

# ***Amélioration de la connaissance des caractéristiques géotechniques des sols grossiers***

## ***(Application aux sols de torrent)***

---

### *Rapport (1<sup>ère</sup> phase 1996-1997)*

---

***Pôle Grenoblois Risques Naturels***

***Conseil Général de l'Isère***

Septembre 1998

Jean-Marc TACNET - Philippe GOTTELAND

## **Sommaire**

<b>1</b>	<b>OBJECTIFS DE L'ETUDE .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>MATERIEL ET METHODES D'EXPERIMENTATION.....</b>	<b>4</b>
2.1	MESURE DE C ET $\phi$ PAR CISAILLEMENT DIRECT RECTILIGNE.....	5
2.2	MATERIAUX ETUDIES.....	6
2.2.1	Caractérisation physique du sol modèle.....	6
2.2.2	Géosynthétiques.....	7
<b>3</b>	<b>RESULTATS DES ESSAIS .....</b>	<b>9</b>
3.1	ESSAIS D'ETALONNAGE.....	10
3.2	ESSAIS DE FROTTEMENT SOL-SOL.....	10
3.3	ESSAIS DE FROTTEMENT SOL-GEOSYNTHETIQUES.....	11
3.4	ESSAIS COMPLEMENTAIRES.....	13
<b>4</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>14</b>

## **Table des figures**

Figure 1 : Barrage de sédimentation (également appelé plage de dépôt ).....	3
Figure 2 : principe de l'essai de cisaillement – détermination des caractéristiques c et $\phi$ .....	5
Figure 3 : Géotextile type Bidim Rock 200.....	7
Figure 4 : Géogrille Tensar SR 110.....	8
Figure 5 : effet de blocage du sol au contact de la géogrille (augmentation de la résistance globale au cisaillement).....	8
Figure 6 : Description des essais de cisaillement (sol/sol – sol/géosynthétique – sol/géogrille) .....	9

# 1 OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les techniques de protection contre les risques naturels en montagne sont largement basées sur la construction d'ouvrages ayant pour but d'agir soit sur la cause du phénomène (protection active) ou sur ses conséquences (protection passive). Ces dispositifs s'accompagnent généralement de mesures de prévention tels que le zonage des risques, la mise en place de dispositifs de suivi des phénomènes, les systèmes et plans d'alerte....



Figure 1 : Barrage de sédimentation (également appelé plage de dépôt)

Pour concevoir et réaliser ces ouvrages de génie civil, le concepteur est confronté à plusieurs difficultés liées à la définition des aléas pris en compte, aux conditions d'accès difficiles mais aussi à l'hétérogénéité géologique des sites d'implantation.

Les données géotechniques physiques et mécaniques des sols sont en effet essentielles dans la mise en œuvre des techniques de calcul allant de méthodes analytiques simples aux modèles numériques complexes ; Elles permettent de déterminer les actions de poussée des terres, d'analyser la stabilité des berges et de vérifier la stabilité des fondations de l'ouvrage.

Dans les formations de pente ou les lits torrentiels, et plus généralement, dans les sols rencontrés en montagne (éboulis, moraines), ces données géotechniques sont peu nombreuses et les méthodes de reconnaissance classiques permettant habituellement d'y accéder (essais in situ ou en laboratoire) peu adaptées aux granulométries observées. Ceci résulte notamment des difficultés liées au contexte de telles études :

- accès aux sites difficiles ;
- hétérogénéité et granulométrie très grossière des sols de torrent ;
- prélèvement d'échantillons de sols significatifs difficiles (volume, variabilité spatiale...) ;
- appareillages permettant les essais dans des sols grossiers inexistantes ou inutilisables pour les raisons ci-dessus ;

Malgré toutes ces inconnues, il n'en demeure pas moins qu'un certain nombre d'ouvrages continuent d'être construits en adoptant bien souvent des hypothèses de calcul identiques d'un ouvrage à l'autre sans réelle considération des différences géologiques entre les sites. Ainsi, dans le

cadre des ouvrages de correction torrentielle, les pratiques habituelles de dimensionnement sont basées sur l'adoption systématique de valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques et physiques des sols (cohésion nulle, angle de frottement  $\varphi=30^\circ$ , contrainte admissible en portance sous charge verticale centrée  $\sigma_{adm}= 0.2$  MPa, valeur unique du poids volumique des terres..)

Il convient de reconnaître que cette démarche a permis la réalisation d'un grand nombre d'ouvrages dans des conditions de sécurité satisfaisantes. Elle présente cependant les inconvénients suivants :

- fondements scientifiques et caractère universel de la méthode très contestables voire risqués dans certains sols de torrent ;
- surdimensionnement probable de nombreux ouvrages ;
- insuffisances techniques et réglementaires pour répondre aux problèmes de sécurité et de calcul soulevés par la mise en œuvre d'ouvrages de protection de type "plage de dépôt" (stabilité des digues, perméabilité...).

L'amélioration de la connaissance des caractéristiques géomécaniques des sols de torrent et plus généralement des sols grossiers constitue un axe de recherche particulièrement important. La démarche adoptée vise à progresser en termes scientifique mais aussi à appliquer ces résultats en terme d'ingénierie pour aboutir ,à terme, à :

- des méthodes de dimensionnement de nouvelles formes d'ouvrages de protection contre les risques naturels ;
- une utilisation économique des matériaux du site pour des travaux de confortement ou de remblai, le renforcement de sols par géosynthétiques apparaissant comme une possibilité intéressante.

Le rapport fait le bilan d'une campagne d'essais effectuée sur des sols grossiers provenant notamment du torrent du Manival sur la commune de Saint-Ismier (département de l'Isère). L'étude a permis :

- l'adaptation d'une boîte de cisaillement direct rectiligne carrée de section 1000 mm x 1000 mm pour permettre l'étude de sols de forte granulométrie (test de modifications techniques du boîtier, définition d'un protocole d'étude..) ;
- d'approcher les caractéristiques mécaniques de sols grossiers ;
- de comparer les résultats obtenus avec ceux obtenus sur d'autres boîtes de cisaillement plus petite (300x300mm) ;
- d'obtenir une première approche des lois de frottement à l'interface entre géotextiles et sols grossiers (adaptation de l'appareillage et mesure des caractéristiques mécaniques).

## 2 MATERIEL ET METHODES D'EXPERIMENTATION

En première approche, on peut considérer que les mécaniciens des sols ont beaucoup étudié des sols appartenant sans ambiguïté à chacune des deux catégories suivantes : les sols sans cohésion (purements frottants) tels que les sables calibrés et les sols cohérents tels que les argiles. **L'étude des sols réels comportant à la fois des éléments fins et grossiers tels que les sols de torrent posent un certain nombre de problèmes pratiques et théoriques de mesure.**

On admet classiquement que les sols à granulométrie grossière ont généralement des caractéristiques mécaniques caractérisées par des valeurs d'angle de frottement assez fortes ( de  $28^\circ$  à  $40^\circ$  ) et des valeurs de cohésion faibles. En fonction de la part des éléments fins dans le sol, la teneur en eau dans le sol, le niveau de contraintes appliquées, le comportement des sols grossiers peut évoluer entre les deux comportements : sols pulvérulents - sols fins. **Il est ainsi particulièrement intéressant d'étudier des échantillons de sols se rapprochant le plus possible du sol réel.**

## 2.1 Mesure de C et $\phi$ par cisaillement direct rectiligne

Pour les sols, la loi de Coulomb est la plus souvent utilisée pour définir la courbe intrinsèque du matériau. Elle s'écrit  $\tau' = C' + (\sigma - u) \cdot \tan \phi'$  avec  $C'$  : cohésion effective du sol,  $\phi'$  : angle de frottement interne effectif et  $u$  : pression interstitielle. L'essai de cisaillement direct permet d'obtenir les valeurs de  $C$  et  $\phi$ .

L'échantillon de sol est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent coulisser horizontalement l'une sur l'autre. Un dispositif de piston permet l'application d'une force  $N$  sur le sol. L'essai consiste à déplacer à vitesse constante l'une des demi-boîtes par rapport à l'autre en appliquant une force  $T$  mesurée à l'aide d'un dynamomètre. Les courbes effort de cisaillement  $T$  en fonction du déplacement de la boîte sont établies pour différentes valeurs de contraintes verticales.

Le Lirigm a développé sur ce principe une boîte de cisaillement carrée de 1000 mm de côté (voir annexe). Dans le cadre de l'utilisation de ce matériel, la force verticale est appliquée à l'aide de 4 vérins hydrauliques appuyés sur une plaque de répartition, avec une capacité maximale de 150 kN. La force horizontale est appliquée à l'aide d'un vérin à vis d'une capacité maximale de 500 kN. Le contrôle des forces appliquées se fait par lecture des pressions dans les circuits hydrauliques d'alimentation des vérins. Pour chaque vérin, la force appliquée s'exprime en théorie par : Force = (Surface utile du vérin) x (pression appliquée). Afin de vérifier que les différences dues à des défauts d'étanchéité, la déformation des conduits n'induisaient pas de trop grosses différences avec la formule théorique, les vérins utilisés ont été testés à l'aide d'une presse hydraulique (courbes d'étalonnage en annexe).

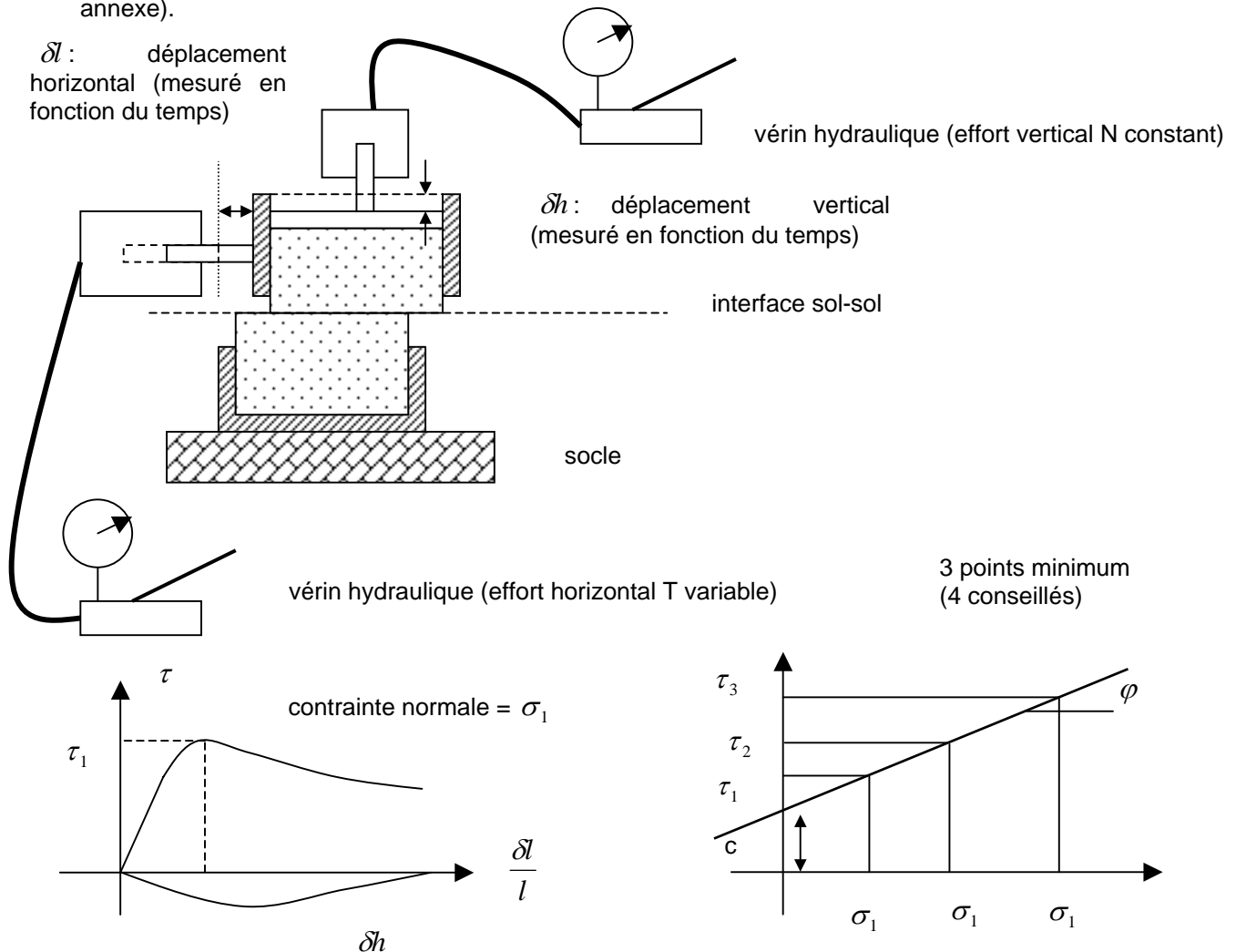


Figure 2 : principe de l'essai de cisaillement – détermination des caractéristiques  $c$  et  $\phi$

En plus des limitations inhérentes au principe de l'appareil de cisaillement direct, **l'étude des sols à forte granulométrie nécessite de mettre en œuvre des moyens humains et matériels considérables pour utiliser le dispositif par rapport à des essais classiques en laboratoire.** S'agissant d'un boîtier prototype conçu et utilisé avec des moyens financiers limités, la réalisation des essais à l'aide du boîtier de cisaillement 1000x1000 mm implique, à titre d'exemples, les sujétions suivantes :

- manipulation manuelle d'un volume de sol considérable (1430 kg de matériau par point d'une courbe devant comporter au moins 3 points soit 4,3 tonnes ou mieux 4 points soit 5,7 tonnes de sol par courbe) ;
- réalisation manuelle du compactage ( 5 x 150 x 33 kg soit 24,75 tonnes levées manuellement par essai ; 74,5 tonnes levées manuellement par courbes) ;
- nécessité de vérins hydrauliques de forte capacité mécanique de 150 kN et 500 kN permettant respectivement l'application des contraintes normales et tangentielles ;
- ajout de raidisseurs sur le boîtier pour obtenir une rigidité suffisante lors de l'application des efforts. Les déplacements observés ne doivent pas inclure la déformation du châssis.

