈS, ALGÉRIE) (b) Glissement plan (Durville.J Sève G., 1996).

Figure 1. 1 : Types de glissements en terrains meubles

1.2.2. Les éboulements en terrain rocheux

Ce sont des chutes soudaines de masses rocheuses. On utilise le terme de chute de pierres lorsque des fragments ou des blocs de petite taille se détachent d'une paroi rocheuse. Le terme écroulement (ou éboulement) est utilisé lorsque la chute affecte, simultanément, une masse importante de matériaux de gros calibre. Les écroulements ont deux origines: présence de fractures préexistantes et de niveaux tendres sous-jacents.

- **Les éboulements** : au sens strict, se produisent lorsqu'un volume de roche important, fragmentant plus ou moins intensément, se détache en bloc du massif rocheux et s'éboule (figure 1.2(a)) ;
- **Les écroulements** : ils peuvent se produire lorsqu'un grand volume du massif rocheux se détache soudainement, le mécanisme peut s'expliquer par le développement d'une surface de glissement (figure 1.2(b)) ;
- **Les chutes de pierres et de blocs** : caractérisées par la chute éparpillée de blocs plus ou moins isolés.



Figure 1.2(a)

Figure 1.2(b)

(a) Éboulement (MAI 2007 RN 11 DAMOUS, ALGÉRIE) (b) Écroulement (JANVIER 2008 RN 11, DAMOUS, ALGÉRIE)

Figure 1. 2 : Types d'éboulements en terrains rocheux (Bedr 2008)

1.2.3. Reptation

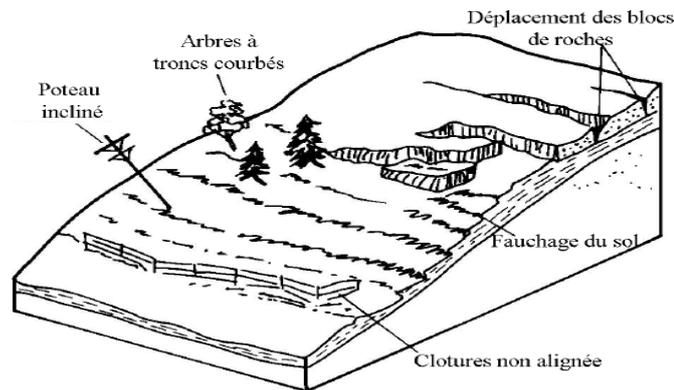


Figure 1. 3 : Exemple de reptation (Durville.J Sève G.,1996).

C'est un déplacement au sens de la pesanteur par une lente descente de l'ensemble des particules de l'ensemble. Elle s'exprime, le long des versants en pente par la courbure de la base des troncs d'arbre, l'inclinaison des piquets des pâtures, et le fauchage de la partie sommitale des affleurements de roches meubles.

1.2.4. Les fluages

Le fluage se produit généralement au sein de formations (marnes, argiles plastique, etc.) de grande épaisseur, supportant une surcharge (naturelle ou anthropique). Ce type de phénomène s'observe également dans des remblais constitués d'argiles, qui ont été amenées à des teneurs en eau élevées au cours du temps et fluant sous leur propre poids. Dans l'exemple de la figure 1.4, le banc de marne flue sous le poids de la falaise calcaire. Ceci peut provoquer une fissuration du banc calcaire peu déformable et un risque d'écroulement de la falaise.

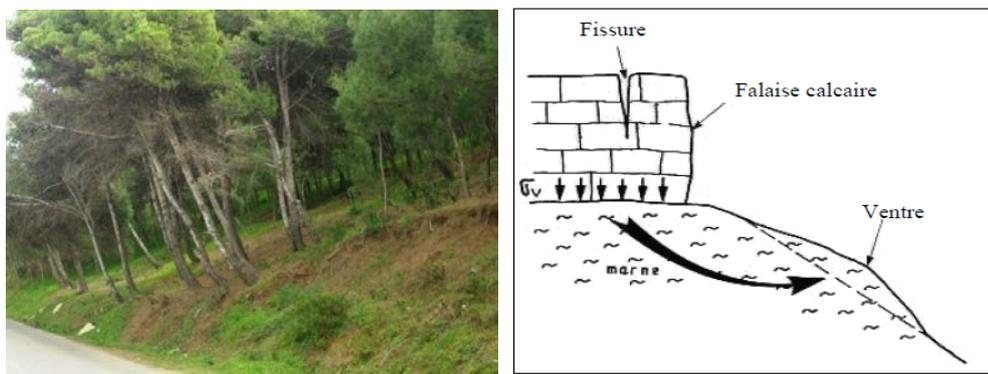
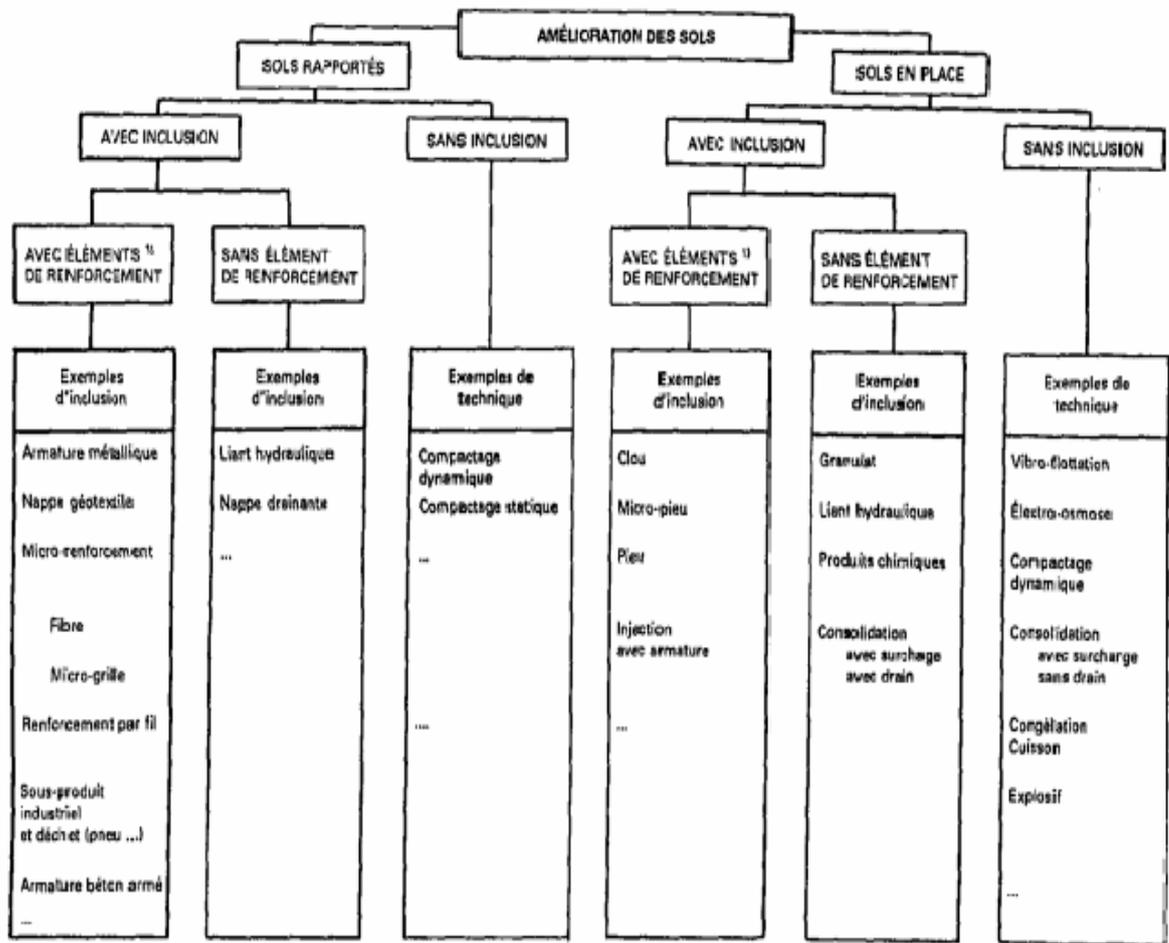


Figure 1. 4: Fluage (Badre JANVIER 2008, Exemple de fluage (Durville.J Sève G., 1996).

RN 11, CHERLCHELL, ALGÉRIE)

1.3. LES DIFFERENT METHODE DE RENFORCEMENT DES SOL

Il existe différentes méthode de renforcement des sols plus ou moins anciens et plus ou moins développée. Magnan (1994) présente un bilan des méthodes permettant de réduire les tassements des remblais édifiés sur les sols .Les diverses méthode ainsi que les principales conclusions sont reportée dans les tableaux ci-après.



1) renforcement de sol :
domaine d'application de la présente norme

Figure 1. 5 : Amélioration des sols (Rabah ARAB, 2009)

Technique	Données nécessaires	Contrainte	Fiabilité	commentaire
Pré chargement	-Compressibilité -perméabilité	Tems nécessaire	Peu fiable pour obtenir de faible déplacement	Lent pencher
Pré chargement avec drains verticaux	-Compressibilité -Perméabilité -verticales et horizontales	Plus rapide	plus flexible	<ul style="list-style-type: none"> • Rapide • relativement cher.
Remplacement du sol	Épaisseur de la couche	Mise en dépôts du sol nouveau matériau	Bonne en cas de remplacement total	Rapide cher
Colonne ballastée, colonne de sable compacté	Résistance et déformabilité du sol	Équipement plot expérimental	Bonne après analyse de plots expérimentaux	Cher rapide
Dalle sur pieux	Résistance du sol		Bonne	Très cher
Électro –osem ose et injection	Propriété chimico-physique compressibilité perméabilité	Destruction des électrodes alimentation électrique	Incertaine	Très cher
Remblai léger	Compressibilité et perméabilité	Protection du matériau léger	Peu fiable pour obtenir des faibles déglacement	Cher
Remblai sur inclusions rigides	Résistance et déformabilité du sol		Bonne	Cher rapide
Colonne de jet grouting	Résistance et déformabilité du sol		Bonne	Cher rapide

Tableau 1. 2 : Différentes méthode de renforcement des sols (Magnan, 1994)

Les chercheurs ont distingué deux échelles de renforcement suivant le type d'inclusion choisi, le micro-renforcement à l'échelle granulaire et le macro-renforcement à l'échelle du massif de sol :

- **Le micro-renforcement** est obtenu par association de sol avec l'élément de renforcement orienté d'une manière quelconque, dont les dimensions sont petites par rapport à la dimension des particules du sol renforcé.
- **Le macro-renforcement** c'est par l'association du sol avec des éléments de renforcement dont les dimensions sont relativement importantes par rapport à la dimension des particules du sol à renforcer. (Inclusion géosynthétique).

1.4. Étude des renforcements des sols par géo synthétiques

La technique de renforcement des sols par géosynthétiques est de plus en plus utilisée et développée pour une large variété. Selon le domaine d'application ou la fonction de l'ouvrage, tel que: les murs de soutènement, les talus, les remblais et les sols de fondations. et domaine d'environnement tel que l'enfouissement des déchets.

Ces produits ont aidé les concepteurs et les ingénieurs pour résoudre plusieurs types de problèmes d'ingénierie où l'utilisation de matériaux de construction traditionnels seraient limités ou beaucoup plus cher, ils sont constitués de fibres polymères synthétiques et sont utilisés généralement pour remplir l'une des fonctions suivantes: séparation, renforcement, filtration, protection ou drainage.

Les principaux types des géosynthétiques incluent Géotextiles, Géogrilles, Géomembranes, Géofilet et Géocomposites.

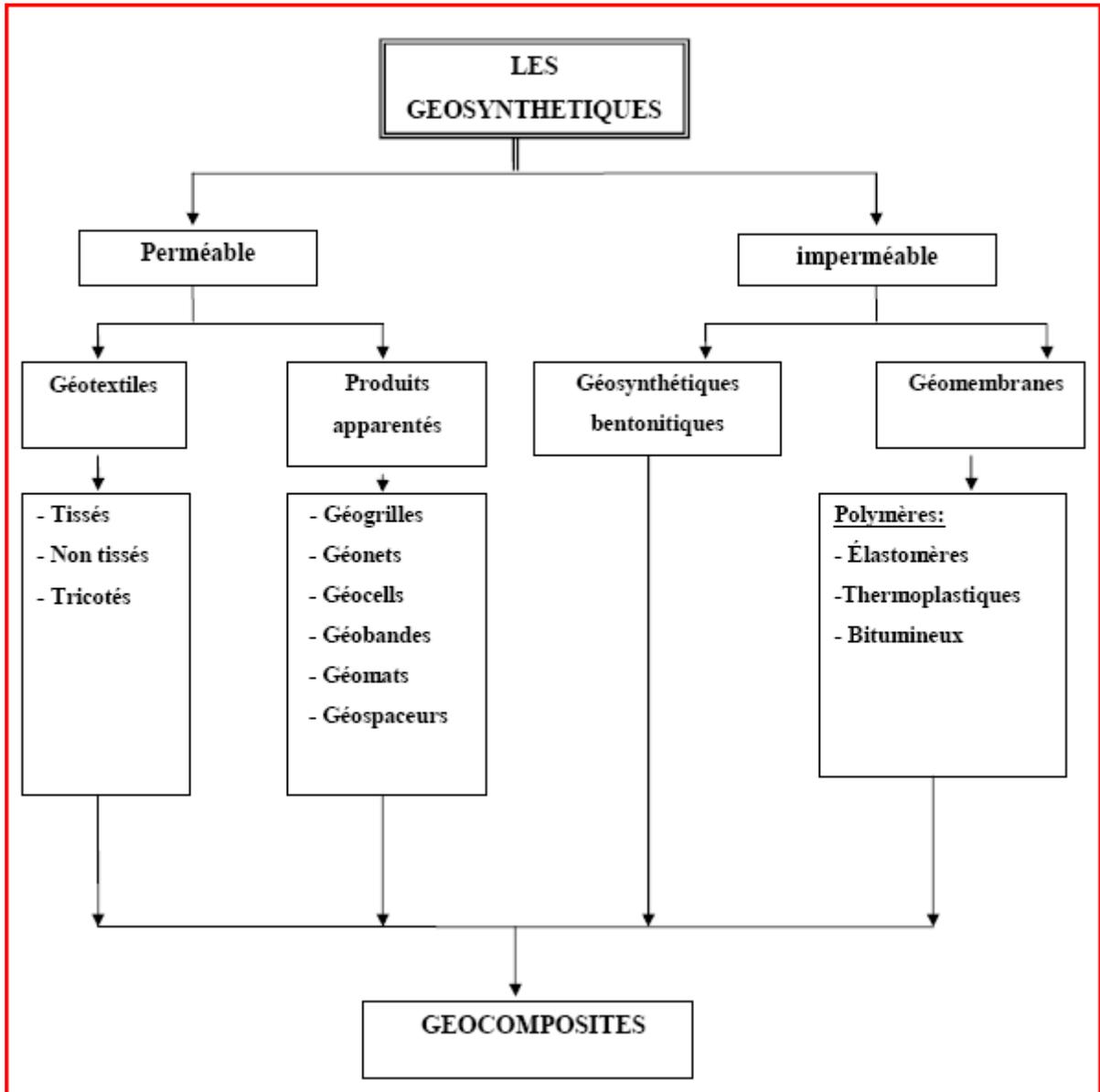


Tableau 1. 3 : Les types principaux des géosynthétique (Lamara S, 2011)

1.4.1. Géotextiles

Géotextiles (Figure 1.6, Bathurst 2007) sont des feuilles continues de tissés, non tissés, tricotés ou des fibres ou des fils cousus : Les feuilles sont souples et perméables et ont généralement l'aspect d'un tissu.

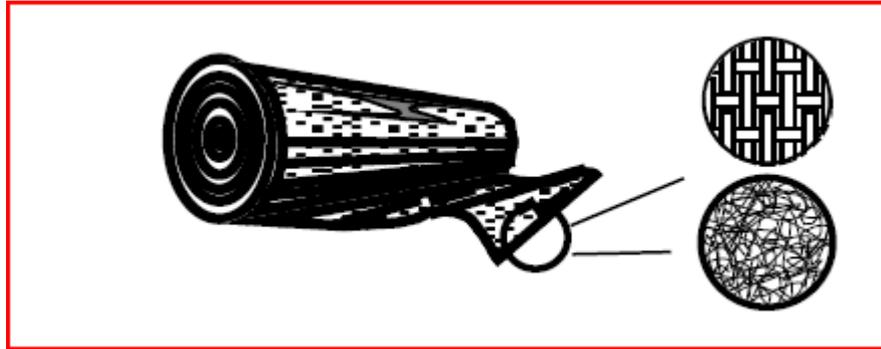


Figure 1. 6 : Géotextiles (Figure 1a, Bathurst 2007)

- **Non tissé** est un géotextile se présentant sous forme d'une feuille manufacturée, constituée d'un voile ou d'une nappe de fibres, orientées aléatoirement, et dont la liaison peut être de différents types :
 - **La liaison mécanique** est faite par entrelacement des fibres, à partir d'une série d'aiguilles qui s'enfoncent dans la nappe qui défile (non tissé aiguillet).
 - **La liaison chimique** est réalisée soit à l'aide de résines soit d'émulsions qui appartiennent à des composés proches des caoutchoucs naturels.
 - **La liaison thermique** Dans laquelle les fibres sont soudées ensemble par la chaleur et/ou pression à leur point de contact dans la masse.

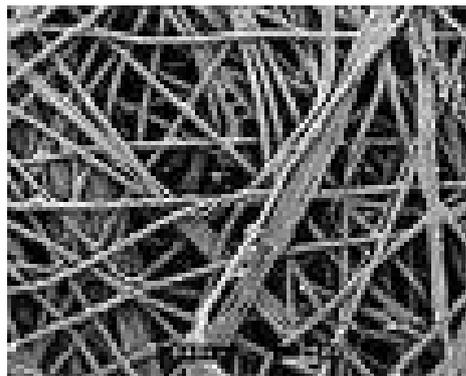


Figure 1. 7 : Exemple de géotextile non tissé (Baziz. F.2012)

- **Tissé** : sont généralement tisse plat avec une haute résistance et de faibles élongation à la rupture sont constitué de séries de fils perpendiculaires combinés de façon systématique :

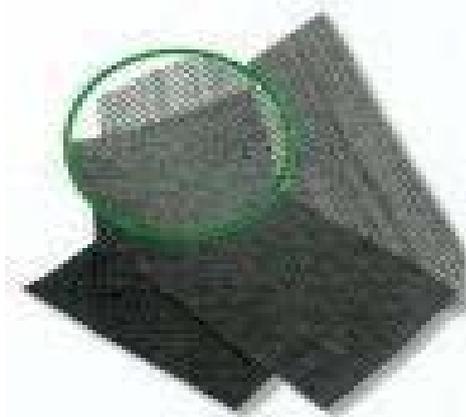


Figure 1. 8: Exemple de géotextile tissé (Baziz. F.2012)

- **Tricoté** : est un géotextile produit par assemblage de deux nappes de fils parallèles au moyen d'un fil de liaison, de façon à obtenir la répartition géométrique désirée, il est très déformable et sont rarement utilisée



Figure 1. 9: Exemple de géotextile tricoté (Baziz. F.2012)

1.4.2. Produits apparentés

Ces produits de fibres polymères synthétique sont généralement très employés dans le domaine de la géotechnique et du génie civil

- **Une géogrille**

Est une structure plane, à base polymère, constituée par un réseau ouvert d'éléments résistants à la traction, reliés entre eux selon un motif régulier, dont les ouvertures ont des dimensions supérieures à celles des constituants. Elles sont utilisées en contact avec le sol pour renforcer les fondations, remblais...etc. Il y a deux types de géogrilles :

- **Géogrille uni axiale** : la résistance à la traction est plus importante dans un sens (longitudinal ou transversal).
- **Géogrille bi axiale** : la résistance à la traction est sensiblement équivalente dans le sens longitudinal et transversal.

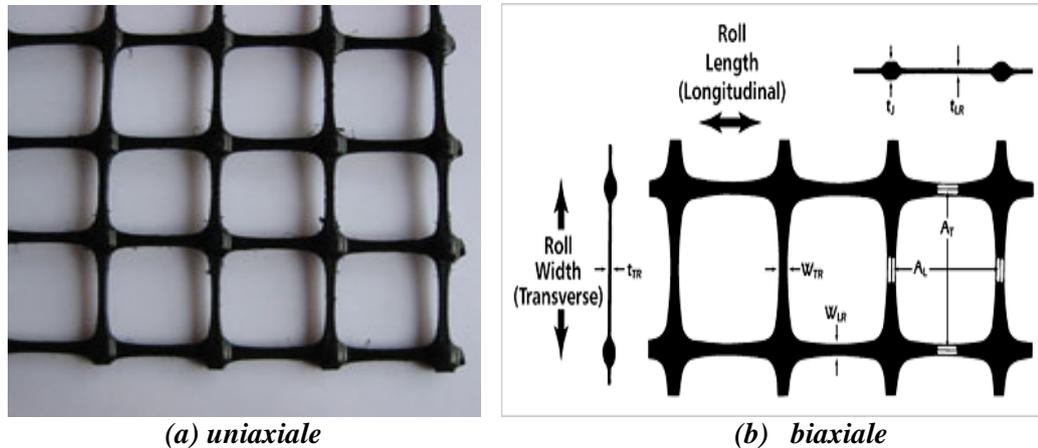


Figure 1. 10: Géogrilles (Baziz. F.2012)

1.4.3. Propriétés des géogrilles utilisées en renforcement

- Les géogrilles ont des taux de travail très élevés, car les matières premières à haut module ont un faible fluage.
- Les géogrilles sont disponibles avec différentes résistances à la traction (entre 20 kN/m et 1000 kN/m) et différentes ouvertures de mailles. Pour des utilisations spéciales, nous pouvons réaliser des résistances à la traction de plus de 1000kN/m.
- Les caractéristiques de traction et d'allongement des géogrilles ne varient que faiblement sous des variations importantes de température et sous des contraintes permanentes.
- Les géogrilles sont conditionnées de manière standard, ceci afin de réduire au mieux les recouvrements.
- Les géogrilles sont faciles à manier et à mettre en œuvre, car elles peuvent être déroulées et pliées. Elles peuvent être facilement découpées aux dimensions voulues et n'ont pas de bord coupant pouvant entraîner des blessures.

1.4.3.1. Un géofilet

Dans le cas d'un géofilet le liage est constitué par des nœuds, les filets sont toujours souples, alors que les grilles sont généralement rigides.

1.4.3.2. Les géocomposites

Ils représentent un assemblage de matériaux, utilisant au moins un géotextile ou un produit apparenté parmi ses composants.



Figure 1. 11: (a) les géocomposite, (b) Talus renforcé par les géocomposites (Baziz. F.2012)

1.4.3.3. Tissé de bandelette : c'est une sorte de tissé résultant de l'entrecroisement de bandelettes. Ces produits sont surtout employés comme renforcement et protection contre l' érosion.

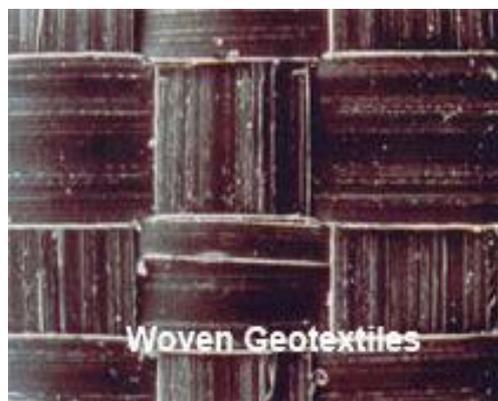


Figure 1. 12: Un tissé de bandelettes (Baziz. F.2012)

1.4.3.4. Mattes

Elles sont constituées de fils relativement rigides, liées avec des températures à leurs intersections.

1.4.3.5. Géomembranes

Ce sont des feuilles étanches, souples, minces et continues, fabriquées à partir de produits synthétiques ou bitumineux, utilisées dans le domaine de la géotechnique et du génie civil.

La principale application des géomembranes est donc de constituer une barrière étanche soit entre un sol et un fluide, soit entre un sol et un gaz.

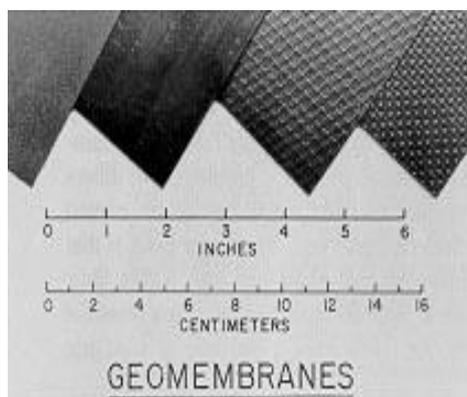


Figure 1. 13: les Géomembranes



Figure 1. 14: Talus renforcé par des mattes.

1.5. L'UTILISATION DES GEOSYNTHETIQUES EN ALGERIE

Les géosynthétiques ont connu un essor considérable en Algérie dans les domaines de la géotechnique et du génie civil durant ces dernières années, ils sont présents dans la plupart des ouvrages géotechniques et leurs domaines d'application ne cessent de s'accroître.

1.5.1. CONSTRUCTION d'une route par la technique des géosynthétiques a M'Sila

Ce projet est le première en Algérie qui utilise les geosynthetiques, il consiste à la réalisation d'une route reliant deux villages dans les hauts plateaux de l'Algérie a la Wilaya de Msila entre (Ain Khedra et M'Cif.), Le site est connu par sa situation immergé, sa sensibilité a l'eau et sa mauvaise portance du sol de fondation.



Figure 1. 15: Tracée de la route entre M'Cif et Ain El Khadra (Arab.R,et al 2009)

Après les études géotechniques du site du projet les ingénieurs on valider définitivement la solution en intégrant les géosynthétique (figure 1. 16), cette solution consiste a une séparation et filtration entre le sol support et les matériaux d'apport.

- Une couche de remblais d'une épaisseur de 30cm.
- Une géogrille de renforcement bidirectionnelle des tubes en PEHD de diamètre 1000 mm, pour assurer la continuité des écoulements naturels entre les deux parties du chott.
- Une protection des talus du remblai routier constituée par un géotextile de séparation/filtration

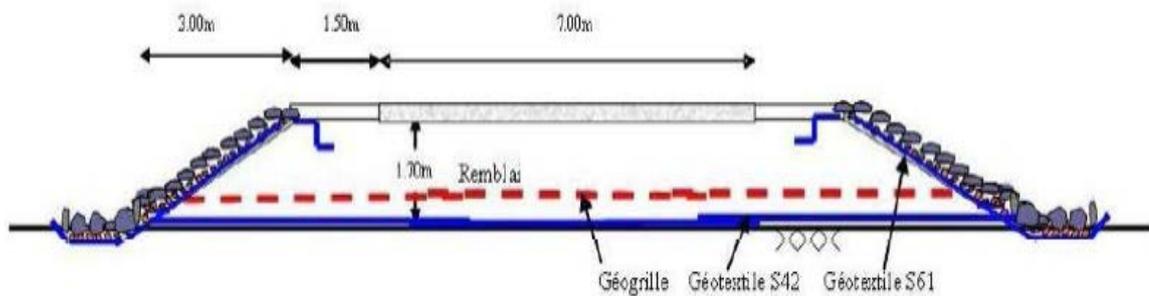


Figure 1. 16: Conception du remblai intégrant les géosynthétiques (Arab.R,et al 2009)

La figure 1. 17 illustre les difficultés de circulation et d'exécution des travaux sans la mise en place d'un géotextile de filtration/séparation.



Figure 1. 17: Difficultés de mise en place de la première couche sans géotextile (Arab.R,et al 2009)



Figure 1. 18: Mise en place du géotextile et de la géogrille (Arab.R,et al 2009)

1.5.2. Traitement d'un glissement de terrain sur le CW13 à Tifra willaya de Bejaïa

Ce projet concerne une route montagneuse suite concerne une route dans une zone montagneuse suite à un événement d'intempérie sur un linéaire de 80 m.

La (figures 1.19) montre le glissement :



Figure 1. 19: Vue du glissement (Arab.R,et al 2009)

Plusieurs solutions techniques de traitement du glissement et de la reconstruction de la chaussée ont été proposé, mais en raison des délais de réalisation imposé, la seul solution retenus est celle d'un massif renforcé par géotextile.

Mur de soutènement renforcé par des géotextiles couplés à un drainage par géocomposite équipé de mini-drains.

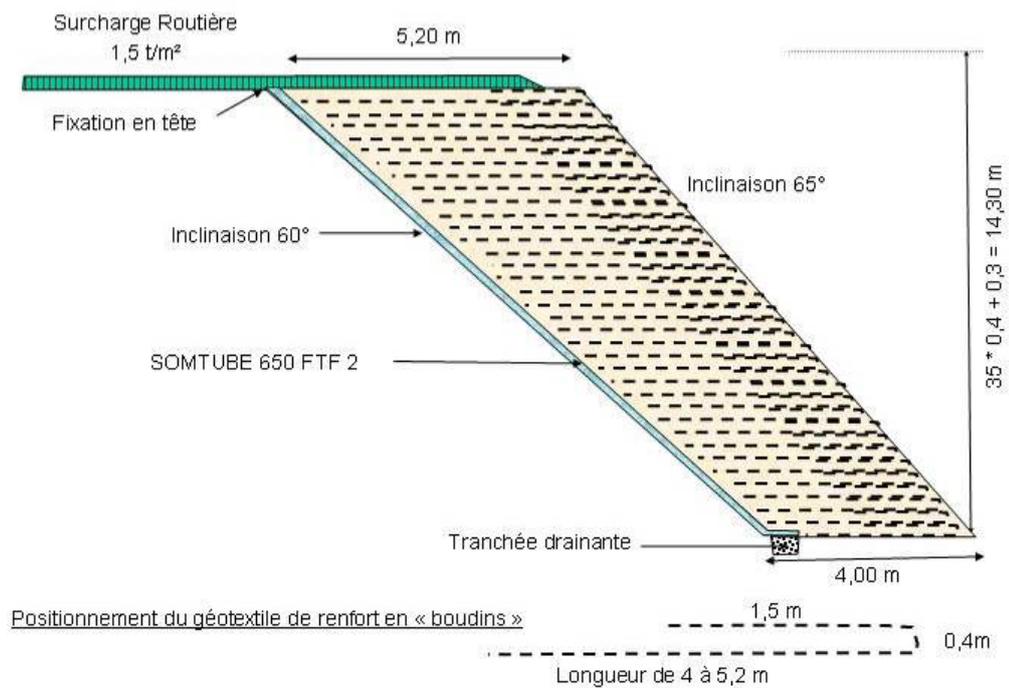


Figure 1. 20: Profil de l'ouvrage et densité de renforcement (Arab.R,et al 2009)

Les figures 1.21 : montrent l'ouvrage respectivement en cours de construction et l'ouvrage achevé. Ce mur une fois construit a permis à élargir la chaussée sur le linéaire.



Figure 1. 21: Vues de l'ouvrage en cours de construction et achevé (Arab.R,et al 2009)

1.5.3. Traitement d'un glissement de terrain sur la RN 12 – willaya de Bejaïa

Le projet concerne une section de la RN 12. Un tassement de 30 cm de la chaussée et parus due aux mouvements des terres,



Figure 1. 22: Vue de la zone de glissement (Arab.R,et al 2009)

Deux variantes en étaient proposées pour ce projet, un mur de soutènement rigide en béton armé muni de contreforts et un mur de soutènement renforcé par géotextile.

En raison de la difficulté de réalisation du mur de soutènement en béton armé vue les différentes contraintes du site la deuxième solution était choisie.

Les figures (1.23. 1.24.) illustrent l'ouvrage pendant la phase travaux et les figures précédentes montrent l'ouvrage après son achèvement,



Figure 1. 23: vue de l'ouvrage pendant la phase travaux (Arab.R,et al 2009)



Figure 1. 24: Vue de l'ouvrage achevé (Arab.R,et al 2009)

1.6. Conclusion

La technique de l'utilisation des géosynthétiques pour le traitement de certains glissements de terrains constitue une réelle alternative innovante et économique où les méthodes traditionnelles sont très difficiles et impossible à mettre en œuvre par exemple à cause de la présence d'eau et de sols de fondations de faible portance.

Les principaux avantages de cette technique sont présentés dans la grande souplesse des massifs du sol renforcés par géosynthétiques, et l'intégration des ouvrages à leurs environnement.

Chapitre 2 :

Le Comportement

Thermomécanique des sols

Renforce

2.1. INTRODUCTION

Plusieurs problèmes peuvent subir les échantillons des sols, parmi ces derniers des perturbations sont liées à la variation thermique depuis le carottage et le transport à l'arrivée au laboratoire, D'autres problèmes se trouvent dans l'enfouissement des câbles des lignes à haute tension et le stockage des déchets radioactifs à haute activité et les structures géothermiques (Laloui, 2008). Pour cela la compréhension du comportement thermomécanique du sol est devenue un important thème dans le domaine de la mécanique des sols, ce chapitre est une contribution au développement des connaissances dans ce domaine.

2.2. COMPORTEMENT THERMIQUE Du SOL

2.2.1. LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DU SOL

La conductivité thermique du sol est une quantité de chaleur qui se propage, une section transversale unitaire (A), dans un temps unitaire sous un gradient thermique unitaire appliqué au sens de la direction du flux de chaleur (q).

Pour un élément prismatique de sol ayant l'aire de la section transversale A traversée par un flux de chaleur (q).

(Figure 2.1), la conductivité thermique du sol est calculée par :

$$K = \frac{ql}{A(T_2 - T_1)} \quad 2.1$$

Où la température diminue de T_2 à T_1 sur la longueur L de l'élément du sol dans cette définition est considéré assez grand pour représenter son homogénéité. Il existe plusieurs phases dans un sol à l'état non saturé solide, liquide, gaz. Lorsque le sol est soumis à un gradient thermique, il y a toujours le transfert de chaleur et le transfert de masse (gaz et liquide) en même temps. À cause de ces phénomènes La mesure de la conductivité thermique du sol devient très délicate (Anh-Minh, 2005).

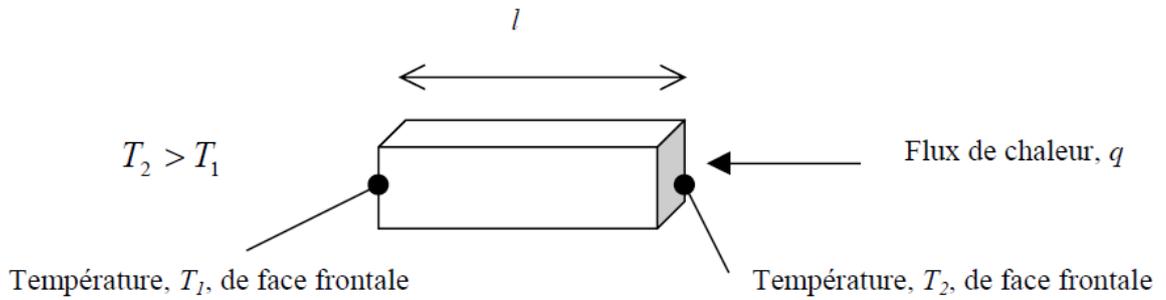


Figure 2. 1 : Flux de chaleur traversant un élément prismatique de sol. (Anh-Minh, 2005)

Salomone & Kovacs (1984) ont effectué des séries de mesures sur un matériau de référence qui est une argile limoneuse en condition non saturées. Les résultats expérimentaux montrent que, pour une masse volumique apparente sèche donnée, la conductivité thermique peut s'écrire sous la forme :

$$\lambda = A \log w + B \quad 2.2$$

$$w = \frac{\rho_e}{\rho_s} \Rightarrow \lambda = A \log \rho_e + B' \quad 2.3$$

Avec A, B et B' ($=B - A \log \rho_s$) trois constantes propres au matériau généralement, les variations de conductivité thermique avec la température, pour des plages de température de l'ordre de quelques dizaines de degrés, sont négligées devant les variations dues aux changements de masse volumique apparente de l'eau.

La conductivité thermique λ du sable limoneux argileux en conditions saturées est

$$\lambda = 1,7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad 2.4$$

Dans le cas du sable limoneux argileux, l'expression de la conductivité thermique en conditions non saturées est approchée par la relation (Saix, 1987) :

$$\lambda = 1.46 \log \rho_e - 2.16 \quad 2.5$$

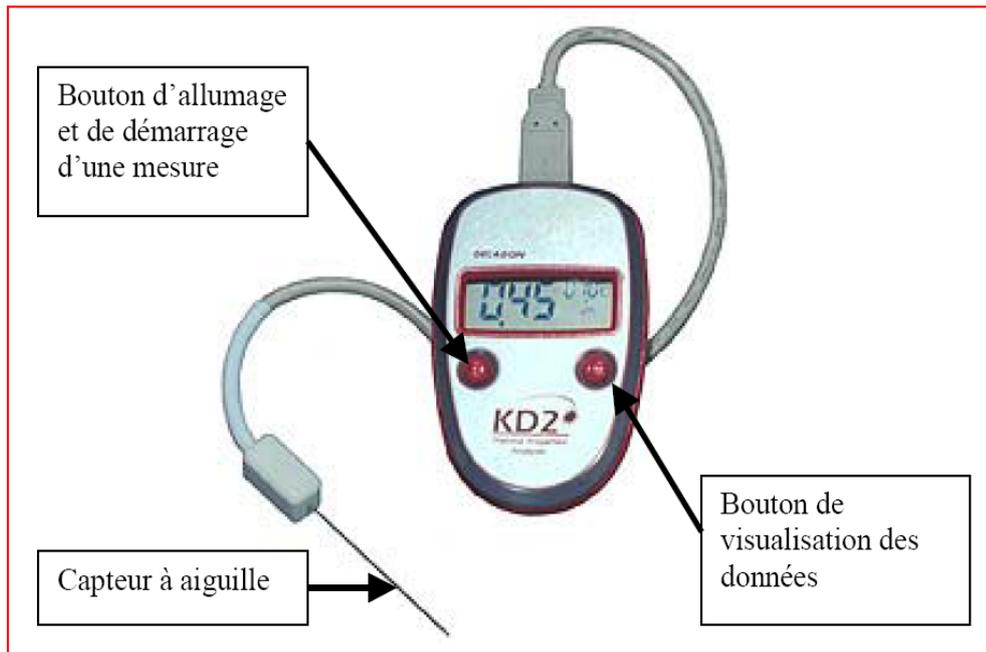


Figure 2. 2 : Instrument pour mesurer la conductivité thermique du sol. (Anh-Minh, 2005)

2.2.2. Effet de la température sur le comportement du sol

Le terme « consolidation thermique » vient par les observations de l'auteur (pawell, 1976), il a remarqué que les courbe de variation volumique sont similaire à celle de la consolidation classique d'après des essais de chauffage sur des sols à charge constante dans la cellule œdométrique.

Cette consolidation thermique est due à la pression interstitielle qui est générée par des expansions thermiques différentes des constituants de sol (solides et eau)

Campanella et Michell (1968) ont étudié la dilatation thermique des composants du sol en réalisant des essais de chauffage dans une cellule isotrope. ils ont formulé une relation qui permette à déterminer la variation volumique du sol à partir de la dilation thermique des constituants et du volume d'eau drainé à l'extérieur.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V_{dr} - (\alpha_w V_w + \alpha_s V_s) \Delta T}{V} \quad 2.6$$

Où : ε_v est déformation volumique, qui est positive dans le cas d'une contraction et négative dans le cas d'une dilatation, ΔV_{dr} est volume de l'eau expulsée à l'extérieur, α_s et α_w est coefficients d'expansion thermique du squelette solide et de l'eau libre, respectivement V_s et V_w est volume du squelette solide et de l'eau libre, respectivement, ΔT est variation de température, V est volume initial de l'échantillon.

Campanella et Michell (1968) ont également étudié l'augmentation de la pression interstitielle dans des essais de chauffage non drainé. L'équation suivante a été proposée pour calculer la pression interstitielle générée dans le sol:

$$\Delta_u = \frac{n \Delta T (\alpha_s + \alpha_w) + \alpha_{st} \Delta T}{m_v} \quad 2.7$$

Où : n est: porosité du sol, α_{st} est coefficient de la variation volumique due au changement de la température, m_v est coefficient de compressibilité du sol.

Burghinoli et al ;(2000) ont fait des essais du chauffage sur des sols en appliquant un cycle de température sur des échantillons normalement consolidé et sur consolidé drainé (Figure 2-3). À température constante, une variation de volume a été enregistrée.

(De point b à c).cette variation est expliqué par les auteurs au réarrangement des particules de sol dû au chauffage, qui dépend du temps.

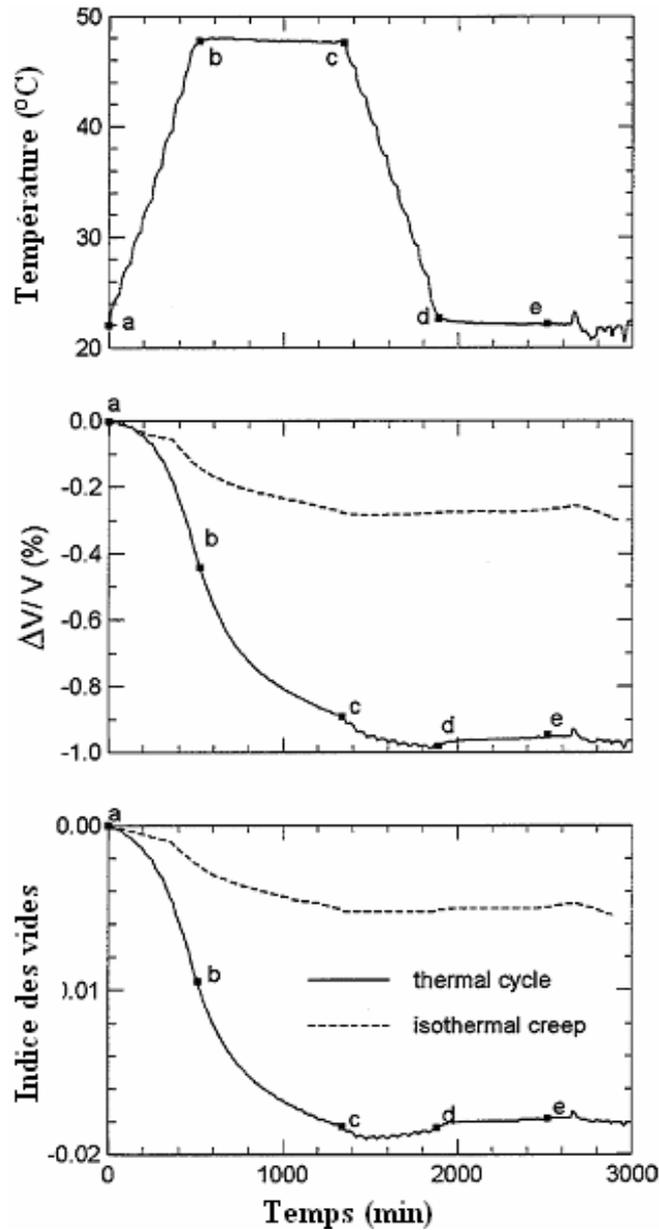


Figure 2. 3 : Variation volumique sous un cycle thermique (Burghinoli et al. 2000)

Le phénomène du fluage causé par les sollicitations mécaniques sous l'effet de la température a été étudié par plusieurs auteurs. Des essais de chauffage ont été réalisés par Zhang et al (2007) (de l'ordre de mois pour chaque palier de température) à différentes contraintes axiales sur l'argile à Opalinus et sur l'argilite du Callovo-Oxfordien. La Figure 2.4 présente les pentes de déformation axiale en fonction de la température des essais à trois contraintes axiales. À des températures inférieures à 50°C, le fluage devient plus important quand la température est plus élevée. À des températures supérieures à 50°C, le fluage semble en revanche diminuer avec l'augmentation de la température, ce qui, d'après les auteurs, est attribué à l'expulsion de l'eau libre due au chauffage.

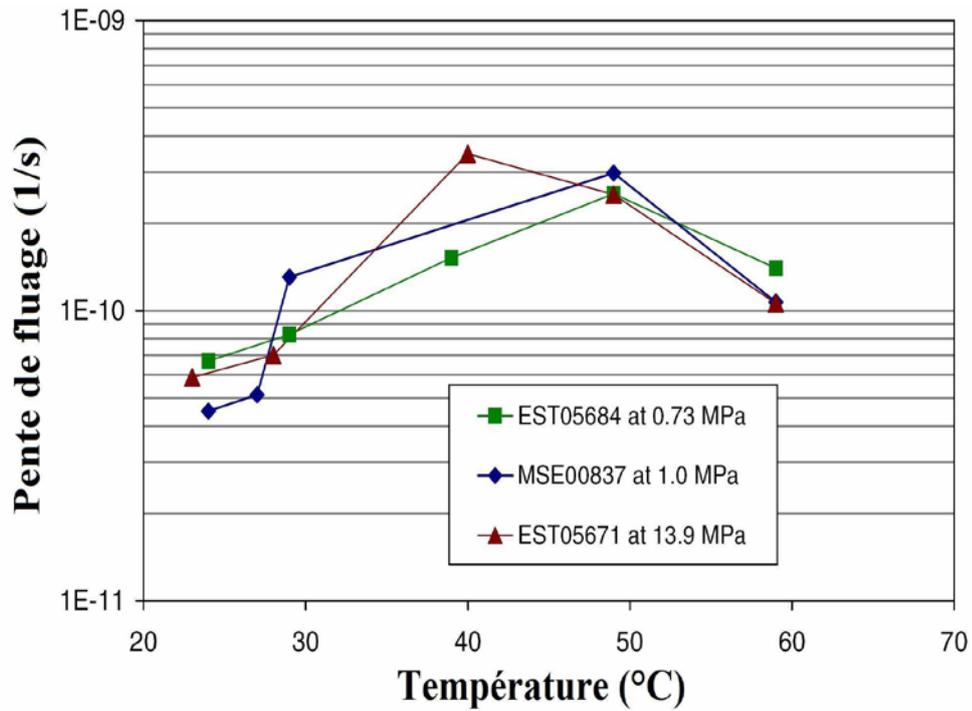


Figure 2. 4 : Vitesses de déformation axiale ($d\epsilon_a/dt$) en fonction de la température (Zhang et al. 2007)

Pendant des essais de compression axiale à des températures différentes sur des sols, Gasc-Barbier et al. (2004) ont montré que le taux de fluage dépend de la charge déviatorique appliquée, de l'histoire des contraintes, et de la température. Les résultats ont montré que lorsque la température augmente, la vitesse de déformation liée au fluage devient plus importante.

Les résultats expérimentaux obtenus et les observations dans la littérature montrent ainsi une influence importante de la température sur le comportement volumique, à la fin de chaque sollicitation mécanique à températures élevées, Zhang et al (2007) ont observé que la température augmente le comportement visqueux, cette observation est expliquée par la diminution de la résistance au cisaillement entre les particules ce qui favorise la déformation.

2.2.3. Effet de la température sur le comportement mécanique

De nombreux travaux sur l'effet de la température sur le comportement mécanique des sols ont été étudiés dans la littérature, LE Trung Tinh, (2008) a cité (Del Olmo et al. 1996; De Bruyn et Thimus, 1996; Tanaka et al. 1997; Burghinoli et al. 2000; Cui et al. 2000; Graham et al. 2001; Sultan et al. 2002; Zhang et al. 2007; etc.). Ces travaux ont touché les effets de la température sur principalement deux aspects de comportement. Premièrement, l'effet de la température sur les caractéristiques élasto-plastiques, Deuxièmement, l'effet de température sur

les caractéristiques à la rupture ou à l'état critique, qui sont : la résistance au cisaillement, l'angle de frottement ϕ , qui seront présentés par la suite

2.2.4. Effet de la température sur le comportement élasto-plastique

Plusieurs auteurs ont observé une diminution de la limite pseudo élastique avec la température. Cekerevac et Laloui (2004) ont regroupé et présenté ces résultats de Tidfors et Sallfors (1989) [1], Erikson (1989) [2], Moritz (1995) [3], Boudali et al. (1994) [4] par la présente (figures 2-5) les mêmes observations ont été remarquées dans les travaux de Sultan et al (2002) sur l'argile de Boom (Figure 2-6), de Cekerevac et Laloui (2004) sur une kaolinite reconstituée, d'Abuel Naga et al. (2006) sur l'argile naturelle de Bangkok.

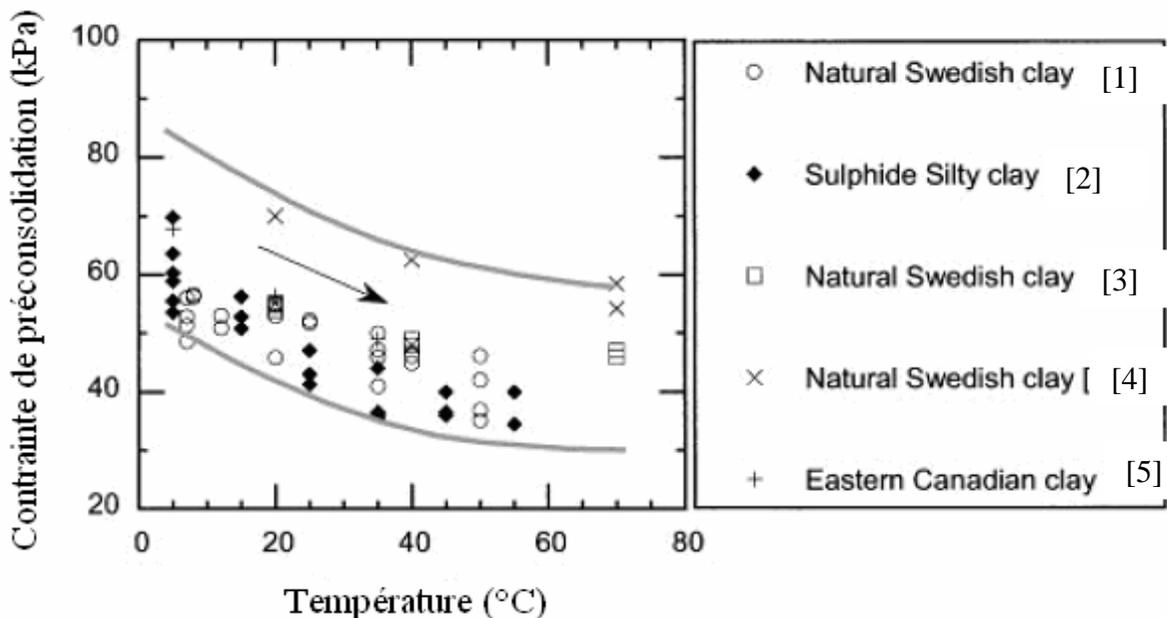


Figure 2. 5 : Effet de la température sur la limite élastique : résumé des résultats de plusieurs auteurs (Cekerevac et Laloui, 2004)

Les limites élastiques Pour chaque sol, obtenues des essais de compression isotrope et celles obtenues des essais de cisaillement pour établir la surface de charge. Un rétrécissement de la surface de charge suite à l'augmentation de la température a été observé par plusieurs auteurs, comme Tanaka et al. (1997) (l'argile illitique reconstituée) (Figure 2-7), Cekerevac et Laloui (2004). Ces résultats montrent que lorsque la température augmente, le domaine élastique se contracte.

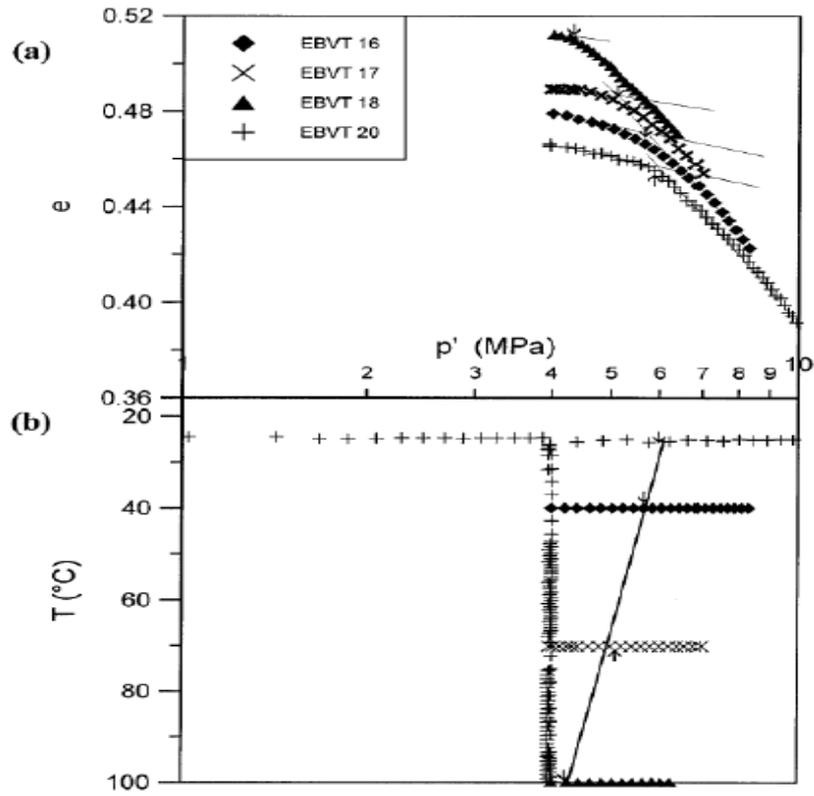


Figure 2. 6 : Les courbes de compression isotrope à différentes températures, essais sur l'argile de Boom (Sultan et al. 2002)

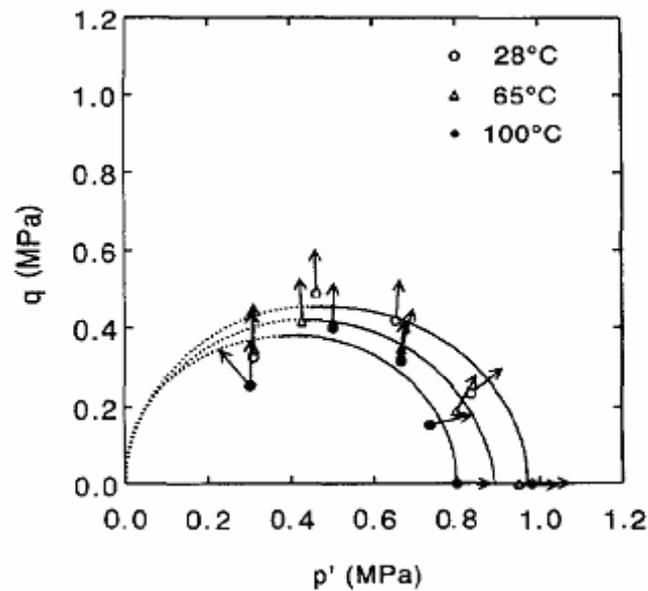


Figure 2. 7 : Surfaces de charge déterminées à partir des essais de cisaillement à différentes Températures, $p'_0 = 0,5$ MPa, $R_{oc} = 2$ (Tanaka et al. 1997)

Différentes études ont été effectuées sur les effets de la température sur les propriétés de compressibilité (C_c et C_s) et sur le module de Young (E) les auteurs ont observé une augmentation du module de Young sécant (E), calculé à déformation axiale de 0,5% dans les essais de cisaillement) avec l'augmentation de la température Cekerevac et Laloui (2004) (Figure 2.8).

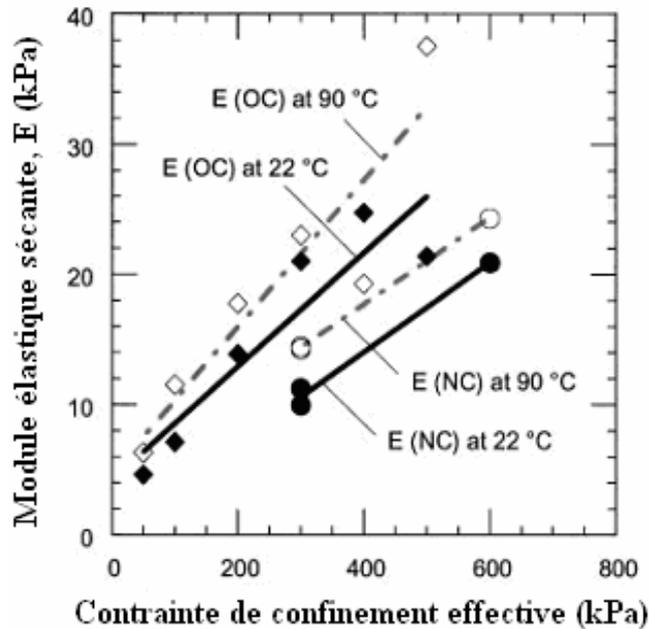


Figure 2. 8 : Modules d'élasticité E obtenus des essais de cisaillement à 25 et 90°C (Cekerevac et Laloui, 2004)

2.2.5. Effet de la température sur le comportement à la rupture ou à l'état critique

Des essais de cisaillement non drainé sur des sols argileux ont été effectués par De Bruyn et Thimus (1996) dans trois températures qui varient entre 20, 50 et 80°C (Figure 2.9). Les trois cisaillements ont été effectués à une même contrainte initiale de 3,1 MPa. Une diminution de la résistance au cisaillement et une augmentation de la pression interstitielle avec une température plus élevée a été remarquée. La vitesse de cisaillement n'a pas été précisée par ces auteurs. À cet effet, Zhang et al. (2007) ont réalisé sur l'argile à Opalinus des essais de cisaillement non drainés à une vitesse de déformation contrôlée de 10^{-7} s^{-1} . Les résultats (Figure II-8) montrent que le sol devient moins résistant à une température plus élevée. D'après les auteurs, cette réduction de résistance pourrait être attribuée à l'augmentation de la pression interstitielle due au chauffage, qui diminue la pression moyenne effective dans le sol.

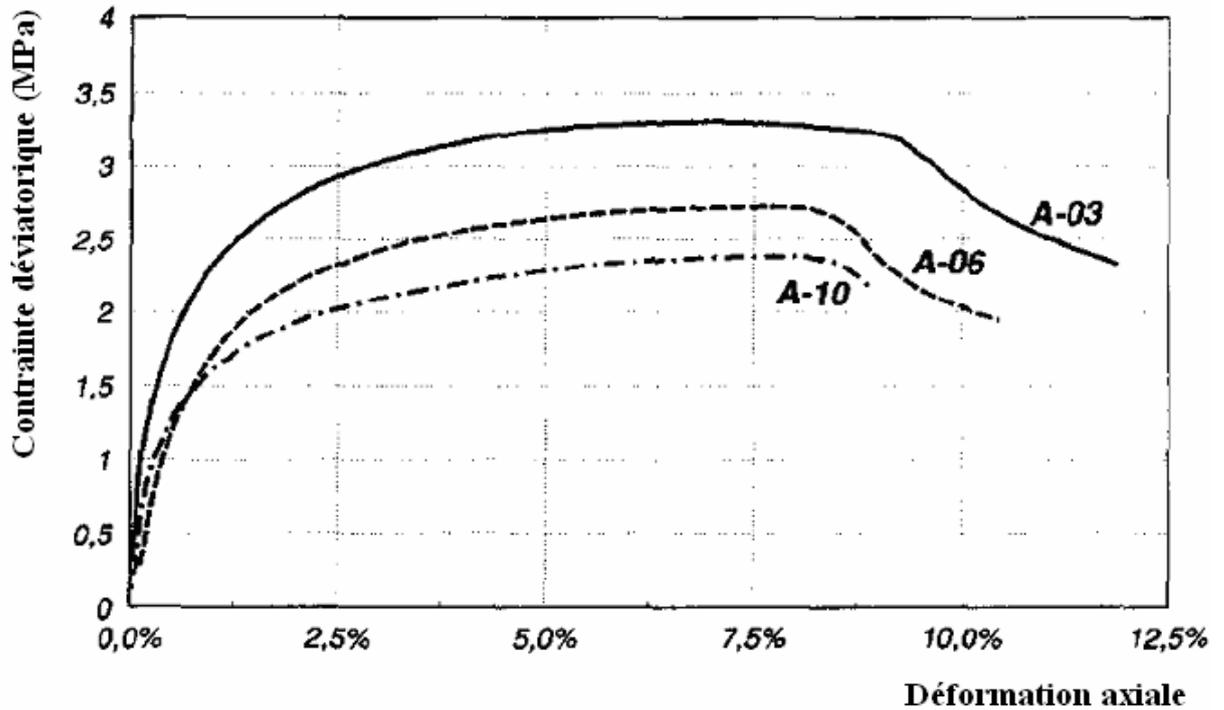


Figure 2. 9 : Cisaillement non drainé à différentes températures. A-10 : 80 °C, A-06 : 50 °C, A-03 : 20 °C (De Bruyn et Thimus, 1996)

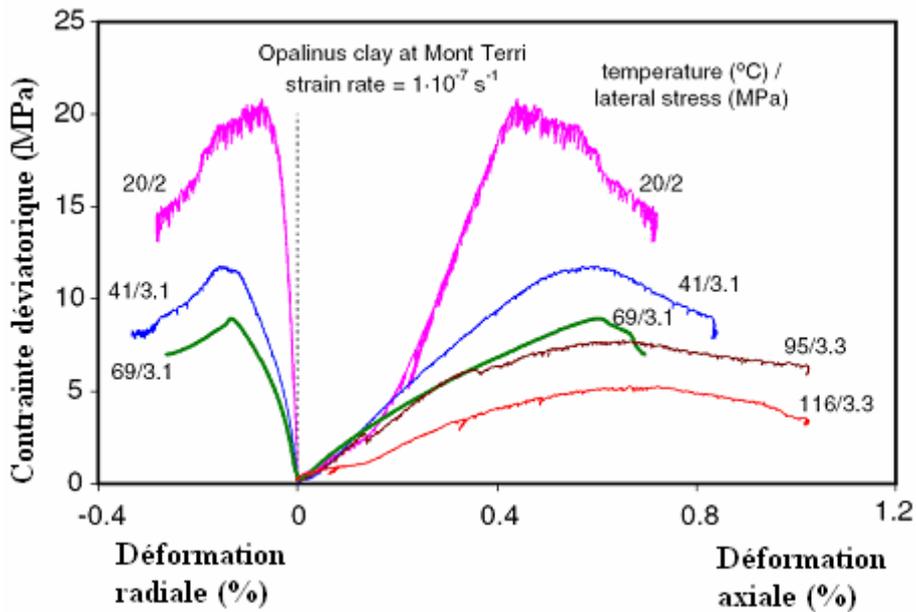


Figure 2. 10 : Comportement de l'argile à Opalinus cisillée à différentes températures. (Zhang et al., 2007)

Des résultats différentes et inverse ont été observé dans les travaux de Cekerevac et Laloui (2004) qui ont effectué des essais de cisaillements avec des différente plage de température sur des échantillons de sol (Kaolinite reconstituée) sur consolidé et normalement consolidés les résultats ont montré une augmentation de la résistance au cisaillement avec la température Une remarque similaire a été également effectuée par Abuel-Naga (2006) dans les cas d'essais non drainés sur des échantillons d'un argile de Bangkok sur consolidés et normalement consolidés (Figure 2.11).

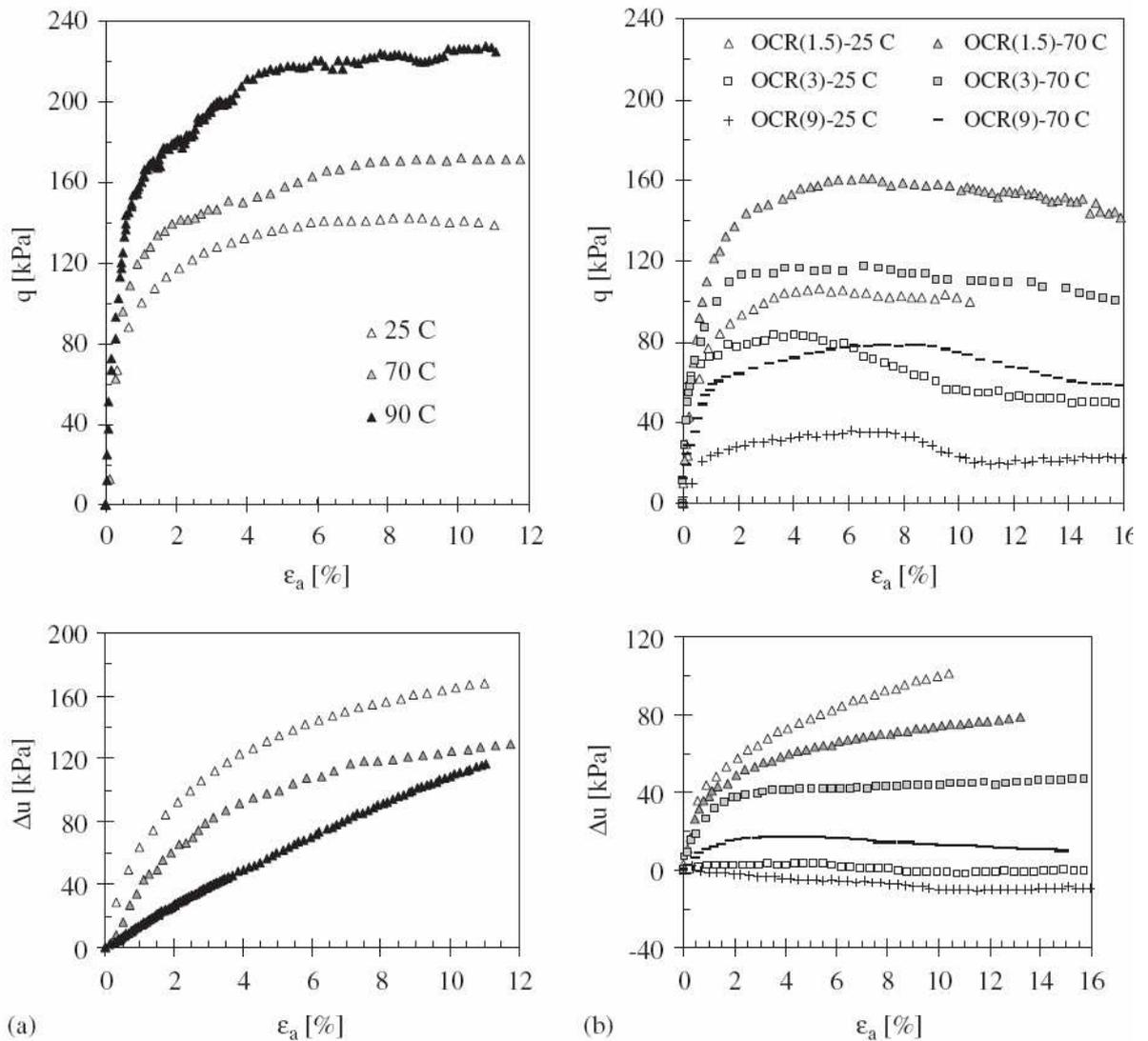


Figure 2. 11 : Résultats des essais de cisaillement non drainés sur des échantillons (normalement consolidés et sur consolidés) de l'argile naturelle de Bangkok ($p'_0 = 0,3$ MPa) à différentes températures (Abuel-Naga, 2006b).

En contrepartie il y'a d'autres auteur citant (Burghinoli et al. 2000) qui n'ont pas remarqué une différence importante entre les résistances au cisaillement obtenus a différente température (Figure 2.12). Yu Jun Cui 2008 a cité des travaux de plusieurs auteur qui ont atteint les mêmes conclusions, Cekerevac et Laloui (2004) ont montré que y'avait pas une influence de la température sur les caractéristique a l'état critique, avec aucun effet de température sur les courbe contrainte – déformation et sur l'angle de frottement ϕ , ces courbes a différente températures étai pratiquement confondues.

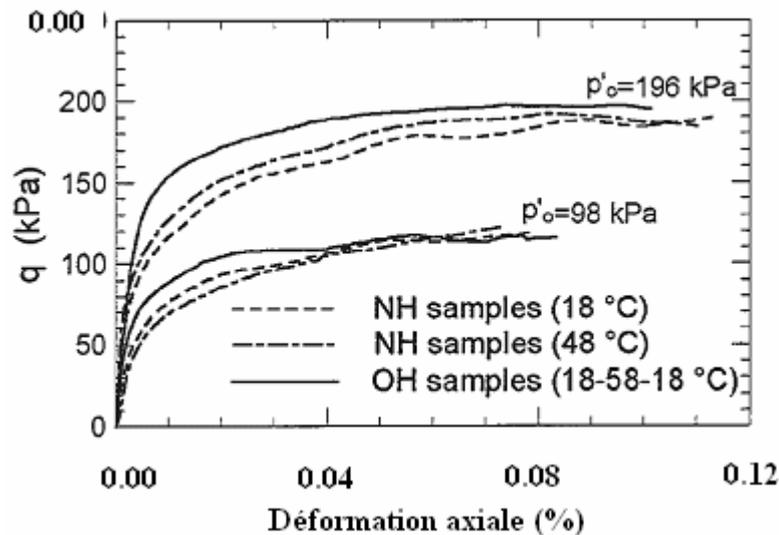


Figure 2. 12 : Essais de cisaillement non drainés à différentes températures (Burghinoli et al. 2000)

Les résultats regroupés dans la (Figure 2-13), incluant les résultats de Hueckel et Baldi (1990), Hueckel et Pellgrini (1989), Burghinoli et al. (2000), et de Graham et al. (2001). Montre que les courbes a différentes températures son parallèles pour cela on peut dir que l'angle de frottement à l'état critique est indépendant de la température.

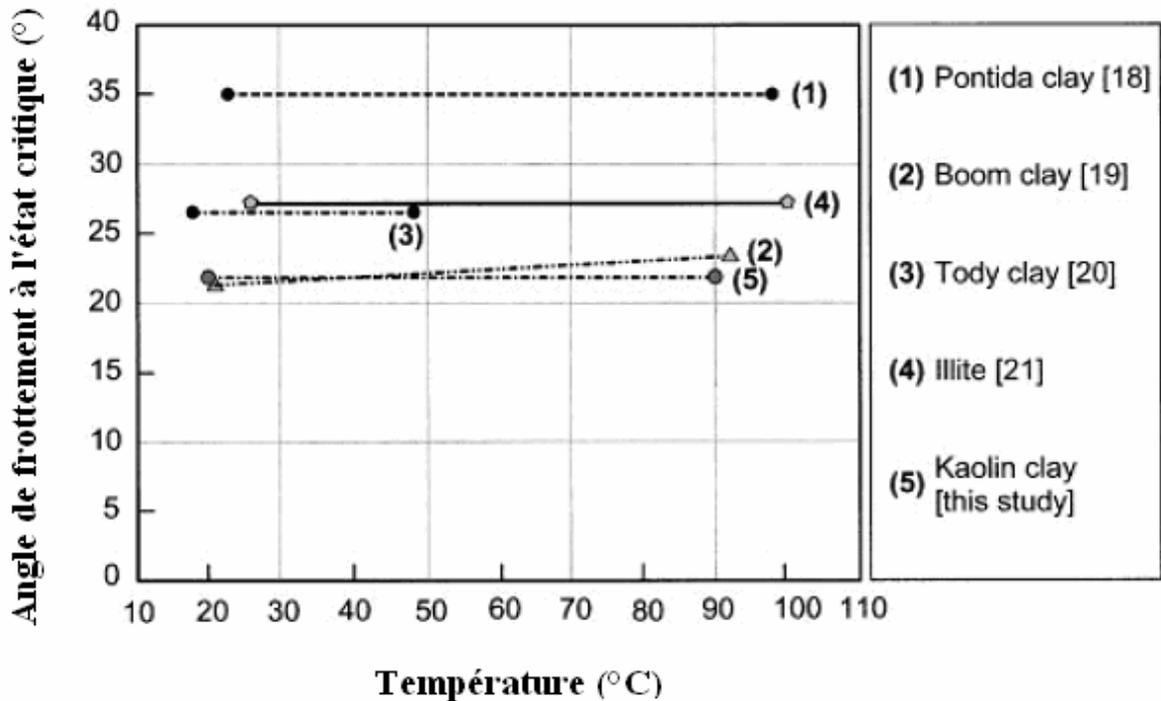


Figure 2. 13 : L'effet de la température sur l'angle de frottement à l'état critique (Cekerevac et Laloui, 2004)

2.3. APPAREIL TRIAXIAL A HAUTE TEMPERATURE

Pour maîtriser les variations thermiques et réalisé des essais de sollicitations thermomécaniques il existe un appareil triaxial à haute températures (Figure 2.14). qui permet de réalisé ces essais à des températures entre 4 a90° sur des échantillons a différent états mécaniques initiaux des essais triaxiaux dans l'ensemble de l'espace des contraintes ,cet équipement expérimental. Avec L'ensemble du système est contrôlé par un logiciel spécialement conçu sous LABVIEW installé à un ordinateur.

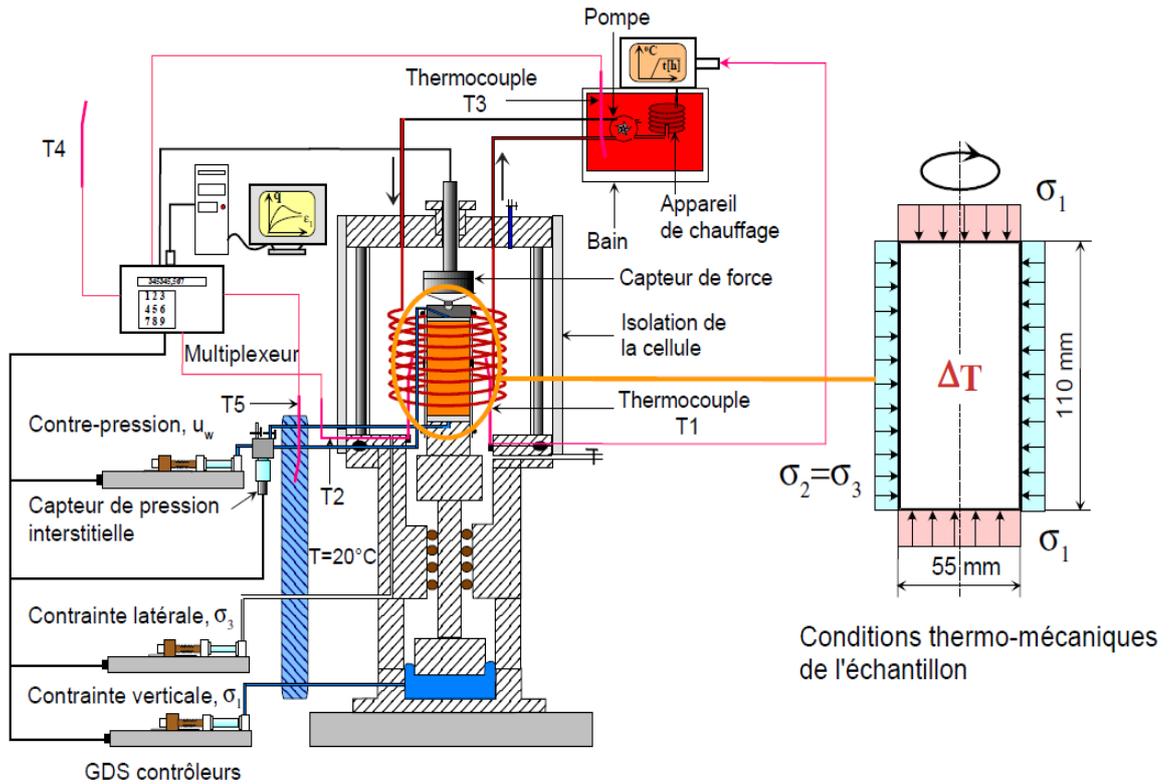


Figure 2. 14 : GDS Appareil triaxial à haute température (GDS-HT)(Laloui 2001)

2.4. LES PROPRIETES MECANQUES DES Géosynthétique

Il y'a deux paramètre essentiel qui influes sur les propriétés des géosynthétique (propriété physiques, hydrauliques et mécaniques) ces paramètres sont la matière première et le mode de fabrication .Les propriétés essentielles au renforcement des ouvrage par les géosynthétique sont les propriétés mécaniques, mai pour étudier l'influence de la température des géosynthétique fabriqués par les polymères il est essentiel d'exploré sa structure physique telles que la densité (ρ), la température de transition vitreuse (T_g), la température de fusion (T_m), et la température de décomposition (T_d) de matériaux polymères utilisés Figure 2.15.

2.4.1.1. Influence de la e contrainte normale a une température ambiante

L'influence de la contrainte normale se caractérise en général par l'angle de frottement apparent et le déplacement relatif, entre le sol et le géosynthétique, nécessaire à la mobilisation du frottement maximal (fig. 2.16). Dans certains cas, la contrainte normale peut avoir une influence en contribuant à l'endommagement de la nappe, diminuant ainsi son aptitude à mobiliser les frottements (fig. 2.17).

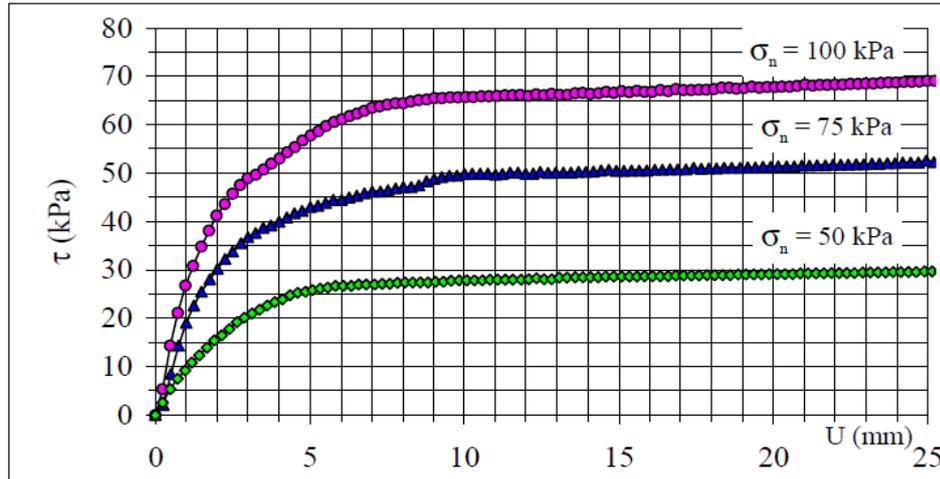


Figure 2. 16 : Influence de la contrainte normale (Gourc, 1984).

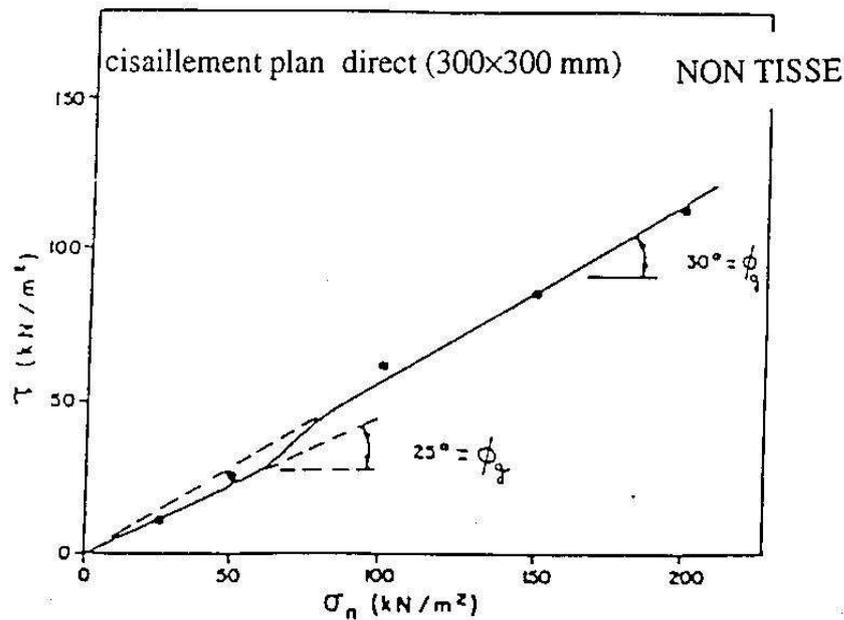


Figure 2. 17 : Résultats d'essais de frottement (sable - géotextile non tissé) obtenus à la boîte de Casagrande (LIRIGM; 1996).

2.4.1.2. Influence de la teneur en eau a une température ambiante

La teneur en eau influence également sur les caractéristiques d'interface sol-géosynthétique comme le montre la figure 2.18. La chute de résistance est probablement engendrée par une modification des propriétés physiques du sol et de l'état de surface (rugosité) du renforcement, liée à une lubrification de l'interface. On a tenté dans notre étude à voir l'influence de la teneur en eau avec deux températures variante qui sera présenté par la suite.

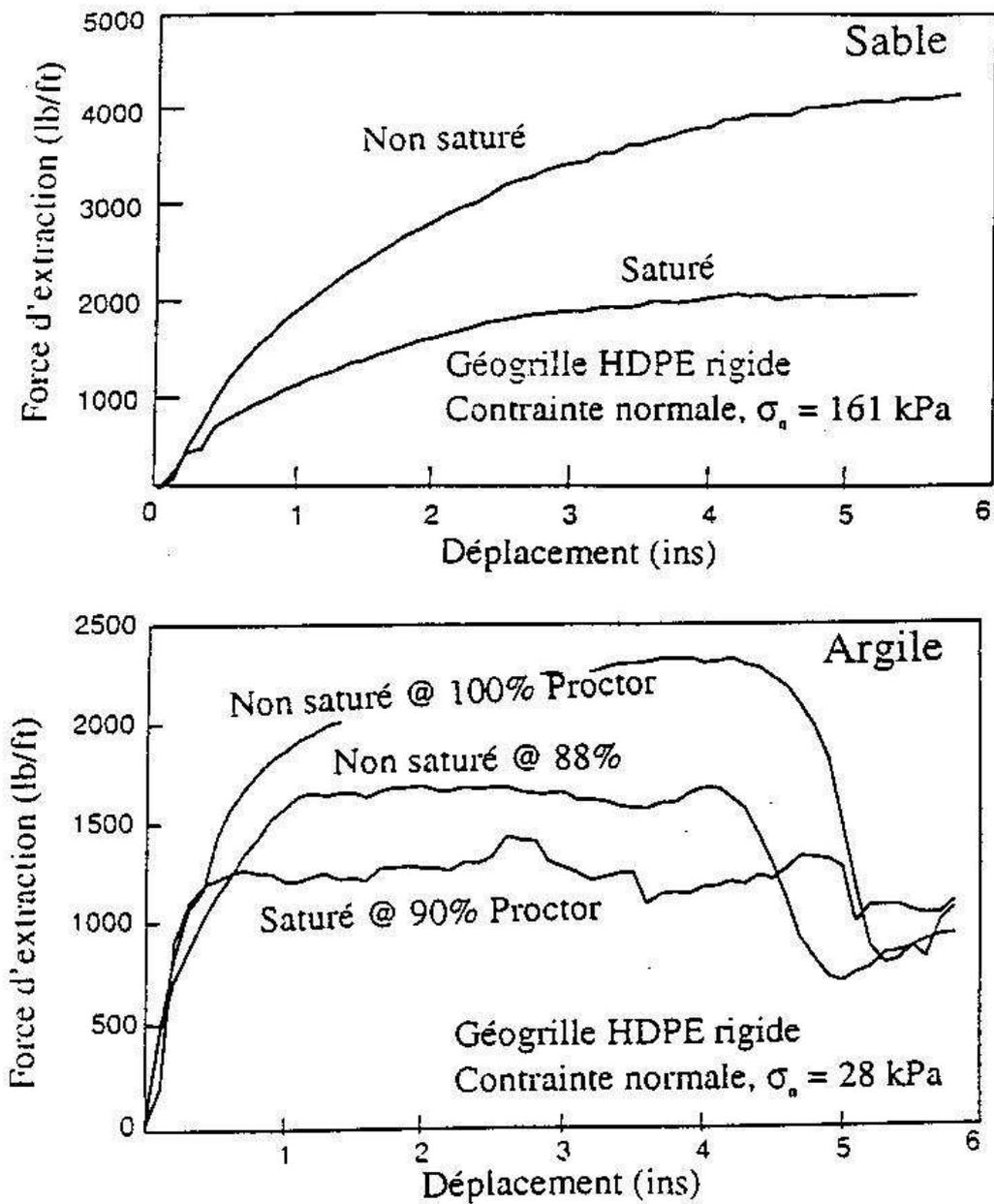


Figure 2. 18 : Influence de la teneur en eau du sol (Chua et al., 1993).

2.4.2. LE COMPORTEMENT EN TRACTION

Le comportement en traction est la caractéristique mécanique la plus importante d'une géosynthétique pour son application comme renfort. À partir de la courbe "effort - allongement", la résistance intrinsèque de traction et l'allongement du géosynthétique à la rupture. La résistance intrinsèque à la traction T_f (kN/m) est donnée par la force de rupture par unité de largeur. L'allongement à la rupture ϵ_f (%) est l'allongement obtenu sous l'effort de traction maximale. Outre la force de rupture T_f et l'allongement à la rupture ϵ_f , à partir de la courbe "effort de traction - allongement" un troisième paramètre : la raideur J , qui est le rapport entre la force de traction par unité de largeur (T) et l'allongement (ϵ) correspondant. Elle s'exprime en kN/m. Plusieurs raideurs sont définis correspondant à des taux de déformations ou à des forces de traction données (raideur tangente initiale, raideur tangente et raideur sécante), comme indiqué sur la figure 2.19.

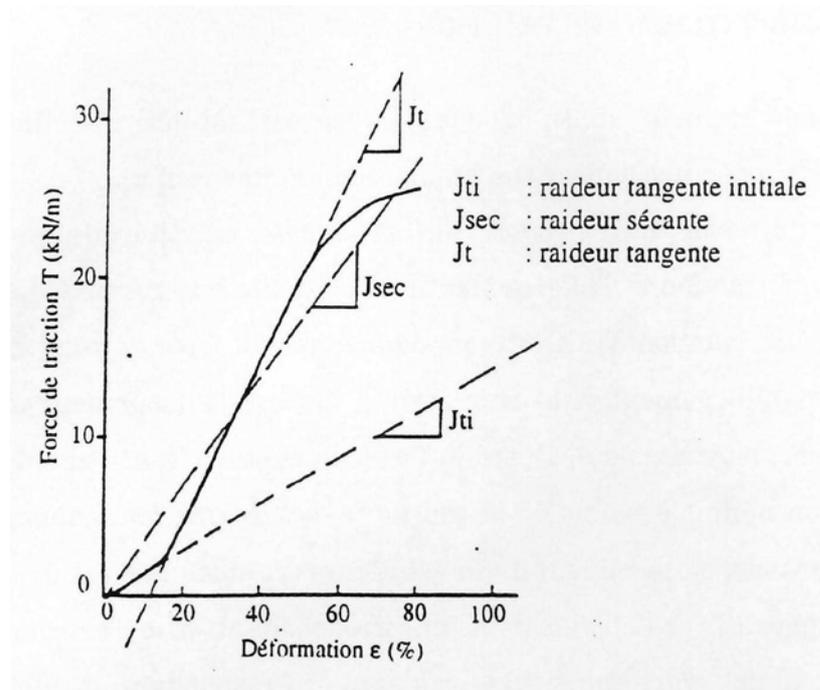


Figure 2. 19 : Différentes raideur (Paulson, 1987)

Le comportement en traction des géosynthétique est influencé par de nombreux facteurs dont :

- la vitesse de déformation,
- la température d'essai, c'est notre objectif de notre étude,
- la taille des éprouvettes,

On n'a pas touché le reste des facteurs.

2.5. COMPORTEMENT THERMIQUE DES GEOSYNTETHIQUES

2.5.1. Influence de la température

Andrawes et al. (1984), ont étudié l'influence de la température sur des éprouvettes de 200 mm de largeur et 100 mm de longueur, en effectuant des essais de traction simple réalisés hors sol à une vitesse de déformation de 2%/mn et à différentes températures (10, 20 et 30° C). la figure 2.20 illustre les résultats obtenus, elle montrent une baisse remarquable des caractéristiques mécaniques de traction des géotextiles tissés et non tissés de polypropylène avec l'augmentation de la température. Cependant, les résultats restent inchangés pour le non tissé aiguilleté de polyester.

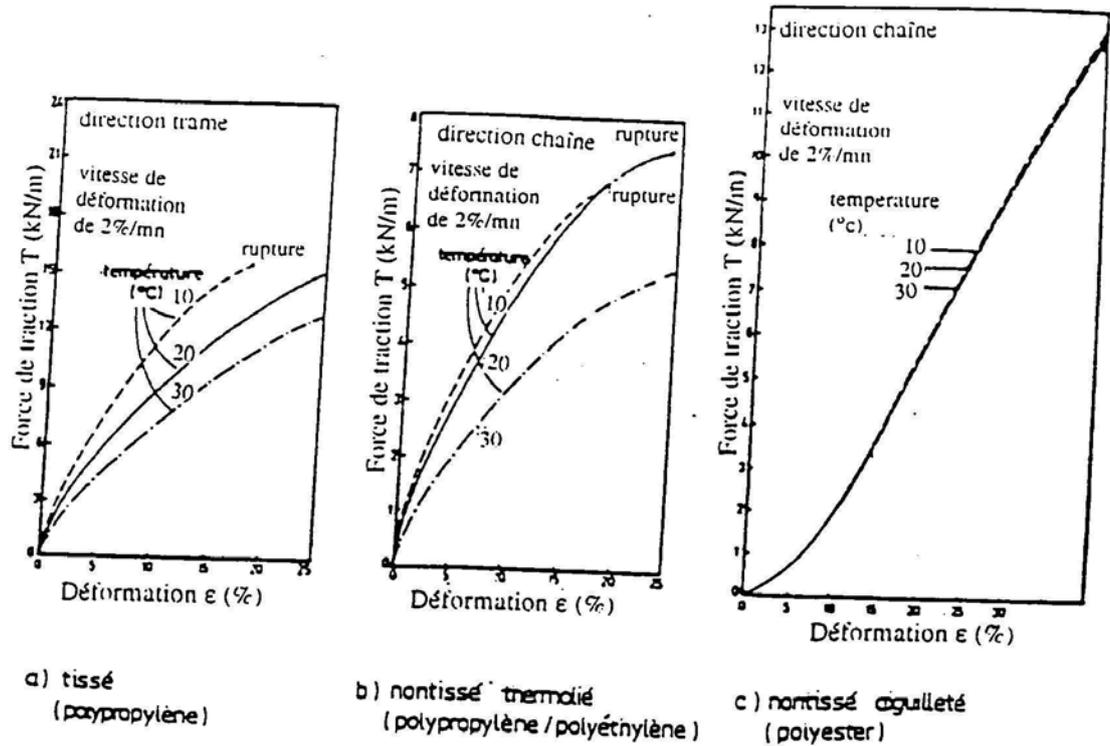


Figure 2. 20 : Influence de la température sur le comportement en traction des géotextiles (Andrawes et al. 1984)

2.5.2. Influence de la température sur le fluage des géosynthétique

Allen et al. (1982) ont étudié les propriétés mécaniques des géosynthétique utilisés dans les régions froides en plus particulièrement de savoir l'influence des gel/dégel sur les caractéristique charge-déformation, résistance et le fluage des géosynthétique avec une température inferieur à Zéro. Il a été conclu que, pour une série de températures généralement associés à des applications dans les régions froides, la charge-déformation-résistance et les caractéristiques de fluage ne sont pas affectés par températures inférieures à zéro. En outre, gel/dégel dans un endroit sec, n'a pas eu influence sensible sur les caractéristiques de charge-déformation et résistance des géosynthétique testés.

La raideur et la résistance des géosynthétique qui est construit par pression de chaleur augmentent avec la diminution de la température. En ce qui concerne le comportement à petites déformations, les effets de la construction géosynthétique sont beaucoup plus grande que l'effet de la température. D'après les résultats des tests de fluage, il a été déterminé que pour les géotextiles avec des fibres de polypropylène, la diminution de la résistance correspond à une diminution de la température. L'influence de la température sur le fluage est liée à la construction géosynthétique Andrawes et al 1986 ont étudié la relation du comportement

mécanique avec le temps et la température ils ont effectué à la fois le chargement et le déchargement sur géotextile pour des duré 10.000heures ces test ont été réalisé a différente température 5, 10, 20 et 40°C respectivement. ils ont noté que les déformations élastiques présente une sensibilité a la température Les mêmes essais ont été faite par Wrigley (1987) sur des geogrille en polyéthylène pour étudier l'effet du temps et température ,il ont constaté que pour une augmentation du température de 10 à 20°C fait augmenté l'échelle du temps par un facteur de dix, c'est à dire les effets se produise dix fois plus vite a des température élevée cette constatation est accordé avec les revues réalisé de la littérature par Jewell et Greenwood, qui ont constaté pour des géogrilles similaire que l'augmentation de la température donne un facteur de onze ans

2.6. Les effets du climat sur les chaussés

2.6.1 PROPAGATION THERMIQUE DE LA FISSURE

La remontée d'une fissure existante, à travers de la couche de roulement. Afin d'identifier correctement le problème de la remontée de fissure, il est important d'identifier les différents paramètres qui peuvent causer ces mouvements et analyser leur nature.

Trois types de charges provoquent des mouvements et favorisent la propagation de la fissure :

- **Trafic** : Les véhicules, et plus particulièrement les essieux de camions, qui passent au droit de la fissure ou à proximité, induisent des mouvements horizontaux et verticaux de la fissure.
- **Variations de température** Les changements de températures, jour et nuit et entre les saisons été et hiver, causent des dilatations et contractions des sections comprises entre deux fissures existantes. Ces mouvements horizontaux alternent entre l'ouverture et la fermeture des fissures.
- **Variation de teneur en eau du sol** La variation de teneur en eau se traduit par un changement de la portance du sol qui se répercute aussitôt sur la fissure par une ouverture ou une fermeture.

Sur la chaussée, ces trois types de mouvements vont causer la rupture de la couche de surface selon une combinaison des mouvements présentés en figure 2.21.