## **2.2 Matériaux étudiés**

### **2.2.1 Caractérisation physique du sol modèle**

Le sol étudié provient du torrent du Manival sur la commune de Saint-Ismier dans le département de l'Isère. Le prélèvement a été effectué en amont de la plage de dépôt principale. Le mécanisme de dépôt des matériaux solides constituant le lit dans un torrent dépend de la variation des conditions hydrauliques. Il est donc important de choisir autant que possible une position du prélèvement dans le lit du torrent correspondant à une zone de dépôt stabilisée sur le profil en long. Le cas échéant, il est probable que la granulométrie du dépôt soit très différente en fonction de la profondeur.

Ce choix s'explique par la proximité du site, par son caractère relativement représentatif de la majorité des sols de torrents (classe C2B5 selon la classification G.T.R.<sup>1</sup> établie par le S.E.T.R.A.<sup>2</sup>). Ce matériau correspondant à des dépôts torrentiels est constitué de grains anguleux calcaires et marno-calcaires enrobés dans une matrice limono-argileuse. La granulométrie de ce matériau est très étendue et peut comprendre des blocs jusqu'à un diamètre de l'ordre de 1000 mm. En raison de la taille du boîtier utilisé, la fraction prélevée pour les besoins de l'étude correspond à la fraction 0/100 mm du matériau. Pour des raisons pratiques, l'écrêtage a eu lieu lors du prélèvement sur le site.

Les courbes granulométriques effectuées sur la fraction 0/200 mm du sol sont jointes en annexe. Les principales caractéristiques physiques du matériau sont les suivantes :

- Poids volumique sec du matériau ( $\gamma_d$ ) sur site voisin de 20,5 KN/m<sup>3</sup> ;

---

<sup>1</sup> Guide des Terrassements Routiers

<sup>2</sup> Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes – Ministère de l'Equipement

- La teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor ( $W_{OPN}$ ) déterminée sur différentes fractions du matériau<sup>3</sup> :

Fraction du sol étudiée	Matériel utilisé (norme de référence)	$W_{OPN}$	$\gamma_{dOPN}$
0/10 mm	Moule proctor $\phi 300$ mm <i>Cemagref Aix (NF P 94-093)</i>	7,8 %	2,17
0/20 mm	Moule proctor $\phi 300$ mm <i>Cemagref Aix (NF P 94-093)</i>	7,5%	2,17
0/50 mm	Moule proctor $\phi 400$ mm <i>CEMETE Aix (non normalisé)</i>	5,5%	2,29

- Répartition granulométrique :

fines ( $d < 80\mu\text{m}$ )	15 %
sables ( $80\mu\text{m} < d < 2\text{mm}$ )	15 %
graviers ( $2\text{mm} < d < 20\text{mm}$ )	45 %
cailloux ( $d > 20\text{mm}$ )	25%

La matrice fine enrobant les grains est de nature limono-argileuse :

- ⇒ VBS mesurée de 0,27 à 0,56 (début de sensibilité à l'eau) ;
- ⇒ Limite de liquidité  $W_l = 31,5$  ; indice de plasticité  $I_p = 11,5$

## 2.2.2 Géosynthétiques

Deux séries d'essais de frottement d'interface ont été effectués :

- sur un géosynthétique (essais Manival/Bidim Rock 200) ;
- sur une géogridde (essais Manival/Tensar SR 110) ;

Ces deux matériaux sont utilisés dans des applications de renforcement de sols (murs de soutènement, remblais sur sols compressibles...).

### 2.2.2.1 Géotextile "Bidim Rock 200"

Le "Bidim Rock" est un matériau géosynthétique composite, constitué de deux parties principales :

- une nappe support en non-tissé aiguilleté Bidim à base de filaments continus en polypropylène ;
- des câbles de renfort composés de fils de hauts modules en polyester.

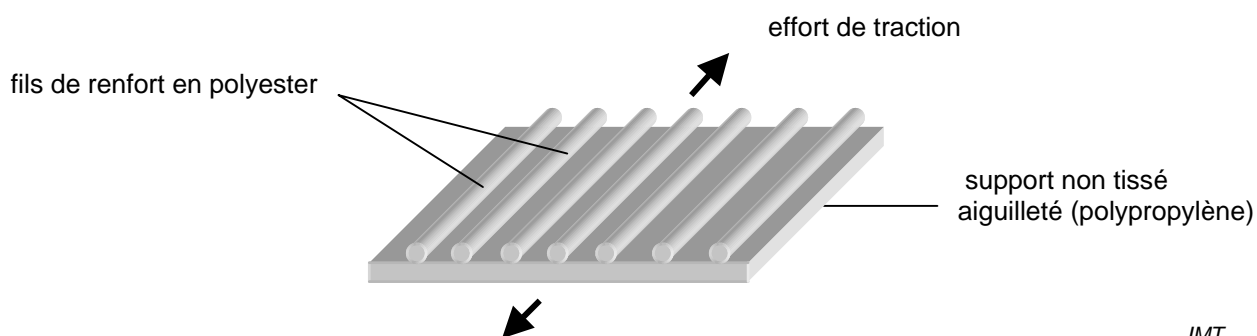


Figure 3 : Géotextile type Bidim Rock 200

JMT

<sup>3</sup> d'après J.C. Guichard – Cemagref Aix-en-Provence

Les principales caractéristiques mécaniques du "Bidim Rock 200" sont les suivantes :

- résistance à la traction de 200 kN/ml ;
- déformation à l'effort maximal de 11% dans le sens longitudinal (sens de la production), et de 60% dans le sens transversal ;
- masse surfacique de 580 g/m<sup>2</sup> ;
- épaisseur (sous 2 kPa) de 2.9 mm.

Ce géosynthétique combine une bonne résistance mécanique (renforts) et une fonction de filtre (nappe en tissu aiguilleté). Dans le cadre des essais effectués en présence de matériaux grossiers, ce géotextile a été rapidement endommagé. Après chaque essai, l'échantillon a du être remplacé (les fils de renfort en polyester se séparent de la trame non tissée lors du cisaillement du sol).

### 2.2.2.2 Géogrille "Tensar SR110"

La géogrille TENSAR SR 110 est une grille uniaxiale utilisée pour le renforcement d'ouvrages. La géogrille est placée dans le sol de manière à ce que le maillage transversal (perpendiculaire à la direction des sollicitations principales) soit un obstacle au glissement.

La géogrille Tensar SR 110 est composée de polyéthylène haute densité contenant un minimum de 2% de carbone, ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- résistance à la traction de 110 kN/ml ;
- maillage longitudinal de 150 mm sur 16 mm en transversal ; épaisseur de 5.5 à 5.9 mm ;
- déformation à l'effort maximal de 11.2% ;
- masse de 1.1 kg/m<sup>2</sup>.

Compte tenu des très faibles déformations imposées à la grille à chaque essai (entre 1 et 4 mm/m), et de sa bonne tenue aux endommagements causés par les gros éléments du sol, l'échantillon a pu être réutilisé plusieurs fois.

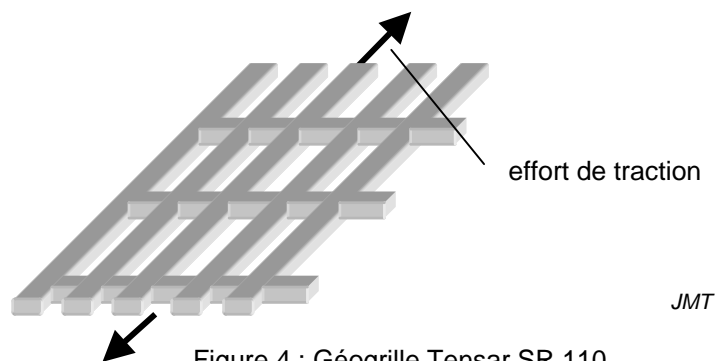


Figure 4 : Géogrille Tensar SR 110

La grille reprend l'effort, non seulement au niveau de la friction de surface (comme c'est le cas pour les géosynthétiques), mais aussi par interaction avec les grains du sol.

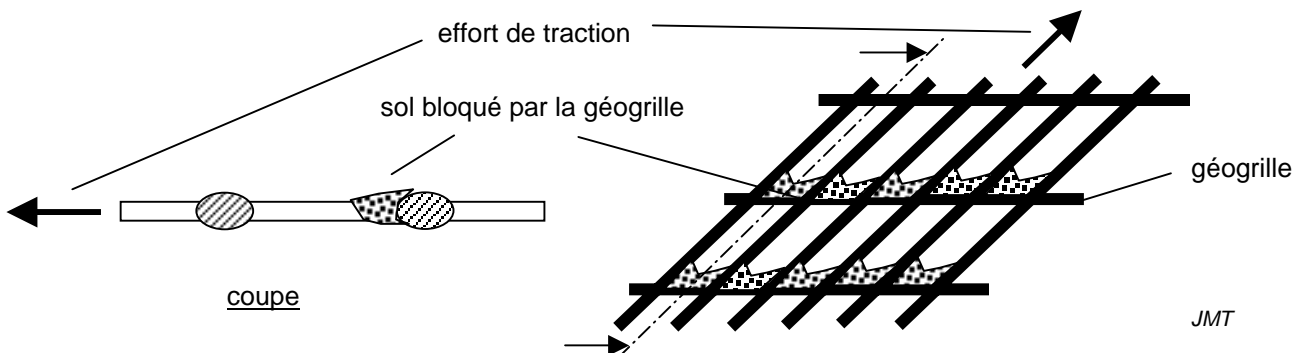


Figure 5 : effet de blocage du sol au contact de la géogrille (augmentation de la résistance globale au cisaillement)

### 3 RESULTATS DES ESSAIS

Les protocoles détaillés des différents essais de cisaillement sont décrits en annexe. Les résultats ci-dessous correspondent aux essais suivants :

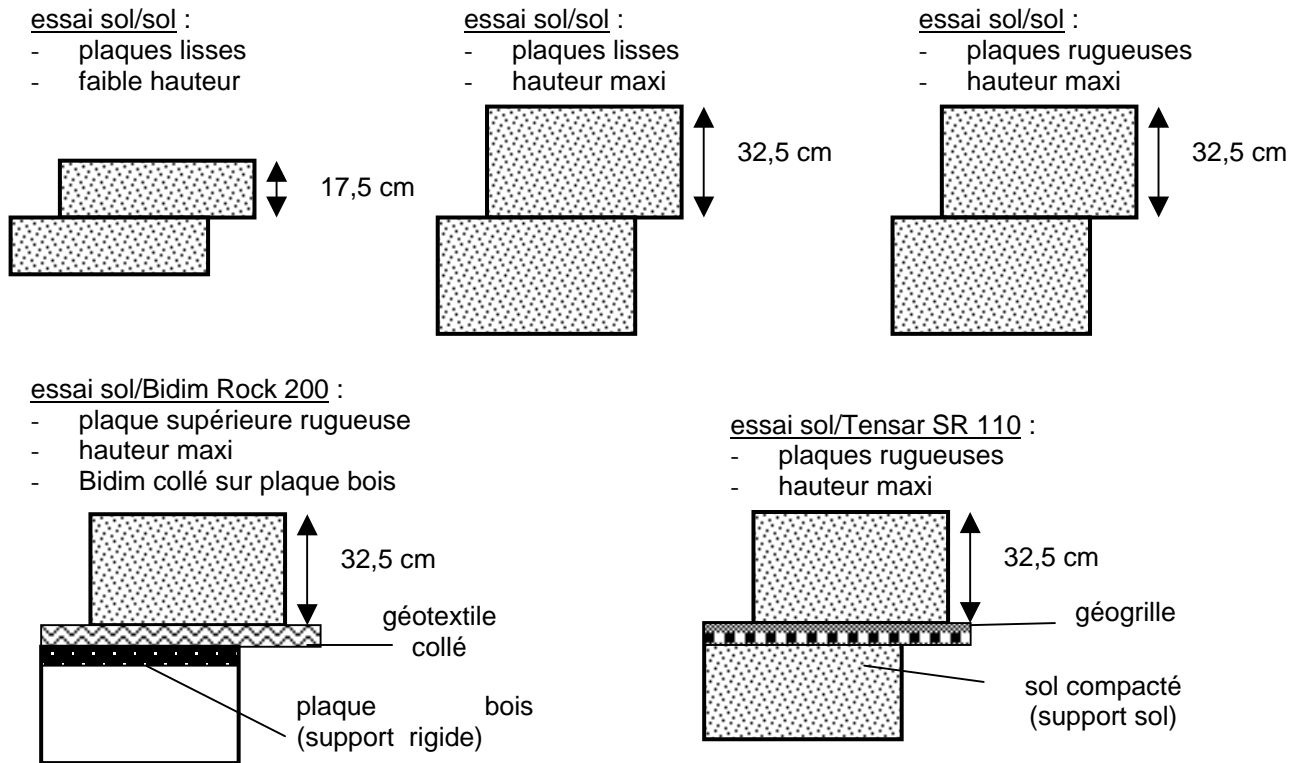


Figure 6 : Description des essais de cisaillement (sol/sol – sol/géosynthétique – sol/géogridde)

Les conditions de réalisation des essais de cisaillement (granulométrie de l'échantillon, compacité, teneur en eau, drainage de l'échantillon durant l'essai, vitesse de cisaillement, niveau de contraintes appliqué) et les courbes effort-déformation sont des informations au moins aussi importantes que les valeurs de résistance mécanique ( $c$  et  $\varphi$ ) obtenues. Ces valeurs résultent en effet souvent d'une interprétation notamment pour le choix de la déformation correspondant à la rupture en l'absence de pic visible sur les courbes obtenues. De plus, afin de coller au mieux aux conditions de mise en œuvre du matériau, les essais de cisaillement d'un sol devraient être conduits dans une gamme de contraintes aussi proches que celles correspondant à la réalité de la construction. Cet objectif est d'autant plus difficile à atteindre que la taille du boîtier augmente (les efforts normaux et tangentiels étant directement proportionnels à la surface du boîtier).

De même, l'interprétation des essais devrait être faite en tenant compte de l'évolution des caractéristiques du matériau (altération mécanique et modification de la granulométrie)

Les courbes jointes en annexe doivent être analysées en prenant en compte les limitations objectives liées aux capacités et conditions de réalisation des essais. Parmi les critiques qu'il est possible de faire, on peut citer les conditions de préparation des échantillons (matériau remanié, variation de teneur en eau d'un essai à l'autre...). Ces difficultés sont inévitables dans le cadre d'essais sur des matériaux d'aussi forte granulométrie. Dans un domaine où les résultats restent très influencés par l'appareillage et les conditions de réalisation des essais, les résultats obtenus constituent une base de comparaison avec les essais d'interface sol grossier - géosynthétique.