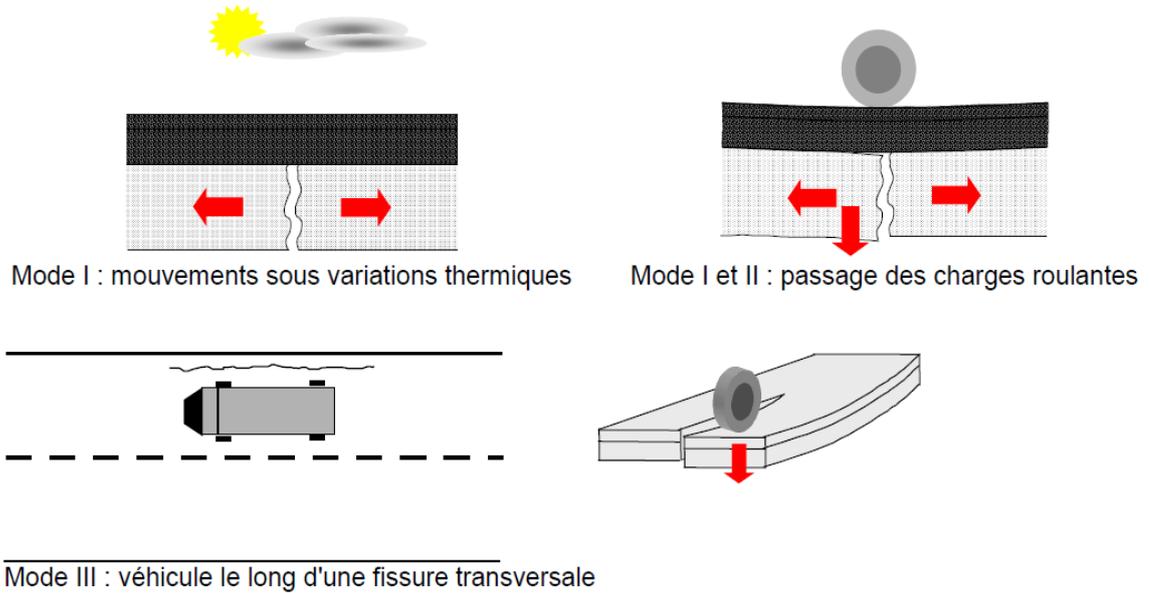


Figure 2. 21 : Mouvements possibles des pointes de la fissure

2.6.2 La réponse à la propagation des fissures

Les fissures de vieilles couches reflètent à travers la nouvelle surface en raison des variations de température quotidiennes, mais surtout en raison de cycles de gel-dégel. Afin de simuler la remontée des fissures d'origine thermique, le Centre de recherche belge de la route (CRR) a développé une méthode d'essai au début des années 90 (figure 2.22) pour étudier l'effet d'un renforcement de la couche du sol pour la réduction des fissures.

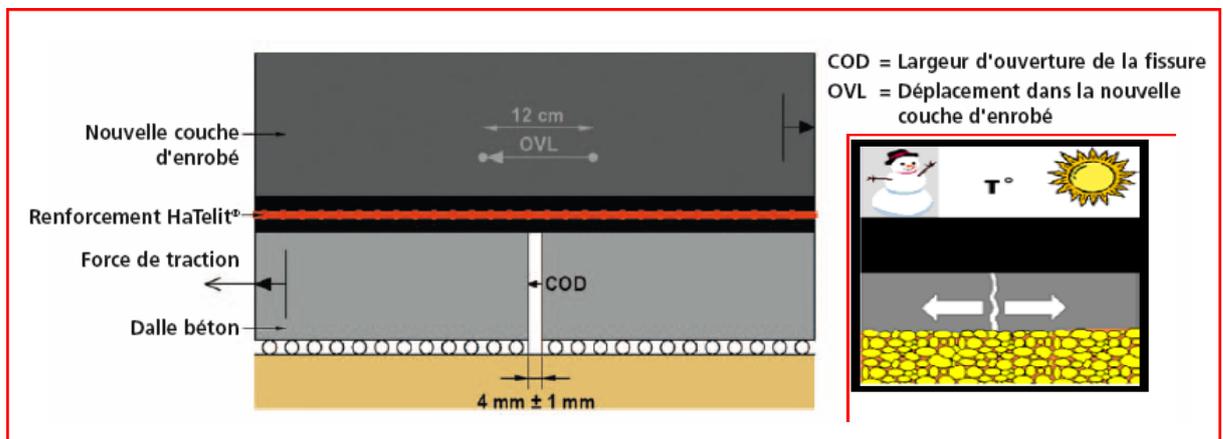


Figure 2. 22 : sollicitation thermique sur la propagation des fissure teste de CCRB (centre de recherche routier Belgique) (B. Thesseling et A. Elsing, 2000)

L'échantillon testé est placé dans une atmosphère contrôlée sur un lit de billes d'acier pour permettre un mouvement horizontal libre. Le côté droit de la base de béton de ciment est fixe et une force cyclique est appliquée sur le côté gauche. La vitesse de déplacement est très faible,

typiquement de quelques millimètres par heure. Ceci simule l'effet de retrait et de dilatation des dalles en béton à la suite de variations thermiques. La figure 2.23 représente l'évolution de la longueur de la fissure observée dans la nouvelle couche d'enrobé lors de tests effectués.

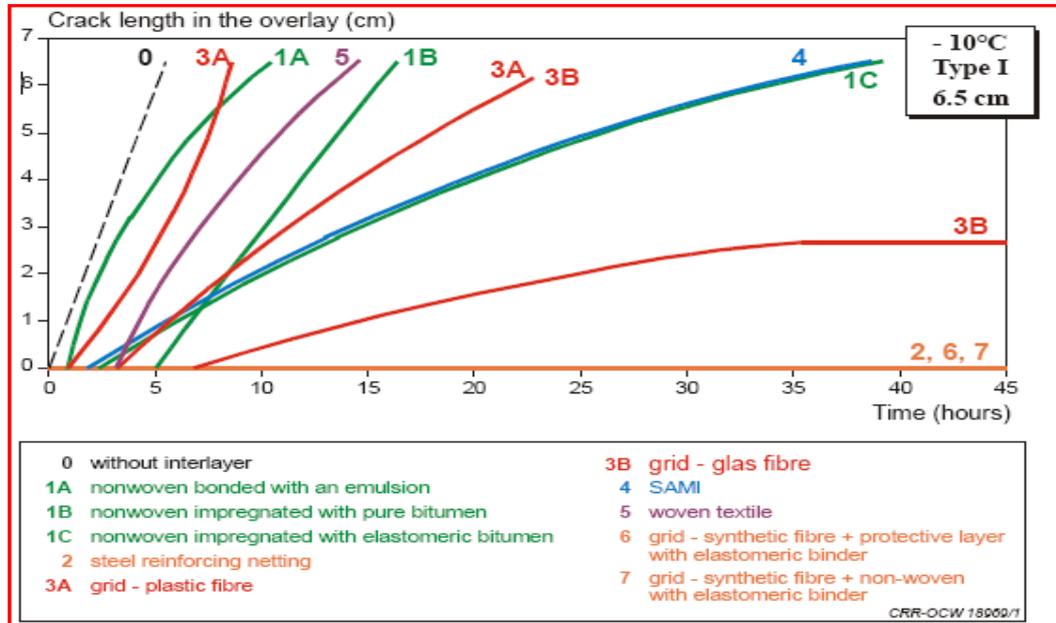


Figure 2. 23 : les fissurations vertical dans la nouvelle couche d'enrobé (Montestruque G.E et al, 2000)

Il est remarqué sur la figure que les teste sans renforcement (0) montre que la fissure atteint la surface après très peu de cycles et les autres systèmes de couche montre une différence de leur efficacité, avec grille enrobée de bitume (6, 7) empêchant complètement les fissures de réflexion.

Les mêmes séries de tests détaillée sont effectué par le laboratoire HUESKER ont démontré l'efficacité de la grille HaTelit vis-à-vis de la propagation de la fissure due à la sollicitation thermique (sollicitation C).la grille HaTelit a été installée sur 2 bloc béton avec une fissure de 4 mm au centre est recouvert de 5 cm d'enrobé. Pour les échantillons non renforcé, la remontée de la fissure est apparue dès le premier cycle, tandis que pour tous les échantillons renforcé avec HaTelit même après la clôture de la série d'essais (100 heures, environ 38 cycles) aucune fissures n'a atteint la surface. La dilatation a été représentée par cycle ou l'ouverture de la fissure augmentée plus que 1mm. Un comparatif de la propagation des fissures entre les échantillons renforcé avec la grille HaTelit ou non a été effectué.

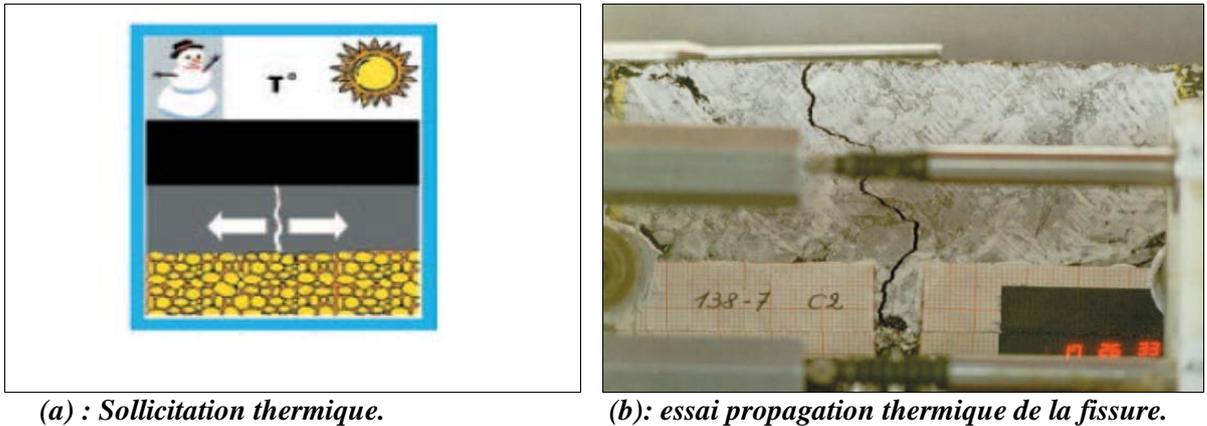


Figure 2. 24 : (a) : Sollicitation thermique (b): essai propagation thermique de la fissure (B.Thesseling et A. Elsing, 2000)

Une série d'essais détaillée a été effectuée sur des dalles ou des fissures de dimension étaient prédéfinies : des échantillons renforcés avec la grille HaTelit ou non ont été soumis a des contraintes dynamique : Sollicitation due au cisaillement (type A) et Sollicitation due au moment fléchissant (type B) Figures 2.25, 2.26, 2.27.

Les résultats ont confirmé que la grille HaTelit retardait de manière considérable la remonté des fissures. En comparaisant avec les échantillons non renforcés.

Les figures suivantes illustre l'état des échantillons d'enrobé non renforcé et renforcé avec HaTelit et le nombre de cycles de charges.

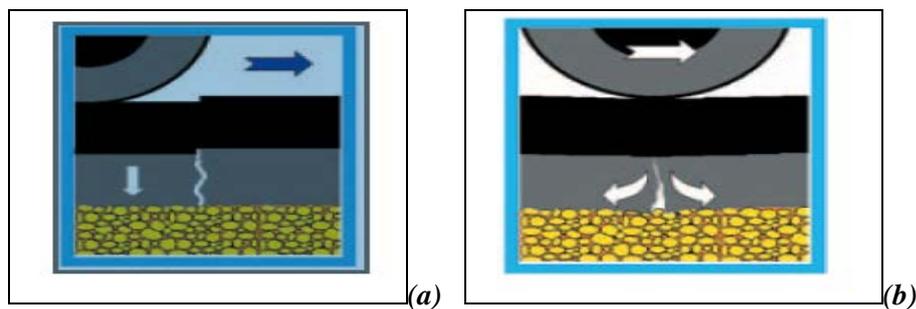
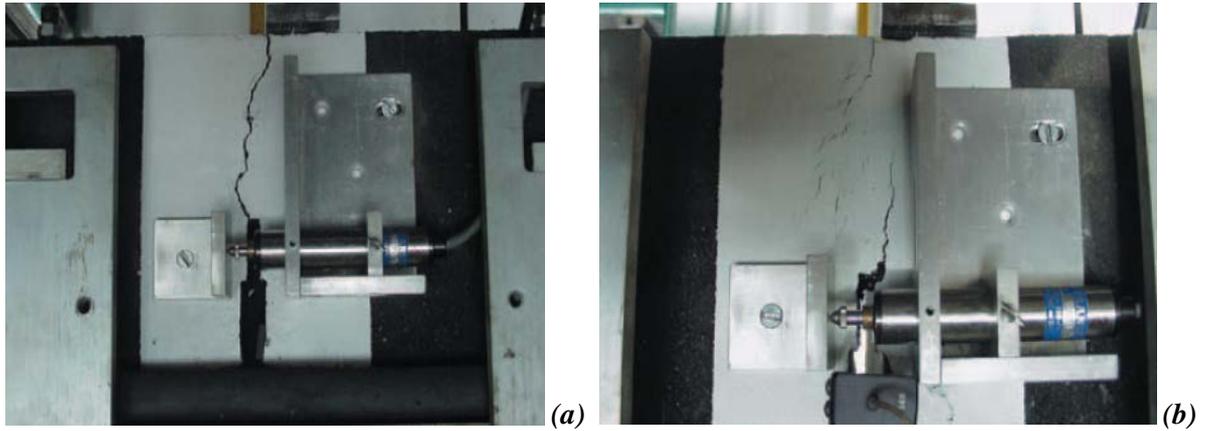
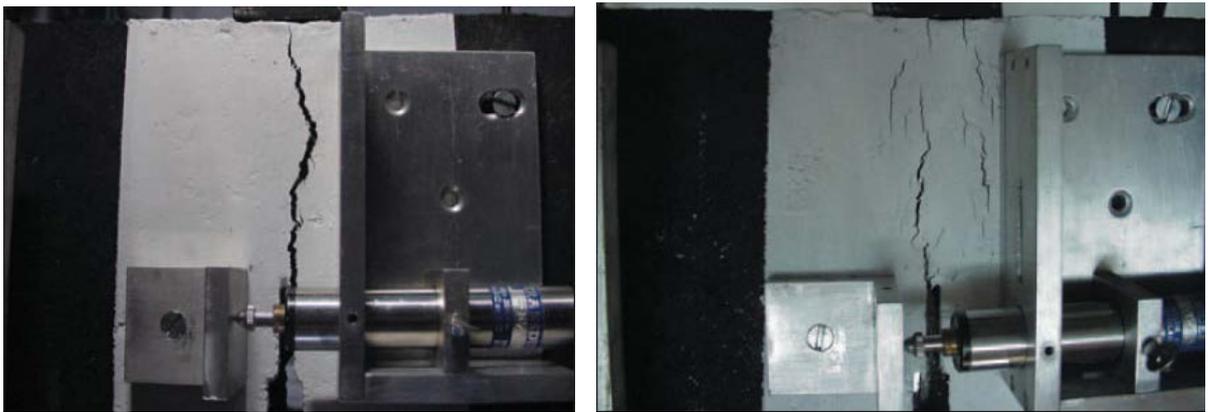


Figure 2. 25 : (a) sollicitation due au cisaillement, (b) sollicitation due au moment fléchissant. (Anreas Elsing et Sven Schröer, 2000) (Anreas Elsing et Sven Schröer, 2000)



**Figure 2. 26 : (a) Echantillon non renforcé soumis au cisaillement après 90.000 cycles.
(b) : Echantillon renforcé avec HaTelit soumis au cisaillement après 570.000 cycles**



**Figure (c) : Échantillon non renforcé soumis au cisaillement après 80.000 cycles.
Figure (d): Échantillon renforcé avec HaTelit soumis au cisaillement après 490.000 cycles.**

Figure 2. 27 : Figure II-24 essai de fatigue dynamique (B. Thesseling et A. Elsing,2000)

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous venons de présenter le comportement des sols en tenant compte les effets thermique et mécanique,(comportement thermomécanique) des géosynthétique ,une étude bibliographique a été prise consternant les comportement des différent type de géosynthétique et leur utilisation pour Dèmeunier la propagation des fissure due aux sollicitations thermiques, En règle générale, dans les ouvrages de soutènement et les remblais renforcés par géo synthétique , la température n'est pas trop élevée. Par contre, dans les centres de stockage de déchets, la température peut s'avérer importante.

Chapitre 3 : Essai de Cisaillement

Direct à la Boite.

3.1. INTRODUCTION

Dans le but d'obtenir une connaissance du comportement thermo- mécanique des sols représentés ici par essai expérimentaux en utilisant des échantillons de renforcement de la geogridde de type Enkagrid -Max 40 avec sable chlef, nous avons tenté de mettre en évidence le rôle de la température et la teneur en eau et l'influence sur la résistance des sol renforcé par géogridde au cisaillement.

Ce chapitre traite les échantillons soumis à des essais de cisaillement direct à la boite aux quels on a ajouté différentes teneurs en eau varient de 3 à 7% comme suit (3%, 5% et 7%) ainsi avec et sans géogridde.

Les essais se déroulent sous l'effet de deux températures différentes :

- Température entre : 17° et 19°
- Température entre : 30 et 35°

L'objectif principal étant de déterminer l'évolution des caractéristiques mécaniques (Cet ϕ) en fonction de la teneur en eau, geogridde et l'influence de la variation de la température à cet effet, nous nous sommes intéressés aux essais suivants :

- Essai non consolidé non drainé :
 1. Sol dense $D_r = 90\%$ sans renforcement par geogridde Enkagrid Max40
 2. Sol lâche sans renforcement par geogridde Enkagrid Max40
 3. Sol dense $D_r = 90\%$ renforcé par geogridde Enkagrid Max40
 4. Sol dense $D_r = 90\%$ renforcé par geogridde Enkagrid Max40
 5. Sol dense $D_r = 90\%$ sans renforcement par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=3\%$
 6. Sol dense $D_r = 90\%$ sans renforcement par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=5\%$
 7. Sol dense $D_r = 90\%$ sans renforcement par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=7\%$
 8. Sol lâche $D_r = 15\%$ sans renforcement par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=3\%$
 9. Sol lâche $D_r = 15\%$ sans renforcement par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=5\%$
 10. Sol lâche $D_r = 15\%$ sans renforcement par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=7\%$
 11. Sol dense $D_r = 90\%$ renforcé par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=3\%$
 12. Sol dense $D_r = 90\%$ renforcé par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=5\%$
 13. Sol dense $D_r = 90\%$ renforcé par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=7\%$
 14. Sol lâche $D_r = 15\%$ renforcé par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=3\%$
 15. Sol lâche $D_r = 15\%$ renforcé par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=5\%$

16. Sol lâche $D_r = 15\%$ renforcé par geogridde Enkagrid Max40 avec $w=7\%$

On a refait le même essai avec une température entre 30 et 35°

3.2. APPAREILLAGE

L'appareil spécifique à l'essai comprend (voir figure 3.1) :

- La boîte de cisaillement (de section intérieure $A = 1 \times 1 = 0,6 \times 0,6 \text{ cm}^2$) composée de deux demi-boîtes. La partie supérieure est immobile et la partie inférieure est mobile et contiennent des plaques drainantes.
- Le dispositif de l'application de l'effort normal désiré,
- Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi boîtes,
- Un anneau dynamométrique indiquant les efforts de cisaillements,
- Un comparateur au 1/1000 de millimètres indiquant les déplacements horizontaux,
- Un comparateur au 1/1000 de millimètres indiquant les déplacements verticaux,
- Un chronomètre pour prendre les lectures toutes les 15 secondes.



Figure 3. 1: Boite de cisaillement (laboratoire université Chlef, 2012)

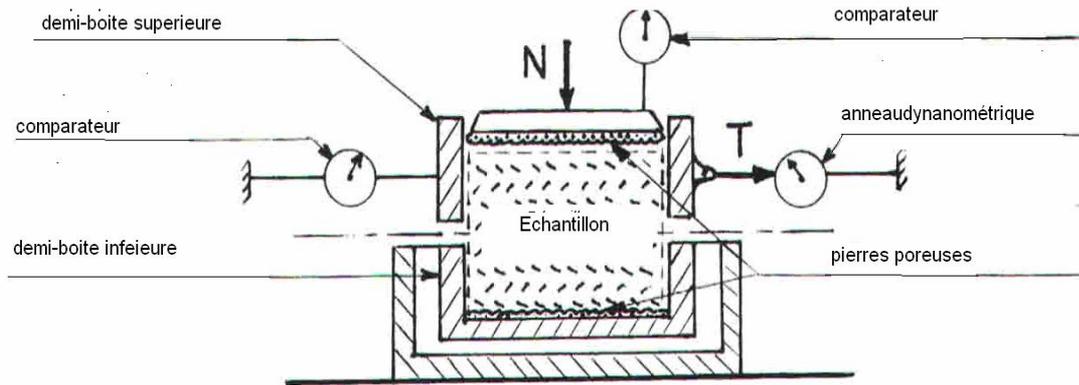
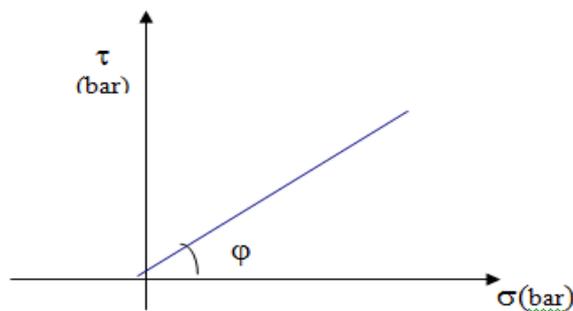


Figure 3. 2 : Schéma de la boîte de cisaillement (Paillier C 2007)

La connaissance de « N » et « T » permet la détermination d'un point de la courbe intrinsèque. En répétant plusieurs fois l'expérience, on peut ainsi tracer la courbe intrinsèque du sol appelé droite de COULOMB ou MOHR-COULOMB.

La courbe intrinsèque du sol qui sépare le domaine plastique dépend de la nature du sol, on distingue pour cela :

La courbe relative aux sols pulvérulents



La courbe relative aux sols cohérents :

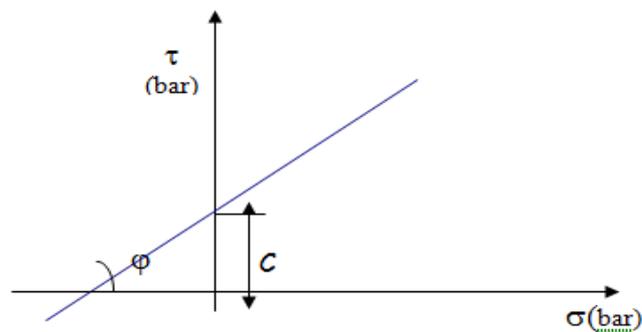


Figure 3. 3 : détermination de C et ϕ . (Paillier C 2007)

3.2.1. DESCRIPTION DU DISPOSITIF

Les demi-boîtes sont garnies de pierres poreuses et contiennent en général une réserve d'eau. Ces dispositions permettent éventuellement de drainer l'échantillon en cours d'essai et d'éviter au sein du matériau l'apparition d'une pression interstitielle. On verra plus loin, en effet, que le volume d'un échantillon varie en cours de cisaillement. Les pierres poreuses sont dentées de manière à assurer une bonne liaison entre l'échantillon et chacune des demi-boîtes. La demi-boîte supérieure est formée de deux parties: un cadre et un couvercle servant de piston pour l'application de la force N . De cette manière, la force N est bien intégralement répartie sur l'échantillon seul et non sur la demi-boîte inférieure ce qui engendrerait des frottements parasites.

Cette disposition permet également la mesure des variations de hauteur de l'échantillon grâce à des comparateurs placés entre le piston et le cadre du demi-boîte supérieure. On trouvera, figure 3.4, le schéma d'une boîte à cisaillement.

L'effort N qui est appliqué au piston de la demi-boîte supérieure résulte généralement de l'action de poids placés sous l'appareil. La figure 3.5, représente un dispositif à peu près abandonné maintenant, pour l'application de l'effort de cisaillement T . La demi-boîte inférieure est fixe, des poids et un levier permettent de transmettre à la demi-boîte supérieure un effort de traction connu, on mesure alors les déplacements relatifs des deux demi-boîtes et on note la valeur de l'effort de traction qui provoque la rupture.

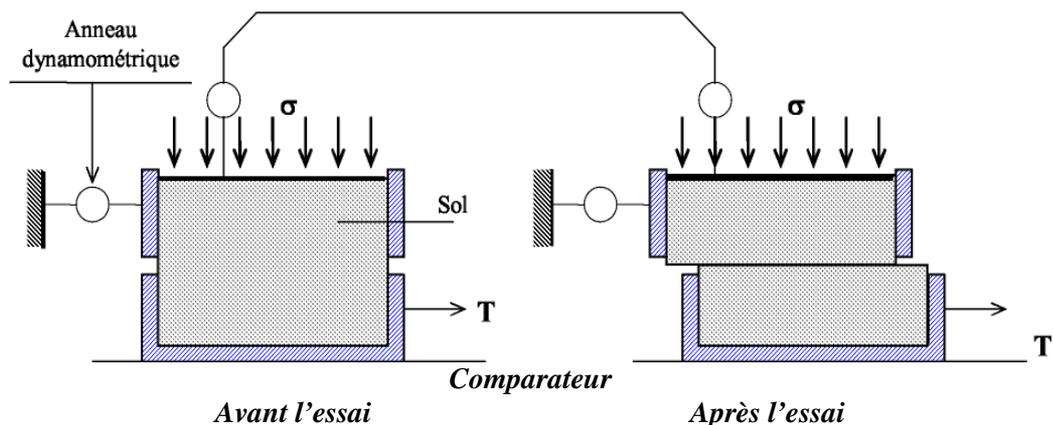


Figure 3. 4 : Schéma de la boîte de cisaillement (efforts contrôlés). (Paillier C 2007)

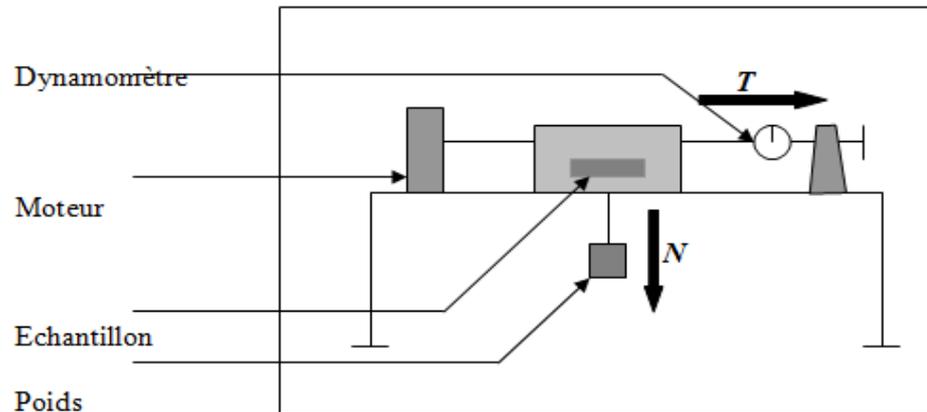


Figure 3. 5 : Essai de cisaillement (déformations contrôlées). (Bedr.S,2008)

Ce dispositif à contraintes contrôlées est actuellement remplacé par un dispositif à déformations contrôlées : la boîte de Casagrande à vitesse de cisaillement constante (Figure.3.6). La demis -boîte inférieure sont entraînées à une vitesse constante par un mécanisme approprié et la demis -boîte supérieure sont maintenues en place par un anneau dynamométrique qui mesure l'effort de cisaillement.

La courbe de cisaillement (*effort-déformation*) qu'on détermine de cette manière a généralement la forme caractéristique représentée sur la figure 3.6. Sur cette courbe apparaissent deux valeurs remarquables de la résistance au cisaillement :

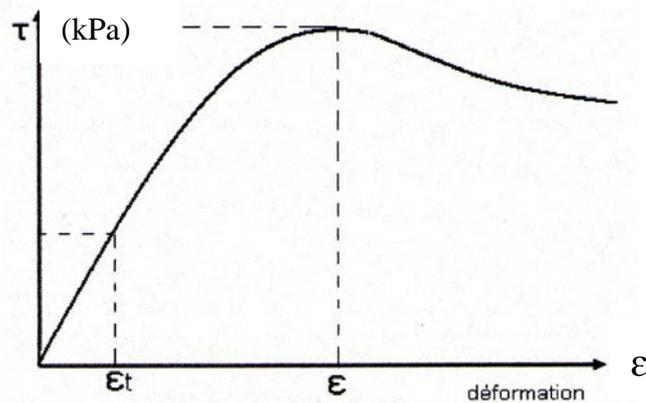


Figure 3. 6 : Courbe contraint – déformation (Baziz.F,2012)

- le maximum au sommet de la bosse qu'on observe pour les faibles déformations;
- et le palier correspondant aux grandes déformations.

3.2.2. LE CISAILLEMENT D'UN SOL

- L'étude au laboratoire, des déplacements des grains d'un sol sous une fondation montre la formation d'un coin rigide sous la fondation. À l'intérieur de ce coin, les grains s'enfoncent verticalement sans mouvements des uns par rapport aux autres.
- Le schéma mécanique adopté est donc le suivant :

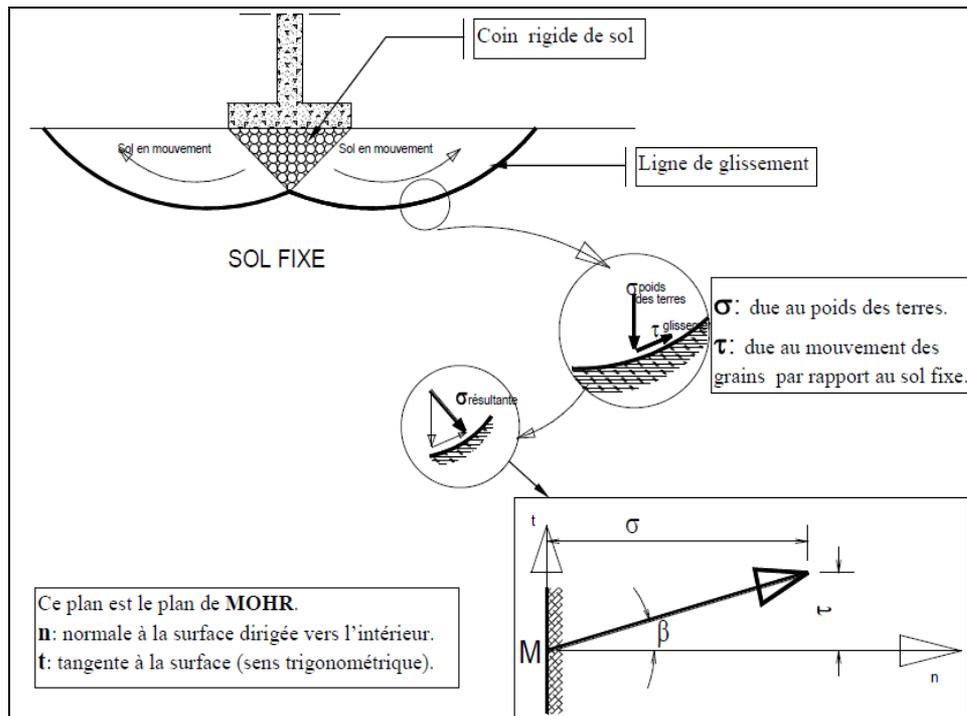


Figure 3. 7 : plan de MOHR (Paillier C 2007)

3.4. DEROULEMENT DE L'ESSAI

Après avoir préparé l'échantillon et mis dans la boîte de cisaillement;

- Appliquer sur la face supérieure de l'échantillon un effort vertical (N), résultant des poids placés sur le plateau, engendrant ainsi une contrainte normale $\sigma = 100, 200, 300$ KPa, maintenue constante toute le long de l'essai ;
- Régler la vitesse de la machine, de façon à imposer un déplacement horizontal relatif constant entre les deux demi-boîtes, (1,5 mm/mn) dans notre cas ;
- Mettre tous les comparateurs (déplacement horizontal, déplacement vertical et force) à zéro;
- Actionner la machine et prendre des lectures sur les trois comparateurs simultanément, à des intervalles de temps réguliers (toutes les 15secondes) ;

- La rupture est caractérisée par l'apparition du pic ou par l'existence d'un palier, ce qui permet d'arrêter l'essai après 4 à 5 lectures décroissantes ou stabilisées, si non, on arrête à la déformation horizontale maximale, correspondant à (1,4cm) de déplacement ;
- Après avoir terminé l'essai, on convertit toutes les lectures obtenues sur les différents comparateurs en unités de calcul.

3.5. PREPARATION DE L'ESSAI

3.5.1. MISE EN PLACE DE L'ÉCHANTILLON DANS LA BOITE

- Les deux demi- boites étant verrouillées, on place successivement :
- le fond de boite,
- une pierre poreuse,
- une plaque striée, les stries étant perpendiculaires au sens de cisaillement (les plaques perforées permettent les essais drainés, les plaques pleines sont utilisées pour les essais non drainés),
- l'échantillon de sol,

Une plaque striée identique à la première

- une pierre poreuse
- le piston.

3.5.2. MISE EN PLACE DE LA BOITE SUR LA MACHINE

- Placer l'étrier de charge sur le piston de la boite,
 - Placer le comparateur vertical et le mettre à zéro,
 - Monter l'anneau dynamométrique sur la machine, le relier à la boite et compenser les jeux en mettant l'anneau légèrement en traction et en ramenant lentement le comparateur de l'anneau au zéro,
 - Appliquer sur l'éprouvette la charge désirée, en principe :
- ❖ Essai non consolidé, non drainé : **100 - 200 - 300 kPa**

- Désolidariser les deux demis -boites en enlevant les goupilles,
- Mettre en route à la vitesse désirée.

3.5.3. VITESSE D'ESSAI

- ❖ Sols pulvérulents : **1,5 mm / min**
- ❖ Sols cohérents :
 1. essais non drainés, consolidés ou non (UU ou CU): **1,5 mm / min.**
 2. essai drainé (CD) : vitesse la plus lente.

3.5.4. LECTURES

Lire, à intervalles réguliers les indications du comparateur de l'anneau, du comparateur de déplacement horizontal et du comparateur vertical. Arrêter l'essai lorsque la contrainte de cisaillement est devenue constante ou lorsqu'on a une déformation horizontale de **5mm**.

3.6. CALCULS ET RESULTATS

3.6.1. EFFORT DE CISAILLEMENT

Convertir les lectures de l'anneau en **KN** ou **N**. Voir tableau donnant les correspondances entre la lecture et la valeur de l'effort.

3.6.2. DETERMINATION DE LA SURFACE CISAILLEE

Pendant l'essai, la surface cisailée diminue proportionnellement au déplacement des demi-boites. La section corrigée A' de l'éprouvette à l'instant t est :

$$A' = l (l - \Delta l) \quad \text{avec } l : \text{longueur de l'éprouvette (6 cm)}$$

$$\Delta l = V \cdot t \quad \text{avec } V : \text{Vitesse de cisaillement}$$

3.6.3. CONTRAINTE DE CISAILLEMENT

On détermine la contrainte de cisaillement : $\tau = \frac{T}{A'}$ On trace ensuite, pour chaque essai, les courbes de contraintes en fonction des déplacements et on détermine la valeur de la contrainte de cisaillement maximale.

On reporte ensuite chaque point sur un graphique ayant pour abscisse la contrainte normale σ et pour ordonnée la contrainte de cisaillement τ . Tracer la courbe intrinsèque du sol étudié.

3.7. PRESENTATION DES RESULTATS

Les essais de cisaillement direct à la boite sont représentés sous forme de courbes :

- Contraintes déformations $\tau = f(\Delta L)$;
- Droites intrinsèques $\tau = f(\sigma)$.

En fonction de :

- La contrainte normale appliquée (100, 200, 300 KPa) ;

3.8. Expression des résultats

Les lectures obtenues sur les différents comparateurs, sont converties en unités de calcul comme suit :

- La section corrigée: $S_c = L(L - \Delta L) \text{ cm}^2$

Avec :

- L : longueur de la boite de cisaillement, L= 60mm.
- ΔL : déplacement horizontal mm.

- La variation de volume : $(\Delta V/V) \%$

Avec:

- ΔV : déplacement volumique vertical cm^3

- La contrainte tangentielle: $\tau = T/S_c \text{ Mpa}$

Avec :

- T : force de cisaillement daN

En vue de déterminer la quantité de matériau correspondant aux différents état de sols, on calcule en fonction de D_r , e_{\min} et e_{\max} .

$$D_r = \frac{(e_{\max} - e)}{(e_{\max} - e_{\min})} \implies e = e_{\max} - D_r \times (e_{\max} - e_{\min})$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$$

$$\gamma_d = \frac{W_{\text{sol}}}{V_{\text{moule}}} \quad W_{\text{sol}} = \gamma_d \times V_{\text{moule}} \quad (\text{Le volume du moule est } 90 \text{ cm}^3).$$

a) Etat lâche ($D_r=15\%$) :

sol	e	γ_d	P_T (g)	P_{fines} (g)	w=3%	w=5%	w=7%
Sable propre	0.799	1.489	134.01	0	4.02	6.70	9.38

Tableau quantité des matériaux sol lâche $D_r=15\%$

b) Etat dense ($D_r=90\%$) :

sol	e	γ_d	P_T (g)	P_{fines} (g)	w=3%	w=5%	w=7%
Sable propre	0.623	1.651	148.61	0	4.45	7.43	10.40

Tableau quantité des matériaux sol dense $D_r=90\%$

3.9. Effets d'échelle dans les expériences

Avant d'appliquer les résultats des études à la conception, il faut comprendre que les résultats sont obtenus à partir d'essais d'éléments avec toutes les limitations de tests à petite échelle. Toutefois, ils représentent une analyse détaillée des différents cas de sable renforcé par géosynthétique, fournissant des indications importantes à l'égard des effets de la forme de renforcement avec répercussions évidentes pour la conception. Pour comprendre l'effet de la taille réduite de l'échantillon sur les résultats, les résultats obtenus à partir des échantillons de petite taille (essais triaxiaux 38mm de diamètre et la hauteur de 76mm) sont comparés avec les résultats calculés en utilisant les équations semi empiriques développées sur la base sur des échantillons de plus grande taille de sable renforcé, testés en compression triaxiale.

En cas de renforcement par géosynthétique d'une couche plane, la charge ultime axiale pour les échantillons triaxiaux de sable renforcé avec des disques circulaires dans les différentes couches obtenues à partir des études sont vérifiées à partir de calculs basés sur les équations développées par Chandrasekaran et al. (1989).

$$P_{\max} = \pi \sigma_3 \frac{K_{av}}{K_a \tan(\alpha \phi_a)} \frac{RD}{\tan(\alpha \phi_a)} \left[\exp\left(\frac{\tan(\alpha \phi_a) R}{DK_{av}} - 1\right) \right] \quad 3.1$$

Avec : σ_3 est la pression de confinement, K_{av} : est le coefficient de pression latérale des terres, cette valeur est prise comme la moyenne du coefficient de Rankine. Dans le cas d'geocells, la cohésion apparente amenée à raison de sable de confinement géocelluls est comparée à la cohésion apparente calculée en utilisant l'équation développée par Bathurst et Karpurapu (1993) basée sur la théorie des membranes en caoutchouc. Les comparaisons sont effectuées comme suit. Coefficient de K_b , en raison de la rotation de la contrainte principale axes au sein de la masse du sol entre les couches de tissu.

$$K_b = \frac{1}{(1 + 2 \tan^2 \phi)} \quad 3.2$$

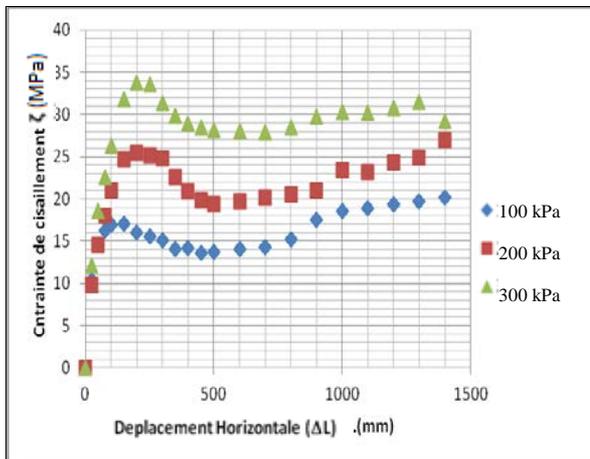
L'effet échelle de la boîte de cisaillement a toujours été un paramètre important pour ces essais. Ingold (1982) effectuée en laboratoire des tests de cisaillement direct de l'interface sol / géotextile en utilisant des tailles de boîtes de cisaillement différent. Il a conclu que

l'angle de frottement obtenue à partir de 60 mm × 60 mm zone de cisaillement était de 2-3 ° C plus élevée que celle obtenue à partir d'un 300 mm × 300 mm zone de cisaillement.

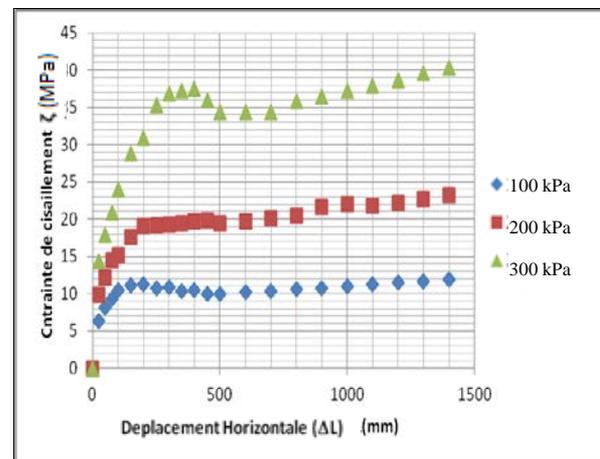
3.10. Courbes Contraintes – Déformations : $\zeta = f(\Delta L)$

En faisant varier la contrainte de compression de 100 à 300 KPa pour le sable propre, dense et lâche, avec et sans renforcement avec géogridle Enkagrid PRO40, a une température de moyenne de 17 à 19, nous obtenons les courbes Contraintes –Déformations représentées sur les figures ci-dessous.

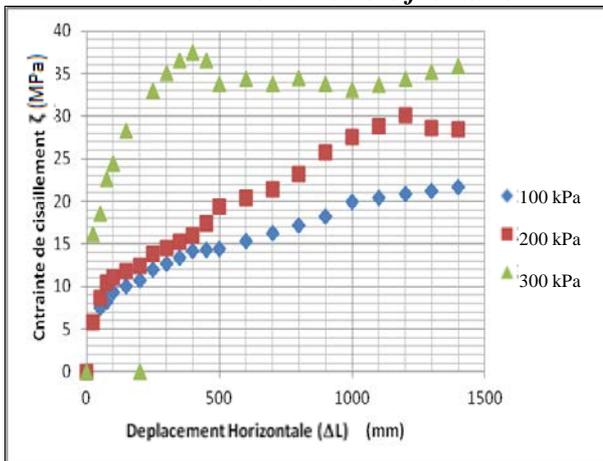
3.10.1. Courbes $\tau = f(\Delta L)$ du sable à sec a une température de moyenne 17 à 19°



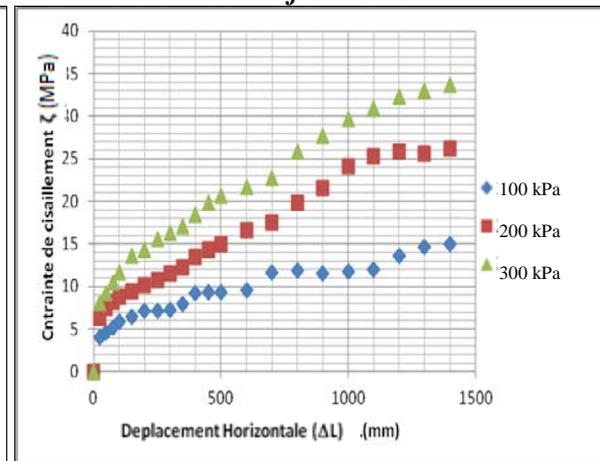
Sol dense sans renforcement



Sol lâche sans renforcement



Sol dense avec renforcement par géogridle



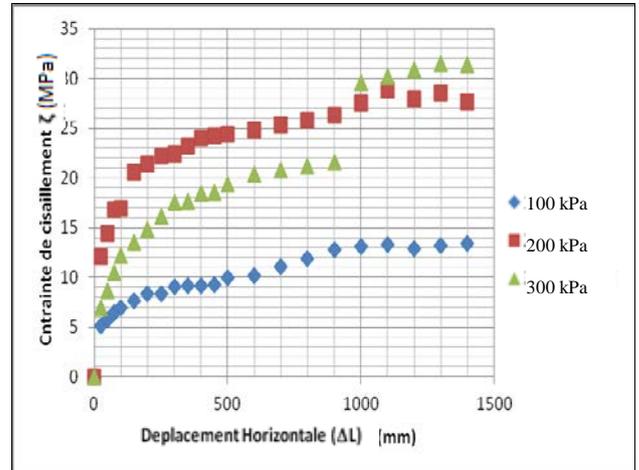
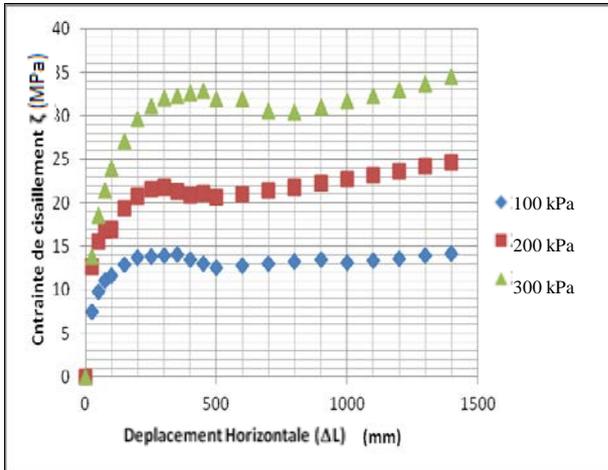
Sol lâche avec renforcement par géogridle

Figure 3. 8 : Courbes Contraintes – Déformations sable à sec, sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa. Avec une température 17a19°

3.10.2. Courbes $\tau = f(\Delta L)$ du sable en fonction de variation de la teneur en eau a une température de moyenne 17 à 19

W=3%

W=3%



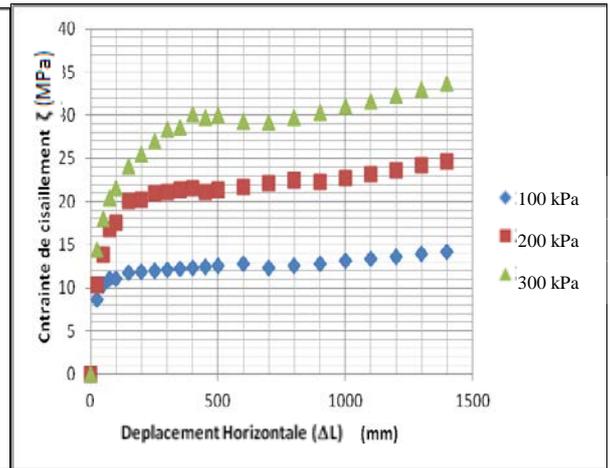
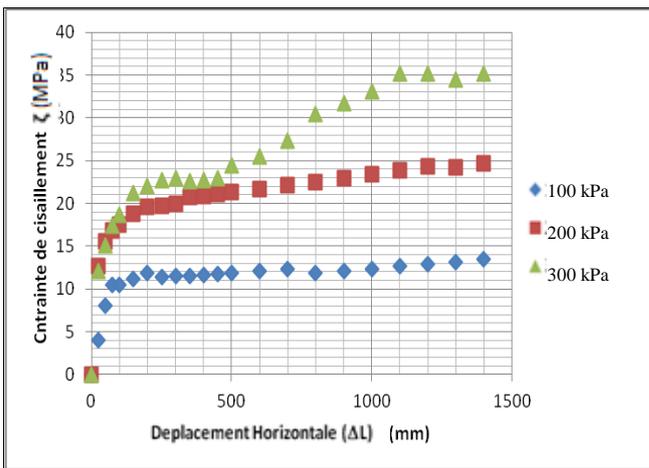
Sol dense sans renforcement par geogridle

Sol dense avec renforcement par geogridle

Figure 3. 9 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r=90\%$, $w=3\%$ sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

W=5%

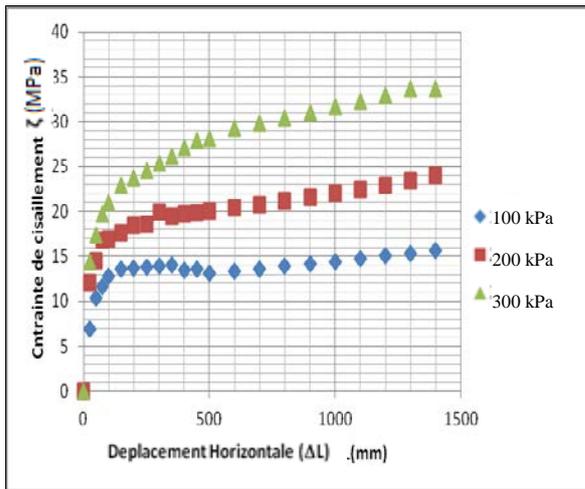
W=5%



Sol dense sans renforcement par geogridle Sol dense avec renforcement par geogridle

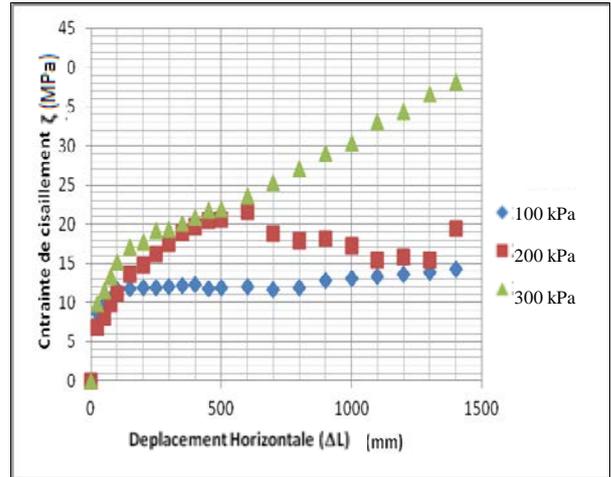
Figure 3. 10 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r=90\%$, $w=5\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

W=7%



Sol dense sans renforcement par géogrid

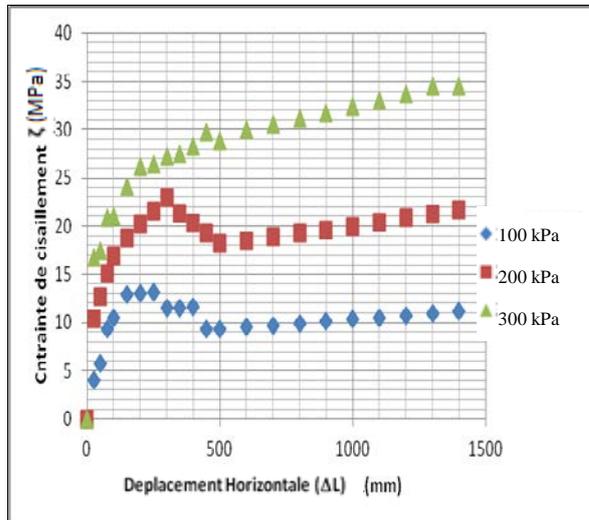
W=7%



Sol dense avec renforcement par géogrid

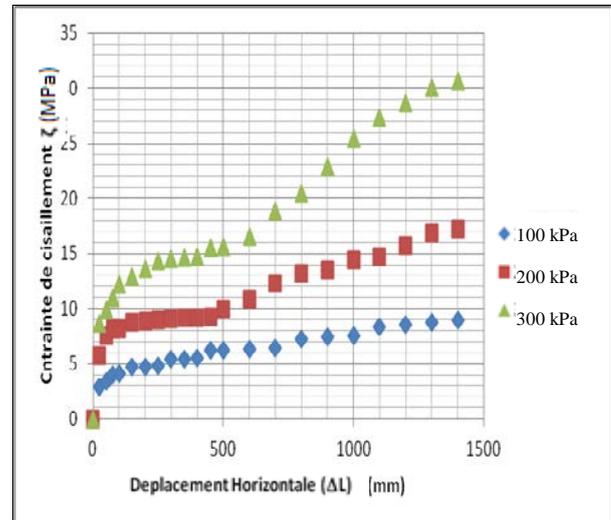
Figure 3. 11 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r=90\%$, $w=7\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

W=3%



Sol lâche sans renforcement par géogrid

W=3%

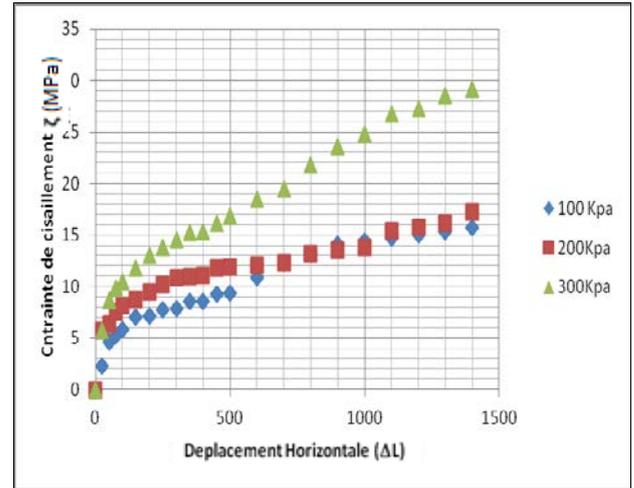
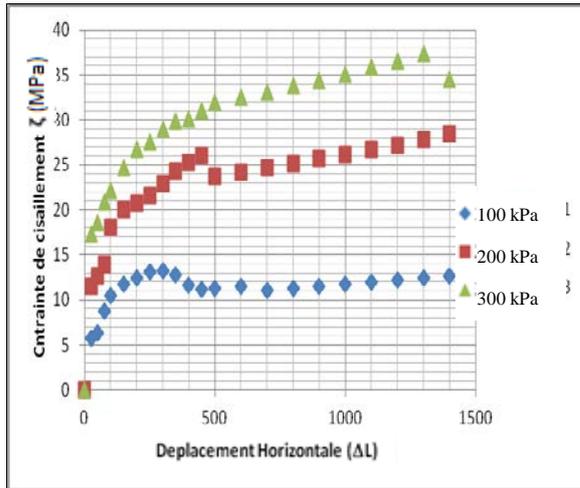


Sol dense lâche avec renforcement par géogrid

Figure 3. 12 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r=15\%$, $w=3\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

W=5%

W=5%



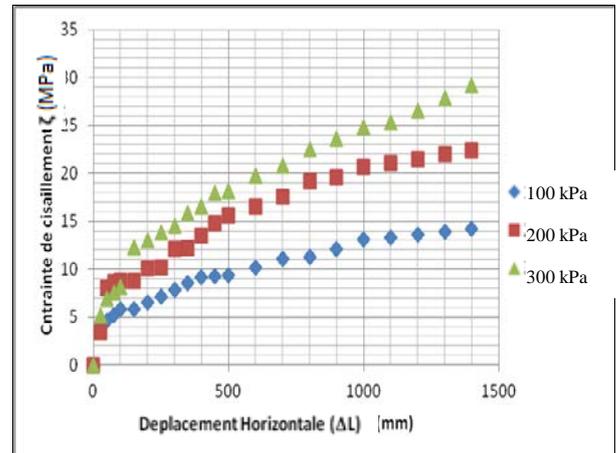
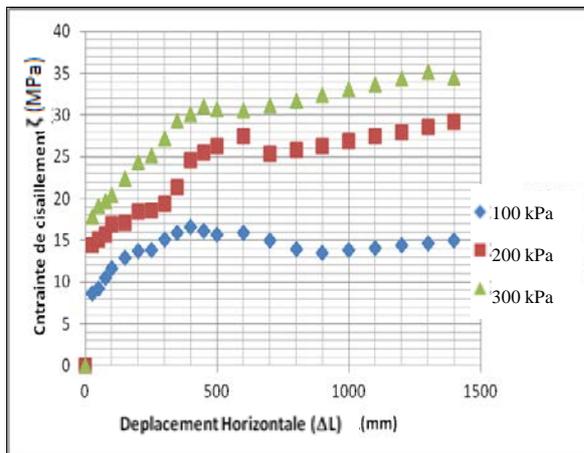
Sol lâche sans renforcement par géogrille

Sol dense lâche avec renforcement par géogrille

Figure 3. 13 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r=15\%$, $w=5\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

W=7%

W=7%



Sol lâche sans renforcement par géogrille

Sol dense lâche avec renforcement par géogrille

Figure 3. 14 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r=15\%$, $w=7\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

3.10.3. Courbes $\tau = f(\Delta L)$ du sable à sec a une température de moyenne 30 à 36

En refait les mêmes essais avec une température moyenne de 30 à 36 :

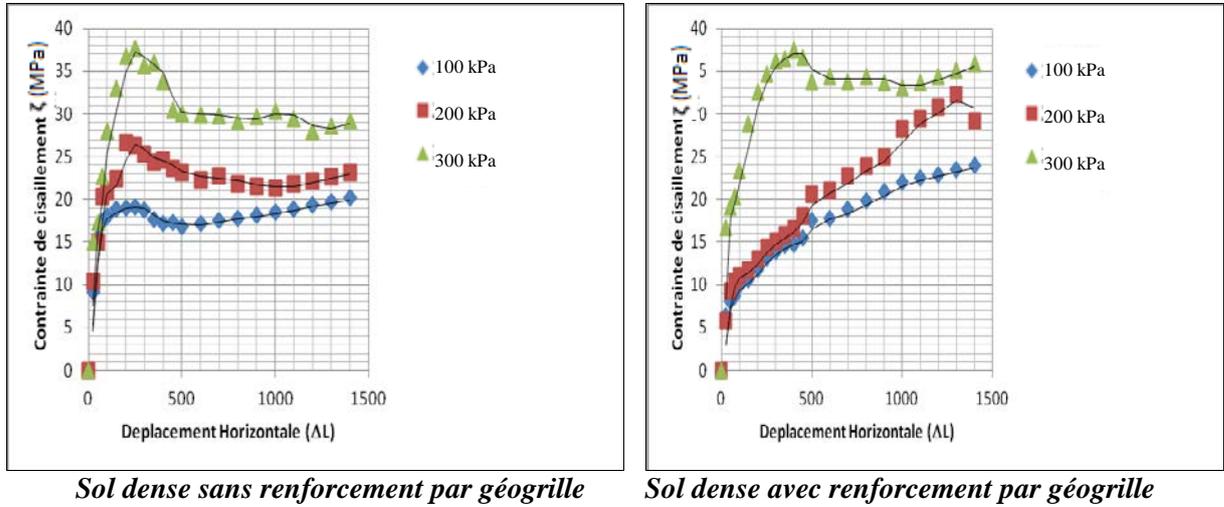


Figure 3. 15 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r=90\%$, et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

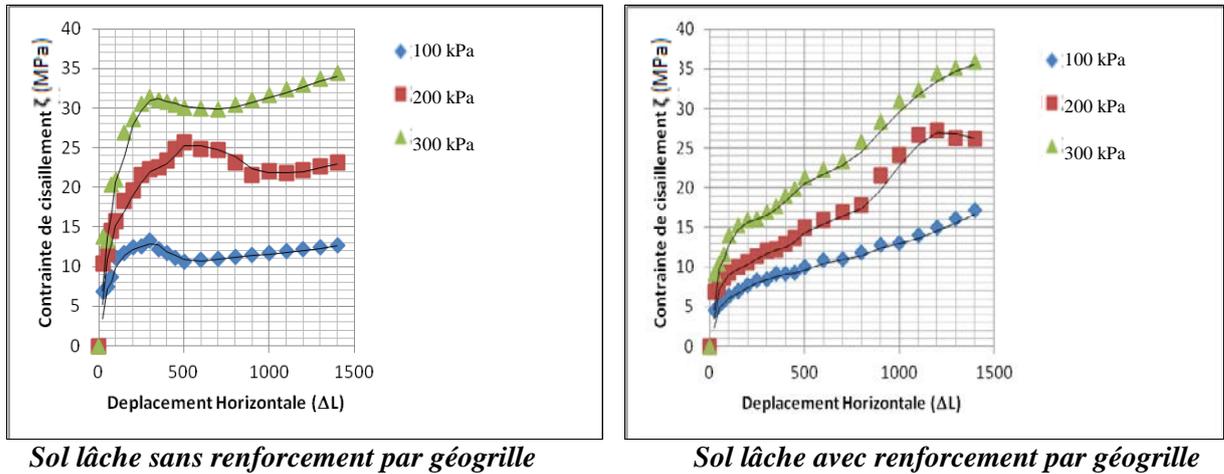


Figure 3. 16 : Courbes Contraintes – Déformations sable à sec et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

3.10.4. Courbes $\tau = f(\Delta L)$ du sable avec variation de la teneur en eau à une température de moyenne 30 a 34

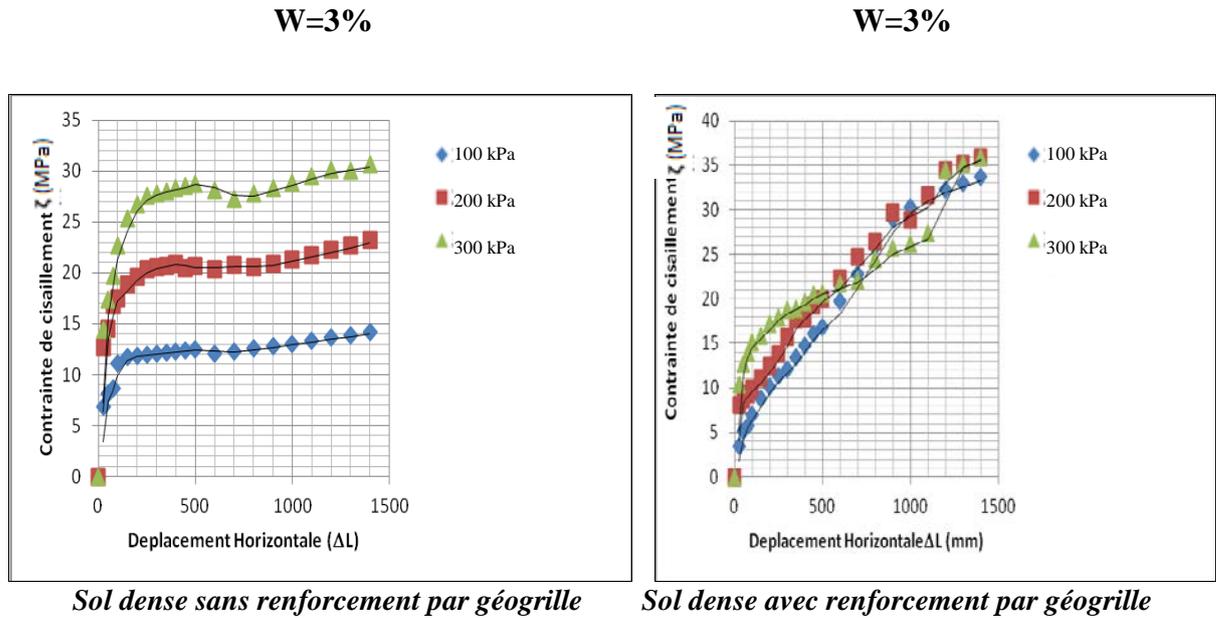


Figure 3. 17 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r = 90\%$, $w=3\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

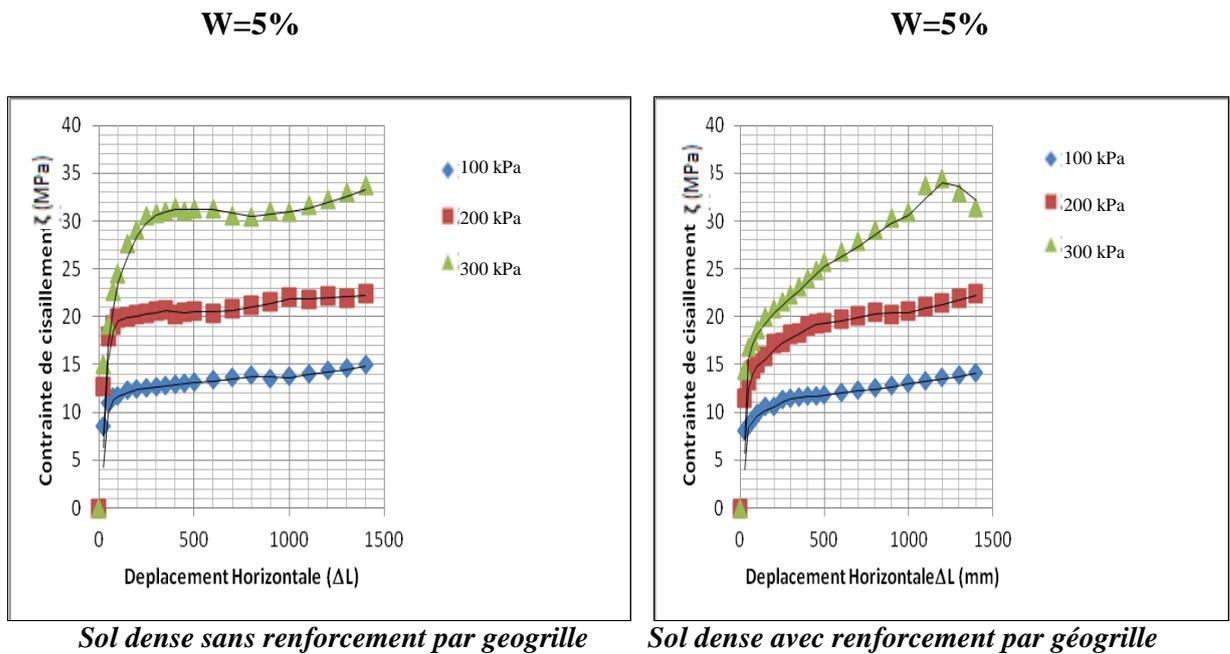
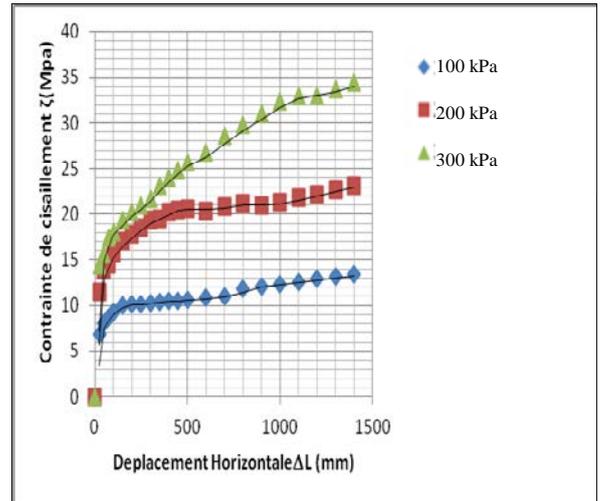
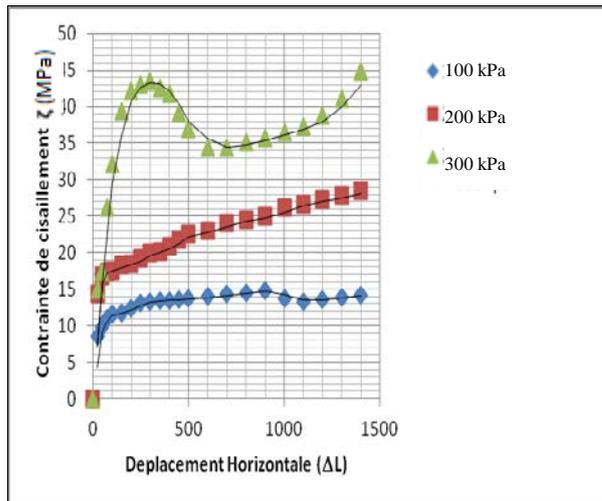


Figure 3. 18 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r = 90\%$, $w=5\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

W=7%

W=7%



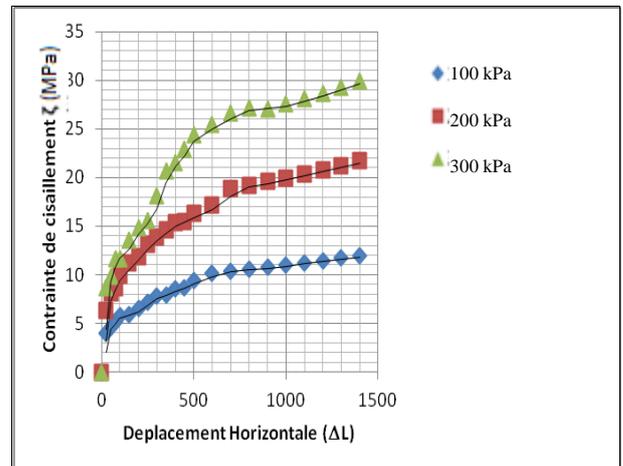
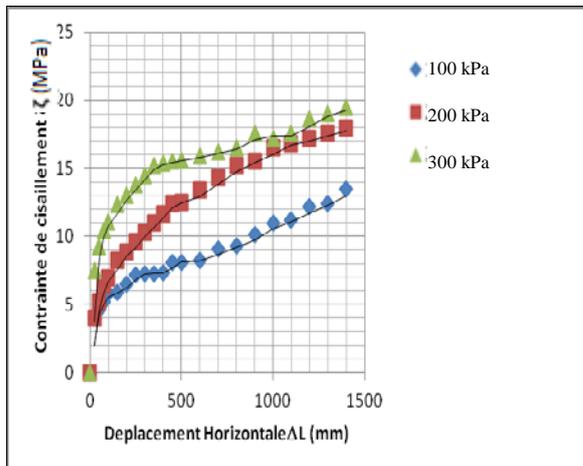
Sol dense sans renforcement par géogridle

Sol dense avec renforcement par géogridle

Figure 3. 19 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r = 90\%$, $w = 7\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

W=3%

W=3%



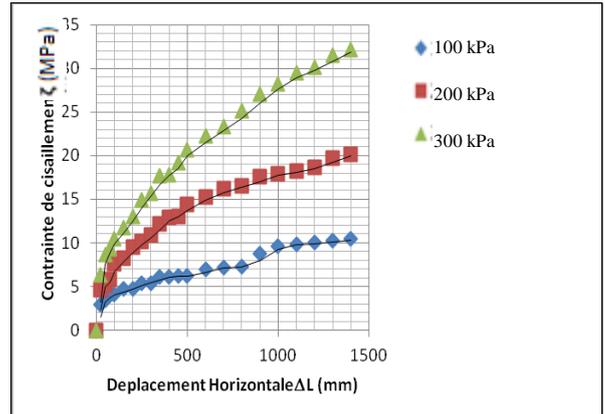
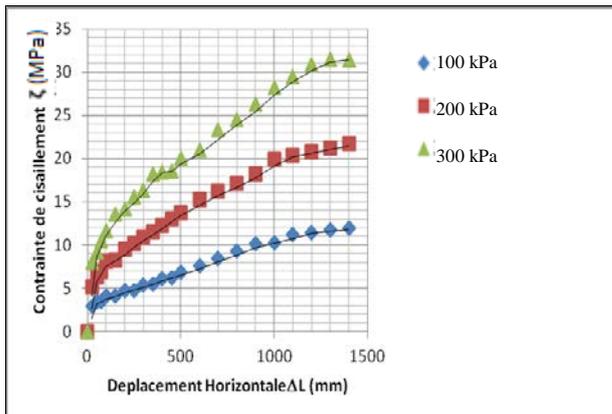
Sol lâche sans renforcement par géogridle

Sol lâche avec renforcement par géogridle

Figure 3. 20 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r = 15\%$, $w = 3\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

W=5%

W=5%



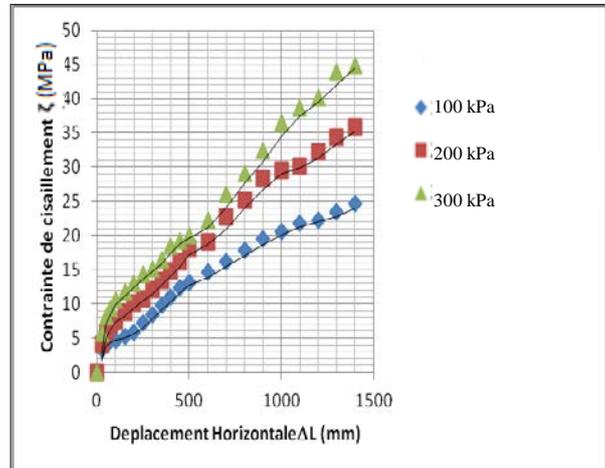
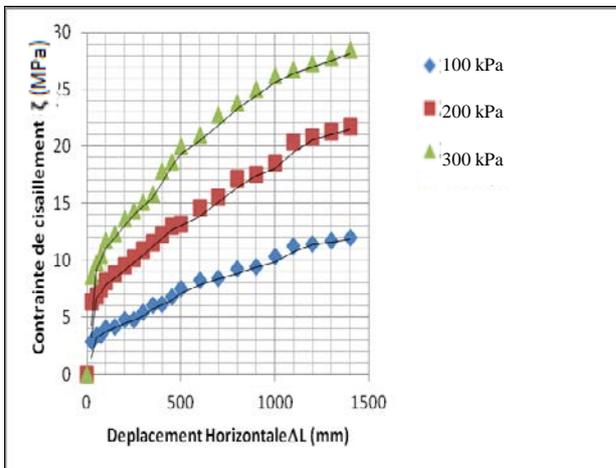
Sol lâche sans renforcement par géotextile

Sol lâche avec renforcement par

Figure 3. 21 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r = 15\%$, $w=5\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

W=7%

W=7%



Sol lâche sans renforcement par géogrid

Sol lâche avec renforcement par géotextile

Figure 3. 22 : Courbes Contraintes – Déformations $D_r = 15\%$, $w=7\%$ et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

3.10.5. Courbes $\tau = f(\Delta L)$ du sable avec variation de la teneur en eau et température

En faisant varier la contrainte de compression de 100 à 300 KPa pour le sable propre, à teneurs en eau variables (3%, 5%, et 7%), et deux différentes température (19°et 34°) nous obtenons les courbes Contraintes –Déformations représentées sur les figures ci-dessous.

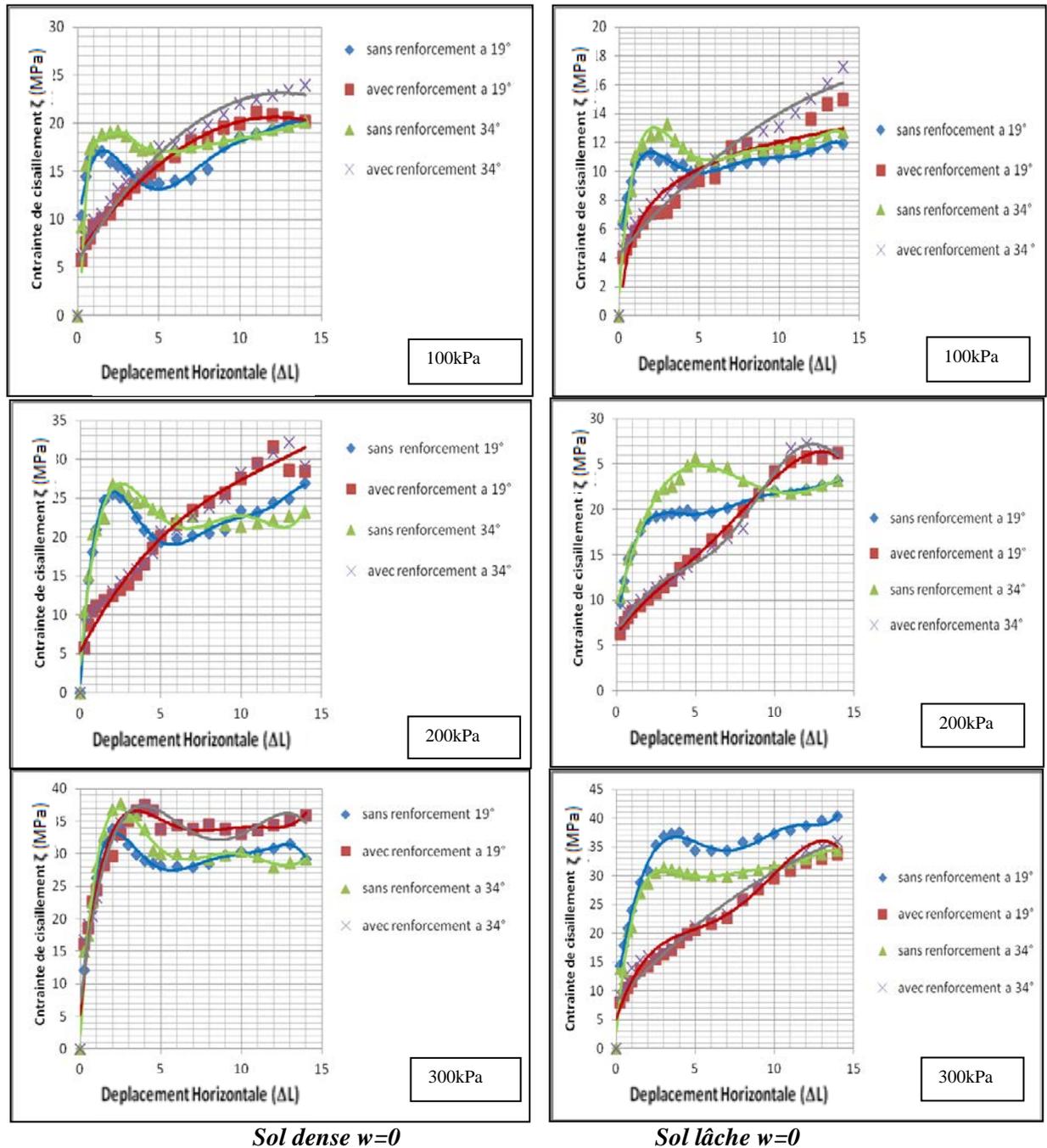


Figure 3. 23 : Courbes Contraintes – Déformations, w=0% avec température 19 et 34° et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

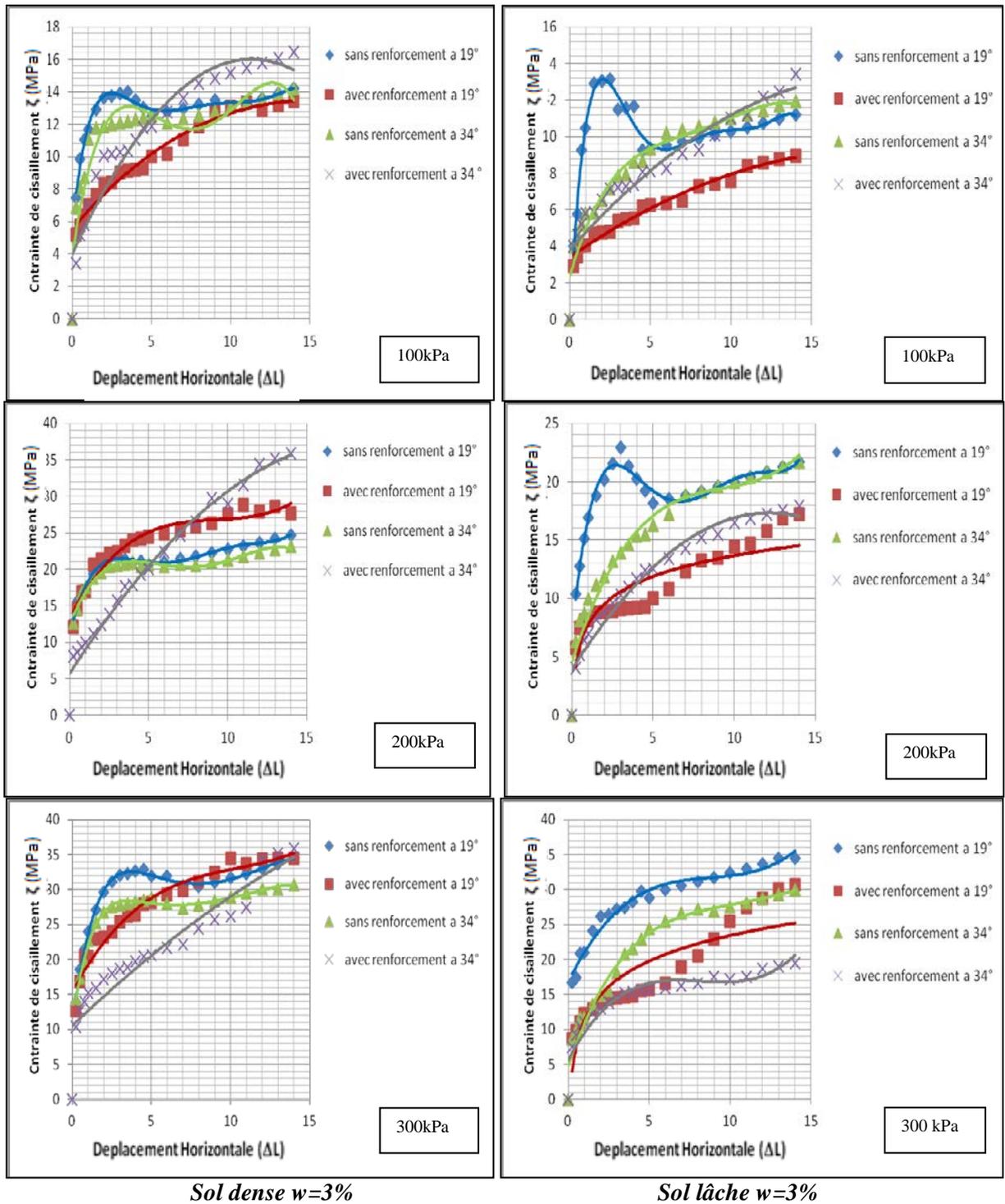
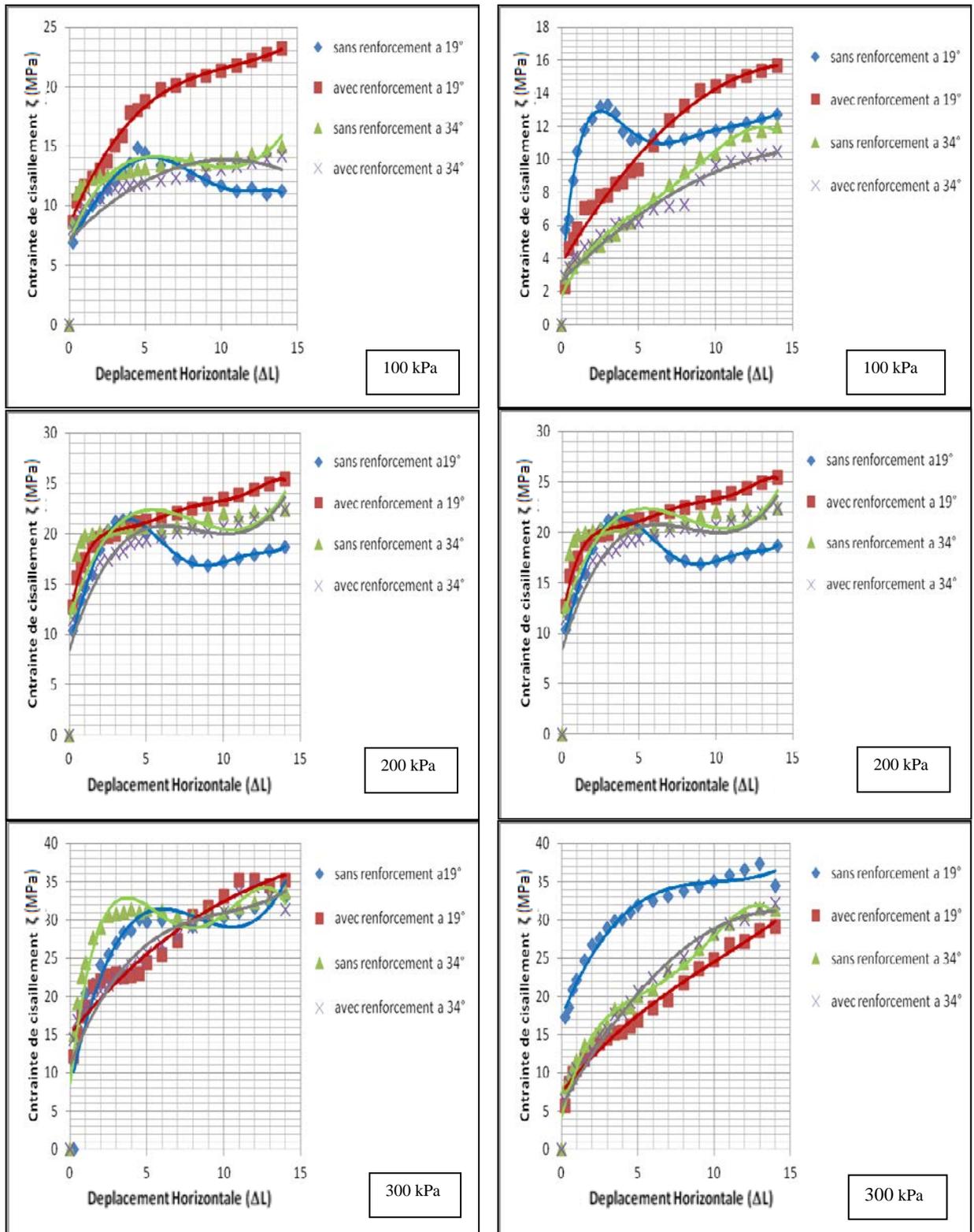


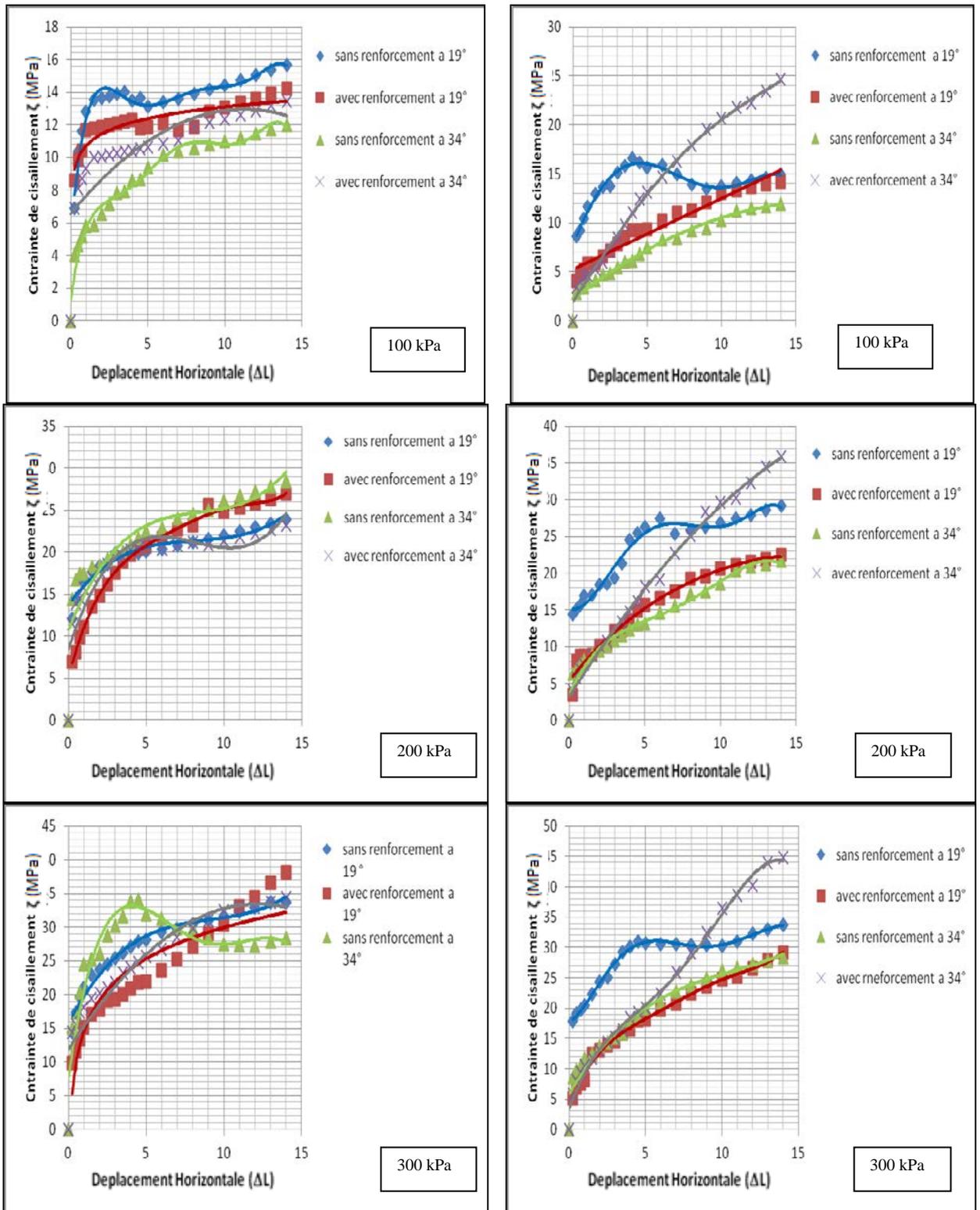
Figure 3. 24 : Courbes Contraintes – Déformations, $w=3\%$ avec température 19 et 34 et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa



Sol dense $w=5\%$

sol lâche $w=5\%$

Figure 3. 25 : Courbes Contraintes – Déformations, $w=5\%$ avec température 19 et 34 et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.



Sol dense w=7%

sol lâche w=7%

Figure 3. 26 : Courbes Contraintes – Déformations, w=7% avec température 19 et 34 et sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa.

3.10.6. Interprétation des résultats

Les Courbes Contraintes – Déformations, représentées sur Les figures,

Montrent que la contrainte de cisaillement des sols non saturés augmente en fonction de la contrainte normale appliquée pour le sol utilisé renforcé ou non renforcé par géogrid, à différentes teneurs en eau et aux différentes températures.

L'application d'une contrainte normale de plus en plus importante engendre un enchevêtrement et un frottement de plus en plus important entre les grains, ce qui empêche le déplacement horizontal des grains les uns par rapport aux autres et seront ainsi, plus susceptibles à se casser qu'à se déplacer, tout en sachant que la force nécessaire pour casser un grain est beaucoup plus importante que celle nécessaire pour le déplacer.

On a constaté lors de l'expérimentation une diminution de la résistance au cisaillement des sols non saturés lorsqu'on augmente la teneur en eau au sol utilisé, et cela pour toute contrainte de compression appliquée. Ceci est dû au fait que la présence d'eau favorise le glissement des grains et ainsi, les grains se déplacent plus facilement les uns par rapport aux autres. Des résultats concordants ont été trouvés par Boussaid (2005).

Par ailleurs on remarque l'augmentation continue de la résistance de cisaillement avec Sable renforcé avec la géogrid qui crée un frottement entre les grains dans les mélanges, ce qui empêche leurs déplacements.

La présence de l'eau dans le sol, crée des macropores signés de vides donc des points faibles entre les grains, favorisent aussi une chute de la résistance de la structure du sol.

D'après les graphes et lors de l'essai pour les sols renforcés avec la géogrid on n'a pas atteint le pic de la contrainte du cisaillement durant la période d'essai.

On remarque que lorsqu'on change la température de 19 à 34° les courbes des mélanges sont presque confondues, y'a pas une grande différence de la valeur de pic de la contrainte de cisaillement pour les deux températures.

3.11. Droites Intrinsèques : $T = f(\Sigma)$

Les résultats obtenus aux différents essais de cisaillement sont représentés sous forme de droites intrinsèques, présentant les allures suivantes :

3.11.1. Courbes $\tau = f(\sigma)$ a une température ambiante de moyenne

17 a 19

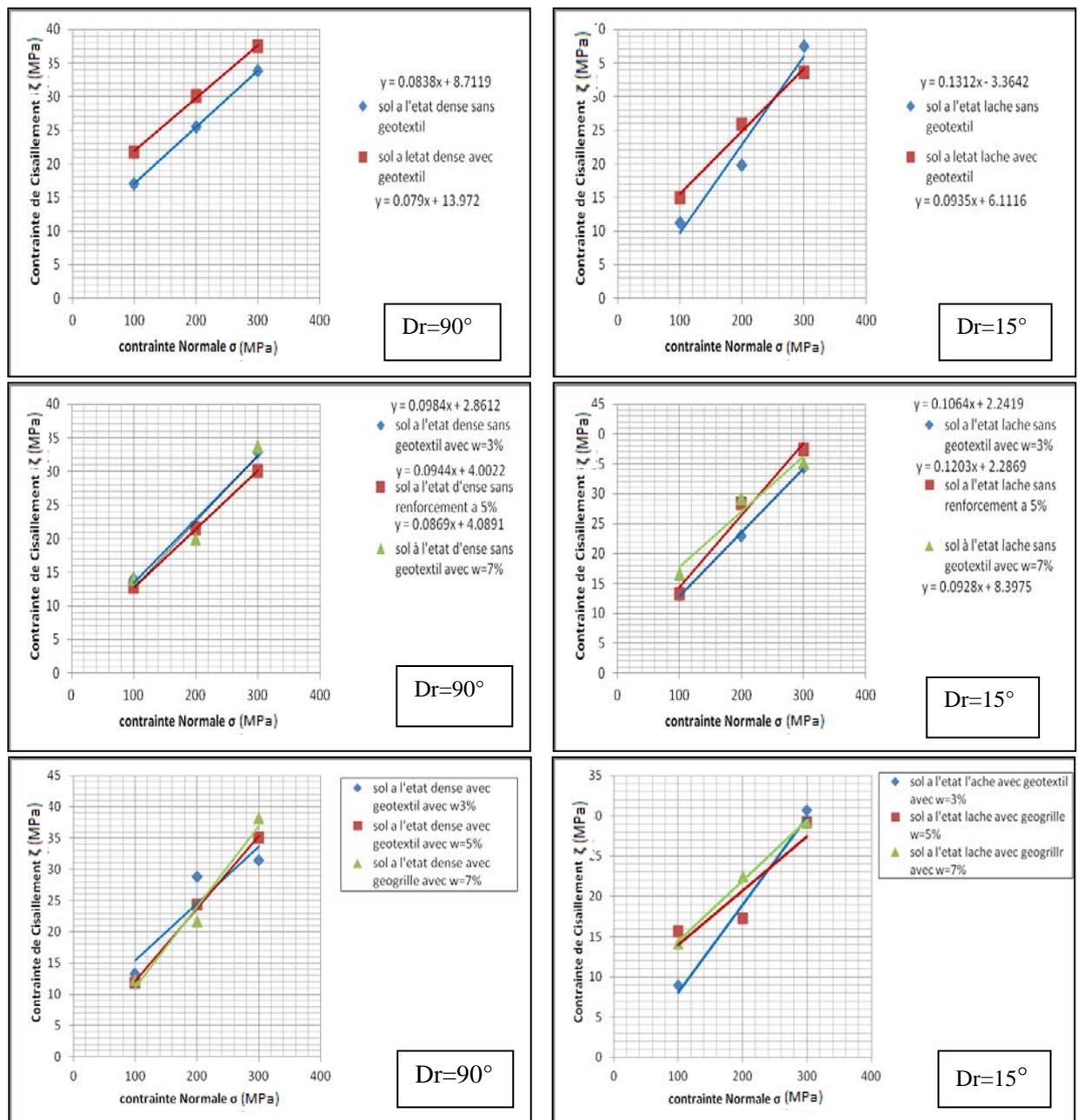


Figure 3. 27 : Droites Intrinsèques sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa, Sol avec renforcement avec une température moyenne 17a 19°.