### 3.1 Essais d'étalonnage

Les différents essais d'étalonnage et résultats mécaniques effectués sont les suivants :

- ⇒ Essais d'étalonnage des vérins (courbe pression-effort)<sup>4</sup>
- ⇒ Essais d'étalonnage de la boîte à vide (mesure des frottements internes)<sup>5</sup>
- ⇒ Essais de cisaillement sable/sable (courbes complètes en annexe)<sup>6</sup>

Essais de cisaillement <b>sable (Leucate)/sable</b> sur (contraintes normales 25 <i>kPa</i> - 50 <i>kPa</i> - 75 <i>kPa</i> )		
série n°1	boîtier 1000 x 1000 mm (Lirigm)	<b>C = 0</b> ; $\varphi_{pic} = 42,4^\circ$
série n°2	boîtier 300 x300 mm (Lirigm)	<b>C = 0</b> ; $\varphi_{pic} = 41^\circ$
série n°3	boîtier 100 x100 mm (Lirigm)	<b>C = 0</b> ; $\varphi_{pic} = 37^\circ$
<b>Interprétation :</b> L'angle de frottement interne mesuré diminue avec la taille du boîtier utilisé. On observe peu de différence entre les résultats du boîtier 300x300mm et la boîte 1000x1000mm (3,5%)		

### 3.2 Essais de frottement sol-sol

Pour un grand nombre d'essais, malgré un compactage soigné du sol, il n'a pas été observé de pics sur les courbes efforts-déplacements. L'interprétation des résultats et le tracé des droites de Coulomb peut être discuté. Aussi les tableaux ci-dessous donnent les valeurs des paramètres mécaniques *c* et  $\varphi$  avec différentes hypothèses de déformation (5% - 7,5% - 10 %). Certains tableaux de résultats font apparaître les valeurs des paramètres mécaniques avec (résultats dits "corrigés") ou sans correction du frottement à vide de la boîte 1000x1000mm (résultats dits "bruts").

Les essais de cisaillement sol/sol réalisés sont les suivants :

Influence de l'épaisseur de l'échantillon sur la boîte 1000 x 1000 mm - Essai de cisaillement direct <b>sol/sol (Manival)</b> - (2 essais avec fraction 0/100mm du sol, plaque supérieure lisse, contrainte normale 50 <i>kPa</i> )		
essai n°1	épaisseur totale de sol de 35 cm	cf. courbes en annexe
essai n°2	épaisseur totale de sol de 65 cm	cf. courbes en annexe
<b>Interprétation :</b> L'effort tangentiel mobilisé est supérieur avec une hauteur de sol cisailé plus importante. Le rapport entre la hauteur du sol cisailé et la taille maximale des plus gros éléments contenus dans l'échantillon intervient probablement (dans le même esprit que le respect d'un rapport Largeur de la boîte/ $D_{max}$ échantillon > 15).		

<sup>4</sup> essais réalisés à l'IUT1 Génie civil Grenoble

<sup>5</sup> essais effectués antérieurement par le Lirigm

<sup>6</sup> essais effectués antérieurement par le Lirigm

Essais de cisaillement complet <b>sol/sol (Manival)</b> sur boîtier 1000 x 1000 mm du Lirigm (3 points, épaisseur totale du sol 65 cm, fraction 0/100mm du sol, contraintes normales (25 kPa ; 50 kPa ; 75 kPa ; V = 3mm/mn )				
Essais	Configuration boîtier	Déplacement	Paramètres mécaniques bruts	Paramètres mécaniques corrigés <sup>7</sup>
série n°1	plaques lisses	U = 50mm ( $\Delta U/U=5\%$ )	C = 48,4 kPa $\varphi = 44,9^\circ$	C = 49,2 kPa $\varphi = 41,1^\circ$
		U = 100mm ( $\Delta U/U=10\%$ )	C = 57 kPa $\varphi = 55,4^\circ$	C = 55,7 kPa $\varphi = 54^\circ$
		U = 150mm ( $\Delta U/U=15\%$ )	C = 60 kPa $\varphi = 62,7^\circ$	C = 60,4 kPa $\varphi = 60,9^\circ$
série n°2	plaques rugueuses	U = 50mm ( $\Delta U/U=5\%$ )	C = 45 kPa $\varphi = 58,9^\circ$	C = 44,4 kPa $\varphi = 57,7^\circ$
		U = 75mm ( $\Delta U/U=7,5\%$ )	C = 40,9 kPa $\varphi = 65,6^\circ$	C = 39,4 kPa $\varphi = 61,7^\circ$
		U = 100mm ( $\Delta U/U=10\%$ )	C = 43 kPa $\varphi = 64^\circ$	C = 41,7 kPa $\varphi = 63,6^\circ$
<p><b>Interprétation :</b>            Les angles de frottement interne avec les plaques rugueuses sont plus importants qu'avec les plaques lisses. Ceci peut s'expliquer par une mobilisation d'une plus grande zone de sol dans la demi-boîte supérieure avec une répartition de l'effort de la contrainte tangentielle plus uniforme le long de la surface de cisaillement ;            Des différences sur les valeurs de cohésion de l'ordre de 5 kPa ne sont pas significatives.</p>				

### 3.3 Essais de frottement sol-géosynthétiques

Les essais suivants ont été exploités dans le cadre de ce travail :

Comparaison d'essais de cisaillement direct <b>sable (Leucate)/géomembrane (PEHD lisse)</b> sur la boîte 1000 x 1000 mm et sur la boîte 300x300 mm (contraintes normales 50 kPa - 100 kPa - 150 kPa) <sup>8</sup>				
série n°1	boîtier 1000x1000mm (Lirigm)	<b>C ≈ 0</b>	<b><math>\varphi = 27,1^\circ</math></b>	-36% par rapport au cisaillement sable/sable
série n°2	boîtier 300x300mm (Lirigm)	<b>C ≈ 0</b>	<b><math>\varphi = 21^\circ</math></b>	-48% par rapport au cisaillement sable/sable
<p><b>Interprétation :</b> Ecart beaucoup plus important entre les résultats de la boîte 300x300mm et 1000x1000mm (29% contre 3,5% dans le cas du cisaillement sable/sable).            La réduction de la valeur de <math>\varphi</math> par rapport aux essais de cisaillement sable/sable est inférieure pour la boîte 1000x1000m (-36% au lieu de -48% pour la boîte 300x300mm)</p>				

<sup>7</sup> avec prise en compte du frottement interne du boîtier

<sup>8</sup> Essais réalisés au Lirigm

Les essais suivants ont été réalisés spécifiquement :

Essai de cisaillement direct <b>sol/ géotextile Bidim Rock 200</b> (collé sur une plaque bois) sur la boîte 1000 x 1000 mm (3 points, essais avec une épaisseur totale de sol de 32,5 cm de sol au dessous d'une plaque lisse, fraction 0/100mm du sol, contraintes normales 25 kPa ; 50 kPa ; 75 kPa ; V= 4mm/mn)			
Essais	Configuration boîte	Déplacement	Paramètres mécaniques corrigés <sup>9</sup>
série n°1	plaques lisses	U = 20mm ( $\Delta U/U=2\%$ )	C = 22,2 kPa $\varphi = 27,5^\circ$
		U = 50mm ( $\Delta U/U=5\%$ )	C = 23,4 kPa $\varphi = 31,4^\circ$
		U = 95mm ( $\Delta U/U=9,5\%$ )	C = 22,4 kPa $\varphi = 37^\circ$
<b>Interprétation :</b> Les valeurs de paramètres mécaniques relatifs au comportement de l'interface sol-géotextile sont très inférieurs aux valeurs correspondant au frottement sol-sol. Pour U=50mm, réduction de 51% de la valeur de cohésion et de 30% de l'angle de frottement interne.			

Essai de cisaillement direct <b>sol/géogridde Tensar SR110</b> (posé sur sol compacté) sur la boîte 1000 x 1000 mm (3 points, essais avec une épaisseur totale de sol de 32,5 cm, fraction 0/100mm du sol, plaque supérieure lisse, contraintes normales 25 kPa ; 50 kPa ; 75 kPa ; V= 4mm/mn)			
Essais	Configuration boîte	Déplacement	Paramètres mécaniques corrigés <sup>10</sup>
série n°1	plaques lisses	U = 20mm ( $\Delta U/U=2\%$ )	C = 40 kPa $\varphi = 17,8^\circ$
		U = 50mm ( $\Delta U/U=5\%$ )	C = 54,8 kPa $\varphi = 27,3^\circ$
		U = 90mm ( $\Delta U/U=9\%$ )	C = 64,8kPa $\varphi = 30,8^\circ$
<b>Interprétation :</b> La valeur de l'angle de frottement interne relatif au comportement de l'interface sol-géogridde est très inférieure aux valeurs correspondant au frottement sol-sol. Pour U=50mm, réduction de 33% de $\varphi$ . La valeur de la cohésion est par contre supérieure aux valeurs obtenues pour le frottement sol/sol. Ceci peut s'expliquer par l'effet de blocage du sol dans les mailles de la géogridde.			

<b>Comparaison</b> des essais de cisaillement <b>sol/sol</b> et <b>sol/géosynthétique</b> ou géogridde (plaques lisses, fraction 0/100 mm du sol, U=50 mm , essais 25-50-75kPa)		
<b>Sol - Sol (Manival)</b>	<b>Sol (Manival) -géosynthétique (Bidim Rock 200)</b>	<b>Sol (Manival)-géogridde (Tensar SR 110)</b>
C = 49,2 kPa $\varphi = 41,1^\circ$	C = 23,4 kPa (-52%) $\varphi = 31,4^\circ$ (-23%)	C = 54,8 kPa (+11%) $\varphi = 27,3^\circ$ (-33%)
<b>Interprétation :</b> La réduction mesurée de la valeur de $\varphi$ est moins importante (-23% pour le géosynthétique ; -33% pour la géogridde) que dans le cas d'une comparaison entre des essais sable/sable et sable/GmPEHD lisse (-36%). La géogridde entraîne un surplus de cohésion (+11%) alors que le géosynthétique entraîne une diminution de -52%. Ces résultats doivent être analysés avec prudence en raison des conditions expérimentales de support (sol ou plaque) différentes entre les deux série d'essais.		

<sup>9</sup> avec prise en compte du frottement interne du boîtier

<sup>10</sup> avec prise en compte du frottement interne du boîtier

<b>Comparaison</b> des essais de cisaillement <b>sol/géosynthétique</b> et sol/géogridde (plaques lisses, fraction 0/100 mm du sol, essais 25-50-75kPa)			
<b>Sol (Manival) -géosynthétique (Bidim Rock 200)</b>		<b>Sol (Manival)-géogridde (Tensar SR 110)</b>	
Déplacement	Paramètres mécaniques corrigés <sup>11</sup>	Déplacement	Paramètres mécaniques corrigés <sup>12</sup>
U = 20mm ( $\Delta U/U=2\%$ )	C = 22,2 kPa $\varphi = 27,5^\circ$	U = 20mm ( $\Delta U/U=2\%$ )	C = 40 kPa (+80%) $\varphi = 17,8^\circ$ (-35%)
U = 50mm ( $\Delta U/U=5\%$ )	C = 23,4 kPa $\varphi = 31,4^\circ$	U = 50mm ( $\Delta U/U=5\%$ )	C = 54,8 kPa (+134%) $\varphi = 27,3^\circ$ (-13%)
U = 95mm ( $\Delta U/U=9,5\%$ )	C = 22,4 kPa $\varphi = 37^\circ$	U = 90mm ( $\Delta U/U=9\%$ )	C = 64,8kPa (+189%) $\varphi = 30,8^\circ$ (-16%)
<b>Interprétation :</b> La géogridde mobilise plus de cohésion et moins de frottement.			

### 3.4 Essais complémentaires

Ces différentes séries d'essais doivent être complétées par d'autres expériences permettant de mesurer l'influence de la compacité, de l'écrêtage et de la teneur en eau. Les essais d'interface avec les matériaux utilisés (géosynthétique et géogridde) seront complétés dans la phase ultérieure sur le matériau type sable de Leucate, puis sur le matériau Manival en faisant varier le type de support (Bidim Rock entre deux couches de sol , essai avec collage de la géogridde sur un support rigide) en plus des paramètres précédemment cités.

<sup>11</sup> avec prise en compte du frottement interne du boîtier

<sup>12</sup> avec prise en compte du frottement interne du boîtier

## 4 CONCLUSION

**Cette étude a confirmé les difficultés opératoires liées à la caractérisation du comportement mécanique des sols grossiers** en particulier à l'aide de boîtes de cisaillement direct de grande dimension. Contrairement aux essais sur des appareillages de petite taille, il est délicat d'adopter une démarche expérimentale totalement rigoureuse, les essais ne sont notamment rarement répétés. En raison de ces difficultés opératoires, un certain nombre d'aspects sont perfectibles et n'ont pu être étudiés dans cette première phase du travail. On peut notamment citer l'influence de l'écrêtage du matériau sur la valeur des paramètres mécaniques (étude en cours). Les adaptations réalisées sur l'appareillage permettent cependant d'envisager de compléter les séries d'essais effectuées.

Dans le cadre de ce travail, **l'étude du comportement d'interface entre le sol et une inclusion géosynthétique est l'un des aspects les plus notables**. Les caractéristiques mécaniques mesurées au niveau d'un frottement sol-sol ont pu être comparées avec des essais d'interface. Il est intéressant de noter la chute des valeurs des caractéristiques observées à l'interface.

Les **résultats contribuent à l'amélioration des connaissances du comportement mécanique des sols grossiers**. Dans le cadre d'une approche plus pratique et opérationnelle pour les concepteurs, ils constituent également la **base indispensable d'une méthodologie de dimensionnement d'ouvrages**. A la suite de cette première étude, cet aspect constitue, en plus des compléments d'essais, un axe de développement logique et attendu par les maîtres d'œuvre chargés de la gestion des risques naturels en montagne. Les travaux en cours dans la seconde phase vont dans ce sens.

Enfin, les applications de ce travail dépassent le strict domaine des barrages de correction torrentielle. **L'utilisation de matériaux hétérogènes à forte granulométrie** prélevés sur les sites **présente un intérêt pour tous les ouvrages géotechniques** construits en particulier en zone de montagne, qu'il s'agisse d'ouvrages de protection contre les risques naturels en général (digues pare-blocs, ouvrages paravalanches) ou bien de travaux de remblais et de soutènements routiers.