3.11.2. Courbes $\tau = f(\sigma)$ avec variation de teneur en eau

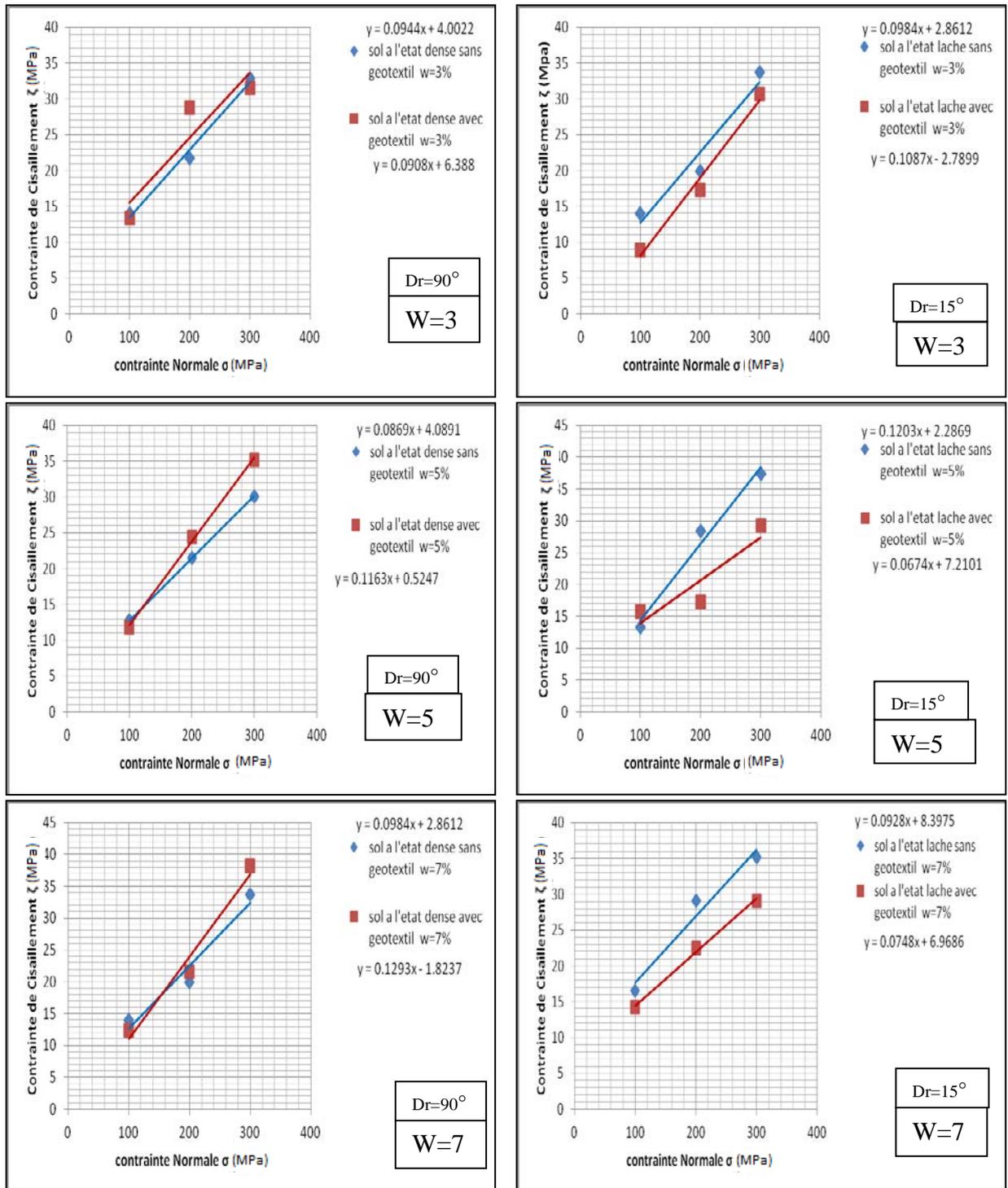


Figure 3. 28 : Droites Intrinsèques, sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa, a des teneurs en eau variable. Sol avec et sans renforcement avec une température ambiante 17° .

3.11.3. Courbes $\tau = f(\sigma)$ avec variation de la température

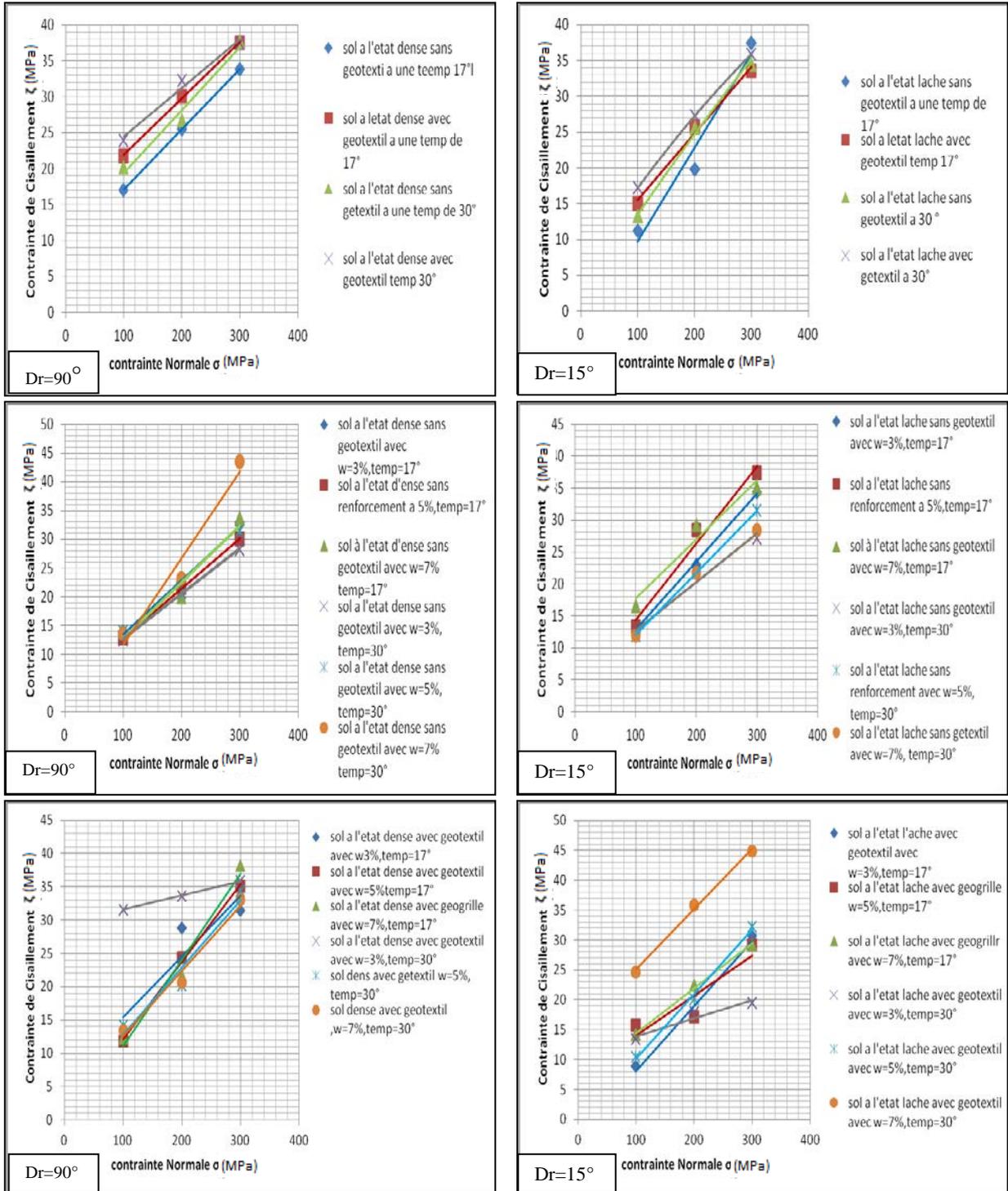


Figure 3. 29 : Droites Intrinsèques, $\tau = f(\sigma)$ sous les contraintes de compression de 100, 200 et 300 KPa avec variation de la température.

Les droites intrinsèques présentées sur la figure 3.27, 3.28, 3.29 nous permettent de déduire deux principales caractéristiques de cisaillement : la cohésion (C) et l'angle de frottement interne (φ).

On remarque que les droites presque sont confondues, on constate d'une part que l'augmentation de la cohésion (C) est liée avec la présence de la géogridde

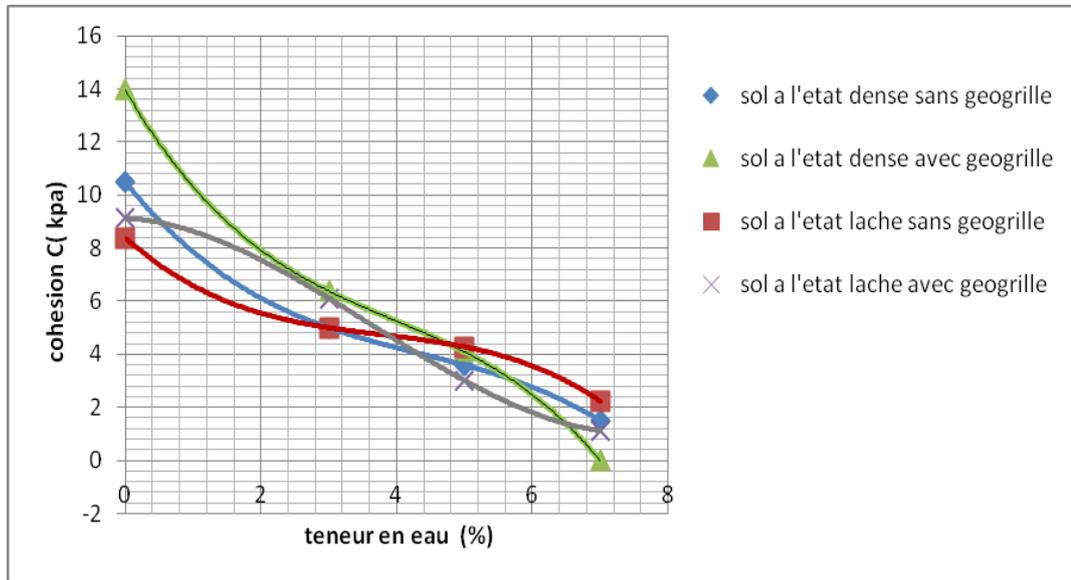


Figure 3. 30 : Évolution de la cohésion(C) en fonction de la teneur avec l'effet de présence de géogridde Enkagrid pro 40.

Sur la figure 3.30 On remarque d'une part l'augmentation de la cohésion avec la présence du matériau de renforcement géogridde pour les sols à l'état lâche et dense. D'autre part, on constate la diminution de la cohésion par accroissement de la teneur en eau dans les mélanges, qui peut être expliquée par le fait qu'au fur et à mesure que l'on augmente la teneur en eau, l'accroissement des macropores entre les grains rendant le sol fragile et apte à la rupture. Des résultats concordants ont été trouvés par Boussaid (2005).

3.12. CONCLUSION

Les sols non saturés soumis aux essais de cisaillement présentés ici par le renforcement avec la géogridde « Enkagrid pro40 », ont présenté des contraintes de cisaillement variables, qui évoluent en fonction de l'augmentation de la contrainte normale appliquées la présence de géogridde et décroissent en fonction de l'augmentation du pourcentage de la teneur en eau.

Dans notre étude expérimentale on n'a pas pu maîtriser la température voulut avec l'appareille de cisaillement, à cet effet on pense dans les prochains essais a utilisé l'appareil triaxial thermique qui permet l'étude du comportement thermo-hydro-mécanique de sols non saturés.

Chapitre 4 :

*Simulation d'essai du
Cisaillement direct*

4.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons effectuer une analyse quantitative et simuler l'essai de cisaillement direct, avec le code de calcul Plaxis. À travers cela, nous souhaitons d'étudier le comportement thermomécanique des sols renforcés par les géosynthétique.

4.2. Définition des Données

La géométrie introduite choisie pour l'analyse du modèle, est représenté sur la figure 4.1.

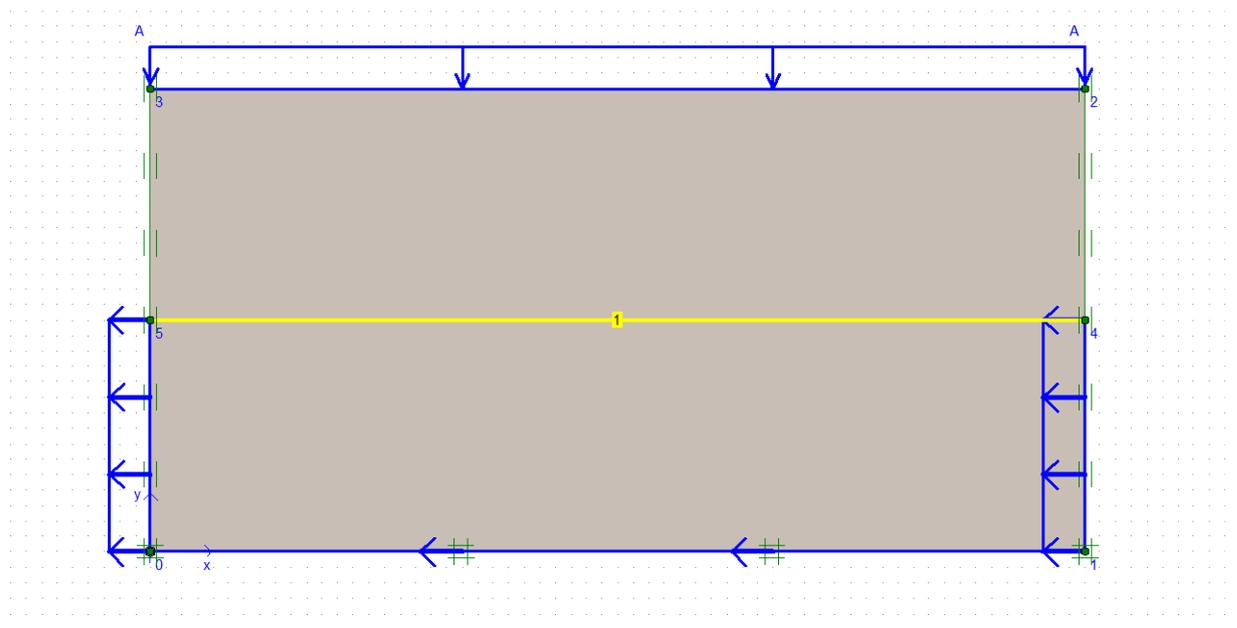


Figure 4. 1 : Profil du modèle à analyser.

4.3. Hypothèses générales

Les hypothèses prises pour la simulation de l'essai de cisaillement direct, sont les suivantes :

- ✓ Le sol est supposé être un milieu continu ;
- ✓ Les déformations sont considérées planes ;
- ✓ Le comportement du sol obéit à la loi de mohr-coulomb.

4.4. Géométrie du modèle

Le profil à analyser est représenté sur la figure 4.1 (600 mm de longueur et 30 mm de hauteur).

4.5. Caractéristiques des matériaux

Les données à introduire dans notre étude sont les résultats des essais réalisés dans les laboratoires de l'université de Chlef. Les données qui nous manquent sont prises de la bibliographie.

4.5.1. Propriétés des couches de sols

Les propriétés géotechniques qui nous manquent pour la modélisation des sols, sont pris de la bibliographie (base de données Plaxis). Les propriétés des couches de sols, leurs types et modèles de comportement à introduire dans ce programme, sont présentés dans le tableau 4.1. Ainsi, les valeurs à introduire sont tirés des essais réalisés.

Paramètres		
Modèle Type		
Poids Volumique Sec	γ_d	[Kn/Mm3]
Poids Volumique Humide	γ_{sat}	[Kn/Mm3]
Module De Young	E	[Kpa]
Coefficient De Poisson	ν	
Cohésion	c	[Kpa]
Angle De Frottement	φ	[°]
Angle De Dilatation	ψ	[°]

Tableau 4. 4 : Propriétés des couches de sols.

4.5.2. Propriétés des éléments de renforcements

Les géogrille et les ancrages en grilles utilisés dans la présente étude sont illustrés sur la figure 4.2 :



Figure 4. 2 : Types des Géogrilles utilisés ‘Enkagrid pro 40’.

C'est une géogrille unidirectionnelle semi-rigide constituée de bandes de polyester extrudé soudées entre elles au laser. Elle se caractérise par une grande rigidité aux nœuds et un maillage très ouvert pour garantir une interaction maximale avec la plupart des sols. La technologie laser permet en outre de très bien maîtriser la qualité d'assemblage.

Les propriétés des éléments de renforcement sont résumées dans le tableau (4.2) suivant :

Produit	Dimensions	Résistance à la	Allongement à	Charge à	Charge à
Enkagrid	ouvertures (A x B) [3] mm	traction [1] EN ISO 10319	la rupture [2] EN ISO 10319	2% [2] EN ISO 10319	5% [2] EN ISO 10319
		kn/m	%	kn/m	kn/m
PRO 40	94 x 41	> 40	6	17	33

Tableau 4. 5 : Propriétés des éléments du renforcement.

- [1] Valeurs atteintes avec une probabilité de 95%.
- [2] Valeurs moyennes.
- [3] A = ouverture sens longitudinal, B = ouverture sens transversal.

La seule propriété d'une géogridde est la rigidité axiale EA. Cette dernière a été prise égale à 0.04 kn/mm et correspond à une géogridde de type Enkagrid PRO40, Pour le cas où la température et élever on a diminué la résistance à la traction a 0.03kn/mm.

4.6. Maillage et conditions aux limites

La génération du maillage se fait automatiquement (figure 4.3).

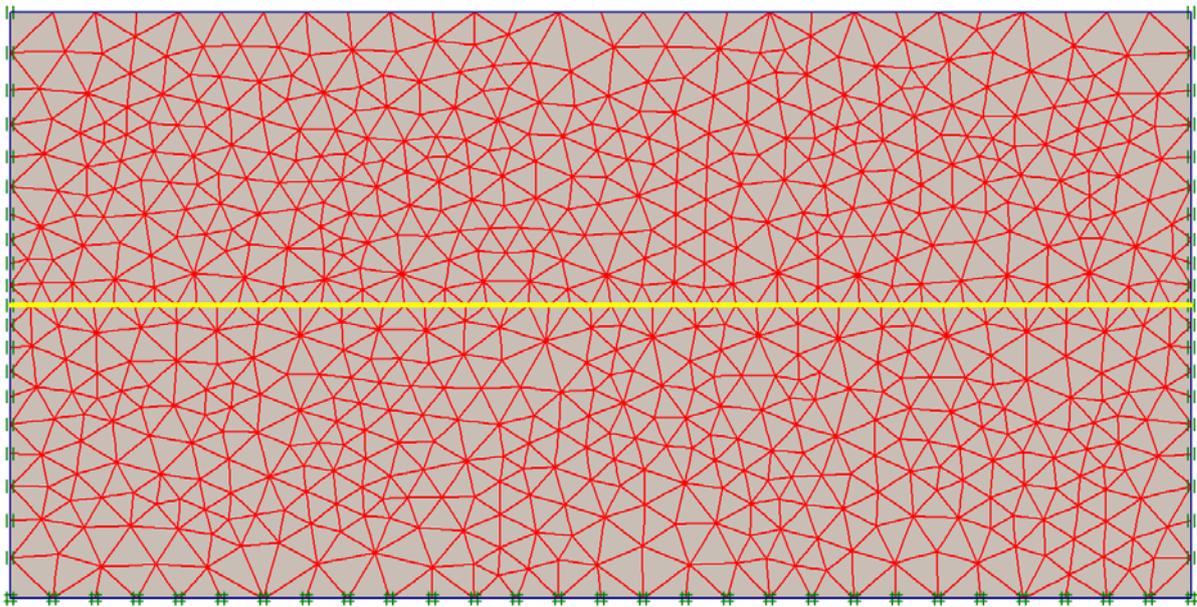


Figure 4. 3 : Génération du maillage et les conditions aux limites.

4.7 Conditions initiales

Les conditions initiales nécessitent la génération des conditions hydrauliques initiales et les contraintes initiales.

4.7.1 Conditions hydrauliques

Le niveau de la nappe est nulle dans un essai de cisaillement direct, ainsi, la génération des pressions interstitielle n'est affectés rien que pour le programme prend en considération le poids volumique saturé, lorsqu'on varie la teneur en eau. Pour cela, dans notre modèle, on a pris comme hypothèse que le régime est statique.

Les résultats sont représentés sur la figure 4.4.

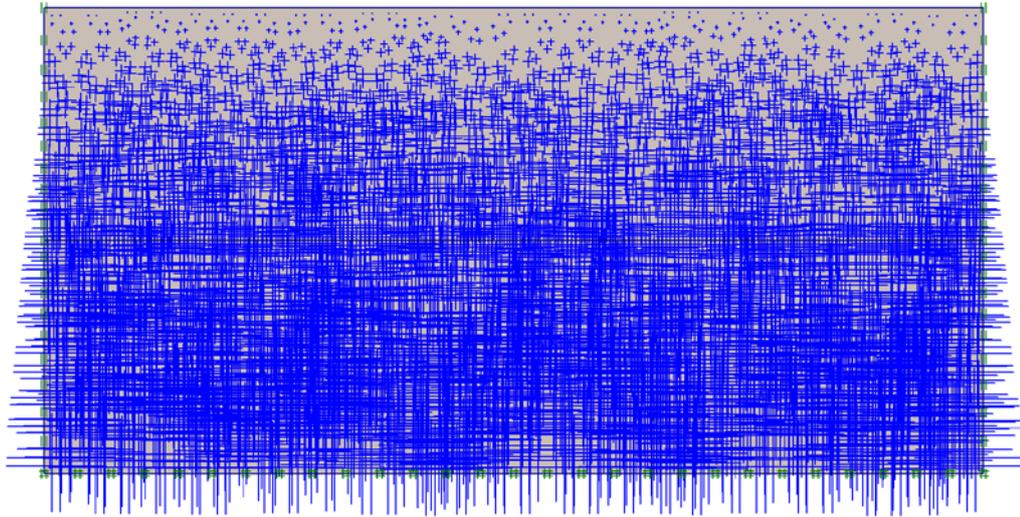


Figure 4. 4 : Conditions hydrauliques initiales

4.7.2 Contraintes initiale

La génération automatique des contraintes initiales peut être réalisée à ce stade, Les résultats sont représentés sur la figure 4.5.

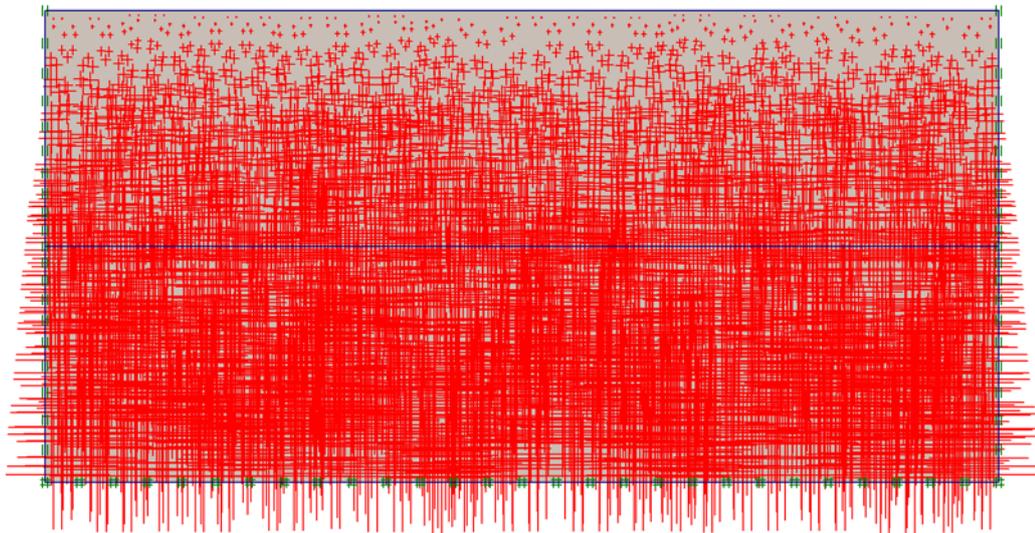


Figure 4. 5 : Conditions contraintes initiales

4.8. PROCÉDURES DE CALCUL

Le calcul se fait en trois phases. La première phase est l'initiation des contraintes, la seconde pour l'application de la force verticale, et la troisième pour l'application des déplacements horizontaux et l'enregistrement des contraintes de cisaillement.

Identifiant	N°	Calcul	Chargement
Phase initiale	0	-	-
Chargement vertical	1	Plastique	<i>Staged construction</i>
Déplacement horizontal	2	Plastique	<i>Staged construction</i>

Tableau 4. 6 : Phases de calcul.

4.8.1 Initiation des contraintes

En premier, la liste des calculs ne contient qu'une seule ligne référenciée phase initiale, et pour laquelle la numérotation est 0. Cette ligne représente la situation initiale du modèle telle que définie par les conditions initiales du programme. La phase initiale est le point de départ pour les calculs ultérieurs.

4.8.2. Chargement vertical

Identifiée par le numéro 1, cette phase de calcul permet l'application des contraintes verticales. Pour cela, on doit paramétrer le programme pour qu'il effectue un calcul par étapes et activer ainsi la contrainte verticale en lui affectant une valeur Cet étape est importante, est a un impact direct sur les prochaines phases de calcul.

4.8.3. Déplacement horizontal

Identifiée par le numéro 2, cette phase permet le calcul des forces horizontale, suite à l'application des déplacements verticaux allant jusqu'à 14 mm.

4.9. Résultats et interprétation

Les résultats sont affichés selon l'ordre des phases de calcul. En premier viennent les résultats du chargement vertical (phase de calcul n°1, voir figure 4.6).

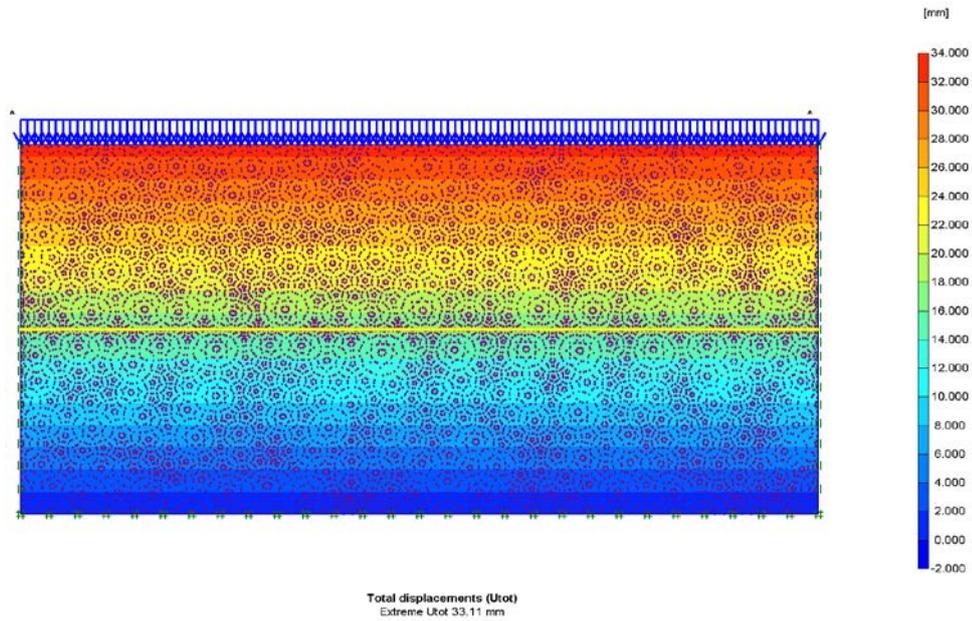


Figure 4. 6 : Résultats de l'application de la contrainte verticale.

En second les résultats des contraintes horizontales suite à l'application des déplacements. (Voir figures 4.7 et 4.8).

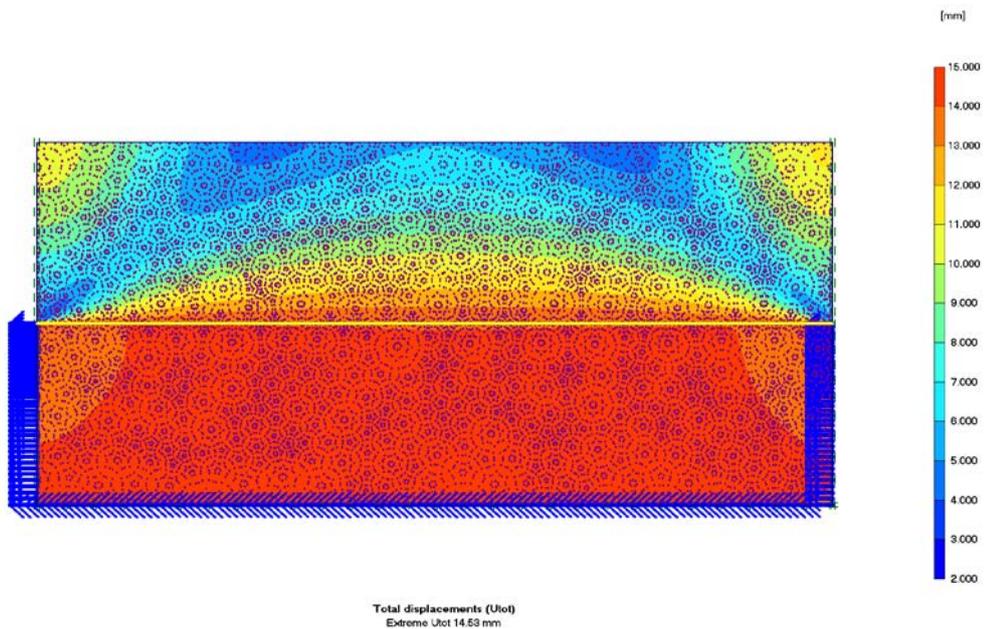


Figure 4. 7 : Résultats de l'application du déplacement horizontale.

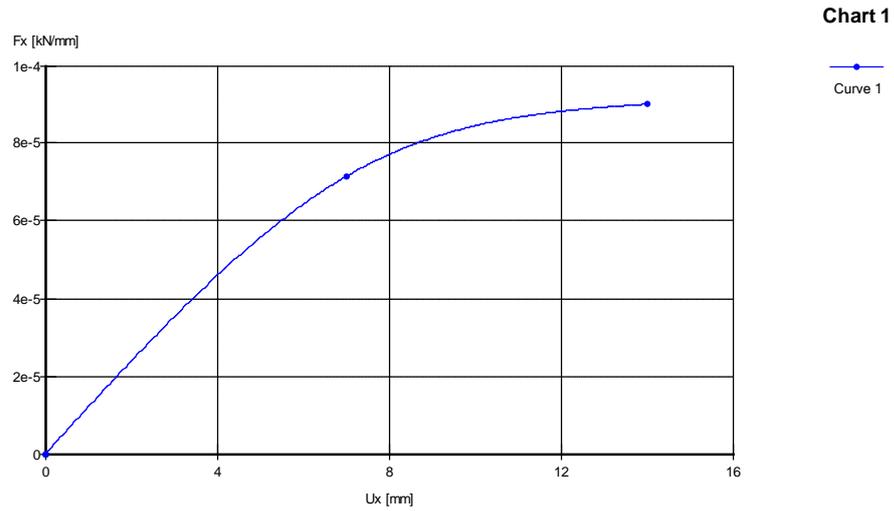
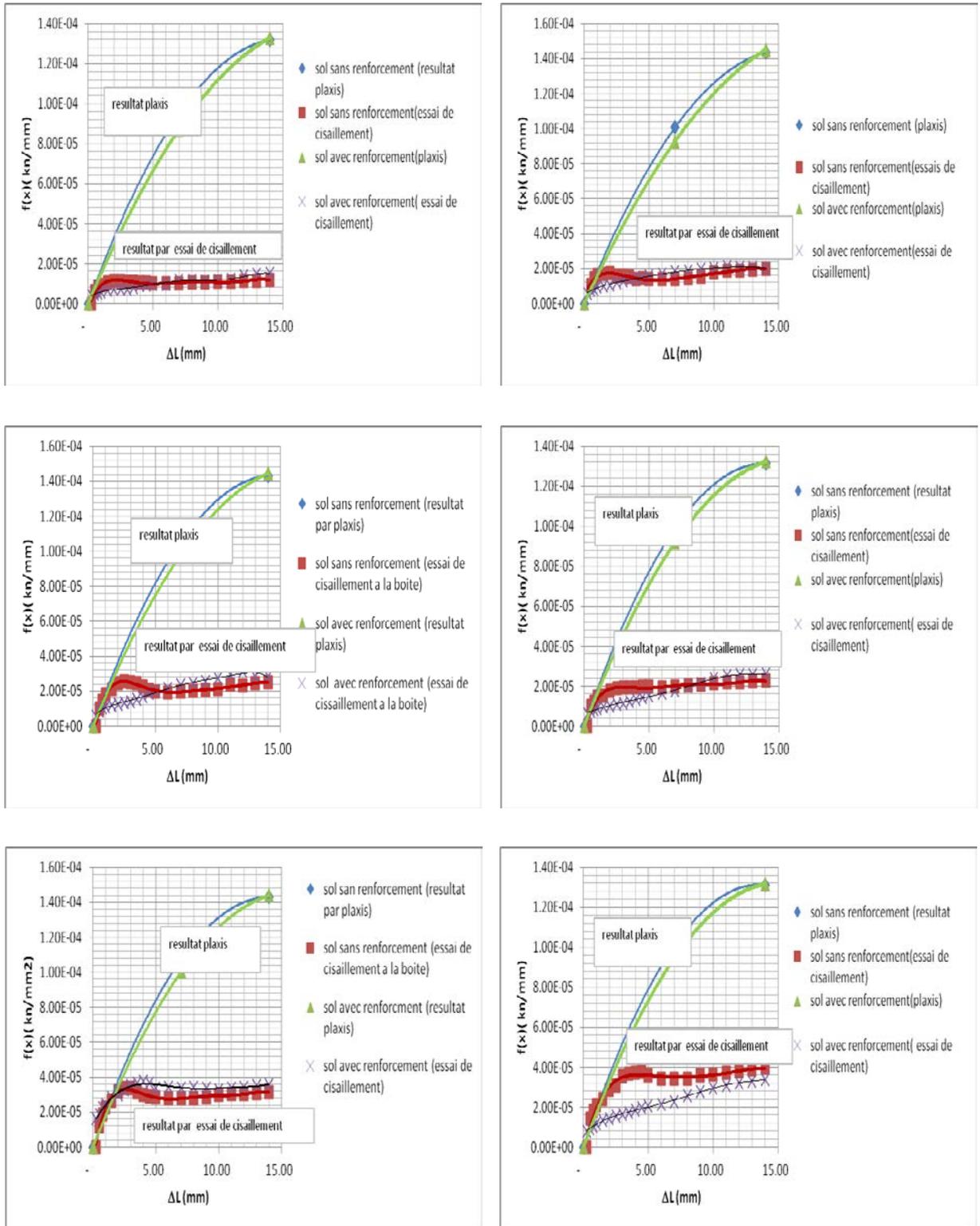


Figure 4. 8 : Résultats de l'application du déplacement horizontale (Courbe).

4.10 Courbe contrainte déformation résultat plaxis avec résultat des essais de cisaillement

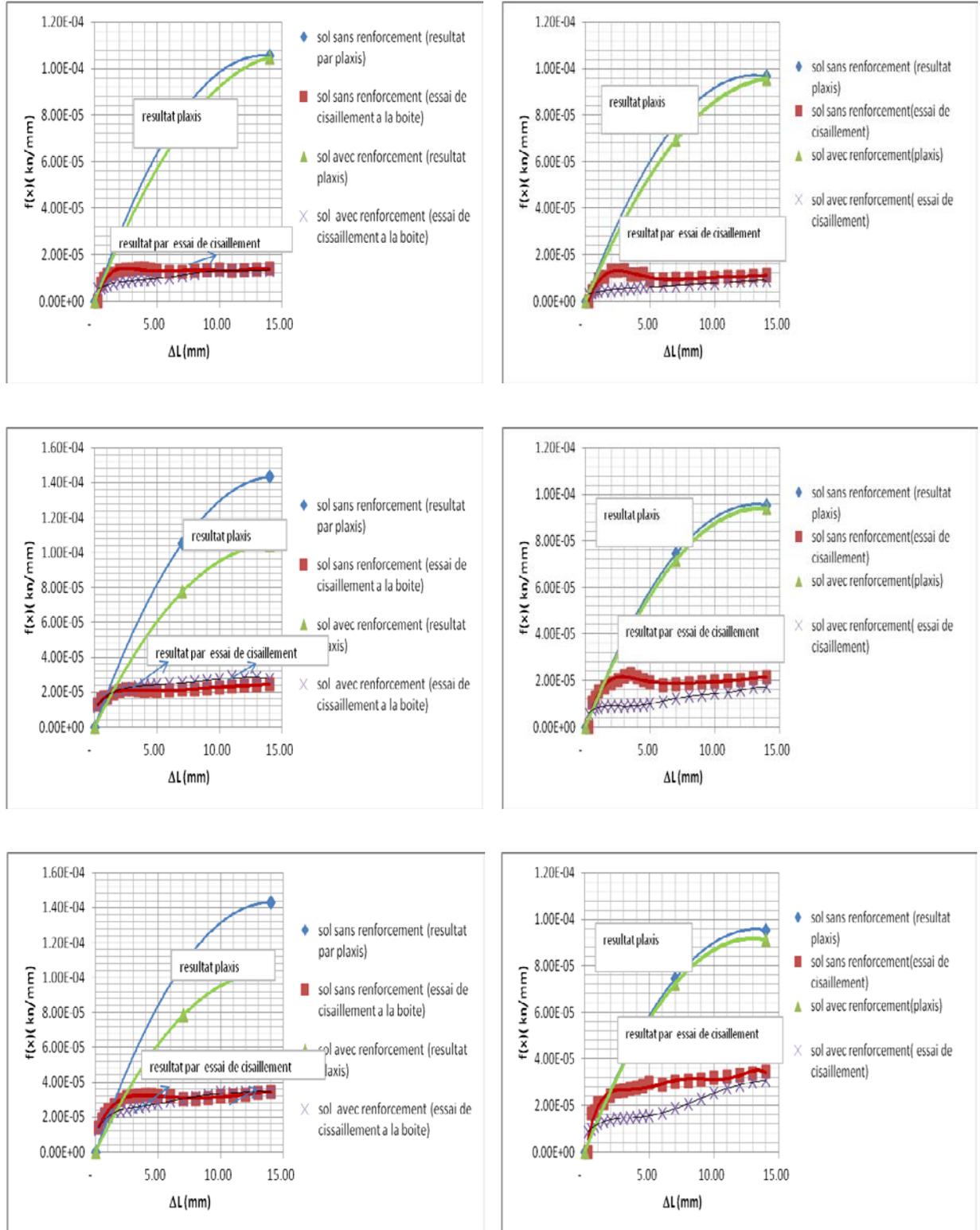
Les résultats obtenus aux différents essais de cisaillement sont représentés sous forme de droites intrinsèques, présentant les allures suivantes :



Sol dense avec $w=0$

Sol lâche avec $w=0$

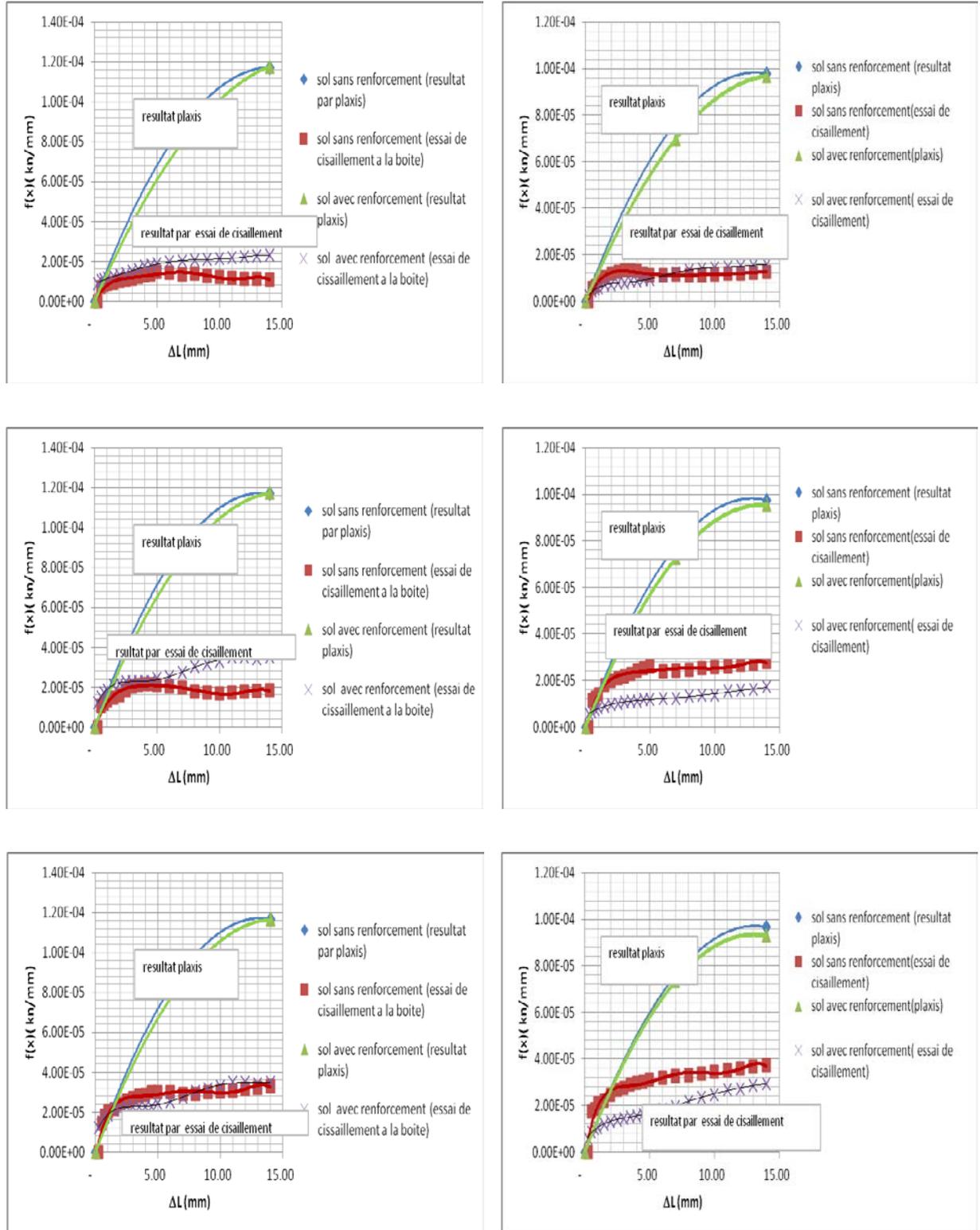
Figure 4. 9 : courbe contrainte – déformation $w= 0\%$ (Résultats Plaxis avec les essais de cisaillement).