Département équipements  
pour l'eau et l'environnement  
Division Erosion Torrentielle Neige Avalanches

# ***Amélioration de la connaissance des caractéristiques géotechniques des sols grossiers***

***(Application aux sols de torrent)***

---

## *Annexes*

---

***Pôle Grenoblois Risques Naturels***

***Conseil Général de l'Isère***

Septembre 1998

Jean-Marc TACNET - Philippe GOTTELAND

## **Sommaire**

<b>1</b>	<b>ANNEXE : CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SOL MODELE.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>ANNEXE : DESCRIPTION DU BOITIER DE CISAILLEMENT 1000X1000 MM (LIRIGM) – ADAPTATIONS TECHNOLOGIQUES .....</b>	<b>5</b>
2.1	CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES ET CAPACITES INITIALES.....	5
2.2	BILAN DE LA MISE AU POINT DU MATERIEL .....	8
2.2.1	<i>Adoption d'un vérin de forte capacité - Renforcement du boîtier de cisaillement.....</i>	<i>8</i>
2.2.2	<i>Calage vertical de la plaque de répartition - rugosité de la plaque de répartition.....</i>	<i>9</i>
<b>3</b>	<b>ANNEXE : PROTOCOLE EXPERIMENTAL D'ESSAIS DE FROTTEMENT SOL-SOL .....</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>ANNEXE : PROTOCOLE EXPERIMENTAL D'ESSAIS D'INTERFACE.....</b>	<b>12</b>
4.1	ESSAIS SOL-GEOSYNTHETIQUE.....	12
4.2	ESSAIS SOL-GEOGRILLE.....	13
<b>5</b>	<b>ANNEXE : RESULTATS D'ESSAIS .....</b>	<b>14</b>
5.1	ETALONNAGE DES VERINS .....	14
5.2	FROTTEMENT PARASITE INTER-BOITERS .....	16
5.3	ESSAIS D'ETALONNAGE CISAILLEMENT SABLE .....	17
5.4	ESSAIS D'ETALONNAGE CISAILLEMENT SABLE-GEOMEMBRANE .....	18
5.5	ESSAIS DE CISAILLEMENT SOL-SOL (MANIVAL) .....	19
5.5.1	<i>Essais plaques inférieures et supérieures lisses.....</i>	<i>19</i>
5.5.2	<i>Essais plaques inférieures et supérieures rugueuses .....</i>	<i>21</i>
5.6	ESSAIS D'INTERFACE SOL (MANIVAL)/ GEOTEXTILE (BIDIM ROCK 200) .....	24
5.7	ESSAIS D'INTERFACE SOL (MANIVAL)/ GEOGRILLE (TENSAR SR 110) .....	26

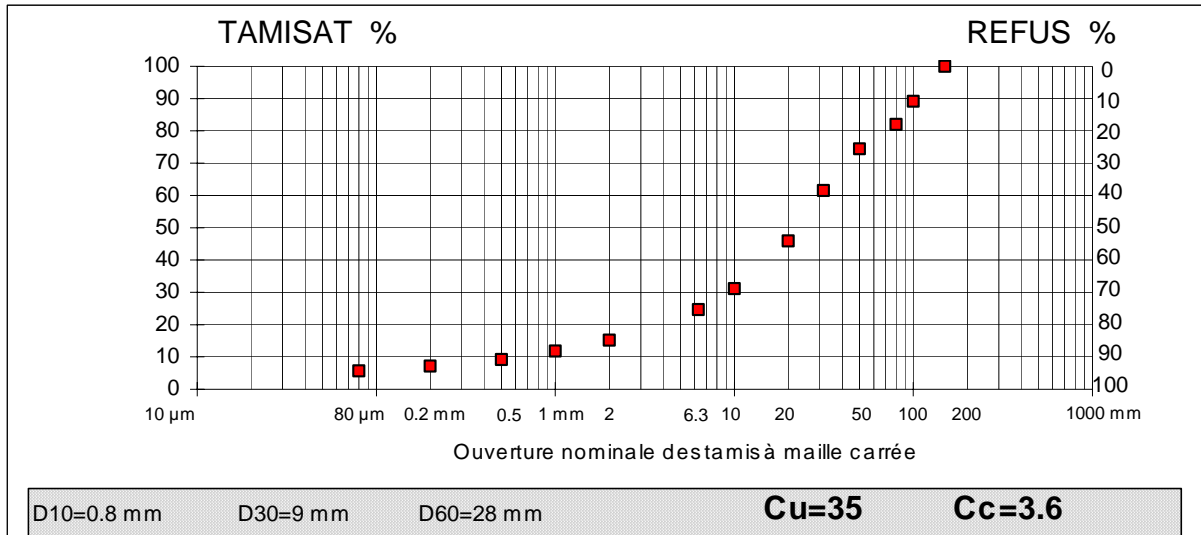
## **Table des figures**

Figure 1 : Schéma de principe du boîtier de cisaillement 1000 x 1000 mm	6
Figure 2 : Augmentation de la rugosité de la plaque de répartition supérieure – surface réduite de calcul de la contrainte normale en cours d'essai	7
Figure 3 : Boîtier de cisaillement 1000 x 1000 mm - Modifications apportées au bâti	8
Figure 4 : défaut de répartition de l'effort de cisaillement	9
Figure 5 : basculement de la plaque supérieure en cours d'essai	9
Figure 6 : Essai de cisaillement sol/sol - principe de compactage du sol	11
Figure 7 : Essai d'interface sol/géosynthétique (ou géogrille) – principe de compactage	12
Figure 8 : Essai d'interface –principe de fixation du géosynthétique	12
Figure 9 : Essai d'interface –principe de fixation de la géogrille	13

## **Table des planches**

Planche 1 : courbe granulométrique du matériau prelevé dans le torrent du Manival	4
Planche 2 : Courbe d'étalonnage des vérins 20kN d'application de l'effort normal	14
Planche 3 : Courbes d'étalonnage du vérin 500 kN d'application de l'effort de cisaillement	15
Planche 4 : Frottement à vide – boîtier supérieur/inférieur	16
Planche 5 : Comparaison de résultats d'essais de cisaillement (matériau sable de Leucate) avec des boîtes de cisaillement de différentes tailles	17
Planche 6 : Comparaison de résultats d'essais de cisaillement d'interface (matériau sable de Leucate) et géomembrane PEHD lisse avec des boîtes de cisaillement de différentes tailles	18
Planche 7 : Droites de Coulomb – Cisaillement sol/sol (Matériau Manival) – plaques lisses	19
Planche 8 : variations volumiques – Essai de cisaillement sol/sol (Manival) – 25 kPa – 50 kPa – plaques lisses	20
Planche 9 : Droites de Coulomb – Cisaillement sol/sol (Matériau Manival) – plaques lisses	21
Planche 10 : Courbes efforts-déplacements - Cisaillement sol/sol (Matériau Manival) – Influence de la rugosité des plaques et de l'épaisseur de l'échantillon	22
Planche 11 : Courbes efforts-déplacements - Cisaillement sol/sol (Matériau Manival) – Influence de la rugosité des plaques ( hauteur échantillon 0,65 m)	22
Planche 12 : variations volumiques – essai de cisaillement sol/sol – (75 kpa) – plaques rugueuses	23
Planche 13 : Droites de Coulomb -Essai d'interface sol (Manival)/géotextile(Bidim Rock) – 25-50-75 kPa	25
Planche 14 : Courbes efforts-déplacements - Essai d'interface sol (Manival)/géotextile(Bidim Rock) – (25-50-75 kPa)	25
Planche 15 : variation volumique – essai d'interface sol(Manival)/géotextile(BidimRock 200) – 25kPa – plaques lisses	25
Planche 16 : Droites de Coulomb – Essai d'interface sol (Manival)/géogrille (Tensar SR 110) – 25-50-75kPa – plaques lisses	26
Planche 17 : Courbes efforts-déplacements – Essai d'interface sol(Manival)/géogrille(Tensar SR 110) –25-50-75 kPa – plaques lisses	27
Planche 18 : variation volumique – essai d'interface sol(Manival)/ géogrille(Tensar SR 110) – 25-50-75 kPa – plaques lisses	28

# 1 ANNEXE : CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SOL MODELE



## ESSAI AU BLEU

Prise d'essai(g)	92.5	52.46
W	54.00%	23.00%
Ms (g)	60.06	42.65
Vol Bleu (cm <sup>3</sup> )	95	65
C(0/2mm)	20%	20%
	0.32	0.31
VBS	0.32	

## TENEUR EN EAU W(0/20)

Masse humide (g)	
Masse sèche (g)	
W(0/20)	13.50

## CLASSIFICATION GTR-USCS-LCPC

GTR:	C1B4
USCS, LCPC:	GW-GM

Planche 1 : courbe granulométrique du matériau prelevé dans le torrent du Manival

## **2 ANNEXE : DESCRIPTION DU BOITIER DE CISAILLEMENT 1000X1000 MM (LIRIGM) – ADAPTATIONS TECHNOLOGIQUES**

La détermination des caractéristiques mécaniques des sols grossiers nécessite d'adopter des méthodologies d'identification particulières et l'emploi d'appareils de mesures de taille exceptionnelle (boîtes de cisaillement de grande dimension). Le L.G.M. a développé un bâti de cisaillement de grande dimension permettant de déterminer les caractéristiques mécaniques sur site et en laboratoire. Le matériel a été développé initialement pour tester des matériaux hétérogènes de cohésion et de poids volumique faibles (déchets ménagers).

### **2.1 Caractéristiques dimensionnelles et capacités initiales**

Le boîtier de cisaillement conçu par Ph. Gotteland du laboratoire de Géologie et de Mécanique de l'Université Joseph Fourier correspond à la figure ci-dessous. Sa conception modulaire permet le démontage de tout ou partie des éléments constitutifs latéraux et son transport sur site pour réaliser les essais de cisaillement in situ. Les faces latérales du boîtier de cisaillement et les profilés métalliques ne peuvent pas être considérés comme infiniment rigides. L'utilisation d'un vérin hydraulique permet cependant de maintenir un effort constant malgré la déformation .

Lors des utilisations en laboratoire, les éléments latéraux sont démontés pour permettre l'évacuation des matériaux après chaque essai. Il est ainsi possible d'observer la face latérale du parallélépipède de sol cisailé lors de l'essai. L'interprétation des observations de la face latérale du plan de cisaillement reste cependant délicat. Nous avons imaginé matérialiser ce plan de cisaillement (craie, peinture, brins de laine...) lors du remplissage de la boîte afin de pouvoir visualiser par la suite les mouvements des grains après essais. Cette opération oblige à créer une zone d'hétérogénéité de compactage ( interface entre couches au niveau du plan de cisaillement). Cette démarche n'a donc pas été poursuivie en privilégiant l'homogénéité des couches de sol.

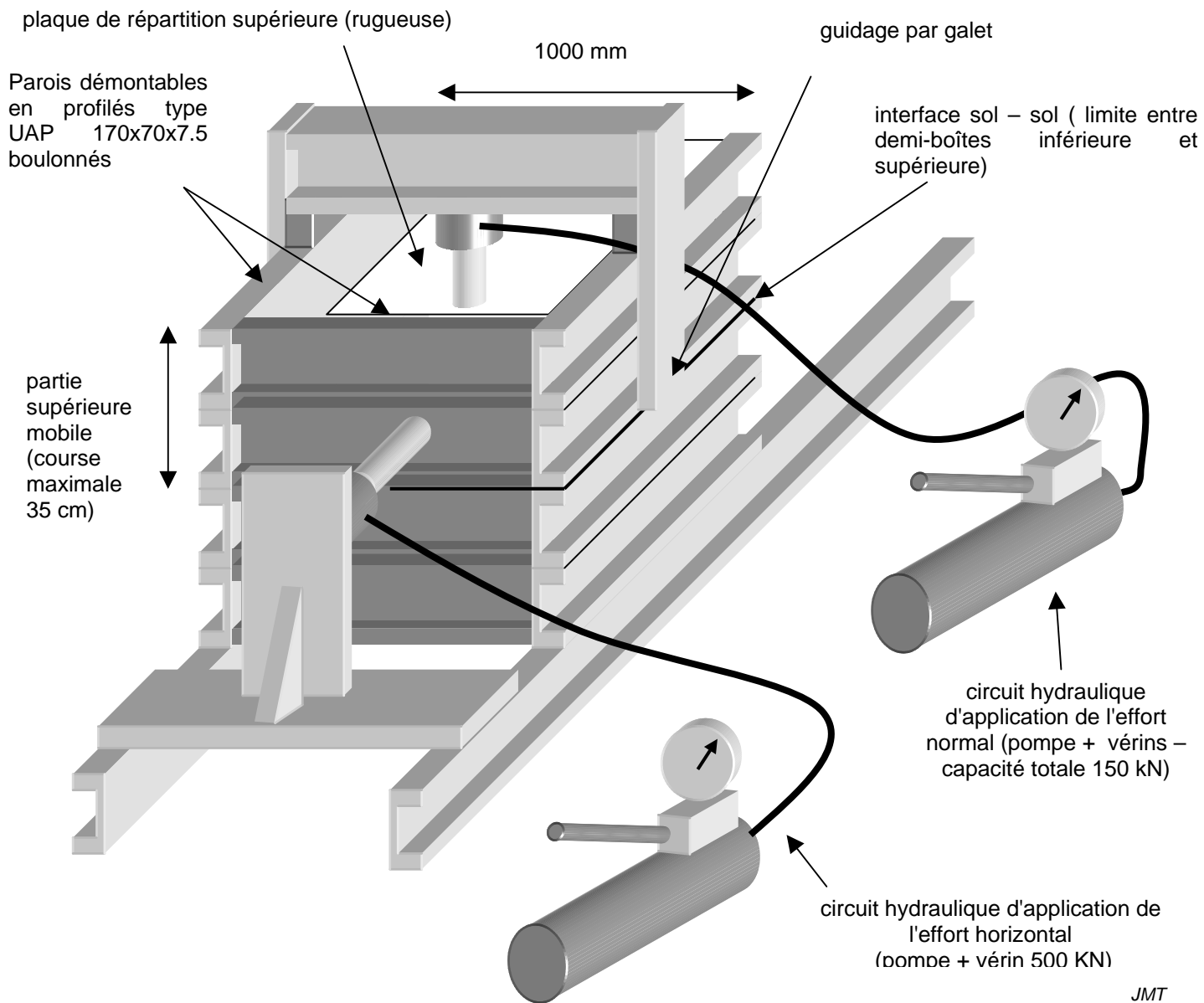
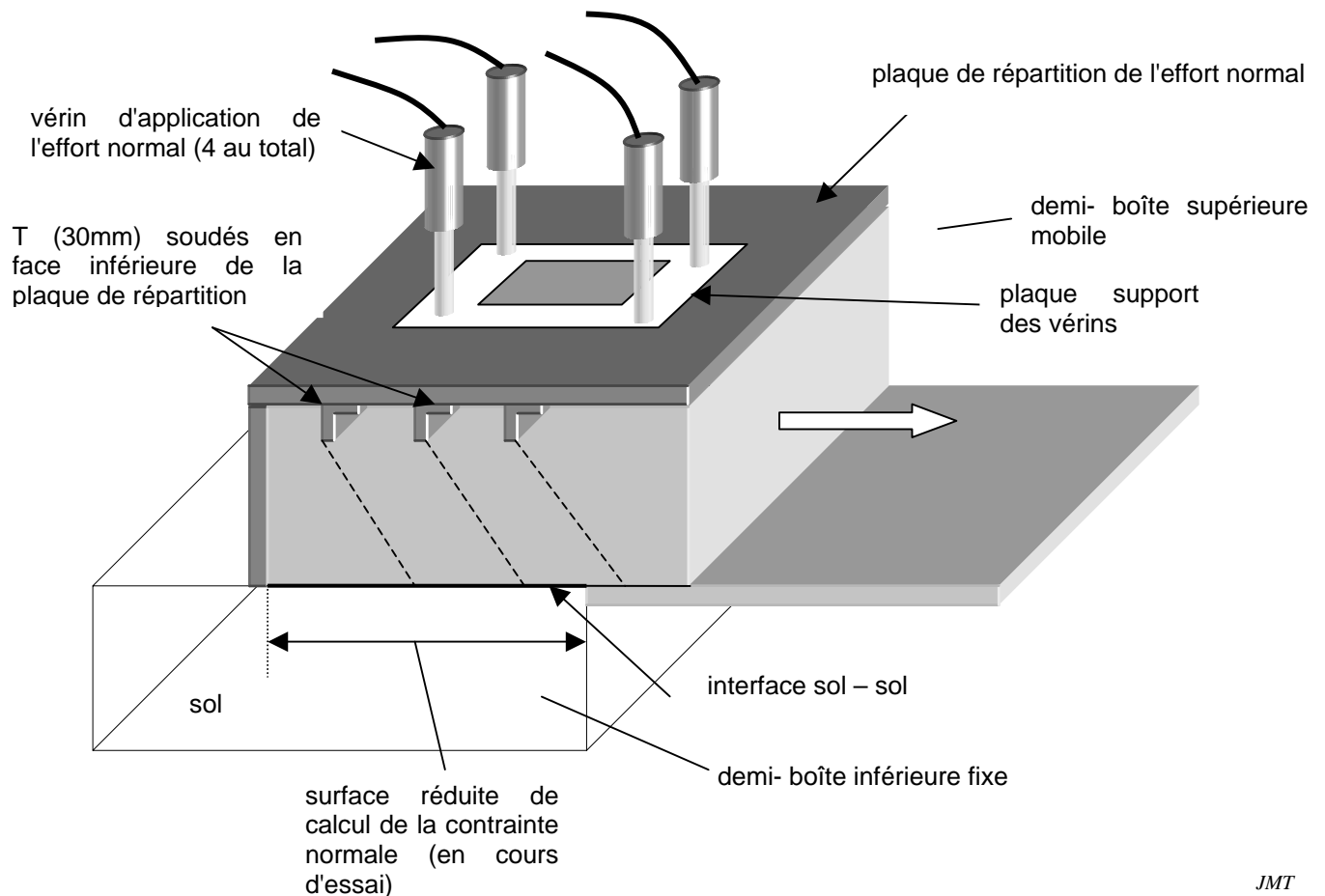


Figure 1 : Schéma de principe du boîtier de cisaillement 1000 x 1000 mm

Avant les modifications apportées sur le châssis de la boîte de cisaillement, la contrainte normale maximale sur le sommet de la boîte de cisaillement est de 150 kPa (15t/m<sup>2</sup>). Cet effort est appliqué sur le sol par quatre vérins agissant sur une plaque de répartition dont la rugosité a été augmentée par soudure de cornières (50x50 mm) en face inférieure. Cette adaptation a été effectuée à la suite des premiers essais pour obtenir une meilleure répartition de l'effort de cisaillement dans le sol.



JMT

Figure 2 : Augmentation de la rugosité de la plaque de répartition supérieure – surface réduite de calcul de la contrainte normale en cours d'essai

La contrainte tangentielle maximale applicable est également de 150 kPa (15t/m<sup>2</sup>). Les valeurs de contrainte verticale appliquées correspondent à une hauteur de remblai de l'ordre de 5m ( $\gamma_h=20$  KN/m<sup>3</sup>). Les résultats correspondent donc à des essais dans le domaine des faibles contraintes. L'application des efforts horizontaux est réalisée à l'aide d'un vérin à commande manuelle d'une capacité de 500 kN. La vitesse de cisaillement est contrôlée visuellement contrairement aux dispositifs asservis courants sur des appareillages de laboratoire de plus petite taille.

## 2.2 Bilan de la mise au point du matériel

La mise au point pratique de l'appareillage et de la procédure d'essais a nécessité plusieurs tentatives préliminaires avant obtention des résultats présentés dans le rapport . Il nous a paru intéressant de récapituler ici les problèmes rencontrés et les solutions apportées.

### 2.2.1 Adoption d'un vérin de forte capacité - Renforcement du boîtier de cisaillement

Le boîtier de cisaillement 1000 x 1000 mm a été conçu initialement pour étudier les caractéristiques de matériaux de décharge de faible poids volumique et faible cohésion. Les essais sur une fraction écrêtée à 0/20 mm à l'aide d'une boîte de cisaillement 300 x 300 mm ont été réalisés pour permettre une comparaison avec les résultats obtenus sur la fraction 0/100 mm du sol.

Au niveau pratique, considérant la cohésion et la granulométrie des matériaux analysés, l'étude de la fraction 0/100 mm du même matériau grossier implique le renforcement du boîtier et des dispositifs d'appui des vérins permettant d'appliquer les contraintes verticales et horizontales.

Les opérations suivantes ont été effectuées par rapport à la configuration initiale du boîtier de cisaillement :

- remplacement de l'ensemble des boulons de fixations des faces latérales ;
- renforcement par un profilé en H de la zone d'appui du vérin permettant d'appliquer la contrainte horizontale ;
- renforcement des profilés d'appui de la platine d'appui du vérin exerçant la contrainte horizontale ;
- renforcement du dispositif d'application de la contrainte verticale et calage horizontal de la plaque de répartition (afin d'éviter le mouvement de rotation de la plaque supérieure).

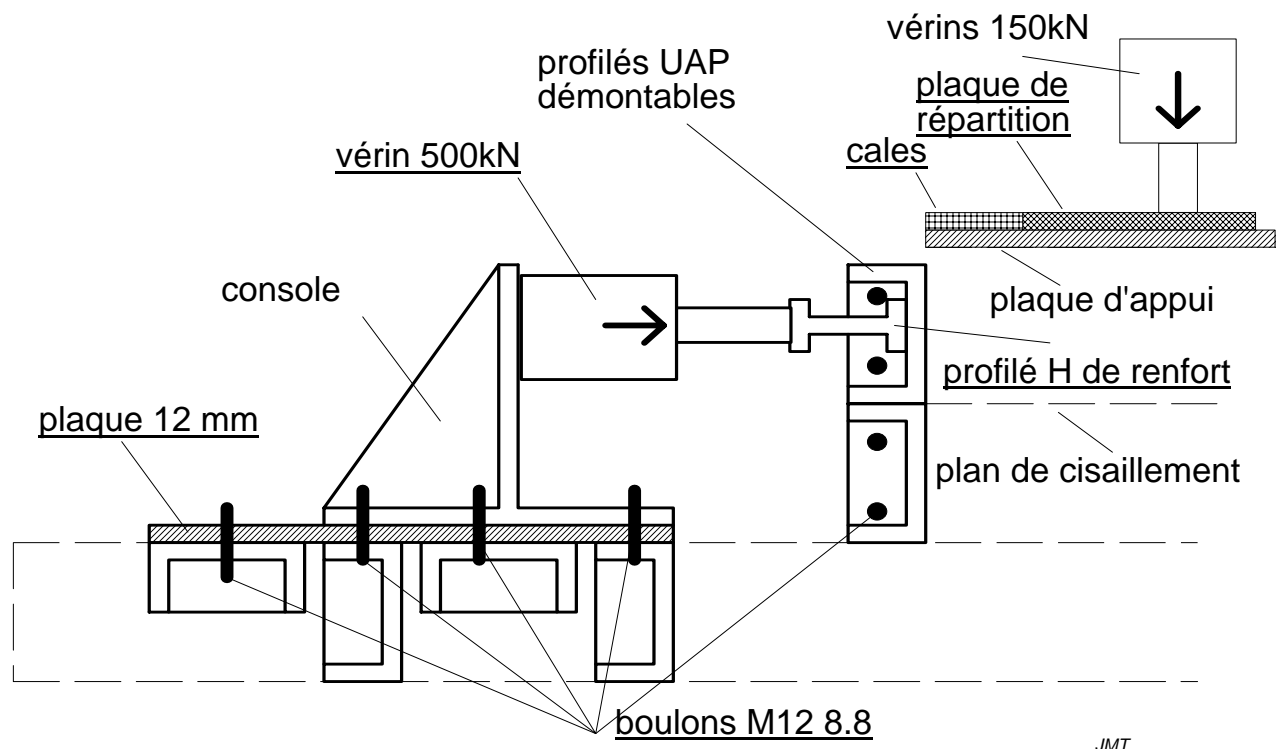


Figure 3 : Boîtier de cisaillement 1000 x 1000 mm - Modifications apportées au bâti

## 2.2.2 Calage vertical de la plaque de répartition - rugosité de la plaque de répartition

La figure ci-dessus montre le dispositif mis en place pour assurer une meilleure transmission de l'effort de cisaillement dans le sol. Lors des premiers essais effectués avec une plaque lisse, un vide était observé dans la partie de la boîte située à l'opposé du vérin d'application de l'effort horizontal. L'hypothèse d'une répartition uniforme des contraintes tangentielles est donc loin d'être vérifiée.

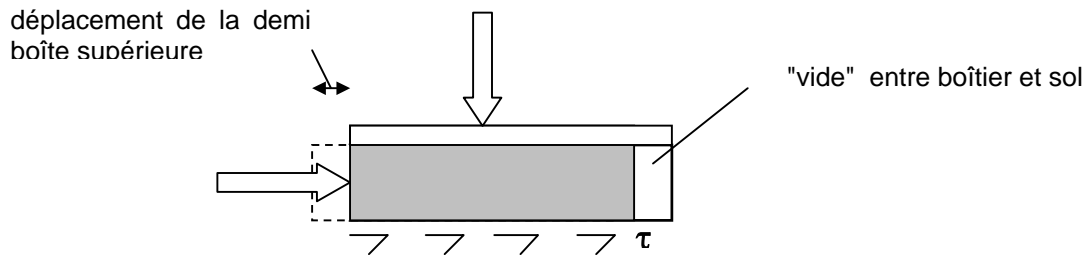


Figure 4 : défaut de répartition de l'effort de cisaillement

Lors des premières tentatives, le dispositif support de vérins était insuffisamment calé. Lors du déplacement de la partie supérieure, une rotation de la plaque a été observée. Le sol situé du côté de l'application de la force horizontale s'est trouvé surcomprimé avec une surélévation de cette partie.

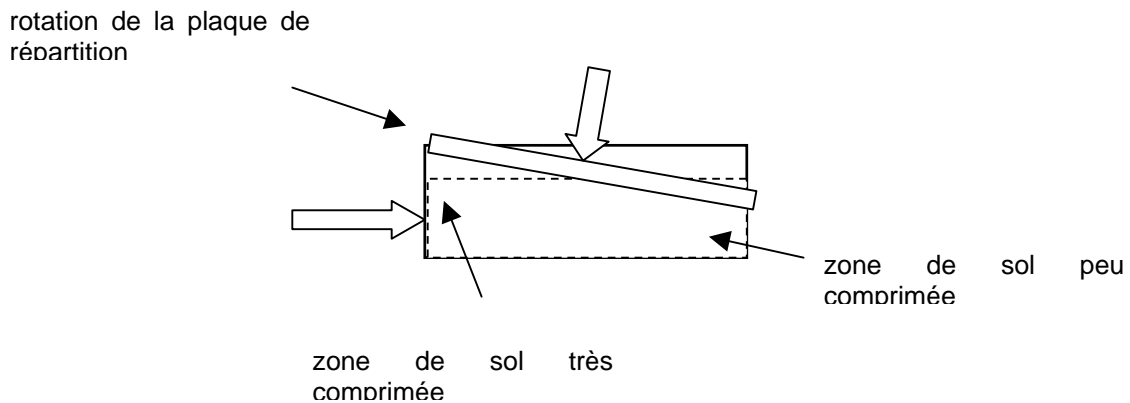


Figure 5 : basculement de la plaque supérieure en cours d'essai

### 3 ANNEXE : PROTOCOLE EXPERIMENTAL D'ESSAIS DE FROTTEMENT SOL-SOL

Les différentes étapes du protocole d'essai sont les suivants :

- 1) Prélèvement sur site
- 2) Identification et caractérisation physique physique du matériau étudié ( $W_n$ ,  $\gamma_d$ )
- 3) Calage de l'appareil sur un matériau de référence (type sable) pour caractériser les frottements à vide
- 4) Définition des conditions de compactage (en laboratoire sur des échantillons écrêtés, sur le matériau utilisé)
- 5) Choix des conditions d'écrêtage (rôle des matériaux grossiers, de la fraction argileuse...)
- 6) Définition de la gamme de contraintes étudiées en fonction des possibilités mécaniques du boîtier de cisaillement et de l'utilisation escomptée des résultats des essais
- 7) mesure de la granulométrie avant et après essais (mesure de l'altération des grains dus à l'essai au niveau du plan d'interface)
- 8) Interprétation des essais (comportement dilatant ou contractant, choix de la déformation limite, résistance de pic ou palier...)