Sol dense avec w=3%

Sol lâche avec w=3%

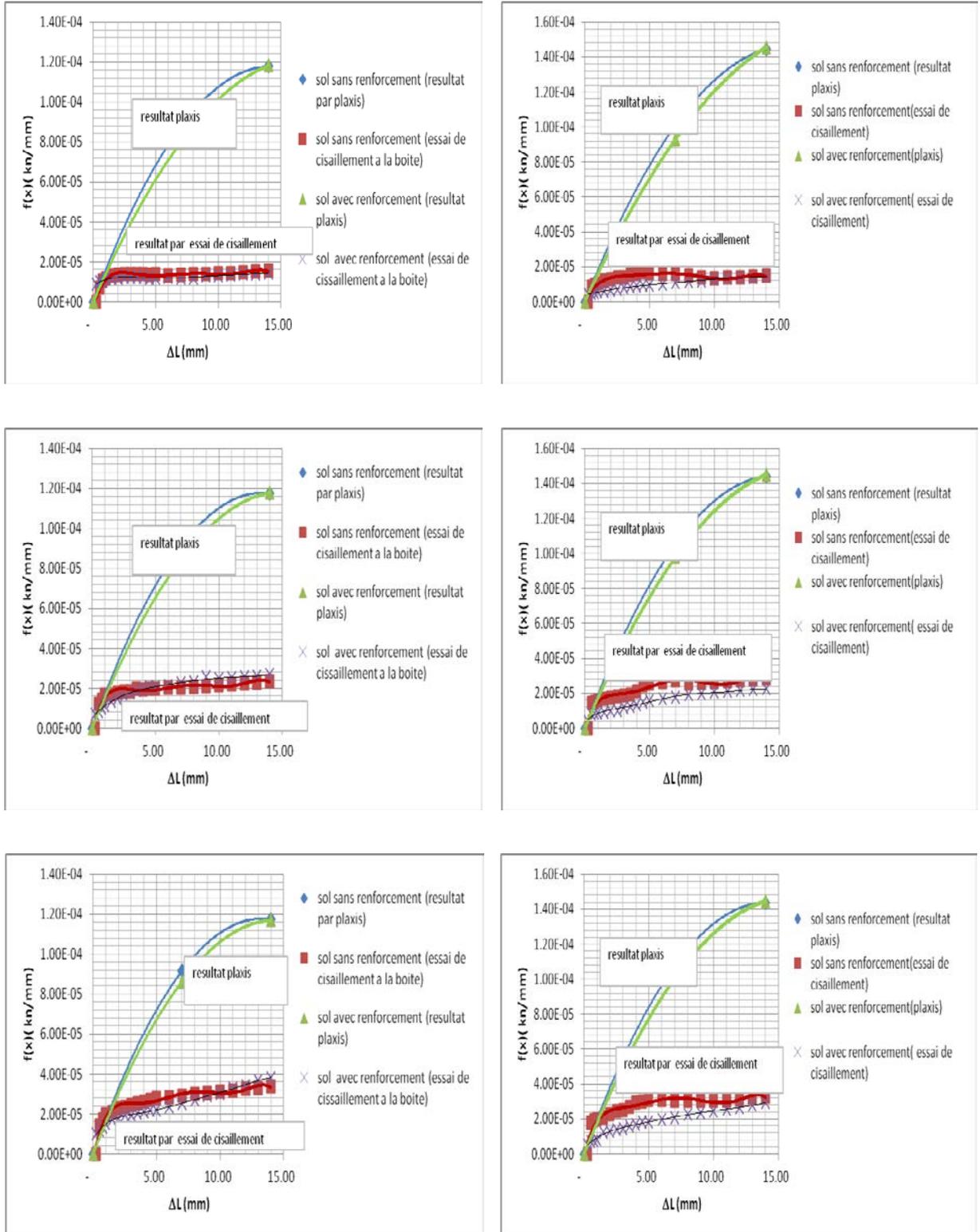
Figure 4. 10 : Courbe contrainte – déformation w= 3% (Résultat Plaxis avec les essais de cisaillement)



Sol dense avec w=5%

Sol lâche avec w=5%

Figure 4. 11 : courbe contrainte – déformation w= 3% (Résultat Plaxis avec les essais de cisaillement)



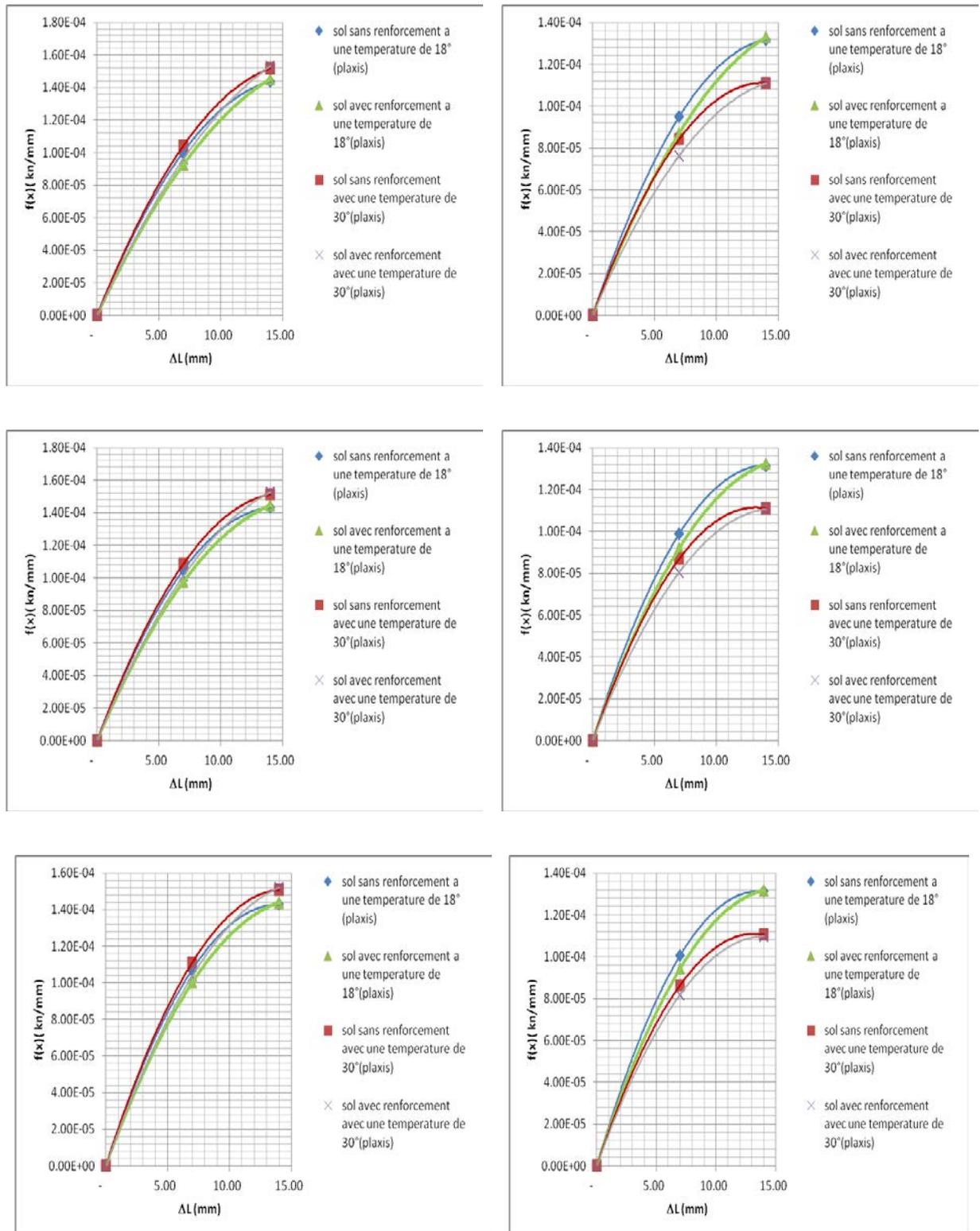
Sol dense avec $w=7\%$

Sol lâche avec $w=7\%$

Figure 4. 12 : Courbe contrainte – déformation $w= 7\%$ (Résultat Plaxis avec les essais de cisaillement)

Les Courbes sur Les figures (4.9, 4.10, 4.11, 4.12), Montrent que la simulation numérique en utilisant le code éléments finis (Plaxis) donne des résultats concordant de manière satisfaisante avec les résultats d'essais réalisés en laboratoire mai seulement dans la phase élastique, il faut d'autre modèle numérique pour obtenir la valeur de pic de la contrainte du cisaillement. (La phase plastique et de rupture le cisaillement du sol).

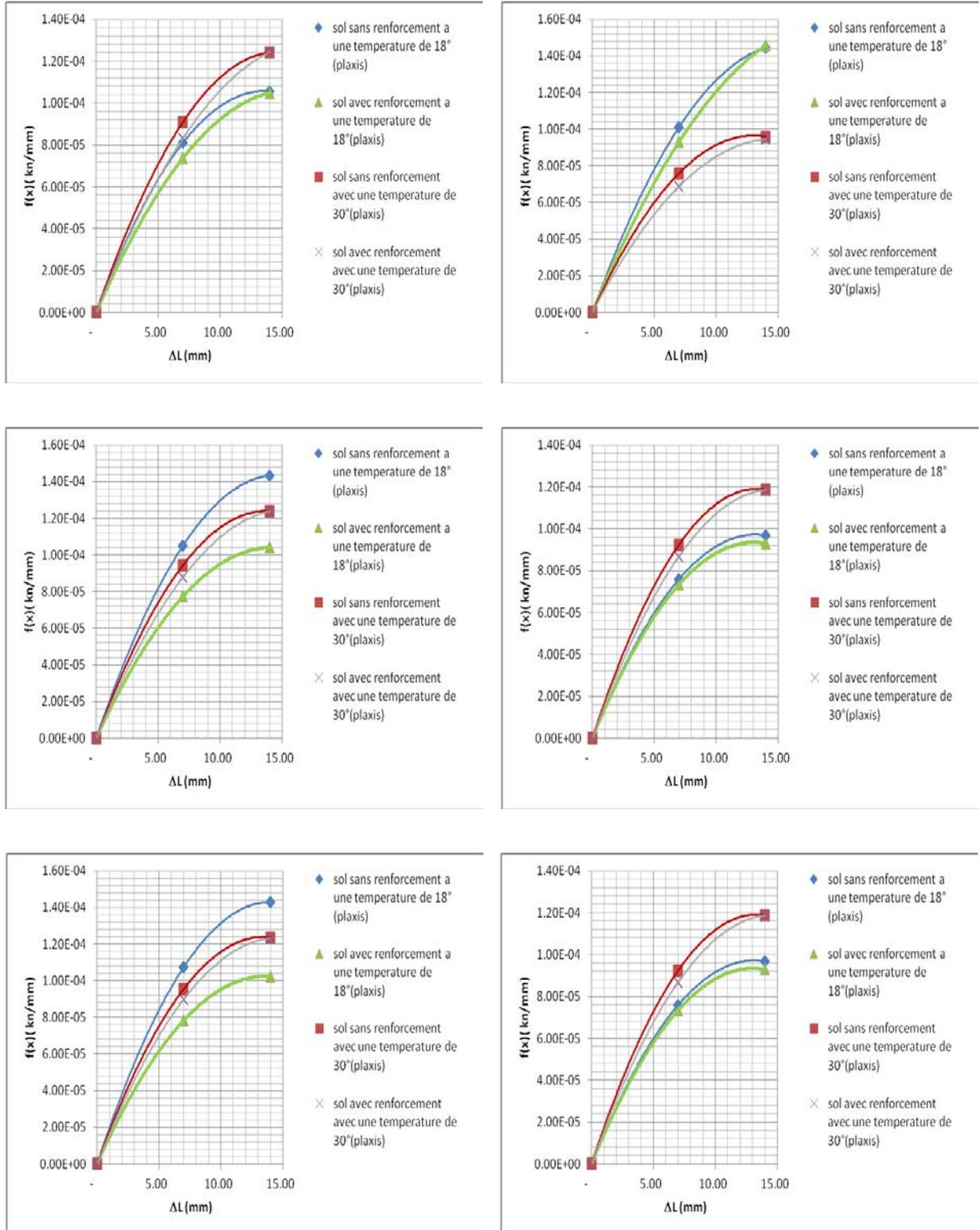
4.11. Courbe contrainte déformation résultat Plaxis avec variation de la teneur en eau avec deux différentes températures (18 et 30)



Sol dense avec $W=0$

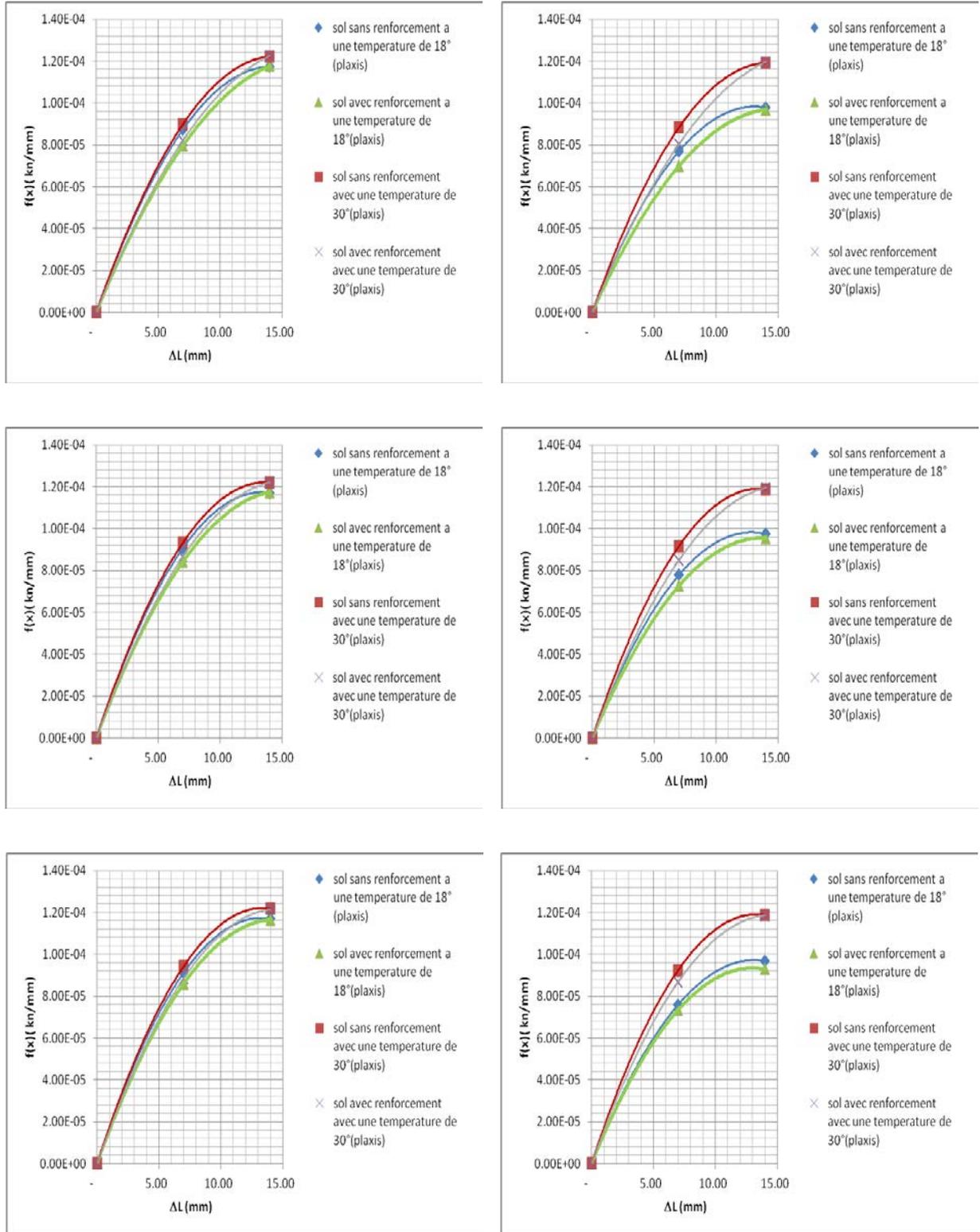
Sol lâche avec $W=0$

Figure 4. 13 : courbe contrainte – déformation $w=0$ a différente température.



Sol dense avec W= 3% Sol lâche avec W= 3%

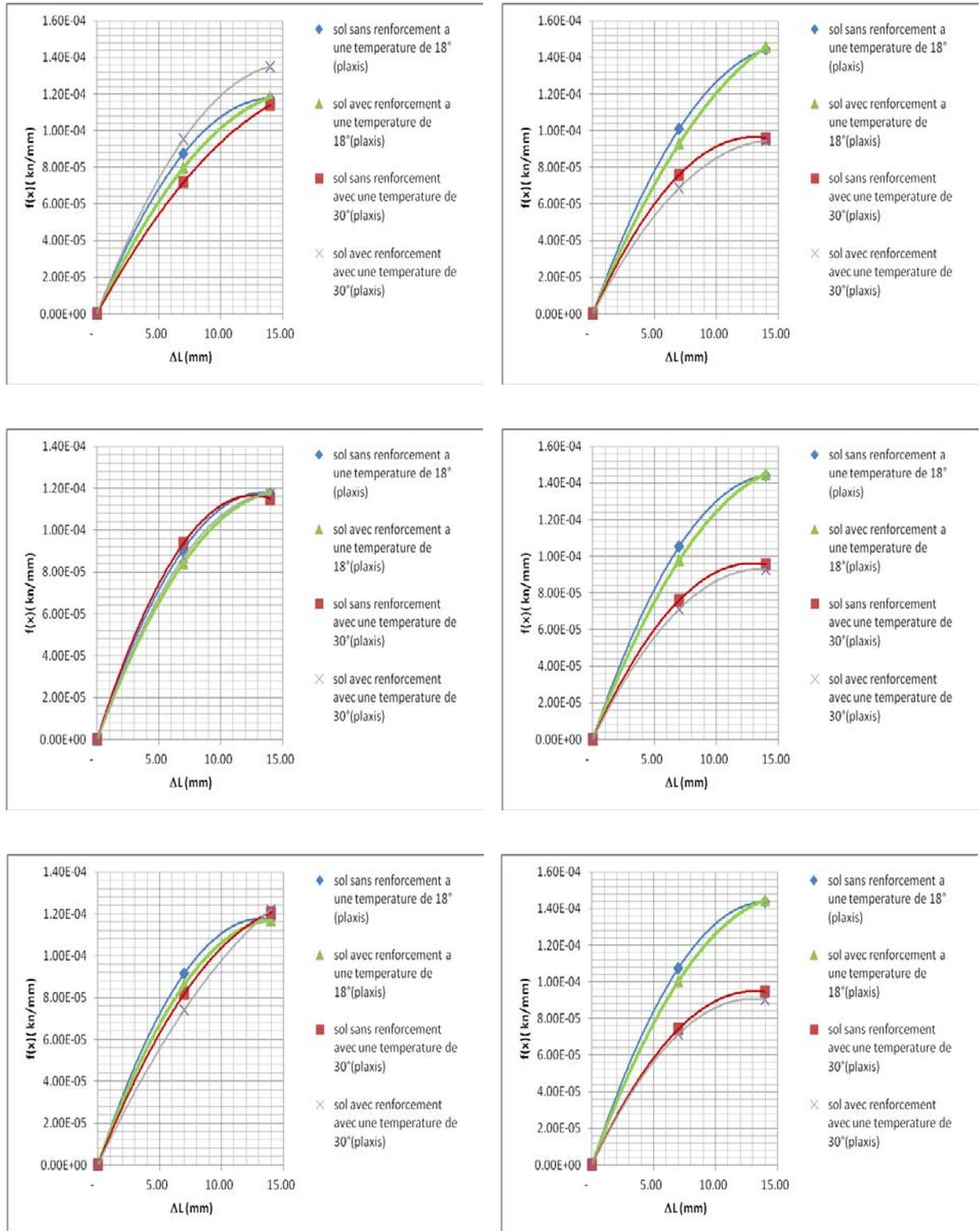
Figure 4. 14 : courbe contrainte – déformation w= 3% à différente température.



Sol dense avec W= 5%

Sol Lache avec W= 5%

Figure 4. 15 : courbe contrainte – déformation w= 5% à différente température.



Sol dense avec W= 7%

Sol lâche avec W= 7%

Figure 4. 16 : Courbe contrainte – déformation w= 7% a différente température.

Sur la figure (4.13, 4.14, 4.15, 4.16) les courbes sont presque confondues pour les sols dense avec les teneurs en eau ($w=0\%$; $w=3,5$ et 7%) quel que soit le sol renforcé ou non, tandis que pour les sols lâche un écart entre les courbes est constaté et qui devient important avec l'augmentation de la température du 18° à 30° .

On constate d'autre part une diminution de la résistance au cisaillement des sols renforcé ou non renforcé par la géogridde lorsqu'on augmente la température, et cela pour toute contrainte de compression appliquée, théoriquement est dû au fait de la diminution de la résistance à la traction de la géogridde par l'effet de la chaleur.

4.12. Conclusion

Les résultats obtenus montrent que la simulation numérique en utilisant le code éléments finis (Plaxis) donne des résultats concordant de manière satisfaisante avec les résultats d'essais réalisés en laboratoire sur modèles réduits, seulement dans la phase élastique, pour cela il faut d'autre modèle numérique pour obtenir la valeur de pic de la contrainte du cisaillement. (la phase plastique et de la rupture du sol).

Conclusion et Recommandation

1. Conclusion

Les problèmes de géomécanique avec des variations thermiques prennent une importance de plus en plus grande. Dans le cadre de cette recherche, une appareille de cisaillement a été utilisé avec deux différentes températures afin de tenté de mettre en évidence le rôle de la température et la teneur en en eau et l'influence sur la résistance au cisaillement des sols renforcé par géogridde.

Les conclusions suivantes peuvent être avancées à l'issue de cette recherche :

- i. Les sols soumis aux essais de cisaillement présentés ici par Sable propre de Chlef, ont présenté des contraintes de cisaillement variables, qui s'accroissent en augmentant la contrainte normale appliquée, avec la présence des matériaux de renforcement géogridde Enkagrid pro-40 et décroissent en fonction de l'augmentation du pourcentage de la teneur en eau.
- ii. Une augmentation de la cohésion avec la présence du matériau de renforcement géogridde pour les sols a l'état lâche et dense. D'autre part, la diminution de la cohésion par accroissement de la teneur en eau dans les échantillons de sol, Des résultats concordants ont été trouvés par (Boussaid 2005 et Chikhi ,2006).
- iii. Y'a pas une grande différence de la valeur de pic du contrainte de cisaillement pour les deux températures. La température n'a pas eu une grande influence sur les ensembles des essais effectués.
- iv. Les résultats obtenus montrent que la simulation numérique en utilisant le code éléments finis (Plaxis) donne des résultats concordant de manière satisfaisante avec les résultats d'essais réalisés en laboratoire sur modèles réduits, seulement dans la phase élastique, pour cela il faut d'autre modèle numérique pour obtenir la valeur de pic de la contrainte du cisaillement.(la phase plastique et de la rupture du sol).

2. Recommandation

Ce travail présente une étude comparative des essais expérimentaux et étude par éléments finis du comportement thermomécanique des sols renforcés par une nappe de géogrid. Il a été prouvé par différents chercheurs que la performance d'un sol renforcé est influencée par de nombreux facteurs. En raison du temps limité, cette étude n'a pas pu toucher tous ces facteurs. La recherche recommandée pourrait viser ce qui suit :

- La réalisation d'essais de sollicitation thermomécanique nécessite un équipement expérimental pouvant maîtriser les variations thermiques, (l'appareille de triaxial à haute températures) Dans cette optique, on pense à refaire les essais précédant avec cette appareille ;
- Choisir un autre model de simulation numérique avec Plaxis (mécanisme thermoplastique).

De façon à prendre en considération le domaine plastique, avec la rupture.

- Utilisé d'autres code élément fini qui permet d'étudier et de simuler des essais de cisaillement à haute température (le code éléments finis Z-Soil).

Références Bibliographiques.

Références Bibliographiques

- Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T. & Chaiprakaikeow, S.** (2006). Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process. *Geotextiles and Geomembranes* **24**, 359–370.
- Abuel-Naga, H. M., Bergado, D. T. & Ramana, G. V., Grino, L., Rujvipat, P. & Thiet, Y.**(2006). Experimental evaluation of engineering behavior of soft Bangkok clay under elevated temperature. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **132**, No. 7, 902-910.
- Allen, T., Vinson, T. S. and Bell, J. R.**, “Tensile Strength and Creep Behavior of Geotextiles in Cold Regions Applications,” *Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, NV, 1982, 775-780. Wrigley, N. E., “Durability and Long-Term Performance of Tensar Polymer Grids for Soil reinforcement,” *Material Science Technology*, 1987, 161-170.
- Andrawes, K.Z., McGown, A. and Murray, R.T.**, 1986, “The Load-Strain-Time-Temperature Behaviour of Geotextiles and Geogrids”, *Proceedings of the Third International Conference on Geotextiles*, Vol. 3, Vienna, Austria, April 1986, pp. 707-712.
- Anh-Minh TANG**, 2005, «Effet de la température sur le comportement des barrières de confinement» thèse pour obtenir le grade Docteur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées paris.201 pages.
- Anreas Elsing et Sven Schröer**, 2000 “prevention of reflective cracking - the successful use of polyester asphalt reinforcement grids” Civil Engineer, Huesker Synthetic GmbH, Germany 9pages.
- ARAB Rabah , ZERMANI Messaoud, TABTI Saïd** « CONTRIBUTIONS DES GEOSYNTHETIQUES DANS LE TRAITEMENT DES GLISSEMENT DE TERRAIN » Premier Symposium Méditerranéen de Géoengineering «SMGE09» Alger 20 et 21 juin 2009.
- Arab R,Messaoud Zermani , Mohamed Guagui** « La liaison M'Sila - Boussaada en traversant le Chott El Hodna – Algérie Construction d'une route sur un sol de mauvaise portance par la technique des géosynthétiques » Colloque International Sols Non Saturés et Environnement « UNSATlemcen09 » Tlemcen, 27 et 28 Octobre 2009.
- B. Thesseling et A. Elsing**, 2000 Pavement rehabilitation by using an asphalt reinforcement grid made of high modulus Polyester Huesker Synthetic GmbH, Gescher, Germany 22 pages.
- Bathurst, R.J.** (2007) “Geosynthetics Classification”.IGS Leaflets on Geosynthetics Applications, IGS Education Committee, disponible au site, www.geosyntheticssociety.org.
- BAZIZ F**(2012) « Comportement d'une fondation superficielle située sur la crête d'un talus de sable renforcé par géogrilles » Thèse de Magister en génie civil de l'Université de Batna.

Références Bibliographiques.

- Bedr S.** 2008. Modélisation et interaction renforcement sol pour les talus instables Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme Magistère en génie civil. TLEMSEN: Université A. Belkaid, 100 page.
- Boudali, M., Leroueil, S. & Sinivas Murthy B. R ;** (1994). Viscous behaviour of natural clays. *Proceedings of the 13th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, 411-416.
- Boussaid 2005**, « sol intermédiaire pour modalisation physique application au fondation superficielle » thèse de doctorat école national de Nantes 286 pages.
- Burghignoli, A., Desideri, A. & Miliziano, S.** (2000) A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils. *Canadian Geotechnical Journal* **37**,764–780.
- Campanella, R. G., & Mitchell, J. K.** (1968). Influence of temperature variations on soil behaviour. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers* **94**, No. SM3, 709-7342
- CCR**, (1999), Les catastrophes naturelles en France, plaquette, 22 pages.
- Cui, Y. J., Sultan, N. & Delage, P.** (2000). A thermomechanical model for saturated clays *Canadian Geotechnical Journal* **37**, 607–620.
- Cekerevac, C., & Laloui, L.** (2004). Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* **28**, 209–228.
- De Bruyn, D. & Thimus, J. -F.** (1996). The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay : the results of an initial laboratory programme. *Engineering Geology* **41**, 117-126.
- Del Olmo, C., Fioravante, V., Gera, F., Hueckel, T., Mayor, J. C. & Pellegrini., R.** (1996). Thermomechanical properties of deep argillaceous formations. *Engineering Geology* **41**, 87-101.
- Durville J.L., Sève G.,** (1996). Stabilité des pentes, glissements en terrain meuble. *Techniques de l'Ingénieur*, 17 p.
- Erikson, L. G.** (1989). Temperature effects on consolidation properties of sulphide clays. *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 2087-2090
- Gasc-Barbier, M., Chanchole, S. & Bérest, P.** (2004). Creep behaviour of Bure clayey rock. *Applied Clay Science* **26**. 449-458
- Guiton M.** (1998) Ruissellement et risque majeur, Phénomènes, exemples et gestion spatiale des crues, Etudes et recherches des LPC Série Environnement et Génie Urbain EG13, 315 pages.

Références Bibliographiques.

- Gourc, J.P., Ratel, A., and Delmas, Ph.**, 1986, "Designe of fabric retaining walls The Displacement Methode" *proceeding of the Third International Conference on es.* Vol.2, Vienne Austria. April 1986, pp.289-294.
- Graham, J., Tanaka, N., Crilly, T. & Alfaro., M.** (2001). Modified Cam-Clay modelling of temperature effects in clays. *Canadian Geotechnical Journal* **38**, 608–621.
- Hueckel, T. & Baldi, G.** (1990). Thermoplasticity of saturated clays: experimental constitutive study. *Journal of Geotechnical Engineering* **116**, No. 12, 1778-1796.
- Hueckel, T. & Pellegrini, R.** (1989). Modelling of thermal failure of saturated clays. International symposium on numerical models in geomechanics - NUMOG, Pietruszczak, L. S., Pande, G. N. (eds), 81-90.
- Ingold, T.S.**, 1982. Some observations on the laboratory measurement of soil geotextile bond. *Geotechnical Testing Journal* 5 (3), 57–67.
- Laloui, L., Cekerevac, C. & Vulliet, L.**, 2001 «Thermomechanical modelling of the behaviour of MC clay», Proceedings of the 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, ed. C. S. Desai, I: 829-835
- Lamara Samia** (2001), Etude numérique d'une fondation circulaire reposant sur un sable renforcé par géogrilles, Projet pour l'obtention du diplôme Magistère en génie civil. Université Hadj Lakhdar – Batna ,2011.
- LE Trung Tinh** 2008 « Comportement thermo-hydro-mécanique de l'argile de Boom » THESE Pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées paris 226 pages.
- Lirigm**; 1996, « Amélioration de la connaissance des caractéristiques géotechniques des sols grossiers » Département équipements pour l'eau et l'environnement Division Erosion Torrentielle Neige Avalanches 28 pages.
- Magnan J.P.** (1994) Methods to reduce the settlement of embankments on soft clay: a review. *Specialty Conference on the Foundations and Embankments Deformations, ASCE, (Geotechnical Special Publication n° 40), 77-90.*
- Montestruque, G.; Rodrigues, R.; Nods, M.; Elsing, A.** 2004. Stopping of reflective crack propagation with the use of PET geogrid as asphalt overlay reinforcement, Proceedings of the Fifth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements.
- Moritz, L.** (1995). Geotechnical properties of clay at elevated temperature. *Report of Swedish Geotechnical Institute* **47**, Linköping.

Références Bibliographiques.

- Nouri S, Lamri B, Et Nechnech A.**, « Etude expérimentale et modélisation numérique du comportement du sable renforcé par géosynthétiques » Rencontres Universitaires de Génie Civil Tlemcen ,558-559 Mai 2011, p 553-562.
- Pilot, G. 1991.** Mécanique des sols, symbole, unités et définitions. PARIS : Technique de l'ingénieur, 1991. C 201.
- Paaswell R. E.** (1967). Temperature effects on clay soil consolidation. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 93, No. SM3, 9-22.
- Paillier C** 2007 Cours géotechnique et mécanique des sols « essai de cisaillement sur un sol pulvérulent » Norme NF P 94-071-1, IUT St Pierre –Département Génie civil.
- Paulson J. N. 1987** "Geosynthetic material and physical properties relevant to soil reinforcement applications", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 6 no 3, pp. 221-223.
- Rabah Arab.**, 2009.Murs de soutènement et talus renforcés par des inclusions souples. Article p1-86.
- Saix, C.** 1991. Consolidation thermique par chaleur d'un sol non saturé. *Canadian Geotechnical Journal*, 28 : 42-50.
- Saix C.** Contribution à l'étude des sols non saturés en température : Application à l'exploitation thermique du sous-sol, Thèse de Doctorat d'État de l'Université Montpellier II, Montpellier, 1987.
- Salomone, L.A. et Kovacs, W.D.** (1984). Thermal resistivity of soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110, No. 3, 375–389.
- Sultan, N., Delage, P. & Cui, Y.J.** (2002). Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay. *Engineering Geology* **64**, 135–145
- Tanaka N., Graham, J. & Crilly, J.** (1997). Stress-strain behaviour of reconstituted illitic clayat different temperatures. *Engineering Geology* **47**, 339 -350.
- Tanay Karademir**,2001« Elevated temperature effects on interface shear behavior » In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology, 592 pages.
- Tidfors, M. & Sällfors, G.** (1989). Temperature effect on preconsolidation pressure. *Geotechnical Testing Journal* **12**, No. 1, 93-97.
- Zhang, C.-L., Rothfuchs, T., Su, K. & Hoteit, N.** (2007). Experimental study of the thermohydro-mechanical behaviour of indurated clays. *Physics and Chemistry of the Earth* **32**, 957-965.

Annexe 1

Tableau des résultats de modélisation de la boîte de cisaillement avec PLAXIS V

Etat	T [°]	18		18		18		18		18		30		30		30		30											
		Dence	Lache	Dence	Lache	Dence	Lache	Dence	Lache	Dence	Lache	Dence	Lache	Dence	Lache	Dence	Lache	Dence	Lache										
Compacité	w [°]	0	3	5	7	0	3	5	7	0	3	5	7	0	3	5	7	0	3	5	7								
		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03							
Traction géogrille [kN/mm]	Modèle	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC							
		1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08	1.65E-08						
Sol	Ysat [kN/mm ³]	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08	1.70E-08						
		7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06	7.00E-06						
Sol	E [kN/mm ²]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3						
		8.71E-06	8.71E-06	4.00E-06	4.08E-06	6.11E-06	2.24E-06	2.28E-06	8.39E-06	1.07E-05	4.80E-06	4.51E-06	0.00E+00	3.30E-06	5.07E-06	4.21E-06	2.18E-06	0.00E+00											
Sol	c [kN/mm ²]	4.47	5.61	5.37	4.96	5.34	6.05	6.84	6.84	4.97	4.46	4.98	7.96	5.99	4.34	4.71	5.58	0	0	0	0	0	0	0					
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Sol	φ [°]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
		ψ = φ - 30 [°]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Sans renforcement	Effort normale [kN/mm ²]	Déplacements [mm]	-	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00					
			7.00	1.01E-04	8.10E-05	8.79E-05	9.49E-05	9.49E-05	7.69E-05	7.69E-05	1.01E-04	1.04E-04	9.09E-05	8.99E-05	7.18E-05	8.42E-05	9.17E-05	8.89E-05	7.59E-05	0.00E+00									
			14.00	1.44E-04	1.06E-04	1.17E-04	1.18E-04	1.32E-04	9.66E-05	9.78E-05	1.44E-04	1.52E-04	1.24E-04	1.22E-04	1.14E-04	1.11E-04	1.25E-04	1.19E-04	1.19E-04	0.00E+00									
			-	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			
			7.00	1.05E-04	1.05E-04	9.07E-05	9.89E-05	9.89E-05	7.69E-05	7.78E-05	1.05E-04	1.09E-04	9.49E-05	9.32E-05	9.37E-05	8.69E-05	9.59E-05	9.17E-05	9.17E-05	7.61E-05	0.00E+00								
			14.00	1.43E-04	1.43E-04	1.17E-04	1.18E-04	1.31E-04	9.62E-05	9.74E-05	1.44E-04	1.51E-04	1.24E-04	1.22E-04	1.15E-04	1.11E-04	1.25E-04	1.19E-04	1.19E-04	0.00E+00									
			-	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			
			7.00	1.07E-04	1.07E-04	9.12E-05	9.16E-05	1.01E-04	7.45E-05	7.59E-05	1.07E-04	1.11E-04	9.55E-05	9.48E-05	8.18E-05	8.64E-05	9.67E-05	9.24E-05	9.24E-05	7.42E-05	0.00E+00								
			14.00	1.43E-04	1.43E-04	1.17E-04	1.17E-04	1.31E-04	9.54E-05	9.68E-05	1.44E-04	1.51E-04	1.24E-04	1.22E-04	1.21E-04	1.11E-04	1.25E-04	1.19E-04	1.19E-04	0.00E+00									
			Avec renforcement	Effort normale [kN/mm ²]	Déplacements [mm]	-	0.00E+00																						
						7.00	9.28E-05	7.37E-05	7.95E-05	7.99E-05	8.71E-05	6.99E-05	6.99E-05	9.30E-05	9.62E-05	8.32E-05	8.21E-05	9.53E-05	7.63E-05	8.40E-05	8.04E-05	6.87E-05	0.00E+00						
						14.00	1.45E-04	1.05E-04	1.18E-04	1.18E-04	1.33E-04	9.56E-05	9.69E-05	1.46E-04	1.53E-04	1.24E-04	1.23E-04	1.35E-04	1.11E-04	1.26E-04	1.20E-04	1.20E-04	0.00E+00						
-	0.00E+00	0.00E+00				0.00E+00																							
7.00	9.77E-05	7.73E-05				8.41E-05	8.44E-05	9.20E-05	7.19E-05	7.27E-05	9.79E-05	1.01E-04	8.78E-05	8.66E-05	8.69E-05	8.05E-05	8.89E-05	8.50E-05	8.50E-05	7.11E-05	0.00E+00								
14.00	1.44E-04	1.04E-04				1.17E-04	1.18E-04	1.32E-04	9.40E-05	9.55E-05	1.45E-04	1.53E-04	1.24E-04	1.22E-04	1.17E-04	1.11E-04	1.25E-04	1.19E-04	1.19E-04	0.00E+00									
-	0.00E+00	0.00E+00				0.00E+00																							
7.00	1.00E-04	7.83E-05				8.59E-05	8.62E-05	9.44E-05	7.22E-05	7.34E-05	1.00E-04	1.04E-04	8.99E-05	8.86E-05	7.41E-05	8.19E-05	9.10E-05	8.68E-05	7.14E-05	0.00E+00									
14.00	1.44E-04	1.02E-04				1.16E-04	1.17E-04	1.32E-04	9.13E-05	9.29E-05	1.45E-04	1.52E-04	1.23E-04	1.21E-04	1.22E-04	1.10E-04	1.25E-04	1.19E-04	1.19E-04	0.00E+00									

Annexe 2

Essai de Cisaillement Température Ambiante : 17°, 18°, Et 19°

ESSAI DE CISAILLEMENT TEMPERATURE AMBIENTE : 17°, 18°, et 19°

Sol à sec sans renforcement

I/1 Sol dense sans renforcement

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau		H	Taneau		H	Taneau	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	18	-7	25	17	16	25	21	22
50	25	-15	50	25	35	50	32	39
75	28	-21	75	31	57	75	39	62
100	29	-26	100	36	61	100	45	85
150	29	-29	150	42	79	150	54	95
200	27	-35	200	43	91	200	57	74
250	26	-49	250	42	82	250	56	45
300	25	-54	300	41	61	300	52	25
350	23	-63	350	37	49	350	49	-15
400	23	-78	400	34	31	400	47	-25
450	22	-86	450	32	25	450	46	-48
500	22	-94	500	31	0	500	45	-57
600	22	-115	600	31	-24	600	44	-71
700	22	-131	700	31	-39	700	43	-84
800	23	-146	800	31	-46	800	43	-98
900	26	-148	900	31	-59	900	44	-116
1000	27	-152	1000	34	-67	1000	44	-122
1100	27	-152	1100	33	-74	1100	43	-131
1200	27	-152	1200	34	-74	1200	43	-131
1300	27	-152	1300	34	-74	1300	43	-131
1400	27	-152	1400	36	-74	1400	39	-131

Annexe.

100kpa				200kpa			300kpa		
	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		ζ	Acorrigé	ζ
0	36	0	0	36	0	0		36	0
0,0371	35,85	10,348675	0,0351	35,85	9,79079498	0,0433		35,85	12,0781032
0,0516	35,7	14,4537815	0,0516	35,7	14,4537815	0,0661		35,7	18,5154062
0,0578	35,55	16,2587904	0,064	35,55	18,0028129	0,0805		35,55	22,6441632
0,0599	35,4	16,920904	0,0743	35,4	20,9887006	0,0929		35,4	26,2429379
0,0599	35,1	17,0655271	0,0867	35,1	24,7008547	0,1115		35,1	31,7663818
0,0557	34,8	16,0057471	0,0888	34,8	25,5172414	0,1177	33,8218391	34,8	33,8218391
0,0537	34,5	15,5652174	0,0867	34,5	25,1304348	0,1157	0,1157	34,5	33,5362319
0,0516	34,2	15,0877193	0,0847	34,2	24,7660819	0,1074	0,1074	34,2	31,4035088
0,0475	33,9	14,0117994	0,0764	33,9	22,5368732	0,1012	0	33,9	29,8525074
0,0475	33,6	14,1369048	0,0702	33,6	20,8928571	0,0971	0	33,6	28,8988095
0,0454	33,3	13,6336336	0,0661	33,3	19,8498498	0,095	0	33,3	28,5285285
0,0454	33	13,7575758	0,064	33	19,3939394	0,0929	0	33	28,1515152
0,0454	32,4	14,0123457	0,064	32,4	19,7530864	0,0909	0	32,4	28,0555556
0,0454	31,8	14,2767296	0,064	31,8	20,1257862	0,0888	0	31,8	27,9245283
0,0475	31,2	15,224359	0,064	31,2	20,5128205	0,0888	0	31,2	28,4615385
0,0537	30,6	17,5490196	0,064	30,6	20,9150327	0,0909	0	30,6	29,7058824
0,0557	30	18,5666667	0,0702	30	23,4	0,0909	0	30	30,3
0,0557	29,4	18,9455782	0,0681	29,4	23,1632653	0,0888	0	29,4	30,2040816
0,0557	28,8	19,3402778	0,0702	28,8	24,375	0,0888	0	28,8	30,8333333
0,0557	28,2	19,751773	0,0702	28,2	24,893617	0,0888	0	28,2	31,4893617
0,0557	27,6	20,1811594	0,0743	27,6	26,9202899	0,0805	0	27,6	29,1666667

ζ	σ
100	17,0655271
200	25,5172414
300	33,8218391

2 Sol lache sans renforcement								
100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	11	51	25	17	55	25	25	55
50	14	140	50	21	146	50	31	115
75	16	210	75	25	291	75	36	166
100	18	250	100	26	374	100	41	240
150	19	348	150	30	466	150	49	301
200	19	454	200	32	552	200	52	355
250	18	512	250	32	645	250	59	422
300	18	589	300	32	722	300	61	463
350	17	651	350	32	725	350	61	513
400	17	714	400	32	755	400	61	588
450	16	750	450	32	781	450	58	622
500	16	788	500	31	796	500	55	684
600	16	814	600	31	814	600	54	691
700	16	851	700	31	822	700	53	745
800	16	894	800	31	822	800	54	782
900	16	917	900	32	822	900	54	782
1000	16	917	1000	32	822	1000	54	782
1100	16	917	1100	31	822	1100	54	782
1200	16	917	1200	31	822	1200	54	782
1300	16	917	1300	31	822	1300	54	782
1400	16	917	1400	31	822	1400	54	782

Annexe.

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ
0	36	0	0	36	0	0	36	0
0,0227	35,85	6,33193863	0,0351	35,85	9,79079498	0,0516	35,85	14,3933054
0,0289	35,7	8,0952381	0,0433	35,7	12,1288515	0,064	35,7	17,9271709
0,033	35,55	9,28270042	0,0516	35,55	14,5147679	0,0743	35,55	20,9001406
0,0371	35,4	10,480226	0,0537	35,4	15,1694915	0,0847	35,4	23,9265537
0,0392	35,1	11,1680912	0,0619	35,1	17,6353276	0,1012	35,1	28,8319088
0,0392	34,8	11,2643678	0,0661	34,8	18,9942529	0,1074	34,8	30,862069
0,0371	34,5	10,7536232	0,0661	34,5	19,1594203	0,1219	34,5	35,3333333
0,0371	34,2	10,8479532	0,0661	34,2	19,3274854	0,126	34,2	36,8421053
0,0351	33,9	10,3539823	0,0661	33,9	19,4985251	0,126	33,9	37,1681416
0,0351	33,6	10,4464286	0,0661	33,6	19,672619	0,126	33,6	37,5
0,033	33,3	9,90990991	0,0661	33,3	19,8498498	0,1198	33,3	35,975976
0,033	33	10	0,064	33	19,3939394	0,1136	33	34,4242424
0,033	32,4	10,1851852	0,064	32,4	19,7530864	0,1115	32,4	34,4135802
0,033	31,8	10,3773585	0,064	31,8	20,1257862	0,1095	31,8	34,4339623
0,033	31,2	10,5769231	0,064	31,2	20,5128205	0,1115	31,2	35,7371795
0,033	30,6	10,7843137	0,0661	30,6	21,6013072	0,1115	30,6	36,4379085
0,033	30	11	0,0661	30	22,0333333	0,1115	30	37,1666667
0,033	29,4	11,2244898	0,064	29,4	21,7687075	0,1115	29,4	37,9251701
0,033	28,8	11,4583333	0,064	28,8	22,2222222	0,1115	28,8	38,7152778
0,033	28,2	11,7021277	0,064	28,2	22,6950355	0,1115	28,2	39,5390071
0,033	27,6	11,9565217	0,064	27,6	23,1884058	0,1115	27,6	40,3985507

ζ	σ
100	11,2643678
200	19,8498498
300	37,5

sol a sec avec renforcement

3 Sol dense avec renforcement par geosyntheticque

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	10	-11	25	10	25	25	28	25
50	13	-18	50	15	46	50	32	29
75	14	-22	75	18	65	75	39	34
100	16	-28	100	19	74	100	42	32
150	17	-38	150	20	87	150	48	21
200	18	-45	200	21	98	200	50	15
250	20	-46	250	23	75	250	55	-9
300	21	-47	300	24	68	300	58	-25
350	22	-55	350	25	51	350	60	-32
400	23	-64	400	26	43	400	61	-48
450	23	-74	450	28	30	450	59	-55
500	23	-76	500	31	0	500	54	-71
600	24	-85	600	32	-22	600	54	-82
700	25	-115	700	33	-37	700	52	-110
800	26	-116	800	35	-49	800	52	-125
900	27	-116	900	38	-52	900	50	-126
1000	29	-116	1000	40	-68	1000	48	-128
1100	29	-116	1100	41	-68	1100	48	-129
1200	29	-116	1200	42	-68	1200	48	-129
1300	29	-116	1300	39	-68	1300	48	-129
1400	29	-116	1400	38	-68	1400	48	-129

Annexe.