Le principe de réalisation des essais ne diffère pas notablement d'essais réalisés sur des échantillons de plus petite taille. La granulométrie des blocs présents dans le sol implique cependant la manipulation d'un volume de matériau considérable et explique la difficulté de réalisation d'essais avec la même rigueur que lors d'essais sur des matériels de taille courante (jusqu'à des boîtiers de cisaillement de dimensions 300 x 300 mm) .

Les différentes phases de réalisation des essais de cisaillement sont les suivantes :

#### Prélèvement et stockage des matériaux

Les matériaux ont été prélevés à l'aide d'une pelle mécanique dans la zone de dépôt à l'amont de la plage de dépôt du torrent du Manival (Commune de Saint-Ismier , Département de l'Isère). Les matériaux sont écrêtés sur site à l'aide de grilles 0/100 mm en appui sur des tréteaux. Le tamisât est récupéré dans des conteneurs géotextiles de 0,5 m<sup>3</sup>. Ainsi huit conteneurs ont été prélevés et transportés jusqu'au Laboratoire de Géologie et de Mécanique où ils sont stockés.

#### Remplissage de la boîte de cisaillement

Le remplissage s'effectue en 5 couches successives. La pesée des matériaux mis en place dans le boîtier permet de déterminer de façon approchée le poids volumique du matériau cisailé. Le remplissage est conduit de manière à ce que le plan de cisaillement soit situé au milieu d'une couche. En fonction de la nature du matériau, la réalisation de l'essai de cisaillement peut conduire à une altération mécanique et une modification de la granulométrie avant et après essais (cas des matériaux schisteux en plaquettes par exemple). Pour éviter cela, dans les cas où l'on utilise des boîtes de cisaillement de taille plus modestes, on change le matériau pour chaque point réalisé. Dans notre cas, les volumes à mettre en œuvre rendant impossibles cette démarche. La minéralogie du matériau étudié lors de cette campagne d'essais (calcaires, marno-calcaires) le rend cependant moins sensible à ces phénomènes d'altération mécanique lors du cisaillement.

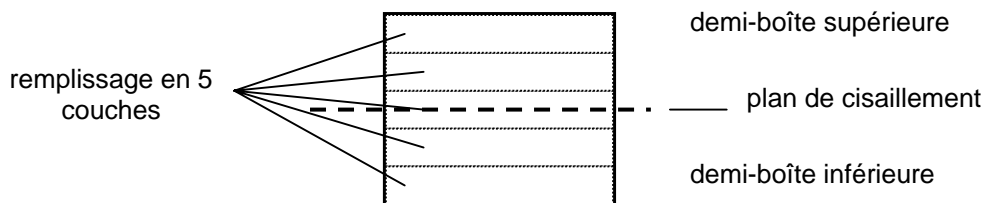


Figure 6 : Essai de cisaillement sol/sol - principe de compactage du sol

Energie de compactage :  $E = (P \cdot h \cdot n \cdot C_p) / V = 76.8 \text{ KJ/m}^3$  pour les essais sol/sol  
 Nombre de couches :  $n = 5$   
 Nombre de coups par couche :  $C_p = 150$   
 Hauteur de chute :  $h = 0.20 \text{ m}$   
 Poids de la dame :  $P = 33.95 \cdot 9.81 = 333 \text{ N}$   
 Volume de l'échantillon :  $V = 0.65 \text{ m}^3$

La réalisation d'un essai nécessite l'intervention de trois opérateurs qui effectuent respectivement chacune des opérations ci-dessous :

- l'opérateur n°1 maintient une pression constante du vérin d'application de l'effort normal (qui a tendance à augmenter avec la dilatance du matériau en cours d'essai) ;
- l'opérateur n°2 impose la vitesse d'avancement du demi-boîtier supérieur (entre 1 mm/mn et 3 mm/mn) par l'intermédiaire du vérin exerçant l'effort de cisaillement horizontal ;
- l'opérateur n°3 note les valeurs correspondantes aux comparateurs de mesure du déplacement horizontal et de la dilatance verticale, ceci à intervalles de temps réguliers (toutes les 15 secondes).

#### Application de la contrainte normale

La conception actuelle du boîtier implique un soulèvement de la partie supérieure lors de l'application de la contrainte normale. Ce mouvement reste cependant limité aux valeurs de jeu entre les éléments de roulement et les glissières d'appui fixées sur le châssis inférieur de la boîte. Sans pouvoir localiser les déformations dans le bloc de sol à cisailier, on peut considérer que ces déplacements ne concernent que partiellement le plan de cisaillement sur lequel s'effectue la rupture lors de l'essai. On peut d'ailleurs remarquer qu'aucune boîte de cisaillement ne permet de visualiser la surface de rupture dans le sol.

#### Application de la contrainte tangentielle et mesures du déplacement du boîtier

L'application de la contrainte tangentielle s'effectue à l'aide d'un vérin manuel. Ceci ne permet pas d'obtenir une vitesse de déplacement constante. De même, les mesures de déplacement sont faites à l'aide de réglés et par lecture visuelle.

Cet appareillage, d'un développement volontairement simple, nécessiterait un grand nombre de modifications pour améliorer la méthode. Ces adaptations sont possibles mais impliquent des investissements coûteux.

## 4 ANNEXE : PROTOCOLE EXPERIMENTAL D'ESSAIS D'INTERFACE

En plus des conditions expérimentales définies dans le cadre des essais de cisaillement sol/sol, l'étude du comportement d'interface sol/géosynthétique implique d'étudier les points suivants :

- 1) Choix des géosynthétiques (nappe ou géogrid) ;
- 2) Conception du dispositif d'accrochage du géosynthétique ;
- 3) Choix du support du géosynthétique ;
- 4) Choix des niveaux de contraintes pour la réalisation des essais de frottement

Cette annexe ne présente que les aspects spécifiques liées à l'étude du frottement sol/géosynthétique.

### 4.1 Essais sol-géosynthétique

Le compactage s'effectue en trois couches selon le schéma ci-dessous :

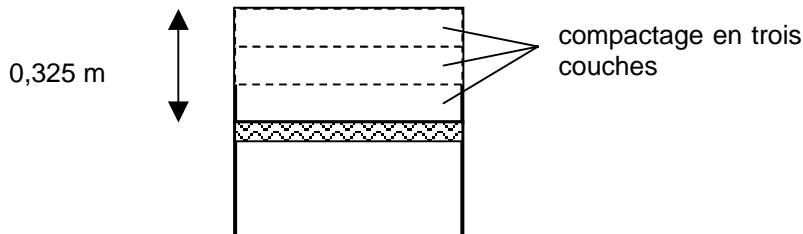


Figure 7 : Essai d'interface sol/géosynthétique (ou géogrid) – principe de compactage

Energie de compactage :  $E = (P \cdot h \cdot n \cdot C_p) / V = 92,2 \text{ KJ/m}^3$  pour les essais sol/sol  
Nombre de couches :  $n = 3$   
Nombre de coups par couche :  $C_p = 150$   
Hauteur de chute :  $h = 0.20 \text{ m}$   
Poids de la dame :  $P = 33.95 \cdot 9.81 = 333 \text{ N}$   
Volume de l'échantillon :  $V = 0,325 \text{ m}^3$

Le géosynthétique est collé sur une plaque en bois découpée aux dimensions de la boîte 1000x1000mm.

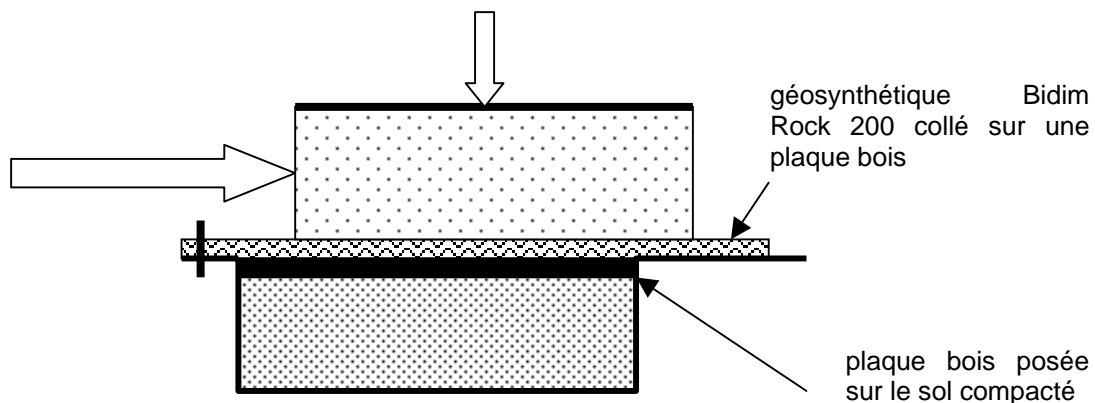


Figure 8 : Essai d'interface – principe de fixation du géosynthétique

## 4.2 Essais sol-géogrille

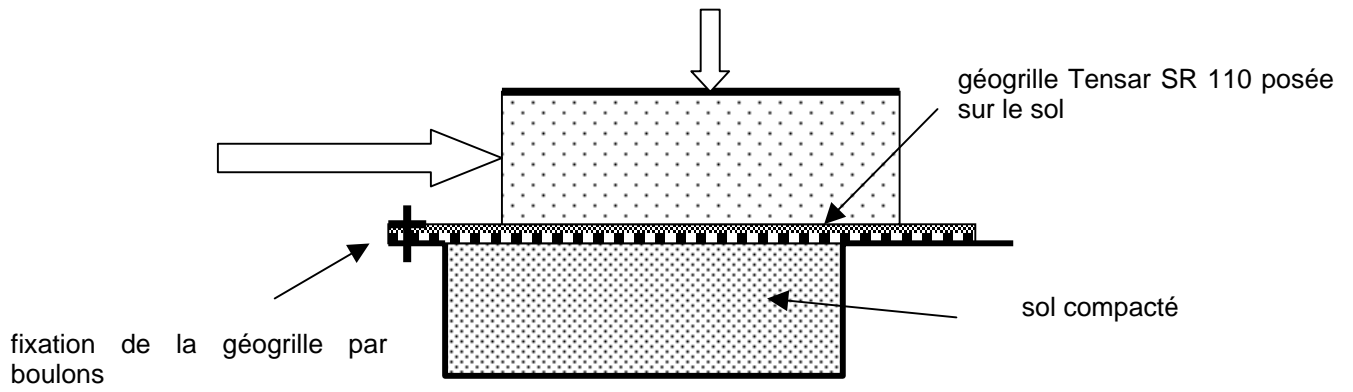


Figure 9 : Essai d'interface –principe de fixation de la géogrille

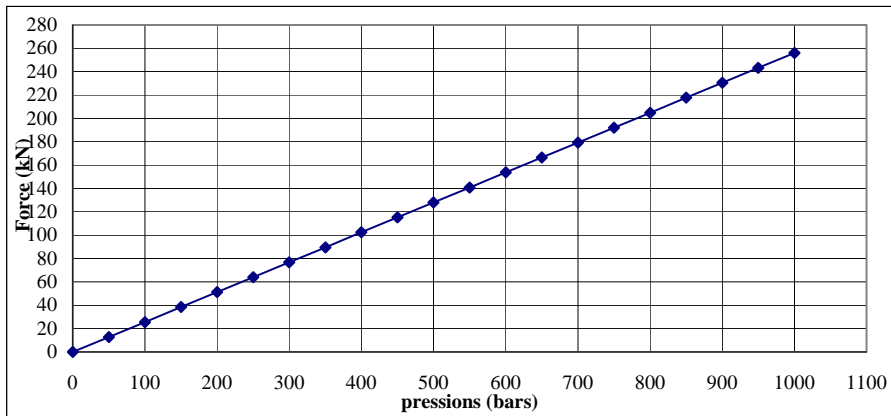
## 5 ANNEXE : RESULTATS D'ESSAIS

### 5.1 Etalonnage des vérins

Boîte de cisaillement 1000 x 1000 mm  
( LGM / IRIGM/CEMAGREF )

*Etalonnage des vérins utilisés pour tous les essais de cisaillement:*

**Courbe d'étalonnage de l'effort normal :**  
( Capacité des quatre vérins 20T )



**Courbe d'étalonnage de l'effort latéral de cisaillement :**  
( Capacité du vérin 15 T )

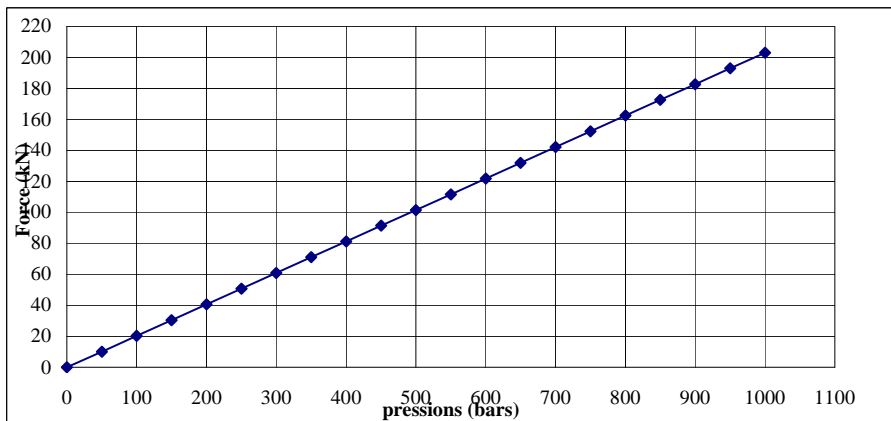
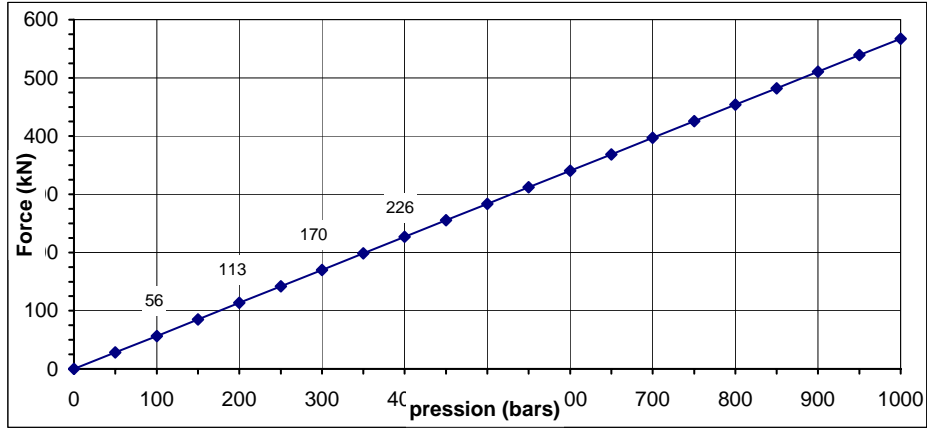


Planche 2 : Courbe d'étalonnage des vérins 20kN d'application de l'effort normal

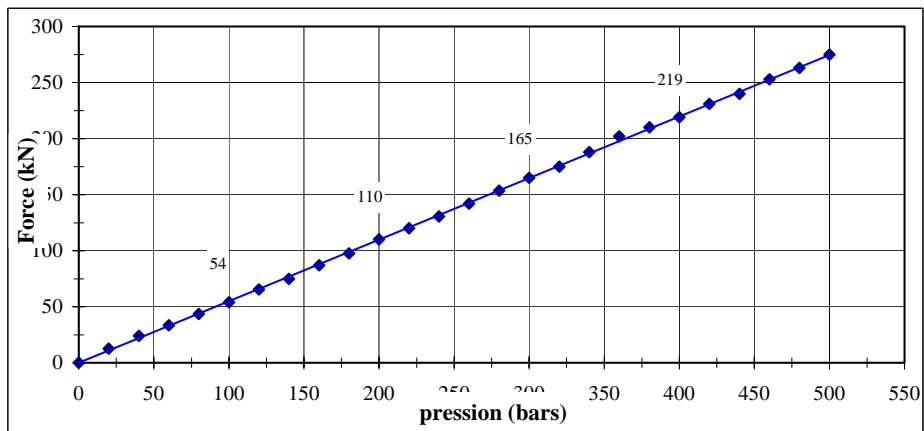
## Boîte de cisaillement 1000 x 1000 mm ( LGM / IRIGM/CEMAGREF )

**Courbe d'étalonnage de l'effort latéral de cisaillement  
calculée à partir de la section efficace du vérin (soit 56.74 cm<sup>2</sup>).  
( Capacité du vérin 50T )**



Pente de la courbe:  $\tan (0.5674) = 29.5^\circ$

**Courbe d'étalonnage de l'effort latéral de cisaillement  
établie à la presse hydraulique de l' I.U.T. génie-civil de Grenoble 1.  
( Capacité du vérin 50T )**



Pente de la courbe:  $\tan (0.5495) = 28.8^\circ$

Planche 3 : Courbes d'étalonnage du vérin 500 kN d'application de l'effort de cisaillement

## 5.2 Frottement parasite inter-boîtiers

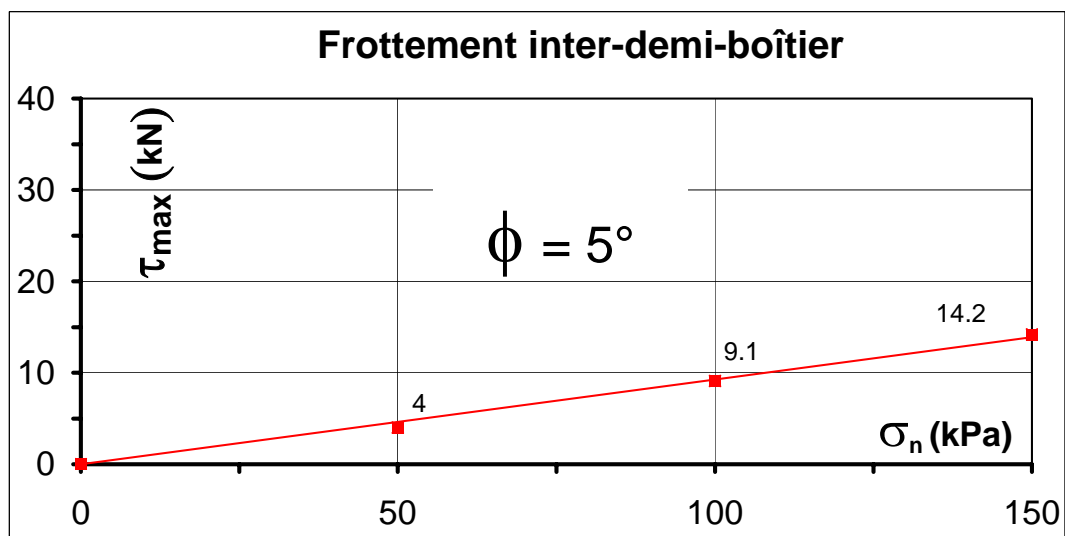
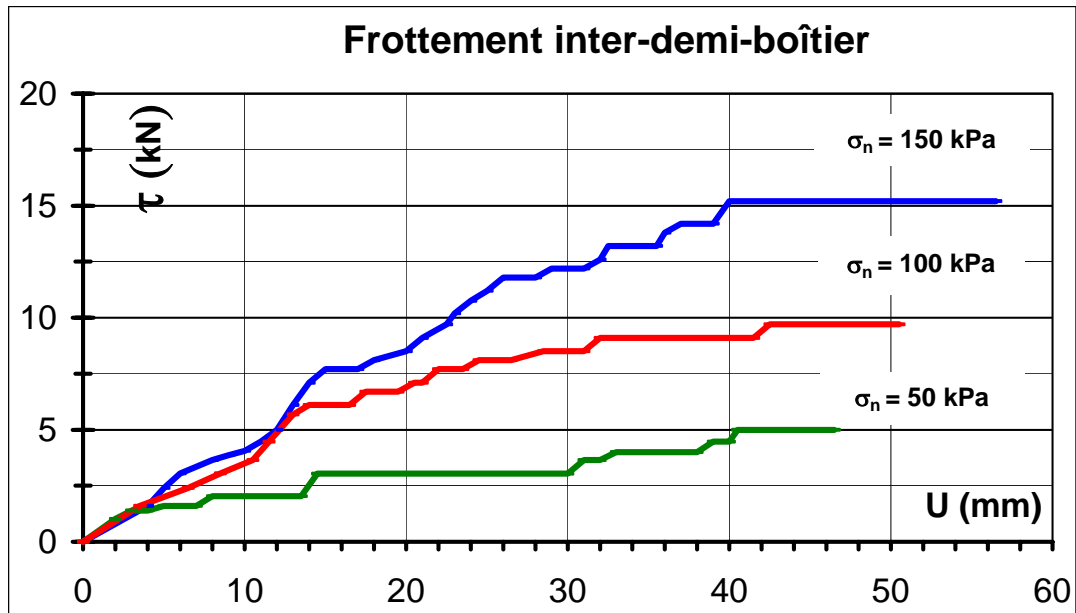
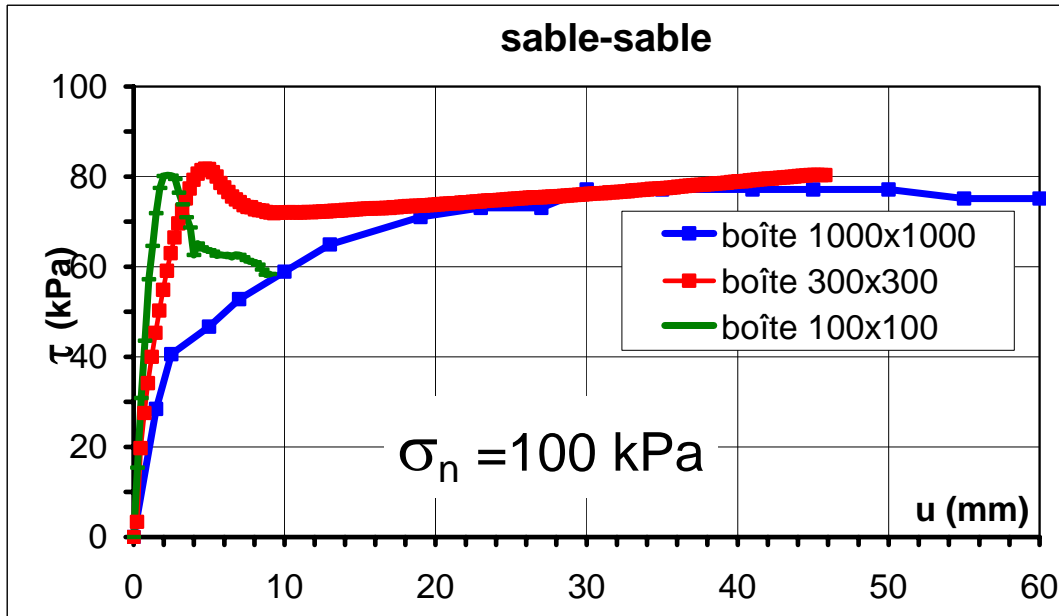


Planche 4 : Frottement à vide – boîtier supérieur/inférieur

### 5.3 Essais d'étalonnage cisaillement sable



DROITES de Coulomb correspondantes:

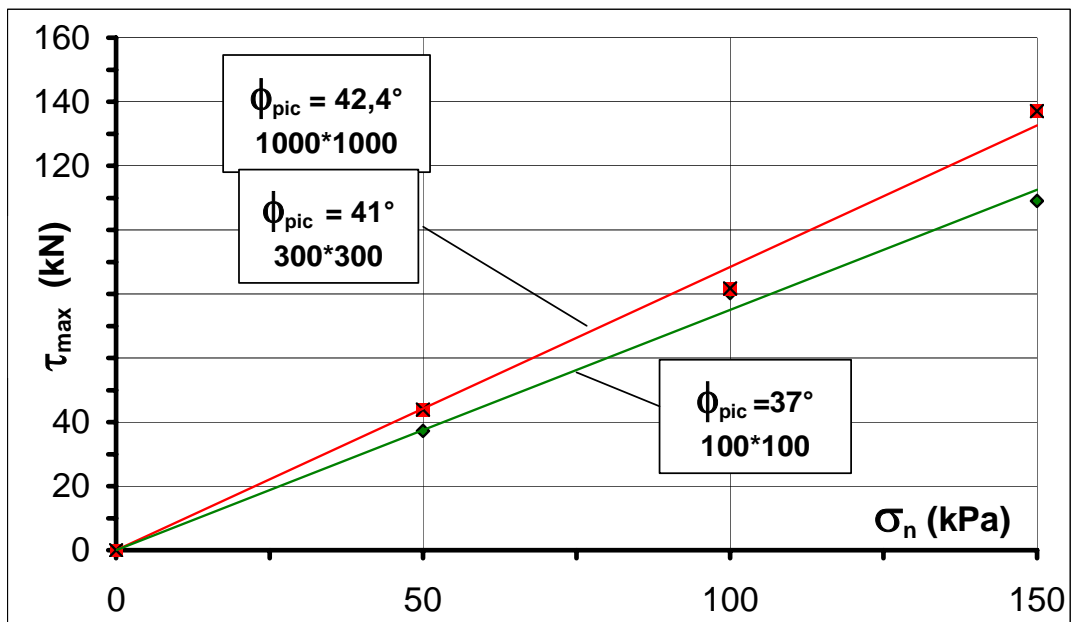


Planche 5 : Comparaison de résultats d'essais de cisaillement (matériau sable de Leucate) avec des boîtes de cisaillement de différentes tailles

**5.4 Essais d'étalonnage cisaillement sable-géomembrane**

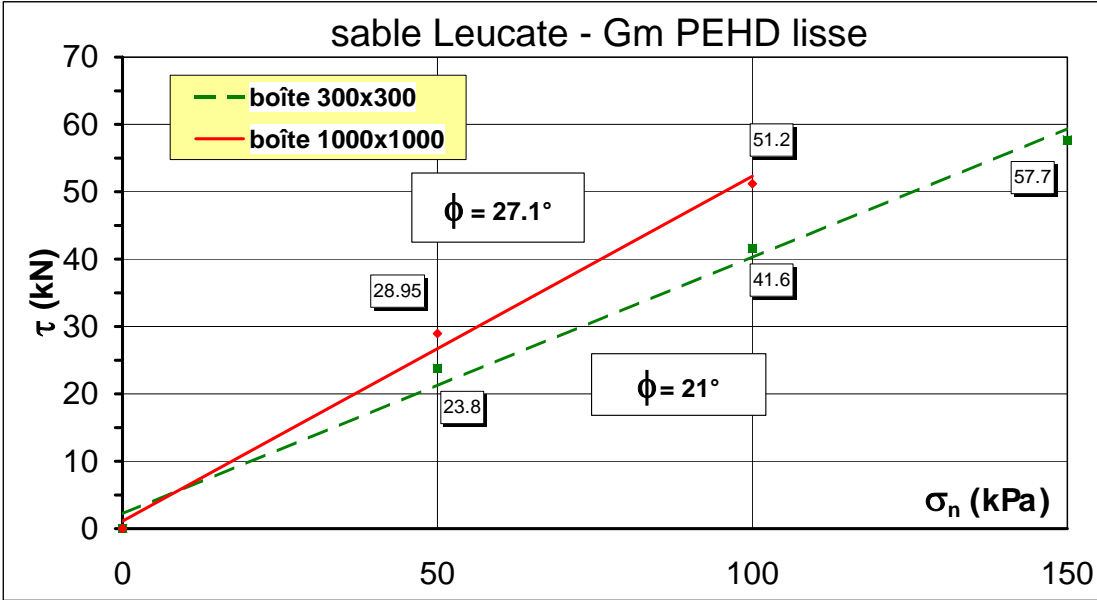


Planche 6 : Comparaison de résultats d'essais de cisaillement d'interface (matériau sable de Leucate) et géomembrane PEHD lisse avec des boîtes de cisaillement de différentes tailles