	Acorrige	ζ		Acorrige	ζ		Acorrige	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0206	35,85	5,74616457	0,0206	35,85	5,74616457	0,0578	35,85	16,1227336
0,0268	35,7	7,5070028	0,0309	35,7	8,65546218	0,0661	35,7	18,5154062
0,0289	35,55	8,12939522	0,0371	35,55	10,4360056	0,0805	35,55	22,6441632
0,033	35,4	9,3220339	0,0392	35,4	11,0734463	0,0867	35,4	24,4915254
0,0351	35,1	10	0,0413	35,1	11,7663818	0,0991	35,1	28,2336182
0,0371	34,8	10,6609195	0,0433	34,8	12,4425287	0,1033	34,8	0
0,0413	34,5	11,9710145	0,0475	34,5	13,7681159	0	0,1136	34,5
0,0433	34,2	12,6608187	0,0495	34,2	14,4736842	0	0,1198	34,2
0,0454	33,9	13,3923304	0,0516	33,9	15,2212389	0	0,1239	33,9
0,0475	33,6	14,1369048	0,0537	33,6	15,9821429	0	0,126	33,6
0,0475	33,3	14,2642643	0,0578	33,3	17,3573574	0	0,1219	33,3
0,0475	33	14,3939394	0,064	33	19,3939394	0	0,1115	33
0,0495	32,4	15,2777778	0,0661	32,4	20,4012346	0	0,1115	32,4
0,0516	31,8	16,2264151	0,0681	31,8	21,4150943	0	0,1074	31,8
0,0537	31,2	17,2115385	0,0723	31,2	23,1730769	0	0,1074	31,2
0,0557	30,6	18,2026144	0,0785	30,6	25,6535948	0,1033		30,6
0,0599	30	19,9666667	0,0826	30	27,5333333	0,0991		30
0,0599	29,4	20,3741497	0,0847	29,4	28,8095238	0,0991		29,4
0,0599	28,8	20,7986111	0,0867	28,8	30,1041667	0,0991		28,8
0,0599	28,2	21,2411348	0,0805	28,2	28,5460993	0,0991		28,2
0,0599	27,6	21,7028986	0,0785	27,6	28,442029	0,0991		27,6

ζ	σ
100	21,7028986
200	30,1041667
300	37,5

3 Sol lache avec renforcement par
geosynthetique

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	7	0	25	11	-25	25	14	-48
50	8	1	50	13	-35	50	16	-75
75	9	0	75	14	-42	75	18	-98
100	10	-4	100	15	-51	100	20	-110
150	11	-10	150	16	-68	150	23	-130
200	12	-15	200	17	-78	200	24	-135
250	12	-15	250	18	-89	250	26	-140
300	12	-26	300	19	-91	300	27	-145
350	13	-29	350	20	-97	350	28	-151
400	15	-35	400	22	-107	400	30	-155
450	15	-55	450	23	-110	450	32	-156
500	15	-57	500	24	-117	500	33	-160
600	15	-57	600	26	-121	600	34	-166
700	18	-56	700	27	-121	700	35	-160
800	18	-50	800	30	-121	800	39	-152
900	17	-44	900	32	-121	900	41	-154
1000	17	-35	1000	35	-120	1000	43	-141
1100	17	-35	1100	36	-109	1100	44	-141
1200	19	-35	1200	36	-100	1200	45	-141
1300	20	-35	1300	35	-100	1300	45	-141
1400	20	-35	1400	35	-95	1400	45	-141

ζ	σ
14,9637681	100
25,7986111	200
33,6594203	300

sans renforcement avec variation de la teneur en eau w

II / 1 Sol dense sans renforcement avec une teneur en eau de

3%

H	Taneau	100 kpa			200kpa			300kpa	
		V	H	Taneau	V	H	Taneau	V	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25	13	0	25	22	-32	25	24	0	
50	17	0	50	27	-38	50	32	-95	
75	19	0	75	28	-42	75	37	-114	
100	20	-5	100	29	-55	100	41	-122	
150	22	-10	150	33	-64	150	46	-135	
200	23	-18	200	35	-71	200	50	-140	
250	23	-22	250	36	-87	250	52	-145	
300	23	-25	300	36	-97	300	53	-150	
350	23	-29	350	35	-98	350	53	-150	
400	22	-35	400	34	-105	400	53	-150	
450	21	-40	450	34	-112	450	53	-150	
500	20	-58	500	33	-122	500	51	-150	
600	20	-60	600	33	-125	600	50	-150	
700	20	-51	700	33	-125	700	47	-150	
800	20	-45	800	33	-125	800	46	-150	
900	20	-35	900	33	-125	900	46	-150	
1000	19	-25	1000	33	-118	1000	46	-145	
1100	19	-15	1100	33	-108	1100	46	-135	
1200	19	-15	1200	33	-100	1200	46	-122	
1300	19	-15	1300	33	-95	1300	46	-122	
1400	19	-15	1400	33	-80	1400	46	-122	

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ
0	36	0		36	0	0	36	0
0,0268	35,85	7,47559275	0,0454	35,85	12,6638773	0,0495	35,85	13,8075314
0,0351	35,7	9,83193277	0,0557	35,7	15,6022409	0,0661	35,7	18,5154062
0,0392	35,55	11,0267229	0,0599	35,55	16,8495077	0,0764	35,55	21,4908579
0,0413	35,4	11,6666667	0,0599	35,4	16,920904	0,0847	35,4	23,9265537
0,0454	35,1	12,9344729	0,0681	35,1	19,4017094	0,095	35,1	27,0655271
0,0475	34,8	13,6494253	0,0723	34,8	20,7758621	0,1033	34,8	29,683908
0,0475	34,5	13,7681159	0,0743	34,5	21,5362319	0,1074	34,5	31,1304348
0,0475	34,2	13,8888889	0,0743	34,2	21,7251462	0,1095	34,2	32,0175439
0,0475	33,9	14,0117994	0,0723	33,9	21,3274336	0,1095	33,9	32,300885
0,0454	33,6	13,5119048	0,0702	33,6	20,8928571	0,1095	33,6	32,5892857
0,0433	33,3	13,003003	0,0702	33,3	21,0810811	0,1095	33,3	32,8828829
0,0413	33	12,5151515	0,0681	33	20,6363636	0,1053	33	31,9090909
0,0413	32,4	12,7469136	0,0681	32,4	21,0185185	0,1033	32,4	31,882716
0,0413	31,8	12,9874214	0,0681	31,8	21,4150943	0,0971	31,8	30,5345912
0,0413	31,2	13,2371795	0,0681	31,2	21,8269231	0,095	31,2	30,4487179
0,0413	30,6	13,496732	0,0681	30,6	22,254902	0,095	30,6	31,0457516
0,0392	30	13,0666667	0,0681	30	22,7	0,095	30	31,6666667
0,0392	29,4	13,3333333	0,0681	29,4	23,1632653	0,095	29,4	32,3129252
0,0392	28,8	13,6111111	0,0681	28,8	23,6458333	0,095	28,8	32,9861111
0,0392	28,2	13,9007092	0,0681	28,2	24,1489362	0,095	28,2	33,6879433
0,0392	27,6	14,2028986	0,0681	27,6	24,673913	0,095	27,6	34,4202899

ζ	σ
14,0117994	100
21,7251462	200
32,8828829	300

II / 2 Sol dense sans renforcement avec une teneur en eau de 5%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	15	-26	25	18	20	25	25	19
50	18	-30	50	24	26	50	31	27
75	19	-68	75	28	27	75	35	48
100	19	-80	100	30	28	100	37	58
150	20	-95	150	34	28	150	41	58
200	20	-110	200	34	28	200	43	82
250	20	-115	250	35	28	250	45	93
300	20	-126	300	35	10	300	47	94
350	20	-140	350	35	5	350	47	94
400	20	-165	400	35	1	400	49	79
450	20	-190	450	34	1	450	48	63
500	20	-220	500	34	-10	500	48	51
600	20	-250	600	34	-15	600	46	35
700	19	269	700	34	-20	700	45	21
800	19	-310	800	34	-21	800	45	6
900	19	-318	900	33	-26	900	45	-2
1000	19	-328	1000	33	-26	1000	45	-6
1100	19	-339	1100	33	-26	1100	45	-7
1200	19	-359	1200	33	-26	1200	45	9
1300	19	-366	1300	33	-18	1300	45	-12
1400	19	-375	1400	33	-18	1400	45	-12

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		ζ	Acorrigé
0	36	0		36	0		0	36
0,0309	35,85	8,61924686	0,0371	35,85	10,348675	0,0516	14,3933054	35,85
0,0371	35,7	10,3921569	0,0495	35,7	13,8655462	0,064	17,9271709	35,7
0,0392	35,55	11,0267229	0,0599	35,55	16,8495077	0,0723	20,3375527	35,55
0,0392	35,4	11,0734463	0,0619	35,4	17,4858757	0,0764	21,5819209	35,4
0,0413	35,1	11,7663818	0,0702	35,1	20	0,0847	24,1310541	35,1
0,0413	34,8	11,8678161	0,0702	34,8	20,1724138	0,0888	25,5172414	34,8
0,0413	34,5	11,9710145	0,0723	34,5	20,9565217	0,0929	26,9275362	34,5
0,0413	34,2	12,0760234	0,0723	34,2	21,1403509	0,0971	28,3918129	34,2
0,0413	33,9	12,1828909	0,0723	33,9	21,3274336	0,0971	28,6430678	33,9
0,0413	33,6	12,2916667	0,0723	33,6	21,5178571	0,1012	30,1190476	33,6
0,0413	33,3	12,4024024	0,0702	33,3	21,0810811	0,0991	29,7597598	33,3
0,0413	33	12,5151515	0,0702	33	21,2727273	0,0991	30,030303	33
0,0413	32,4	12,7469136	0,0702	32,4	21,6666667	0,095	29,3209877	32,4
0,0392	31,8	12,327044	0,0702	31,8	22,0754717	0,0929	29,2138365	31,8
0,0392	31,2	12,5641026	0,0702	31,2	22,5	0,0929	29,775641	31,2
0,0392	30,6	12,8104575	0,0681	30,6	22,254902	0,0929	30,3594771	30,6
0,0392	30	13,0666667	0,0681	30	22,7	0,0929	30,9666667	30
0,0392	29,4	13,3333333	0,0681	29,4	23,1632653	0,0929	31,5986395	29,4
0,0392	28,8	13,6111111	0,0681	28,8	23,6458333	0,0929	32,2569444	28,8
0,0392	28,2	13,9007092	0,0681	28,2	24,1489362	0,0929	32,9432624	28,2
0,0392	27,6	14,2028986	0,0681	27,6	24,673913	0,0929	33,6594203	27,6

ζ	σ
12,7469136	100
21,5178571	200
30,1190476	300

II / 3 Sol dense sans renforcement avec une teneur en eau de 7%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0		0	0		0	0	
25	12		25	21		25	25	
50	18		50	25		50	30	
75	20		75	28		75	34	
100	22		100	29		100	36	
150	23		150	30		150	39	
200	23		200	31		200	40	
250	23		250	31		250	41	
300	23		300	33		300	42	
350	23		350	32		350	43	
400	22		400	32		400	44	
450	22		450	32		450	45	
500	21		500	32		500	45	
600	21		600	32		600	46	
700	21		700	32		700	46	
800	21		800	32		800	46	
900	21		900	32		900	46	
1000	21		1000	32		1000	46	
1100	21		1100	32		1100	46	
1200	21		1200	32		1200	46	
1300	21		1300	32		1300	46	
1400	21		1400	32		1400	45	

Annexe.

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		ζ	Acorrigé
0	36	0		36	0		0	36
0,0247	35,85	6,88981869	0,0433	35,85	12,0781032	0,0516	14,3933054	35,85
0,0371	35,7	10,3921569	0,0516	35,7	14,4537815	0,0619	17,3389356	35,7
0,0413	35,55	11,6174402	0,0599	35,55	16,8495077	0,0702	19,7468354	35,55
0,0454	35,4	12,8248588	0,0599	35,4	16,920904	0,0743	20,9887006	35,4
0,0475	35,1	13,5327635	0,0619	35,1	17,6353276	0,0805	22,9344729	35,1
0,0475	34,8	13,6494253	0,064	34,8	18,3908046	0,0826	23,7356322	34,8
0,0475	34,5	13,7681159	0,064	34,5	18,5507246	0,0847	24,5507246	34,5
0,0475	34,2	13,8888889	0,0681	34,2	19,9122807	0,0867	25,3508772	34,2
0,0475	33,9	14,0117994	0,0661	33,9	19,4985251	0,0888	26,1946903	33,9
0,0454	33,6	13,5119048	0,0661	33,6	19,672619	0,0909	27,0535714	33,6
0,0454	33,3	13,6336336	0,0661	33,3	19,8498498	0,0929	27,8978979	33,3
0,0433	33	13,1212121	0,0661	33	20,030303	0,0929	28,1515152	33
0,0433	32,4	13,3641975	0,0661	32,4	20,4012346	0,095	29,3209877	32,4
0,0433	31,8	13,6163522	0,0661	31,8	20,7861635	0,095	29,8742138	31,8
0,0433	31,2	13,8782051	0,0661	31,2	21,1858974	0,095	30,4487179	31,2
0,0433	30,6	14,1503268	0,0661	30,6	21,6013072	0,095	31,0457516	30,6
0,0433	30	14,4333333	0,0661	30	22,0333333	0,095	31,6666667	30
0,0433	29,4	14,7278912	0,0661	29,4	22,4829932	0,095	32,3129252	29,4
0,0433	28,8	15,0347222	0,0661	28,8	22,9513889	0,095	32,9861111	28,8
0,0433	28,2	15,3546099	0,0661	28,2	23,4397163	0,095	33,6879433	28,2
0,0433	27,6	15,6884058	0,0661	27,6	23,9492754	0,0929	33,6594203	27,6

ζ	σ
14,0117994	100
19,9122807	200
33,6879433	300

II / 4 Sol lache sans renforcement avec une teneur en eau de 3%

100 kpa		200kpa		300kpa	
H	Taneau	H	Taneau	H	Taneau
0	0	0	0	0	0
25	7	25	18	25	29
50	10	50	22	50	30
75	16	75	26	75	36
100	18	100	29	100	36
150	22	150	32	150	41
200	22	200	34	200	44
250	22	250	36	250	44
300	19	300	38	300	45
350	19	350	35	350	45
400	19	400	33	400	46
450	15	450	31	450	48
500	15	500	29	500	46
600	15	600	29	600	47
700	15	700	29	700	47
800	15	800	29	800	47
900	15	900	29	900	47
1000	15	1000	29	1000	47
1100	15	1100	29	1100	47
1200	15	1200	29	1200	47
1300	15	1300	29	1300	47
1400	15	1400	29	1400	46

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		ζ	Acorrigé
0	36	0		36	0		0	36
0,0144	35,85	4,0167364	0,0371	35,85	10,348675	0,0599	16,7085077	35,85
0,0206	35,7	5,77030812	0,0454	35,7	12,7170868	0,0619	17,3389356	35,7
0,033	35,55	9,28270042	0,0537	35,55	15,1054852	0,0743	20,9001406	35,55
0,0371	35,4	10,480226	0,0599	35,4	16,920904	0,0743	20,9887006	35,4
0,0454	35,1	12,9344729	0,0661	35,1	18,8319088	0,0847	24,1310541	35,1
0,0454	34,8	13,045977	0,0702	34,8	20,1724138	0,0909	26,1206897	34,8
0,0454	34,5	13,1594203	0,0743	34,5	21,5362319	0,0909	26,3478261	34,5
0,0392	34,2	11,4619883	0,0785	34,2	22,9532164	0,0929	27,1637427	34,2
0,0392	33,9	11,5634218	0,0723	33,9	21,3274336	0,0929	27,4041298	33,9
0,0392	33,6	11,6666667	0,0681	33,6	20,2678571	0,095	28,2738095	33,6
0,0309	33,3	9,27927928	0,064	33,3	19,2192192	0,0991	29,7597598	33,3
0,0309	33	9,36363636	0,0599	33	18,1515152	0,095	28,7878788	33
0,0309	32,4	9,53703704	0,0599	32,4	18,4876543	0,0971	29,9691358	32,4
0,0309	31,8	9,71698113	0,0599	31,8	18,836478	0,0971	30,5345912	31,8
0,0309	31,2	9,90384615	0,0599	31,2	19,1987179	0,0971	31,1217949	31,2
0,0309	30,6	10,0980392	0,0599	30,6	19,5751634	0,0971	31,7320261	30,6
0,0309	30	10,3	0,0599	30	19,9666667	0,0971	32,3666667	30
0,0309	29,4	10,5102041	0,0599	29,4	20,3741497	0,0971	33,0272109	29,4
0,0309	28,8	10,7291667	0,0599	28,8	20,7986111	0,0971	33,7152778	28,8
0,0309	28,2	10,9574468	0,0599	28,2	21,2411348	0,0971	34,4326241	28,2
0,0309	27,6	11,1956522	0,0599	27,6	21,7028986	0,095	34,4202899	27,6

ζ	σ
13,1594203	100
22,9532164	200
34,4326241	300

II / 5 Sol lache sans renforcement avec une teneur en eau de 5%

100 kpa		200kpa		300kpa	
H	Taneau	H	Taneau	H	Taneau
0	0	0	0	0	0
25	10	25	20	25	30
50	11	50	22	50	32
75	15	75	24	75	36
100	18	100	31	100	38
150	20	150	34	150	42
200	21	200	35	200	45
250	22	250	36	250	46
300	22	300	38	300	48
350	21	350	40	350	49
400	19	400	41	400	49
450	18	450	42	450	50
500	18	500	38	500	51
600	18	600	38	600	51
700	17	700	38	700	51
800	17	800	38	800	51
900	17	900	38	900	51
1000	17	1000	38	1000	51
1100	17	1100	38	1100	51
1200	17	1200	38	1200	51
1300	17	1300	38	1300	51
1400	17	1400	38	1400	46

Annexe.

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		ζ	Acorrigé
0	36	0		36	0		0	36
0,0206	35,85	5,74616457	0,0413	35,85	11,5202232	0,0619	17,2663877	35,85
0,0227	35,7	6,35854342	0,0454	35,7	12,7170868	0,0661	18,5154062	35,7
0,0309	35,55	8,69198312	0,0495	35,55	13,9240506	0,0743	20,9001406	35,55
0,0371	35,4	10,480226	0,064	35,4	18,079096	0,0785	22,1751412	35,4
0,0413	35,1	11,7663818	0,0702	35,1	20	0,0867	24,7008547	35,1
0,0433	34,8	12,4425287	0,0723	34,8	20,7758621	0,0929	26,6954023	34,8
0,0454	34,5	13,1594203	0,0743	34,5	21,5362319	0,095	27,5362319	34,5
0,0454	34,2	13,2748538	0,0785	34,2	22,9532164	0,0991	28,9766082	34,2
0,0433	33,9	12,7728614	0,0826	33,9	24,3657817	0,1012	29,8525074	33,9
0,0392	33,6	11,6666667	0,0847	33,6	25,2083333	0,1012	30,1190476	33,6
0,0371	33,3	11,1411411	0,0867	33,3	26,036036	0,1033	31,021021	33,3
0,0371	33	11,2424242	0,0785	33	23,7878788	0,1053	31,9090909	33
0,0371	32,4	11,4506173	0,0785	32,4	24,2283951	0,1053	32,5	32,4
0,0351	31,8	11,0377358	0,0785	31,8	24,6855346	0,1053	33,1132075	31,8
0,0351	31,2	11,25	0,0785	31,2	25,1602564	0,1053	33,75	31,2
0,0351	30,6	11,4705882	0,0785	30,6	25,6535948	0,1053	34,4117647	30,6
0,0351	30	11,7	0,0785	30	26,1666667	0,1053	35,1	30
0,0351	29,4	11,9387755	0,0785	29,4	26,7006803	0,1053	35,8163265	29,4
0,0351	28,8	12,1875	0,0785	28,8	27,2569444	0,1053	36,5625	28,8
0,0351	28,2	12,4468085	0,0785	28,2	27,8368794	0,1053	37,3404255	28,2
0,0351	27,6	12,7173913	0,0785	27,6	28,442029	0,095	34,4202899	27,6

ζ	σ
13,2748538	100
28,442029	200
37,3404255	300

II / 6 Sol lache sans renforcement avec une teneur en eau de 7%

100 kpa		200kpa		300kpa	
H	Taneau	H	Taneau	H	Taneau
0	0	0	0	0	0
25	15	25	25	25	31
50	16	50	26	50	33
75	18	75	27	75	34
100	20	100	28	100	35
150	22	150	29	150	38
200	23	200	31	200	41
250	23	250	31	250	42
300	25	300	32	300	45
350	26	350	35	350	48
400	27	400	40	400	49
450	26	450	41	450	50
500	25	500	42	500	49
600	25	600	43	600	48
700	23	700	39	700	48
800	21	800	39	800	48
900	20	900	39	900	48
1000	20	1000	39	1000	48
1100	20	1100	39	1100	48
1200	20	1200	39	1200	48
1300	20	1300	39	1300	48
1400	20	1400	39	1400	46

Annexe.

	Acorrige	ζ		Acorrige	ζ		ζ	Acorrige
0	36	0		36	0		0	36
0,0309	35,85	8,61924686	0,0516	35,85	14,3933054	0,064	17,8521618	35,85
0,033	35,7	9,24369748	0,0537	35,7	15,0420168	0,0681	19,0756303	35,7
0,0371	35,55	10,4360056	0,0557	35,55	15,6680731	0,0702	19,7468354	35,55
0,0413	35,4	11,6666667	0,0599	35,4	16,920904	0,0723	20,4237288	35,4
0,0454	35,1	12,9344729	0,0599	35,1	17,0655271	0,0785	22,3646724	35,1
0,0475	34,8	13,6494253	0,064	34,8	18,3908046	0,0847	24,3390805	34,8
0,0475	34,5	13,7681159	0,064	34,5	18,5507246	0,0867	25,1304348	34,5
0,0516	34,2	15,0877193	0,0661	34,2	19,3274854	0,0929	27,1637427	34,2
0,0537	33,9	15,840708	0,0723	33,9	21,3274336	0,0991	29,2330383	33,9
0,0557	33,6	16,577381	0,0826	33,6	24,5833333	0,1012	30,1190476	33,6
0,0537	33,3	16,1261261	0,0847	33,3	25,4354354	0,1033	31,021021	33,3
0,0516	33	15,6363636	0,0867	33	26,2727273	0,1012	30,6666667	33
0,0516	32,4	15,9259259	0,0888	32,4	27,4074074	0,0991	30,5864198	32,4
0,0475	31,8	14,9371069	0,0805	31,8	25,3144654	0,0991	31,163522	31,8
0,0433	31,2	13,8782051	0,0805	31,2	25,8012821	0,0991	31,7628205	31,2
0,0413	30,6	13,496732	0,0805	30,6	26,3071895	0,0991	32,3856209	30,6
0,0413	30	13,7666667	0,0805	30	26,8333333	0,0991	33,0333333	30
0,0413	29,4	14,047619	0,0805	29,4	27,3809524	0,0991	33,707483	29,4
0,0413	28,8	14,3402778	0,0805	28,8	27,9513889	0,0991	34,4097222	28,8
0,0413	28,2	14,6453901	0,0805	28,2	28,5460993	0,0991	35,141844	28,2
0,0413	27,6	14,9637681	0,0805	27,6	29,1666667	0,095	34,4202899	27,6

ζ	σ
16,577381	100
29,1666667	200
35,141844	300

avec renforcement avec variation de la teneur en eau w

II / 1 Sol dense avec renforcement avec geotextil et une teneur en eau de 3%

H	Taneau	100 kpa			200kpa			300kpa	
		V	H	Taneau	V	H	Taneau	V	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25	9	0	25	21	-6	25	12	-10	
50	10	7	50	25	-7	50	15	-15	
75	11	15	75	28	-7	75	18	-15	
100	12	35	100	28	-7	100	21	-15	
150	13	45	150	35	-7	150	23	-15	
200	14	69	200	36	9	200	25	-15	
250	14	92	250	37	22	250	27	-14	

Annexe.

300	15	110	300	37	35	300	28	-10
350	15	126	350	38	50	350	28	-9
400	15	125	400	39	67	400	30	-7
450	15	165	450	39	77	450	30	-1
500	16	180	500	39	90	500	31	3
600	16	198	600	39	115	600	32	8
700	17	215	700	39	133	700	32	10
800	18	300	800	39	148	800	32	10
900	19	333	900	39	160	900	32	10
1000	19	370	1000	40	167	1000	43	10
1100	19	380	1100	41	167	1100	43	10
1200	18	400	1200	39	189	1200	43	9
1300	18	420	1300	39	182	1300	43	9
1400	18	455	1400	37	184	1400	42	9

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		ζ	Acorrigé
0	36	0		36	0		0	36
0,0185	35,85	5,16039052	0,0433	35,85	12,0781032	0,0247	6,88981869	35,85
0,0206	35,7	5,77030812	0,0516	35,7	14,4537815	0,0309	8,65546218	35,7
0,0227	35,55	6,38537271	0,0599	35,55	16,8495077	0,0371	10,4360056	35,55
0,0247	35,4	6,97740113	0,0599	35,4	16,920904	0,0433	12,2316384	35,4
0,0268	35,1	7,63532764	0,0723	35,1	20,5982906	0,0475	13,5327635	35,1
0,0289	34,8	8,3045977	0,0743	34,8	21,3505747	0,0516	14,8275862	34,8
0,0289	34,5	8,37681159	0,0764	34,5	22,1449275	0,0557	16,1449275	34,5
0,0309	34,2	9,03508772	0,0764	34,2	22,3391813	0,0599	17,5146199	34,2
0,0309	33,9	9,11504425	0,0785	33,9	23,1563422	0,0599	17,6696165	33,9
0,0309	33,6	9,19642857	0,0805	33,6	23,9583333	0,0619	18,422619	33,6
0,0309	33,3	9,27927928	0,0805	33,3	24,1741742	0,0619	18,5885886	33,3
0,033	33	10	0,0805	33	24,3939394	0,064	19,3939394	33
0,033	32,4	10,1851852	0,0805	32,4	24,845679	0,0661	20,4012346	32,4
0,0351	31,8	11,0377358	0,0805	31,8	25,3144654	0,0661	20,7861635	31,8
0,0371	31,2	11,8910256	0,0805	31,2	25,8012821	0,0661	21,1858974	31,2
0,0392	30,6	12,8104575	0,0805	30,6	26,3071895	0,0661	21,6013072	30,6
0,0392	30	13,0666667	0,0826	30	27,5333333	0,0888	29,6	30
0,0392	29,4	13,3333333	0,0847	29,4	28,8095238	0,0888	30,2040816	29,4
0,0371	28,8	12,8819444	0,0805	28,8	27,9513889	0,0888	30,8333333	28,8
0,0371	28,2	13,1560284	0,0805	28,2	28,5460993	0,0888	31,4893617	28,2
0,0371	27,6	13,442029	0,0764	27,6	27,6811594	0,0867	31,4130435	27,6

ζ	σ
13,3333333	100
28,8095238	200
31,4893617	300

II / 2 Sol dense avec renforcement par getextil et une teneur en eau de 5%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	7	-1	25	22	0	25	21	15
50	14	-4	50	27	0	50	26	18
75	18	-16	75	29	0	75	30	18
100	18	-25	100	30	-10	100	32	19
150	19	-65	150	32	-32	150	36	19
200	20	-74	200	33	-57	200	37	19
250	19	-90	250	33	-83	250	38	18
300	19	-120	300	33	-115	300	38	10
350	19	-135	350	34	-139	350	37	1
400	19	-141	400	34	-160	400	37	-4
450	19	-150	450	34	-180	450	37	-7
500	19	-165	500	34	-209	500	39	-10
600	19	-185	600	34	-245	600	40	-19
700	19	-210	700	34	-282	700	42	-31
800	18	-234	800	34	-320	800	46	-41
900	18	-240	900	34	-350	900	47	-44
1000	18	-240	1000	34	-375	1000	48	-48
1100	18	-249	1100	34	-400	1100	50	-56
1200	18	-269	1200	34	-420	1200	49	-60
1300	18	-269	1300	33	-430	1300	47	-64
1400	18	-269	1400	33	-443	1400	47	-64

Annexe.

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		ζ	Acorrigé
0	36	0		36	0		0	36
0,0144	35,85	4,0167364	0,0454	35,85	12,6638773	0,0433	12,0781032	35,85
0,0289	35,7	8,0952381	0,0557	35,7	15,6022409	0,0537	15,0420168	35,7
0,0371	35,55	10,4360056	0,0599	35,55	16,8495077	0,0619	17,4120956	35,55
0,0371	35,4	10,480226	0,0619	35,4	17,4858757	0,0661	18,6723164	35,4
0,0392	35,1	11,1680912	0,0661	35,1	18,8319088	0,0743	21,1680912	35,1
0,0413	34,8	11,8678161	0,0681	34,8	19,5689655	0,0764	21,954023	34,8
0,0392	34,5	11,3623188	0,0681	34,5	19,7391304	0,0785	22,7536232	34,5
0,0392	34,2	11,4619883	0,0681	34,2	19,9122807	0,0785	22,9532164	34,2
0,0392	33,9	11,5634218	0,0702	33,9	20,7079646	0,0764	22,5368732	33,9
0,0392	33,6	11,6666667	0,0702	33,6	20,8928571	0,0764	22,7380952	33,6
0,0392	33,3	11,7717718	0,0702	33,3	21,0810811	0,0764	22,9429429	33,3
0,0392	33	11,8787879	0,0702	33	21,2727273	0,0805	24,3939394	33
0,0392	32,4	12,0987654	0,0702	32,4	21,6666667	0,0826	25,4938272	32,4
0,0392	31,8	12,327044	0,0702	31,8	22,0754717	0,0867	27,2641509	31,8
0,0371	31,2	11,8910256	0,0702	31,2	22,5	0,095	30,4487179	31,2
0,0371	30,6	12,124183	0,0702	30,6	22,9411765	0,0971	31,7320261	30,6
0,0371	30	12,3666667	0,0702	30	23,4	0,0991	33,0333333	30
0,0371	29,4	12,6190476	0,0702	29,4	23,877551	0,1033	35,1360544	29,4
0,0371	28,8	12,8819444	0,0702	28,8	24,375	0,1012	35,1388889	28,8
0,0371	28,2	13,1560284	0,0681	28,2	24,1489362	0,0971	34,4326241	28,2
0,0371	27,6	13,442029	0,0681	27,6	24,673913	0,0971	35,1811594	27,6

ζ	σ
11,8678161	100
24,375	200
35,1360544	300

II / 3 Sol dense avec renforcement par geotextil et une teneur en eau de 7%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	15	5	25	12	0	25	17	7
50	17	5	50	14	-1	50	20	8
75	18	0	75	17	-1	75	23	8
100	20	-8	100	19	-1	100	26	9
150	20	-28	150	23	-5	150	28	9
200	20	-52	200	25	-15	200	30	7
250	20	-75	250	27	-32	250	32	-10
300	20	-100	300	29	-40	300	32	-25
350	20	-125	350	31	-54	350	33	-40
400	20	-140	400	32	-65	400	34	-50
450	19	-157	450	33	-80	450	35	-59
500	19	-174	500	33	-94	500	35	-70
600	19	-209	600	34	-105	600	37	-84
700	18	-232	700	28	-125	700	39	-100
800	18	-260	800	27	-140	800	41	-117
900	19	-272	900	27	-156	900	43	-132
1000	19	-292	1000	25	-170	1000	44	-143
1100	19	-315	1100	22	-185	1100	47	-150
1200	19	-315	1200	22	-194	1200	48	-162
1300	19	-315	1300	21	-200	1300	50	-174
1400	19	-315	1400	26	-205	1400	51	-182

Annexe.

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0309	35,85	8,61924686	0,0247	35,85	6,88981869	0,0351	35,85	9,79079498
0,0351	35,7	9,83193277	0,0289	35,7	8,0952381	0,0413	35,7	11,5686275
0,0371	35,55	10,4360056	0,0351	35,55	9,87341772	0,0475	35,55	13,3614627
0,0413	35,4	11,6666667	0,0392	35,4	11,0734463	0,0537	35,4	15,1694915
0,0413	35,1	11,7663818	0,0475	35,1	13,5327635	0,0599	35,1	17,0655271
0,0413	34,8	11,8678161	0,0516	34,8	14,8275862	0,0619	34,8	17,7873563
0,0413	34,5	11,9710145	0,0557	34,5	16,1449275	0,0661	34,5	19,1594203
0,0413	34,2	12,0760234	0,0599	34,2	17,5146199	0,0661	34,2	19,3274854
0,0413	33,9	12,1828909	0,064	33,9	18,879056	0,0681	33,9	20,0884956
0,0413	33,6	12,2916667	0,0661	33,6	19,672619	0,0702	33,6	20,8928571
0,0392	33,3	11,7717718	0,0681	33,3	20,4504505	0,0723	33,3	21,7117117
0,0392	33	11,8787879	0,0681	33	20,6363636	0,0723	33	21,9090909
0,0392	32,4	12,0987654	0,0702	32,4	21,6666667	0,0764	32,4	23,5802469
0,0371	31,8	11,6666667	0,0599	31,8	18,836478	0,0805	31,8	25,3144654
0,0371	31,2	11,8910256	0,0557	31,2	17,8525641	0,0847	31,2	27,1474359
0,0392	30,6	12,8104575	0,0557	30,6	18,2026144	0,0888	30,6	29,0196078
0,0392	30	13,0666667	0,0516	30	17,2	0,0909	30	30,3
0,0392	29,4	13,3333333	0,0454	29,4	15,4421769	0,0971	29,4	33,0272109
0,0392	28,8	13,6111111	0,0454	28,8	15,7638889	0,0991	28,8	34,4097222
0,0392	28,2	13,9007092	0,0433	28,2	15,3546099	0,1033	28,2	36,6312057
0,0392	27,6	14,2028986	0,0537	27,6	19,4565217	0,1053	27,6	38,1521739

ζ	σ
12,2916667	100
21,6666667	200
38,1521739	300

II / 4 Sol lache avec renforcement par geotextil et une teneur en eau de 3%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	5	0	25	10	10	25	15	36
50	6	0	50	13	10	50	17	90
75	7	0	75	14	10	75	19	110
100	7	-5	100	14	10	100	21	135
150	8	-5	150	15	10	150	22	150
200	8	-5	200	15	10	200	23	165
250	8	-5	250	15	10	250	24	173
300	9	-5	300	15	10	300	24	186
350	9	-5	350	15	10	350	24	198
400	9	-5	400	15	10	400	24	206
450	10	-5	450	15	10	450	25	215
500	10	-5	500	16	10	500	25	223
600	10	-5	600	17	10	600	26	235
700	10	-5	700	19	10	700	29	253
800	11	-5	800	20	10	800	31	271
900	11	-5	900	20	10	900	34	286
1000	11	-7	1000	21	10	1000	37	305
1100	12	-15	1100	21	10	1100	39	320
1200	12	-22	1200	22	10	1200	40	327
1300	12	-23	1300	23	10	1300	41	331
1400	12	-23	1400	23	-7	1400	41	331

Annexe.

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0103	35,85	2,87308229	0,0206	35,85	5,74616457	0,0309	35,85	8,61924686
0,0123	35,7	3,44537815	0,0268	35,7	7,5070028	0,0351	35,7	9,83193277
0,0144	35,55	4,05063291	0,0289	35,55	8,12939522	0,0392	35,55	11,0267229
0,0144	35,4	4,06779661	0,0289	35,4	8,16384181	0,0433	35,4	12,2316384
0,0165	35,1	4,7008547	0,0309	35,1	8,8034188	0,0454	35,1	12,9344729
0,0165	34,8	4,74137931	0,0309	34,8	8,87931034	0,0475	34,8	13,6494253
0,0165	34,5	4,7826087	0,0309	34,5	8,95652174	0,0495	34,5	14,3478261
0,0185	34,2	5,40935673	0,0309	34,2	9,03508772	0,0495	34,2	14,4736842
0,0185	33,9	5,45722714	0,0309	33,9	9,11504425	0,0495	33,9	14,6017699
0,0185	33,6	5,50595238	0,0309	33,6	9,19642857	0,0495	33,6	14,7321429
0,0206	33,3	6,18618619	0,0309	33,3	9,27927928	0,0516	33,3	15,4954955
0,0206	33	6,24242424	0,033	33	10	0,0516	33	15,6363636
0,0206	32,4	6,35802469	0,0351	32,4	10,83333333	0,0537	32,4	16,5740741
0,0206	31,8	6,47798742	0,0392	31,8	12,327044	0,0599	31,8	18,836478
0,0227	31,2	7,27564103	0,0413	31,2	13,2371795	0,064	31,2	20,5128205
0,0227	30,6	7,41830065	0,0413	30,6	13,496732	0,0702	30,6	22,9411765
0,0227	30	7,56666667	0,0433	30	14,43333333	0,0764	30	25,4666667
0,0247	29,4	8,40136054	0,0433	29,4	14,7278912	0,0805	29,4	27,3809524
0,0247	28,8	8,57638889	0,0454	28,8	15,7638889	0,0826	28,8	28,6805556
0,0247	28,2	8,75886525	0,0475	28,2	16,8439716	0,0847	28,2	30,035461
0,0247	27,6	8,94927536	0,0475	27,6	17,2101449	0,0847	27,6	30,6884058

ζ	σ
8,94927536	100
17,2101449	200
30,6884058	300

II / 5 Sol lache avec renforcement par geotextil et une teneur en eau de 5%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	4	10	25	10	51	25	10	42
50	8	24	50	11	72	50	15	81
75	9	7	75	13	88	75	17	143
100	10	7	100	14	107	100	18	189
150	12	14	150	15	127	150	20	231
200	12	22	200	16	140	200	22	254
250	13	27	250	17	154	250	23	276
300	13	32	300	18	159	300	24	294
350	14	39	350	18	165	350	25	306
400	14	41	400	18	171	400	25	319
450	15	43	450	19	174	450	26	332
500	15	47	500	19	179	500	27	360
600	17	49	600	19	181	600	28	395
700	19	64	700	19	181	700	30	434
800	20	71	800	20	181	800	33	468
900	21	82	900	20	181	900	35	500
1000	21	85	1000	20	184	1000	36	531
1100	21	86	1100	22	185	1100	38	548
1200	21	87	1200	22	182	1200	38	549
1300	21	88	1300	22	181	1300	39	552
1400	21	89	1400	23	182	1400	39	558

Annexe.

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0082	35,85	2,28730823	0,0206	35,85	5,74616457	0,0206	35,85	5,74616457
0,0165	35,7	4,62184874	0,0227	35,7	6,35854342	0,0309	35,7	8,65546218
0,0185	35,55	5,20393812	0,0268	35,55	7,53867792	0,0351	35,55	9,87341772
0,0206	35,4	5,81920904	0,0289	35,4	8,16384181	0,0371	35,4	10,480226
0,0247	35,1	7,03703704	0,0309	35,1	8,8034188	0,0413	35,1	11,7663818
0,0247	34,8	7,09770115	0,033	34,8	9,48275862	0,0454	34,8	13,045977
0,0268	34,5	7,76811594	0,0351	34,5	10,173913	0,0475	34,5	13,7681159
0,0268	34,2	7,83625731	0,0371	34,2	10,8479532	0,0495	34,2	14,4736842
0,0289	33,9	8,52507375	0,0371	33,9	10,9439528	0,0516	33,9	15,2212389
0,0289	33,6	8,60119048	0,0371	33,6	11,0416667	0,0516	33,6	15,3571429
0,0309	33,3	9,27927928	0,0392	33,3	11,7717718	0,0537	33,3	16,1261261
0,0309	33	9,36363636	0,0392	33	11,8787879	0,0557	33	16,8787879
0,0351	32,4	10,83333333	0,0392	32,4	12,0987654	0,0599	32,4	18,4876543
0,0392	31,8	12,327044	0,0392	31,8	12,327044	0,0619	31,8	19,4654088
0,0413	31,2	13,2371795	0,0413	31,2	13,2371795	0,0681	31,2	21,8269231
0,0433	30,6	14,1503268	0,0413	30,6	13,496732	0,0723	30,6	23,627451
0,0433	30	14,43333333	0,0413	30	13,7666667	0,0743	30	24,7666667
0,0433	29,4	14,7278912	0,0454	29,4	15,4421769	0,0785	29,4	26,7006803
0,0433	28,8	15,0347222	0,0454	28,8	15,7638889	0,0785	28,8	27,2569444
0,0433	28,2	15,3546099	0,0454	28,2	16,0992908	0,0805	28,2	28,5460993
0,0433	27,6	15,6884058	0,0475	27,6	17,2101449	0,0805	27,6	29,1666667

ζ	σ
15,6884058	100
17,2101449	200
29,1666667	300

II / 6 Sol lache avec renforcement et une teneur en eau de 7%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	7	10	25	6	52	25	9	50
50	8	16	50	14	89	50	12	120
75	9	24	75	15	124	75	13	155
100	10	31	100	15	145	100	14	170
150	10	41	150	15	199	150	21	220
200	11	59	200	17	250	200	22	250
250	12	63	250	17	271	250	23	290
300	13	69	300	20	298	300	24	330
350	14	72	350	20	359	350	26	355
400	15	81	400	22	384	400	27	380
450	15	90	450	24	408	450	28	410
500	15	103	500	25	437	500	29	430
600	16	125	600	26	460	600	31	470
700	17	144	700	27	480	700	32	490
800	17	150	800	28	499	800	34	515
900	18	156	900	29	514	900	35	532
1000	19	156	1000	30	540	1000	36	552
1100	19	158	1100	30	554	1100	36	560
1200	19	160	1200	30	558	1200	37	565
1300	19	162	1300	30	562	1300	38	571
1400	19	164	1400	30	562	1400	39	577

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0144	35,85	4,0167364	0,0123	35,85	3,43096234	0,0185	35,85	5,16039052
0,0165	35,7	4,62184874	0,0289	35,7	8,0952381	0,0247	35,7	6,91876751
0,0185	35,55	5,20393812	0,0309	35,55	8,69198312	0,0268	35,55	7,53867792
0,0206	35,4	5,81920904	0,0309	35,4	8,72881356	0,0289	35,4	8,16384181
0,0206	35,1	5,86894587	0,0309	35,1	8,8034188	0,0433	35,1	12,3361823
0,0227	34,8	6,52298851	0,0351	34,8	10,0862069	0,0454	34,8	13,045977
0,0247	34,5	7,15942029	0,0351	34,5	10,173913	0,0475	34,5	13,7681159
0,0268	34,2	7,83625731	0,0413	34,2	12,0760234	0,0495	34,2	14,4736842
0,0289	33,9	8,52507375	0,0413	33,9	12,1828909	0,0537	33,9	15,840708
0,0309	33,6	9,19642857	0,0454	33,6	13,5119048	0,0557	33,6	16,577381
0,0309	33,3	9,27927928	0,0495	33,3	14,8648649	0,0599	33,3	17,987988
0,0309	33	9,36363636	0,0516	33	15,6363636	0,0599	33	18,1515152
0,033	32,4	10,1851852	0,0537	32,4	16,5740741	0,064	32,4	19,7530864
0,0351	31,8	11,0377358	0,0557	31,8	17,5157233	0,0661	31,8	20,7861635
0,0351	31,2	11,25	0,0599	31,2	19,1987179	0,0702	31,2	22,5
0,0371	30,6	12,124183	0,0599	30,6	19,5751634	0,0723	30,6	23,627451
0,0392	30	13,0666667	0,0619	30	20,6333333	0,0743	30	24,7666667
0,0392	29,4	13,3333333	0,0619	29,4	21,0544218	0,0743	29,4	25,2721088
0,0392	28,8	13,6111111	0,0619	28,8	21,4930556	0,0764	28,8	26,5277778
0,0392	28,2	13,9007092	0,0619	28,2	21,9503546	0,0785	28,2	27,8368794
0,0392	27,6	14,2028986	0,0619	27,6	22,4275362	0,0805	27,6	29,1666667

ζ	σ
14,2028986	100
22,4275362	200
29,1666667	300

Annexe 3

Essai de Cisaillement Avec Variation du Température : Température E : 30°, 34°, et 36°

*Essai de Cisaillement avec variation de la température : Température 30 à 34 °36°**Sol à sec sans renforcement
I/I Sol dense sans renforcement*

H	100 kpa		H	200kpa		H	300kpa	
	Taneau	V		Taneau	V		Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	16	-10	25	18	18	25	26	25
50	27	-15	50	26	41	50	30	29
75	30	-20	75	35	68	75	39	39
100	31	-22	100	36	74	100	48	46
150	32	-24	150	38	89	150	56	35
200	32	-30	200	45	96	200	62	24
250	32	-31	250	44	85	250	63	18
300	31	-36	300	42	74	300	59	-26
350	29	-41	350	40	52	350	59	-34
400	28	-43	400	40	49	400	55	-45
450	28	-48	450	38	32	450	49	-55
500	27	-49	500	37	0	500	48	-68
600	27	-55	600	35	-28	600	47	-71
700	27	-75	700	35	-39	700	46	-84
800	27	-115	800	33	-48	800	44	-98
900	27	-126	900	32	-54	900	44	-115
1000	27	-132	1000	31	-66	1000	44	-114
1100	27	-132	1100	31	-67	1100	42	-114
1200	27	-132	1200	31	-67	1200	39	-114
1300	27	-132	1300	31	-67	1300	39	-114
1400	27	-132	1400	31	-67	1400	39	-114

Annexe.

0	Acorrige	ζ	0	Acorrige	ζ	0	Acorrige	ζ
0	36	0	36	0	0	36	0	
0,033	35,85	9,20502092	0,0371	35,85	10,348675	0,0537	35,85	14,9790795
0,0557	35,7	15,6022409	0,0537	35,7	15,0420168	0,0619	35,7	17,3389356
0,0619	35,55	17,4120956	0,0723	35,55	20,3375527	0,0805	35,55	22,6441632
0,064	35,4	18,079096	0,0743	35,4	20,9887006	0,0991	35,4	27,9943503
0,0661	35,1	18,8319088	0,0785	35,1	22,3646724	0,1157	35,1	32,962963
0,0661	34,8	18,9942529	0,0929	34,8	26,6954023	0,128	34,8	36,7816092
0,0661	34,5	19,1594203	0,0909	34,5	26,3478261	0,1301	34,5	37,7101449
0,064	34,2	18,7134503	0,0867	34,2	25,3508772	0,1219	34,2	35,6432749
0,0599	33,9	17,6696165	0,0826	33,9	24,3657817	0,1219	33,9	35,9587021
0,0578	33,6	17,202381	0,0826	33,6	24,5833333	0,1136	33,6	33,8095238
0,0578	33,3	17,3573574	0,0785	33,3	23,5735736	0,1012	33,3	30,3903904
0,0557	33	16,8787879	0,0764	33	23,1515152	0,0991	33	30,030303
0,0557	32,4	17,191358	0,0723	32,4	22,3148148	0,0971	32,4	29,9691358
0,0557	31,8	17,5157233	0,0723	31,8	22,7358491	0,095	31,8	29,8742138
0,0557	31,2	17,8525641	0,0681	31,2	21,8269231	0,0909	31,2	29,1346154
0,0557	30,6	18,2026144	0,0661	30,6	21,6013072	0,0909	30,6	29,7058824
0,0557	30	18,5666667	0,064	30	21,3333333	0,0909	30	30,3
0,0557	29,4	18,9455782	0,064	29,4	21,7687075	0,0867	29,4	29,4897959
0,0557	28,8	19,3402778	0,064	28,8	22,2222222	0,0805	28,8	27,9513889
0,0557	28,2	19,751773	0,064	28,2	22,6950355	0,0805	28,2	28,5460993
0,0557	27,6	20,1811594	0,064	27,6	23,1884058	0,0805	27,6	29,1666667

σ	ζ
100	20,1811594
200	26,6954023
300	37,7101449

2 Sol lache sans renforcement								
100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	12	65	25	18	55	25	24	55
50	13	130	50	20	120	50	23	100
75	15	190	75	25	180	75	35	151
100	19	250	100	27	200	90	36	231
150	20	348	150	31	295	120	46	300
200	21	425	200	33	345	114	49	401
250	21	496	250	36	402	250	51	402
300	22	555	300	37	405	300	52	415
350	20	610	350	37	450	350	51	500
400	19	650	400	38	510	400	50	505
450	18	680	450	40	585	450	49	522
500	17	725	500	41	596	500	48	530
600	17	790	600	39	602	600	47	560
700	17	831	700	38	639	700	46	615
800	17	860	800	35	685	800	46	635
900	17	877	900	32	695	900	46	661
1000	17	896	1000	32	710	1000	46	661
1100	17	910	1100	31	722	1100	46	661
1200	17	916	1200	31	756	1200	46	661
1300	17	922	1300	31	756	1300	46	661
1400	17	926	1400	31	756	1400	46	661

Annexe.

0	Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0
0,0247	35,85	6,88981869	0,0371	35,85	10,348675	0,0495	35,85	13,8075314
0,0268	35,7	7,5070028	0,0413	35,7	11,5686275	0,0475	35,7	13,3053221
0,0309	35,55	8,69198312	0,0516	35,55	14,5147679	0,0723	35,55	20,3375527
0,0392	35,4	11,0734463	0,0557	35,4	15,7344633	0,0743	35,46	20,9531867
0,0413	35,1	11,7663818	0,064	35,1	18,2336182	0,095	35,28	26,9274376
0,0433	34,8	12,4425287	0,0681	34,8	19,5689655	0,1012	35,316	28,6555669
0,0433	34,5	12,5507246	0,0743	34,5	21,5362319	0,1053	34,5	30,5217391
0,0454	34,2	13,2748538	0,0764	34,2	22,3391813	0,1074	34,2	31,4035088
0,0413	33,9	12,1828909	0,0764	33,9	22,5368732	0,1053	33,9	31,0619469
0,0392	33,6	11,6666667	0,0785	33,6	23,3630952	0,1033	33,6	30,7440476
0,0371	33,3	11,1411411	0,0826	33,3	24,8048048	0,1012	33,3	30,3903904
0,0351	33	10,6363636	0,0847	33	25,6666667	0,0991	33	30,030303
0,0351	32,4	10,8333333	0,0805	32,4	24,845679	0,0971	32,4	29,9691358
0,0351	31,8	11,0377358	0,0785	31,8	24,6855346	0,095	31,8	29,8742138
0,0351	31,2	11,25	0,0723	31,2	23,1730769	0,095	31,2	30,4487179
0,0351	30,6	11,4705882	0,0661	30,6	21,6013072	0,095	30,6	31,0457516
0,0351	30	11,7	0,0661	30	22,0333333	0,095	30	31,6666667
0,0351	29,4	11,9387755	0,064	29,4	21,7687075	0,095	29,4	32,3129252
0,0351	28,8	12,1875	0,064	28,8	22,2222222	0,095	28,8	32,9861111
0,0351	28,2	12,4468085	0,064	28,2	22,6950355	0,095	28,2	33,6879433
0,0351	27,6	12,7173913	0,064	27,6	23,1884058	0,095	27,6	34,4202899

σ	ζ
100	13,2748538
200	25,6666667
300	34,4202899

sol a sec avec renforcement

3 Sol dense avec renforcement par geosyntheticque

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	11	-7	25	10	21	25	29	28
50	14	-15	50	16	41	50	33	32
75	15	-17	75	18	65	75	35	36
100	17	-21	100	19	75	100	40	37
150	18	-26	150	20	84	150	49	32
200	20	-35	200	22	88	200	55	15
250	22	-41	250	24	75	250	58	-10
300	23	-42	300	25	65	300	60	-25
350	24	-43	350	26	53	350	60	-38
400	24	-59	400	27	44	400	61	-45
450	25	-65	450	29	32	450	59	-58
500	28	-72	500	33	0	500	54	-70
600	28	-85	600	33	-25	600	54	-86
700	29	-102	700	35	-36	700	52	-102
800	30	-102	800	36	-45	800	52	-105
900	31	-115	900	37	-58	900	50	-112
1000	32	-120	1000	41	-62	1000	48	-112
1100	32	-122	1100	42	-63	1100	48	-112
1200	32	-122	1200	43	-63	1200	48	-112
1300	32	-122	1300	44	-63	1300	48	-112
1400	32	-122	1400	39	-63	1400	48	-112

Annexe.

	Acorrige	ζ		Acorrige	ζ		Acorrige	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0227	35,85	6,33193863	0,0206	35,85	5,74616457	0,0599	35,85	16,7085077
0,0289	35,7	8,0952381	0,033	35,7	9,24369748	0,0681	35,7	19,0756303
0,0309	35,55	8,69198312	0,0371	35,55	10,4360056	0,0723	35,55	20,3375527
0,0351	35,4	9,91525424	0,0392	35,4	11,0734463	0,0826	35,4	23,3333333
0,0371	35,1	10,5698006	0,0413	35,1	11,7663818	0,1012	35,1	28,8319088
0,0413	34,8	11,8678161	0,0454	34,8	13,045977	0,1136	34,8	32,6436782
0,0454	34,5	13,1594203	0,0495	34,5	14,3478261	0,1198	34,5	34,7246377
0,0475	34,2	13,8888889	0,0516	34,2	15,0877193	0,1239	34,2	36,2280702
0,0495	33,9	14,6017699	0,0537	33,9	15,840708	0,1239	33,9	36,5486726
0,0495	33,6	14,7321429	0,0557	33,6	16,577381	0,126	33,6	37,5
0,0516	33,3	15,4954955	0,0599	33,3	17,987988	0,1219	33,3	36,6066066
0,0578	33	17,5151515	0,0681	33	20,6363636	0,1115	33	33,7878788
0,0578	32,4	17,8395062	0,0681	32,4	21,0185185	0,1115	32,4	34,4135802
0,0599	31,8	18,836478	0,0723	31,8	22,7358491	0,1074	31,8	33,7735849
0,0619	31,2	19,8397436	0,0743	31,2	23,8141026	0,1074	31,2	34,4230769
0,064	30,6	20,9150327	0,0764	30,6	24,9673203	0,1033	30,6	33,7581699
0,0661	30	22,0333333	0,0847	30	28,2333333	0,0991	30	33,0333333
0,0661	29,4	22,4829932	0,0867	29,4	29,4897959	0,0991	29,4	33,707483
0,0661	28,8	22,9513889	0,0888	28,8	30,8333333	0,0991	28,8	34,4097222
0,0661	28,2	23,4397163	0,0909	28,2	32,2340426	0,0991	28,2	35,141844
0,0661	27,6	23,9492754	0,0805	27,6	29,1666667	0,0991	27,6	35,9057971

σ	ζ
100	23,9492754
200	32,2340426
300	37,5

3 Sol lache avec renforcement par
geosyntheticque

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	8	26	25	12	60	25	16	58
50	9	54	50	13	90	50	18	112
75	10	74	75	15	125	75	20	115
100	11	98	100	16	140	100	24	140
150	12	125	150	17	171	150	26	175
200	13	136	200	18	185	200	27	189
250	14	165	250	19	200	250	27	200
300	14	179	300	20	205	300	28	215
350	15	196	350	20	215	350	29	223
400	15	222	400	21	218	400	31	223
450	15	225	450	22	218	450	32	233
500	16	203	500	24	218	500	34	245
600	17	203	600	25	218	600	35	256
700	17	185	700	26	216	700	36	248
800	18	172	800	27	198	800	39	242
900	19	168	900	32	190	900	42	242
1000	19	159	1000	35	185	1000	45	242
1100	20	145	1100	38	175	1100	46	241
1200	21	145	1200	38	180	1200	48	241
1300	22	145	1300	36	181	1300	48	241
1400	23	145	1400	35	181	1400	48	241

Annexe.

0	Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0
0,0165	35,85	4,60251046	0,0247	35,85	6,88981869	0,033	35,85	9,20502092
0,0185	35,7	5,18207283	0,0268	35,7	7,5070028	0,0371	35,7	10,3921569
0,0206	35,55	5,79465541	0,0309	35,55	8,69198312	0,0413	35,55	11,6174402
0,0227	35,4	6,41242938	0,033	35,4	9,3220339	0,0495	35,4	13,9830508
0,0247	35,1	7,03703704	0,0351	35,1	10	0,0537	35,1	15,2991453
0,0268	34,8	7,70114943	0,0371	34,8	10,6609195	0,0557	34,8	16,0057471
0,0289	34,5	8,37681159	0,0392	34,5	11,3623188	0,0557	34,5	16,1449275
0,0289	34,2	8,4502924	0,0413	34,2	12,0760234	0,0578	34,2	16,9005848
0,0309	33,9	9,11504425	0,0413	33,9	12,1828909	0,0599	33,9	17,6696165
0,0309	33,6	9,19642857	0,0433	33,6	12,8869048	0,064	33,6	19,047619
0,0309	33,3	9,27927928	0,0454	33,3	13,6336336	0,0661	33,3	19,8498498
0,033	33	10	0,0495	33	15	0,0702	33	21,2727273
0,0351	32,4	10,83333333	0,0516	32,4	15,9259259	0,0723	32,4	22,3148148
0,0351	31,8	11,0377358	0,0537	31,8	16,8867925	0,0743	31,8	23,3647799
0,0371	31,2	11,8910256	0,0557	31,2	17,8525641	0,0805	31,2	25,8012821
0,0392	30,6	12,8104575	0,0661	30,6	21,6013072	0,0867	30,6	28,3333333
0,0392	30	13,0666667	0,0723	30	24,1	0,0929	30	30,9666667
0,0413	29,4	14,047619	0,0785	29,4	26,7006803	0,095	29,4	32,3129252
0,0433	28,8	15,0347222	0,0785	28,8	27,2569444	0,0991	28,8	34,4097222
0,0454	28,2	16,0992908	0,0743	28,2	26,3475177	0,0991	28,2	35,141844
0,0475	27,6	17,2101449	0,0723	27,6	26,1956522	0,0991	27,6	35,9057971

σ	ζ
100	17,2101449
200	27,2569444
300	35,9057971

sans renforcement avec variation de la teneur en eau w

II / 1 Sol dense sans renforcement avec une teneur en eau de 3%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	12	-5	25	22	27	25	25	25
50	14	-10	50	25	45	50	30	30
75	15	-15	75	28	63	75	34	35
100	19	-16	100	30	75	100	39	35
150	20	-25	150	32	86	150	43	30
200	20	-40	200	33	86	200	45	10
250	20	-52	250	34	74	250	46	-10
300	20	-65	300	34	68	300	46	-25
350	20	-81	350	34	42	350	46	-45
400	20	-98	400	34	34	400	46	-57
450	20	-110	450	33	15	450	46	-77
500	20	-122	500	33	0	500	46	-90
600	19	-140	600	32	-20	600	44	-95
700	19	-150	700	32	-32	700	42	-102
800	19	-157	800	31	-40	800	42	-102
900	19	-164	900	31	-41	900	42	-102
1000	19	-165	1000	31	-48	1000	42	-102
1100	19	-170	1100	31	-51	1100	42	-102
1200	19	-173	1200	31	-55	1200	42	-102
1300	19	-174	1300	31	-58	1300	41	-102
1400	19	-174	1400	31	-62	1400	41	-102

Annexe.

0	Acorrigé 36	ζ 0	0,0454	Acorrigé 36	ζ 0	0,0516	Acorrigé 36	ζ 0
0,0247	35,85	6,88981869	0,0454	35,85	12,6638773	0,0516	35,85	14,3933054
0,0289	35,7	8,0952381	0,0516	35,7	14,4537815	0,0619	35,7	17,3389356
0,0309	35,55	8,69198312	0,0599	35,55	16,8495077	0,0702	35,55	19,7468354
0,0392	35,4	11,0734463	0,0619	35,4	17,4858757	0,0805	35,4	22,740113
0,0413	35,1	11,7663818	0,0661	35,1	18,8319088	0,0888	35,1	25,2991453
0,0413	34,8	11,8678161	0,0681	34,8	19,5689655	0,0929	34,8	26,6954023
0,0413	34,5	11,9710145	0,0702	34,5	20,3478261	0,095	34,5	27,5362319
0,0413	34,2	12,0760234	0,0702	34,2	20,5263158	0,095	34,2	27,7777778
0,0413	33,9	12,1828909	0,0702	33,9	20,7079646	0,095	33,9	28,0235988
0,0413	33,6	12,2916667	0,0702	33,6	20,8928571	0,095	33,6	28,2738095
0,0413	33,3	12,4024024	0,0681	33,3	20,4504505	0,095	33,3	28,5285285
0,0413	33	12,5151515	0,0681	33	20,6363636	0,095	33	28,7878788
0,0392	32,4	12,0987654	0,0661	32,4	20,4012346	0,0909	32,4	28,0555556
0,0392	31,8	12,327044	0,0661	31,8	20,7861635	0,0867	31,8	27,2641509
0,0392	31,2	12,5641026	0,064	31,2	20,5128205	0,0867	31,2	27,7884615
0,0392	30,6	12,8104575	0,064	30,6	20,9150327	0,0867	30,6	28,3333333
0,0392	30	13,0666667	0,064	30	21,3333333	0,0867	30	28,9
0,0392	29,4	13,3333333	0,064	29,4	21,7687075	0,0867	29,4	29,4897959
0,0392	28,8	13,6111111	0,064	28,8	22,2222222	0,0867	28,8	30,1041667
0,0392	28,2	13,9007092	0,064	28,2	22,6950355	0,0847	28,2	30,035461
0,0392	27,6	14,2028986	0,064	27,6	23,1884058	0,0847	27,6	30,6884058

σ	ζ
100	12,5151515
200	20,8928571
300	28,2738095

II / 2 Sol dense sans renforcement avec une teneur en eau de 5%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	15	-21	25	22	15	25	26	19
50	19	-34	50	31	20	50	33	27
75	20	-63	75	33	21	75	39	48
100	20	-78	100	34	21	100	42	58
150	21	-98	150	34	21	150	47	58
200	21	-105	200	34	21	200	49	82
250	21	-112	250	34	21	250	51	93
300	21	-123	300	34	16	300	51	94
350	21	-135	350	34	10	350	51	94
400	21	-160	400	33	6	400	51	79
450	21	-185	450	33	1	450	50	63
500	21	-210	500	33	-5	500	50	51
600	21	-245	600	32	-9	600	49	35
700	21	-270	700	32	-16	700	47	21
800	21	-290	800	32	-22	800	46	6
900	20	-315	900	32	-24	900	46	-2
1000	20	-325	1000	32	-24	1000	45	-6
1100	20	-335	1100	31	-24	1100	45	-7
1200	20	-347	1200	31	-24	1200	45	9
1300	20	-354	1300	30	-18	1300	45	-12
1400	20	-364	1400	30	-18	1400	45	-12

Annexe.

0	Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0
0,0309	35,85	8,61924686	0,0454	35,85	12,6638773	0,0537	35,85	14,9790795
0,0392	35,7	10,9803922	0,064	35,7	17,9271709	0,0681	35,7	19,0756303
0,0413	35,55	11,6174402	0,0681	35,55	19,1561181	0,0805	35,55	22,6441632
0,0413	35,4	11,6666667	0,0702	35,4	19,8305085	0,0867	35,4	24,4915254
0,0433	35,1	12,3361823	0,0702	35,1	20	0,0971	35,1	27,6638177
0,0433	34,8	12,4425287	0,0702	34,8	20,1724138	0,1012	34,8	29,0804598
0,0433	34,5	12,5507246	0,0702	34,5	20,3478261	0,1053	34,5	30,5217391
0,0433	34,2	12,6608187	0,0702	34,2	20,5263158	0,1053	34,2	30,7894737
0,0433	33,9	12,7728614	0,0702	33,9	20,7079646	0,1053	33,9	31,0619469
0,0433	33,6	12,8869048	0,0681	33,6	20,2678571	0,1053	33,6	31,3392857
0,0433	33,3	13,003003	0,0681	33,3	20,4504505	0,1033	33,3	31,021021
0,0433	33	13,1212121	0,0681	33	20,6363636	0,1033	33	31,3030303
0,0433	32,4	13,3641975	0,0661	32,4	20,4012346	0,1012	32,4	31,2345679
0,0433	31,8	13,6163522	0,0661	31,8	20,7861635	0,0971	31,8	30,5345912
0,0433	31,2	13,8782051	0,0661	31,2	21,1858974	0,095	31,2	30,4487179
0,0413	30,6	13,496732	0,0661	30,6	21,6013072	0,095	30,6	31,0457516
0,0413	30	13,7666667	0,0661	30	22,0333333	0,0929	30	30,9666667
0,0413	29,4	14,047619	0,064	29,4	21,7687075	0,0929	29,4	31,5986395
0,0413	28,8	14,3402778	0,064	28,8	22,2222222	0,0929	28,8	32,2569444
0,0413	28,2	14,6453901	0,0619	28,2	21,9503546	0,0929	28,2	32,9432624
0,0413	27,6	14,9637681	0,0619	27,6	22,4275362	0,0929	27,6	33,6594203

σ	ζ
100	13,8782051
200	20,7079646
300	31,3392857

II / 3 Sol dense sans renforcement avec une teneur en eau de 7%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	15	0	25	25	0	25	26	20
50	17	0	50	28	0	50	30	31
75	19	-8	75	30	0	75	45	35
100	20	-3	100	30	-4	100	55	38
150	20	-50	150	31	-9	150	67	40
200	21	-80	200	31	-27	200	71	42
250	22	-108	250	32	-42	250	72	43
300	22	-128	300	33	-56	300	72	43
350	22	-145	350	33	-65	350	70	43
400	22	-160	400	34	-71	400	68	43
450	22	-173	450	35	-77	450	63	43
500	22	-185	500	36	-82	500	59	43
600	22	-212	600	36	-90	600	54	43
700	22	-231	700	37	-97	700	53	43
800	22	-242	800	37	-99	800	53	43
900	22	-249	900	37	-102	900	53	43
1000	20	-249	1000	38	-107	1000	53	43
1100	19	-249	1100	38	-110	1100	53	43
1200	19	-249	1200	38	-115	1200	54	42
1300	19	-249	1300	38	-117	1300	56	42
1400	19	-249	1400	38	-119	1400	60	42

Annexe.

0	Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0
0,0309	35,85	8,61924686	0,0516	35,85	14,3933054	0,0537	35,85	14,9790795
0,0351	35,7	9,83193277	0,0599	35,7	16,7787115	0,0619	35,7	17,3389356
0,0392	35,55	11,0267229	0,0619	35,55	17,4120956	0,0929	35,55	26,1322082
0,0413	35,4	11,6666667	0,0619	35,4	17,4858757	0,1136	35,4	32,0903955
0,0413	35,1	11,7663818	0,064	35,1	18,2336182	0,1384	35,1	39,4301994
0,0433	34,8	12,4425287	0,064	34,8	18,3908046	0,1466	34,8	42,1264368
0,0454	34,5	13,1594203	0,0661	34,5	19,1594203	0,1487	34,5	43,1014493
0,0454	34,2	13,2748538	0,0681	34,2	19,9122807	0,1487	34,2	43,4795322
0,0454	33,9	13,3923304	0,0681	33,9	20,0884956	0,1446	33,9	42,6548673
0,0454	33,6	13,5119048	0,0702	33,6	20,8928571	0,1404	33,6	41,7857143
0,0454	33,3	13,6336336	0,0723	33,3	21,7117117	0,1301	33,3	39,0690691
0,0454	33	13,7575758	0,0743	33	22,5151515	0,1219	33	36,9393939
0,0454	32,4	14,0123457	0,0743	32,4	22,9320988	0,1115	32,4	34,4135802
0,0454	31,8	14,2767296	0,0764	31,8	24,0251572	0,1095	31,8	34,4339623
0,0454	31,2	14,5512821	0,0764	31,2	24,4871795	0,1095	31,2	35,0961538
0,0454	30,6	14,8366013	0,0764	30,6	24,9673203	0,1095	30,6	35,7843137
0,0413	30	13,7666667	0,0785	30	26,1666667	0,1095	30	36,5
0,0392	29,4	13,3333333	0,0785	29,4	26,7006803	0,1095	29,4	37,244898
0,0392	28,8	13,6111111	0,0785	28,8	27,2569444	0,1115	28,8	38,7152778
0,0392	28,2	13,9007092	0,0785	28,2	27,8368794	0,1157	28,2	41,0283688
0,0392	27,6	14,2028986	0,0785	27,6	28,442029	0,1239	27,6	44,8913043

σ	ζ
100	14,8366013
200	28,442029
300	43,4795322

II / 4 Sol lache sans renforcement avec une teneur en eau de 3%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	7	32	25	11	55	25	15	55
50	8	62	50	14	89	50	17	90
75	9	85	75	15	112	75	20	115
100	10	110	100	17	133	100	20	137
150	10	144	150	19	161	150	23	155
200	11	164	200	20	179	200	25	172
250	12	180	250	22	192	250	26	185
300	13	191	300	23	201	300	30	225
350	13	201	350	24	210	350	34	245
400	14	201	400	25	214	400	35	250
450	14	203	450	25	214	450	37	252
500	15	203	500	26	214	500	39	253
600	16	203	600	27	214	600	40	253
700	16	195	700	28	215	700	41	247
800	16	185	800	28	209	800	41	242
900	16	178	900	28	200	900	40	242
1000	16	170	1000	28	195	1000	40	242
1100	16	167	1100	28	193	1100	40	241
1200	16	164	1200	28	193	1200	40	241
1300	16	164	1300	28	190	1300	40	241
1400	16	164	1400	28	186	1400	40	241

Annexe.

0	Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0
0,0144	35,85	4,0167364	0,0227	35,85	6,33193863	0,0309	35,85	8,61924686
0,0165	35,7	4,62184874	0,0289	35,7	8,0952381	0,0351	35,7	9,83193277
0,0185	35,55	5,20393812	0,0309	35,55	8,69198312	0,0413	35,55	11,6174402
0,0206	35,4	5,81920904	0,0351	35,4	9,91525424	0,0413	35,4	11,6666667
0,0206	35,1	5,86894587	0,0392	35,1	11,1680912	0,0475	35,1	13,5327635
0,0227	34,8	6,52298851	0,0413	34,8	11,8678161	0,0516	34,8	14,8275862
0,0247	34,5	7,15942029	0,0454	34,5	13,1594203	0,0537	34,5	15,5652174
0,0268	34,2	7,83625731	0,0475	34,2	13,8888889	0,0619	34,2	18,0994152
0,0268	33,9	7,90560472	0,0495	33,9	14,6017699	0,0702	33,9	20,7079646
0,0289	33,6	8,60119048	0,0516	33,6	15,3571429	0,0723	33,6	21,5178571
0,0289	33,3	8,67867868	0,0516	33,3	15,4954955	0,0764	33,3	22,9429429
0,0309	33	9,36363636	0,0537	33	16,2727273	0,0805	33	24,3939394
0,033	32,4	10,1851852	0,0557	32,4	17,191358	0,0826	32,4	25,4938272
0,033	31,8	10,3773585	0,0599	31,8	18,836478	0,0847	31,8	26,6352201
0,033	31,2	10,5769231	0,0599	31,2	19,1987179	0,0847	31,2	27,1474359
0,033	30,6	10,7843137	0,0599	30,6	19,5751634	0,0826	30,6	26,9934641
0,033	30	11	0,0599	30	19,9666667	0,0826	30	27,5333333
0,033	29,4	11,2244898	0,0599	29,4	20,3741497	0,0826	29,4	28,0952381
0,033	28,8	11,4583333	0,0599	28,8	20,7986111	0,0826	28,8	28,6805556
0,033	28,2	11,7021277	0,0599	28,2	21,2411348	0,0826	28,2	29,2907801
0,033	27,6	11,9565217	0,0599	27,6	21,7028986	0,0826	27,6	29,9275362

σ	ζ
100	11,9565217
200	21,7028986
300	27,1474359

II / 5 Sol lache sans renforcement avec une teneur en eau de 5%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	5	65	25	9	50	25	14	50
50	6	130	50	11	115	50	16	90
75	6	190	75	12	155	75	18	135
100	7	250	100	14	200	100	20	172
150	7	348	150	14	272	150	23	239
200	8	425	200	16	340	200	24	290
250	8	496	250	17	400	250	26	355
300	9	555	300	18	440	300	27	400
350	9	610	350	19	475	350	30	456
400	10	650	400	20	510	400	30	475
450	10	680	450	21	560	450	30	500
500	11	725	500	22	579	500	32	526
600	12	790	600	24	635	600	33	565
700	13	831	700	25	660	700	36	605
800	14	860	800	26	681	800	37	624
900	15	877	900	27	698	900	39	640
1000	15	896	1000	28	710	1000	41	655
1100	16	910	1100	28	719	1100	42	664
1200	16	916	1200	29	722	1200	43	665
1300	16	922	1300	29	724	1300	43	668
1400	16	926	1400	29	732	1400	42	700

Annexe.

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0103	35,85	2,87308229	0,0185	35,85	5,16039052	0,0289	35,85	8,06136681
0,0123	35,7	3,44537815	0,0227	35,7	6,35854342	0,033	35,7	9,24369748
0,0123	35,55	3,45991561	0,0247	35,55	6,94796062	0,0371	35,55	10,4360056
0,0144	35,4	4,06779661	0,0289	35,4	8,16384181	0,0413	35,4	11,6666667
0,0144	35,1	4,1025641	0,0289	35,1	8,23361823	0,0475	35,1	13,5327635
0,0165	34,8	4,74137931	0,033	34,8	9,48275862	0,0495	34,8	14,2241379
0,0165	34,5	4,7826087	0,0351	34,5	10,173913	0,0537	34,5	15,5652174
0,0185	34,2	5,40935673	0,0371	34,2	10,8479532	0,0557	34,2	16,2865497
0,0185	33,9	5,45722714	0,0392	33,9	11,5634218	0,0619	33,9	18,259587
0,0206	33,6	6,13095238	0,0413	33,6	12,2916667	0,0619	33,6	18,422619
0,0206	33,3	6,18618619	0,0433	33,3	13,003003	0,0619	33,3	18,5885886
0,0227	33	6,87878788	0,0454	33	13,7575758	0,0661	33	20,030303
0,0247	32,4	7,62345679	0,0495	32,4	15,2777778	0,0681	32,4	21,0185185
0,0268	31,8	8,42767296	0,0516	31,8	16,2264151	0,0743	31,8	23,3647799
0,0289	31,2	9,26282051	0,0537	31,2	17,2115385	0,0764	31,2	24,4871795
0,0309	30,6	10,0980392	0,0557	30,6	18,2026144	0,0805	30,6	26,3071895
0,0309	30	10,3	0,0599	30	19,9666667	0,0847	30	28,2333333
0,033	29,4	11,2244898	0,0599	29,4	20,3741497	0,0867	29,4	29,4897959
0,033	28,8	11,4583333	0,0599	28,8	20,7986111	0,0888	28,8	30,8333333
0,033	28,2	11,7021277	0,0599	28,2	21,2411348	0,0888	28,2	31,4893617
0,033	27,6	11,9565217	0,0599	27,6	21,7028986	0,0867	27,6	31,4130435

σ	ζ
100	11,9565217
200	21,7028986
300	31,4893617

II / 6 Sol lache sans renforcement avec une teneur en eau de 7%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	5	50	25	11	62	25	15	55
50	6	100	50	12	115	50	17	100
75	6	150	75	13	165	75	18	150
100	7	205	100	14	214	100	20	190
150	7	282	150	15	280	150	21	255
200	8	355	200	16	350	200	23	325
250	8	420	250	17	410	250	24	365
300	9	470	300	18	455	300	25	415
350	10	524	350	19	499	350	26	450
400	10	564	400	20	535	400	28	490
450	11	605	450	21	570	450	30	545
500	12	637	500	21	582	500	32	593
600	13	685	600	23	625	600	33	630
700	13	731	700	24	640	700	35	661
800	14	760	800	26	690	800	36	685
900	14	775	900	26	710	900	37	700
1000	15	797	1000	27	723	1000	38	714
1100	16	820	1100	28	733	1100	38	719
1200	16	823	1200	28	738	1200	38	719
1300	16	827	1300	28	742	1300	38	721
1400	16	830	1400	28	743	1400	38	721

Annexe.

0	Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0		Acorrigé 36	ζ 0
0,0103	35,85	2,87308229	0,0227	35,85	6,33193863	0,0309	35,85	8,61924686
0,0123	35,7	3,44537815	0,0247	35,7	6,91876751	0,0351	35,7	9,83193277
0,0123	35,55	3,45991561	0,0268	35,55	7,53867792	0,0371	35,55	10,4360056
0,0144	35,4	4,06779661	0,0289	35,4	8,16384181	0,0413	35,4	11,6666667
0,0144	35,1	4,1025641	0,0309	35,1	8,8034188	0,0433	35,1	12,3361823
0,0165	34,8	4,74137931	0,033	34,8	9,48275862	0,0475	34,8	13,6494253
0,0165	34,5	4,7826087	0,0351	34,5	10,173913	0,0495	34,5	14,3478261
0,0185	34,2	5,40935673	0,0371	34,2	10,8479532	0,0516	34,2	15,0877193
0,0206	33,9	6,07669617	0,0392	33,9	11,5634218	0,0537	33,9	15,840708
0,0206	33,6	6,13095238	0,0413	33,6	12,2916667	0,0599	33,6	17,827381
0,0227	33,3	6,81681682	0,0433	33,3	13,003003	0,0619	33,3	18,5885886
0,0247	33	7,48484848	0,0433	33	13,1212121	0,0661	33	20,030303
0,0268	32,4	8,27160494	0,0475	32,4	14,6604938	0,0681	32,4	21,0185185
0,0268	31,8	8,42767296	0,0495	31,8	15,5660377	0,0723	31,8	22,7358491
0,0289	31,2	9,26282051	0,0537	31,2	17,2115385	0,0743	31,2	23,8141026
0,0289	30,6	9,44444444	0,0537	30,6	17,5490196	0,0764	30,6	24,9673203
0,0309	30	10,3	0,0557	30	18,5666667	0,0785	30	26,1666667
0,033	29,4	11,2244898	0,0599	29,4	20,3741497	0,0785	29,4	26,7006803
0,033	28,8	11,4583333	0,0599	28,8	20,7986111	0,0785	28,8	27,2569444
0,033	28,2	11,7021277	0,0599	28,2	21,2411348	0,0785	28,2	27,8368794
0,033	27,6	11,9565217	0,0599	27,6	21,7028986	0,0785	27,6	28,442029

σ	ζ
100	11,9565217
200	21,7028986
300	28,442029

avec renforcement avec variation de la teneur en eau w

II / 1 Sol dense avec renforcement avec geotextil et une teneur en eau de 3%

H	100 kpa			200kpa			300kpa	
	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	6	0	25	14	1	25	18	15
50	9	0	50	15	2	50	22	24
75	10	0	75	16	2	75	24	24
100	12	0	100	17	2	100	26	24
150	15	-2	150	19	2	150	27	24
200	17	-5	200	21	2	200	29	24
250	19	-11	250	23	0	250	30	19
300	20	-20	300	26	-4	300	31	10
350	22	-27	350	28	-15	350	31	1
400	24	-35	400	29	-27	400	32	-10
450	26	-40	450	31	-40	450	33	-17
500	27	-50	500	32	-51	500	33	-24
600	31	-60	600	35	-76	600	34	-32
700	35	-82	700	38	-107	700	34	-51
800	39	-100	800	40	-132	800	37	-70
900	43	-135	900	44	-156	900	38	-90
1000	44	-150	1000	42	-174	1000	38	-106
1100	45	-171	1100	45	-190	1100	39	-132
1200	45	-195	1200	48	-208	1200	48	-150
1300	45	-232	1300	48	-225	1300	48	-172
1400	45	-251	1400	48	-252	1400	48	-182

Annexe.

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0123	35,85	3,43096234	0,0289	35,85	8,06136681	0,0371	35,85	10,348675
0,0185	35,7	5,18207283	0,0309	35,7	8,65546218	0,0454	35,7	12,7170868
0,0206	35,55	5,79465541	0,033	35,55	9,28270042	0,0495	35,55	13,9240506
0,0247	35,4	6,97740113	0,0351	35,4	9,91525424	0,0537	35,4	15,1694915
0,0309	35,1	8,8034188	0,0392	35,1	11,1680912	0,0557	35,1	15,8689459
0,0351	34,8	10,0862069	0,0433	34,8	12,4425287	0,0599	34,8	17,2126437
0,0392	34,5	11,3623188	0,0475	34,5	13,7681159	0,0619	34,5	17,942029
0,0413	34,2	12,0760234	0,0537	34,2	15,7017544	0,064	34,2	18,7134503
0,0454	33,9	13,3923304	0,0599	33,9	17,6696165	0,064	33,9	18,879056
0,0495	33,6	14,7321429	0,0599	33,6	17,827381	0,0661	33,6	19,672619
0,0537	33,3	16,1261261	0,064	33,3	19,2192192	0,0681	33,3	20,4504505
0,0557	33	16,8787879	0,0661	33	20,030303	0,0681	33	20,6363636
0,064	32,4	19,7530864	0,0723	32,4	22,3148148	0,0702	32,4	21,6666667
0,0723	31,8	22,7358491	0,0785	31,8	24,6855346	0,0702	31,8	22,0754717
0,0805	31,2	25,8012821	0,0826	31,2	26,474359	0,0764	31,2	24,4871795
0,0888	30,6	29,0196078	0,0909	30,6	29,7058824	0,0785	30,6	25,6535948
0,0909	30	30,3	0,0867	30	28,9	0,0785	30	26,1666667
0,0929	29,4	31,5986395	0,0929	29,4	31,5986395	0,0805	29,4	27,3809524
0,0929	28,8	32,2569444	0,0991	28,8	34,4097222	0,0991	28,8	34,4097222
0,0929	28,2	32,9432624	0,0991	28,2	35,141844	0,0991	28,2	35,141844
0,0929	27,6	33,6594203	0,0991	27,6	35,9057971	0,0991	27,6	35,9057971

σ	ζ
100	31,5986395
200	35,9057971
300	35,9057971

II / 2 Sol dense avec renforcement par getextil et une teneur en eau de 5%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	10	0	0	0
25	14	7	25	20	14	25	25	7
50	15	7	50	23	14	50	28	15
75	16	7	75	25	14	75	30	17
100	17	2	100	26	14	100	32	19
150	18	-18	150	27	14	150	34	21
200	18	-40	200	28	5	200	35	15
250	19	-57	250	29	-15	250	36	10
300	19	-71	300	30	-30	300	37	5
350	19	-86	350	30	-43	350	38	-13
400	19	-105	400	31	-59	400	39	-18
450	19	-120	450	31	-73	450	40	-24
500	19	-132	500	31	-85	500	41	-24
600	19	-152	600	31	-115	600	42	-24
700	19	-174	700	31	-135	700	43	-24
800	19	-195	800	31	-149	800	44	-24
900	19	-216	900	30	-160	900	45	-25
1000	19	-232	1000	30	-165	1000	45	-25
1100	19	-244	1100	30	-167	1100	48	-30
1200	19	-256	1200	30	-173	1200	48	-40
1300	19	-265	1300	30	-180	1300	45	-56
1400	19	-273	1400	30	-191	1400	42	-77

Annexe.

	Acorrige	ζ		Acorrige	ζ		Acorrige	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0289	35,85	8,06136681	0,0413	35,85	11,5202232	0,0516	35,85	14,3933054
0,0309	35,7	8,65546218	0,0475	35,7	13,3053221	0,0599	35,7	16,7787115
0,033	35,55	9,28270042	0,0516	35,55	14,5147679	0,0619	35,55	17,4120956
0,0351	35,4	9,91525424	0,0537	35,4	15,1694915	0,0661	35,4	18,6723164
0,0371	35,1	10,5698006	0,0557	35,1	15,8689459	0,0702	35,1	20
0,0371	34,8	10,6609195	0,0599	34,8	17,2126437	0,0723	34,8	20,7758621
0,0392	34,5	11,3623188	0,0599	34,5	17,3623188	0,0743	34,5	21,5362319
0,0392	34,2	11,4619883	0,0619	34,2	18,0994152	0,0764	34,2	22,3391813
0,0392	33,9	11,5634218	0,0619	33,9	18,259587	0,0785	33,9	23,1563422
0,0392	33,6	11,6666667	0,064	33,6	19,047619	0,0805	33,6	23,9583333
0,0392	33,3	11,7717718	0,064	33,3	19,2192192	0,0826	33,3	24,8048048
0,0392	33	11,8787879	0,064	33	19,3939394	0,0847	33	25,6666667
0,0392	32,4	12,0987654	0,064	32,4	19,7530864	0,0867	32,4	26,7592593
0,0392	31,8	12,327044	0,064	31,8	20,1257862	0,0888	31,8	27,9245283
0,0392	31,2	12,5641026	0,064	31,2	20,5128205	0,0909	31,2	29,1346154
0,0392	30,6	12,8104575	0,0619	30,6	20,2287582	0,0929	30,6	30,3594771
0,0392	30	13,0666667	0,0619	30	20,6333333	0,0929	30	30,9666667
0,0392	29,4	13,3333333	0,0619	29,4	21,0544218	0,0991	29,4	33,707483
0,0392	28,8	13,6111111	0,0619	28,8	21,4930556	0,0991	28,8	34,4097222
0,0392	28,2	13,9007092	0,0619	28,2	21,9503546	0,0929	28,2	32,9432624
0,0392	27,6	14,2028986	0,0619	27,6	22,4275362	0,0867	27,6	31,4130435

σ	ζ
100	14,2028986
200	20,1257862
300	34,4097222

II / 3 Sol dense avec renforcement par geotextil et une teneur en eau de 7%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	12	7	25	20	9	25	25	10
50	14	10	50	24	14	50	27	15
75	15	11	75	25	14	75	30	18
100	16	11	100	27	14	100	31	19
150	17	11	150	29	14	150	33	19
200	17	12	200	30	2	200	34	19
250	17	6	250	31	-20	250	35	19
300	17	-5	300	32	-37	300	36	19
350	17	-15	350	32	-52	350	38	19
400	17	-23	400	33	-70	400	39	19
450	17	-32	450	33	-85	450	40	15
500	17	-39	500	33	-102	500	41	10
600	17	-49	600	32	-132	600	42	1
700	17	-60	700	32	-146	700	44	-8
800	18	-69	800	32	-160	800	45	-16
900	18	-80	900	31	-174	900	46	-23
1000	18	-85	1000	31	-181	1000	47	-27
1100	18	-86	1100	31	-192	1100	47	-28
1200	18	-86	1200	31	-198	1200	46	-31
1300	18	-86	1300	31	-198	1300	46	-31
1400	18	-90	1400	31	-198	1400	46	-31

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0247	35,85	6,88981869	0,0413	35,85	11,5202232	0,0516	35,85	14,3933054
0,0289	35,7	8,0952381	0,0495	35,7	13,8655462	0,0557	35,7	15,6022409
0,0309	35,55	8,69198312	0,0516	35,55	14,5147679	0,0619	35,55	17,4120956
0,033	35,4	9,3220339	0,0557	35,4	15,7344633	0,064	35,4	18,079096
0,0351	35,1	10	0,0599	35,1	17,0655271	0,0681	35,1	19,4017094
0,0351	34,8	10,0862069	0,0619	34,8	17,7873563	0,0702	34,8	20,1724138
0,0351	34,5	10,173913	0,064	34,5	18,5507246	0,0723	34,5	20,9565217
0,0351	34,2	10,2631579	0,0661	34,2	19,3274854	0,0743	34,2	21,7251462
0,0351	33,9	10,3539823	0,0661	33,9	19,4985251	0,0785	33,9	23,1563422
0,0351	33,6	10,4464286	0,0681	33,6	20,2678571	0,0805	33,6	23,9583333
0,0351	33,3	10,5405405	0,0681	33,3	20,4504505	0,0826	33,3	24,8048048
0,0351	33	10,6363636	0,0681	33	20,6363636	0,0847	33	25,6666667
0,0351	32,4	10,8333333	0,0661	32,4	20,4012346	0,0867	32,4	26,7592593
0,0351	31,8	11,0377358	0,0661	31,8	20,7861635	0,0909	31,8	28,5849057
0,0371	31,2	11,8910256	0,0661	31,2	21,1858974	0,0929	31,2	29,775641
0,0371	30,6	12,124183	0,064	30,6	20,9150327	0,095	30,6	31,0457516
0,0371	30	12,3666667	0,064	30	21,3333333	0,0971	30	32,3666667
0,0371	29,4	12,6190476	0,064	29,4	21,7687075	0,0971	29,4	33,0272109
0,0371	28,8	12,8819444	0,064	28,8	22,2222222	0,095	28,8	32,9861111
0,0371	28,2	13,1560284	0,064	28,2	22,6950355	0,095	28,2	33,6879433
0,0371	27,6	13,442029	0,064	27,6	23,1884058	0,095	27,6	34,4202899

σ	ζ
100	13,442029
200	20,6363636
300	33,0272109

II / 4 Sol lache avec renforcement par geotextil et une teneur en eau de 3%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	7	24	25	7	40	25	13	50
50	8	34	50	9	78	50	16	92
75	9	41	75	11	119	75	18	115
100	10	49	100	12	140	100	19	140
150	10	62	150	14	185	150	21	165
200	11	70	200	15	221	200	22	182
250	12	75	250	16	250	250	23	195
300	12	80	300	17	270	300	24	210
350	12	80	350	18	290	350	25	221
400	12	80	400	19	304	400	25	227
450	13	81	450	20	314	450	25	231
500	13	82	500	20	323	500	25	231
600	13	82	600	21	330	600	25	235
700	14	82	700	22	342	700	25	239
800	14	82	800	23	352	800	25	243
900	15	82	900	23	360	900	26	246
1000	16	82	1000	24	362	1000	25	248
1100	16	82	1100	24	363	1100	25	248
1200	17	82	1200	24	369	1200	26	248
1300	17	82	1300	24	380	1300	26	248
1400	18	82	1400	24	394	1400	26	248

Annexe.

	Acorrige	ζ		Acorrige	ζ		Acorrige	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0144	35,85	4,0167364	0,0144	35,85	4,0167364	0,0268	35,85	7,47559275
0,0165	35,7	4,62184874	0,0185	35,7	5,18207283	0,033	35,7	9,24369748
0,0185	35,55	5,20393812	0,0227	35,55	6,38537271	0,0371	35,55	10,4360056
0,0206	35,4	5,81920904	0,0247	35,4	6,97740113	0,0392	35,4	11,0734463
0,0206	35,1	5,86894587	0,0289	35,1	8,23361823	0,0433	35,1	12,3361823
0,0227	34,8	6,52298851	0,0309	34,8	8,87931034	0,0454	34,8	13,045977
0,0247	34,5	7,15942029	0,033	34,5	9,56521739	0,0475	34,5	13,7681159
0,0247	34,2	7,22222222	0,0351	34,2	10,2631579	0,0495	34,2	14,4736842
0,0247	33,9	7,28613569	0,0371	33,9	10,9439528	0,0516	33,9	15,2212389
0,0247	33,6	7,35119048	0,0392	33,6	11,6666667	0,0516	33,6	15,3571429
0,0268	33,3	8,04804805	0,0413	33,3	12,4024024	0,0516	33,3	15,4954955
0,0268	33	8,12121212	0,0413	33	12,5151515	0,0516	33	15,6363636
0,0268	32,4	8,27160494	0,0433	32,4	13,3641975	0,0516	32,4	15,9259259
0,0289	31,8	9,08805031	0,0454	31,8	14,2767296	0,0516	31,8	16,2264151
0,0289	31,2	9,26282051	0,0475	31,2	15,224359	0,0516	31,2	16,5384615
0,0309	30,6	10,0980392	0,0475	30,6	15,5228758	0,0537	30,6	17,5490196
0,033	30	11	0,0495	30	16,5	0,0516	30	17,2
0,033	29,4	11,2244898	0,0495	29,4	16,8367347	0,0516	29,4	17,5510204
0,0351	28,8	12,1875	0,0495	28,8	17,1875	0,0537	28,8	18,6458333
0,0351	28,2	12,4468085	0,0495	28,2	17,5531915	0,0537	28,2	19,0425532
0,0371	27,6	13,442029	0,0495	27,6	17,9347826	0,0537	27,6	19,4565217

σ	ζ
100	13,442029
200	17,9347826
300	19,4565217

II / 5 Sol lache avec renforcement par geotextil et une teneur en eau de 5%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	5	30	25	8	50	25	11	57
50	6	50	50	9	80	50	15	105
75	7	62	75	10	115	75	16	152
100	7	72	100	13	140	100	18	200
150	8	85	150	14	175	150	20	250
200	8	107	200	16	220	200	22	286
250	9	120	250	17	250	250	25	325
300	9	131	300	18	280	300	26	352
350	10	140	350	20	306	350	28	380
400	10	151	400	21	330	400	29	400
450	10	160	450	21	347	450	31	450
500	10	172	500	23	357	500	33	480
600	11	185	600	24	375	600	35	520
700	11	206	700	25	400	700	36	550
800	11	224	800	25	420	800	38	570
900	13	233	900	26	429	900	40	590
1000	14	247	1000	26	431	1000	41	604
1100	14	250	1100	26	434	1100	42	615
1200	14	250	1200	26	435	1200	42	625
1300	14	249	1300	27	441	1300	43	632
1400	14	245	1400	27	447	1400	43	650

Annexe.

0	Acorrige	ζ		Acorrige	ζ		Acorrige	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0103	35,85	2,87308229	0,0165	35,85	4,60251046	0,0227	35,85	6,33193863
0,0123	35,7	3,44537815	0,0185	35,7	5,18207283	0,0309	35,7	8,65546218
0,0144	35,55	4,05063291	0,0206	35,55	5,79465541	0,033	35,55	9,28270042
0,0144	35,4	4,06779661	0,0268	35,4	7,57062147	0,0371	35,4	10,480226
0,0165	35,1	4,7008547	0,0289	35,1	8,23361823	0,0413	35,1	11,7663818
0,0165	34,8	4,74137931	0,033	34,8	9,48275862	0,0454	34,8	13,045977
0,0185	34,5	5,36231884	0,0351	34,5	10,173913	0,0516	34,5	14,9565217
0,0185	34,2	5,40935673	0,0371	34,2	10,8479532	0,0537	34,2	15,7017544
0,0206	33,9	6,07669617	0,0413	33,9	12,1828909	0,0599	33,9	17,6696165
0,0206	33,6	6,13095238	0,0433	33,6	12,8869048	0,0599	33,6	17,827381
0,0206	33,3	6,18618619	0,0433	33,3	13,003003	0,064	33,3	19,2192192
0,0206	33	6,24242424	0,0475	33	14,3939394	0,0681	33	20,6363636
0,0227	32,4	7,00617284	0,0495	32,4	15,2777778	0,0723	32,4	22,3148148
0,0227	31,8	7,13836478	0,0516	31,8	16,2264151	0,0743	31,8	23,3647799
0,0227	31,2	7,27564103	0,0516	31,2	16,5384615	0,0785	31,2	25,1602564
0,0268	30,6	8,75816993	0,0537	30,6	17,5490196	0,0826	30,6	26,9934641
0,0289	30	9,63333333	0,0537	30	17,9	0,0847	30	28,2333333
0,0289	29,4	9,82993197	0,0537	29,4	18,2653061	0,0867	29,4	29,4897959
0,0289	28,8	10,0347222	0,0537	28,8	18,6458333	0,0867	28,8	30,1041667
0,0289	28,2	10,248227	0,0557	28,2	19,751773	0,0888	28,2	31,4893617
0,0289	27,6	10,4710145	0,0557	27,6	20,1811594	0,0888	27,6	32,173913

σ	ζ
100	10,4710145
200	20,1811594
300	32,173913

II / 6 Sol lache avec renforcement et une teneur en eau de 7%

100 kpa			200kpa			300kpa		
H	Taneau	V	H	Taneau	V	H	Taneau	V
0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	6	19	25	7	61	25	10	180
50	7	27	50	10	105	50	14	230
75	8	31	75	12	135	75	16	270
100	8	32	100	13	153	100	18	315
150	9	32	150	15	185	150	20	360
200	10	36	200	17	210	200	22	395
250	12	37	250	18	227	250	24	423
300	14	38	300	20	240	300	25	445
350	16	39	350	22	250	350	27	463
400	18	40	400	24	260	400	30	470
450	20	40	450	26	265	450	31	500
500	21	40	500	28	271	500	32	510
600	23	40	600	30	276	600	35	528
700	25	40	700	35	280	700	40	550
800	27	40	800	38	290	800	44	572
900	28	40	900	42	298	900	48	590
1000	30	40	1000	43	305	1000	53	615
1100	31	40	1100	43	306	1100	55	635
1200	31	43	1200	45	306	1200	56	660
1300	32	57	1300	47	325	1300	60	690
1400	33	68	1400	48	340	1400	60	696

Annexe.

	Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ		Acorrigé	ζ
0	36	0		36	0		36	0
0,0123	35,85	3,43096234	0,0144	35,85	4,0167364	0,0206	35,85	5,74616457
0,0144	35,7	4,03361345	0,0206	35,7	5,77030812	0,0289	35,7	8,0952381
0,0165	35,55	4,64135021	0,0247	35,55	6,94796062	0,033	35,55	9,28270042
0,0165	35,4	4,66101695	0,0268	35,4	7,57062147	0,0371	35,4	10,480226
0,0185	35,1	5,27065527	0,0309	35,1	8,8034188	0,0413	35,1	11,7663818
0,0206	34,8	5,91954023	0,0351	34,8	10,0862069	0,0454	34,8	13,045977
0,0247	34,5	7,15942029	0,0371	34,5	10,7536232	0,0495	34,5	14,3478261
0,0289	34,2	8,4502924	0,0413	34,2	12,0760234	0,0516	34,2	15,0877193
0,033	33,9	9,73451327	0,0454	33,9	13,3923304	0,0557	33,9	16,4306785
0,0371	33,6	11,0416667	0,0495	33,6	14,7321429	0,0619	33,6	18,422619
0,0413	33,3	12,4024024	0,0537	33,3	16,1261261	0,064	33,3	19,2192192
0,0433	33	13,1212121	0,0599	33	18,1515152	0,0661	33	20,030303
0,0475	32,4	14,6604938	0,0619	32,4	19,1049383	0,0723	32,4	22,3148148
0,0516	31,8	16,2264151	0,0723	31,8	22,7358491	0,0826	31,8	25,9748428
0,0557	31,2	17,8525641	0,0785	31,2	25,1602564	0,0909	31,2	29,1346154
0,0599	30,6	19,5751634	0,0867	30,6	28,3333333	0,0991	30,6	32,3856209
0,0619	30	20,6333333	0,0888	30	29,6	0,1095	30	36,5
0,064	29,4	21,7687075	0,0888	29,4	30,2040816	0,1136	29,4	38,6394558
0,064	28,8	22,2222222	0,0929	28,8	32,2569444	0,1157	28,8	40,1736111
0,0661	28,2	23,4397163	0,0971	28,2	34,4326241	0,1239	28,2	43,9361702
0,0681	27,6	24,673913	0,0991	27,6	35,9057971	0,1239	27,6	44,8913043

σ	ζ
100	24,673913
200	35,9057971
300	44,8913043