## 5.5 Essais de cisaillement Sol-Sol (Manival)

### 5.5.1 Essais plaques inférieures et supérieures lisses

**Essai de cisaillement direct sol-sol à la boîte 1000x1000 mm  
(LGM/IRIGM/CEMAGREF)**

**Cas 2: plaques lisses en fond et couverture du matériau**

Nature du sol: **sol grossier alluvionnaire écrêté 0/100mm (lave du Manival)**

Origine : **Massif de la Chartreuse (Commune de S<sup>t</sup>-Ismier)**

Teneur en eau moyenne: **w = 5.2 %**

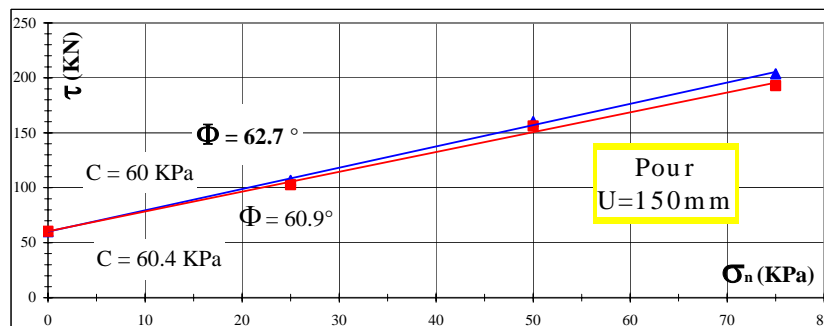
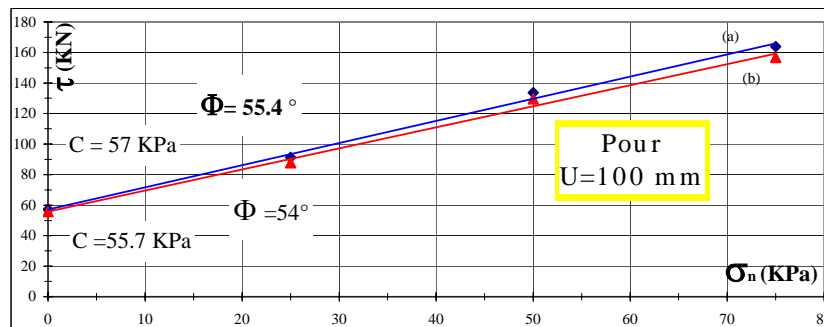
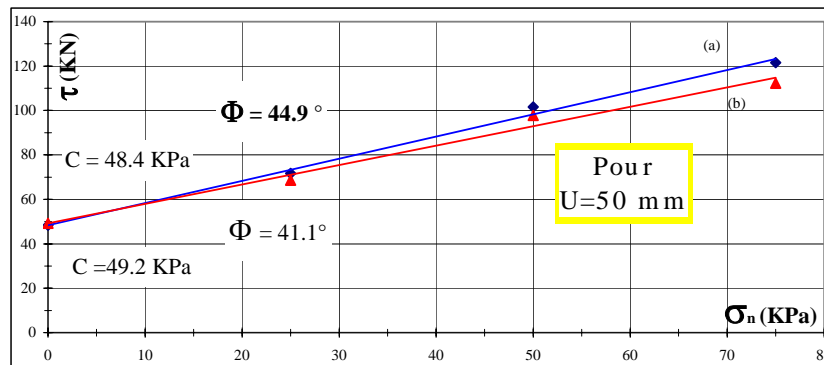
**$\gamma = 22.1 \text{ kN/m}^3$**

**Hauteur de l'échantillon = 0.650 m**

**Energie de compactage = 76.8 kJ/m<sup>3</sup>**

La vitesse moyenne de cisaillement est : **v = 3mm/mn**

**DROITES de Coulomb (sol-sol en plaques lisses) :**



Courbe (a) : Sans tenir compte du frottement inter demi-boîtier

Courbe (b) : En déduisant le frottement inter demi-boîtier

Planche 7 : Droites de Coulomb – Cisaillement sol/sol (Matériau Manival) – plaques lisses

**Essai de cisaillement direct sol-sol à la boîte 1000x1000 mm**  
**LGM/IRIGM/CEMAGREF**

**Cas 2 : Plaques lisses en fond et en couverture du matériau**

Nature du sol: **sol grossier alluvionnaire écrêté 0/100mm (lave du Manival)**

Origine : **Massif de la Chartreuse (Commune de S<sup>t</sup>-Ismier)**

Hauteur de l'échantillon : **H = 0.325 m**

Energie de compactage = **76.8 kJ/m<sup>3</sup>**

$\gamma = 22.2 \text{ kN/m}^3$

vitesse moyenne de cisaillement : **v = 3mm/mn**

**Variations Volumiques des échantillons testés, mesurées sur la plaque supérieure de la boîte de cisaillement, aux quatre coins extrêmes:**

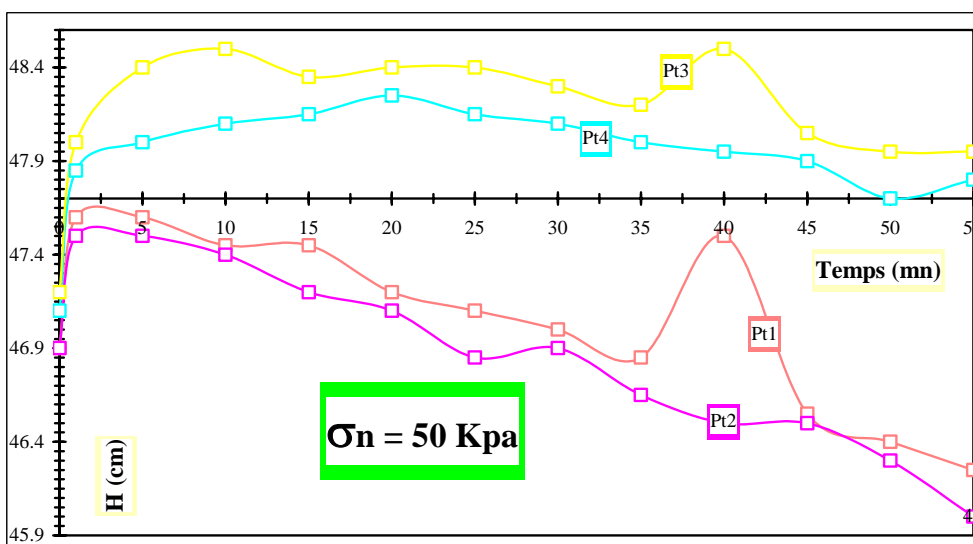
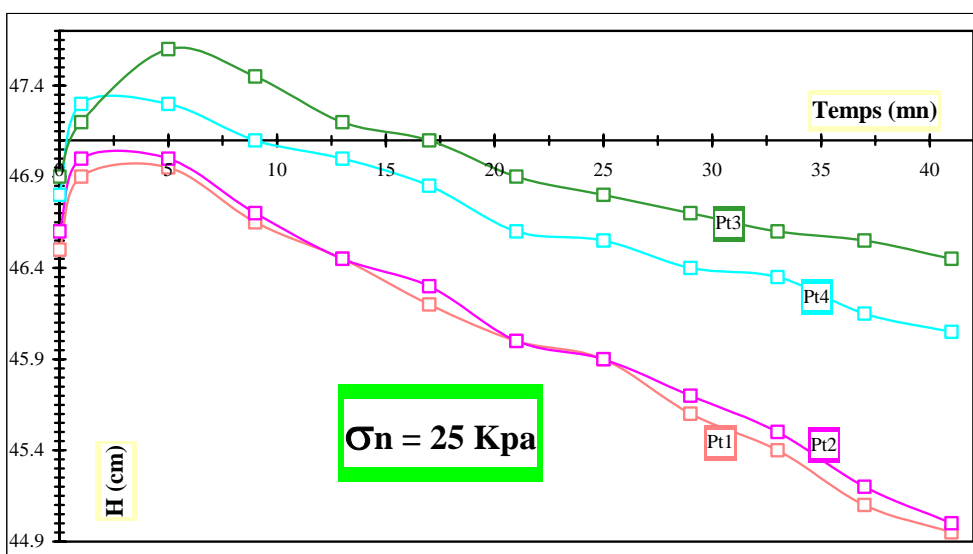
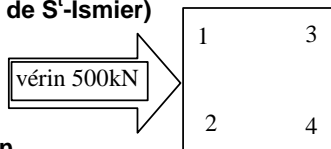


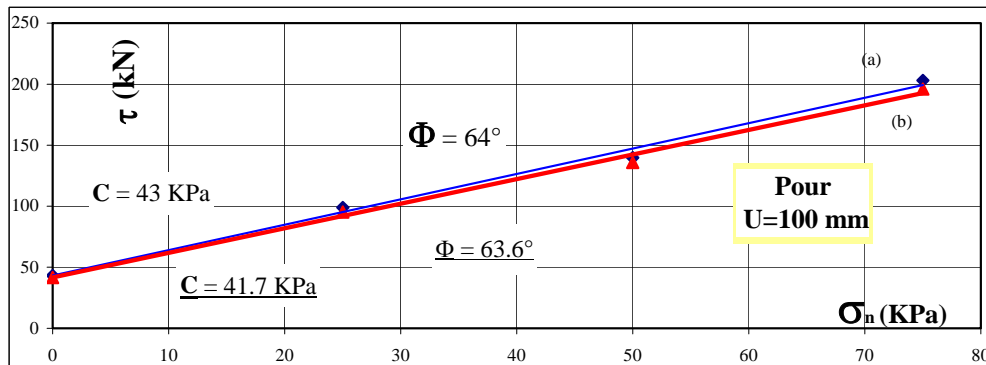
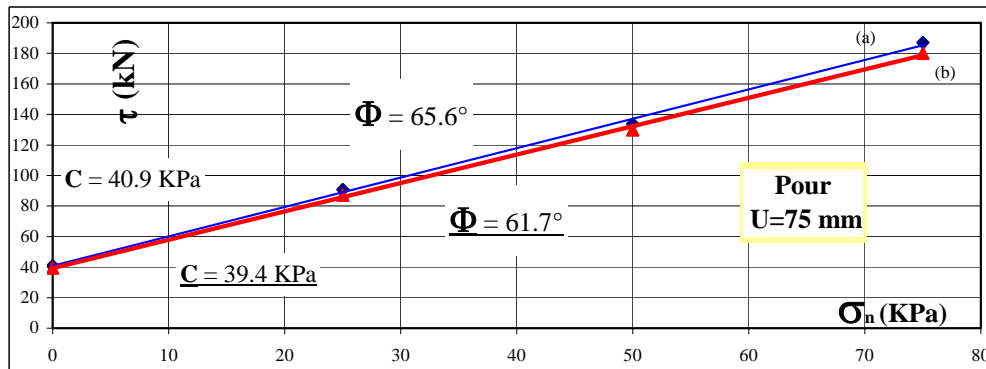
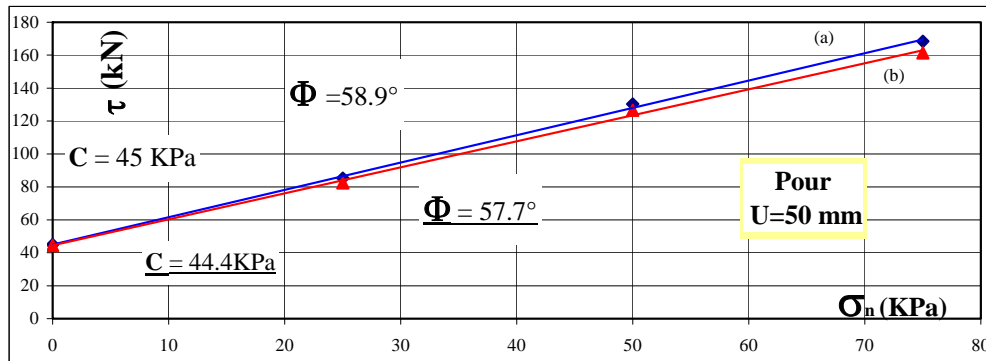
Planche 8 : variations volumiques – Essai de cisaillement sol/sol (Manival) – 25 kPa – 50 kPa – plaques lisses

## 5.5.2 Essais plaques inférieures et supérieures ruqueuses

### Essai de cisaillement direct sol-sol à la boîte 1000x1000 mm (LGM/IRIGM/CEMAGREF)

**Cas 1:** plaques ruqueuses en fond et couverture du matériau  
 Nature du sol: sol grossier alluvionnaire écrêté 0/100mm (lave du Manival)  
 Origine: Massif de la Chartreuse (Commune de S<sup>t</sup>-Ismier)  
 Teneur en eau moyenne:  $w = 5,3\%$   $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$   
 Hauteur de l'échantillon = 0.640 m  
 Energie de compactage = 76.8 kJ/m<sup>3</sup>  
 La vitesse moyenne de cisaillement est:  $v = 3 \text{ mm/mn}$

### DROITES de Coulomb (sol-sol en plaques ruqueuses) :



Courbe (a) : Sans tenir compte du frottement inter demi-boîtier  
 Courbe (b) : En déduisant le frottement inter demi-boîtier

Planche 9 : Droites de Coulomb – Cisaillement sol/sol (Matériau Manival) – plaques lisses

**Essai de cisaillement direct sol-sol à la boîte 1000x1000 mm (LGM/IRIGM)**

Cas 1: plaques lisses ( fond et couverture du matériau)  
 Cas 2: plaques rugueuses ( fond et couverture du matériau)  
 Nature du sol: sol grossier alluvionnaire écrêté 0/100mm ( lave du Manival )  
 Origine : Massif de la Chartreuse (Commune de S<sup>t</sup>-Ismier)

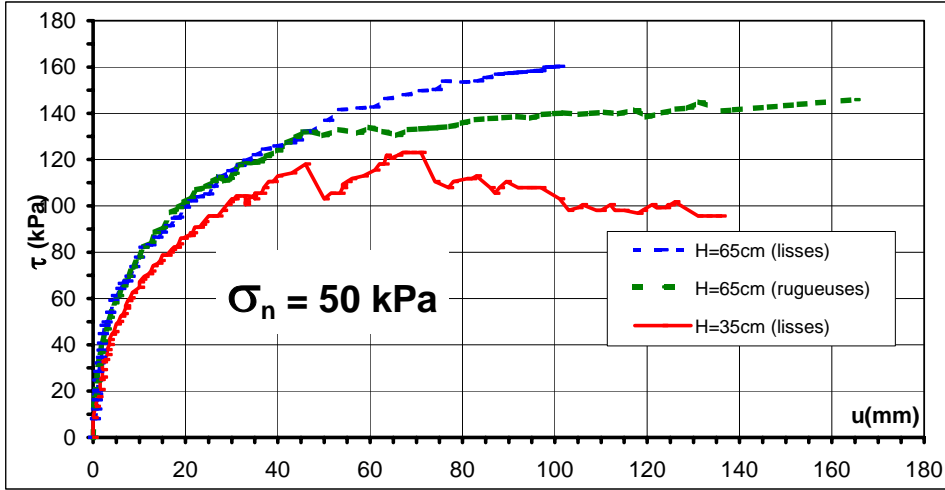


Planche 10 : Courbes efforts-déplacements - Cisaillement sol/sol (Matériau Manival) – Influence de la rugosité des plaques et de l'épaisseur de l'échantillon

**Cas 1: Plaques rugueuses**

**Cas 2: Plaques lisses**

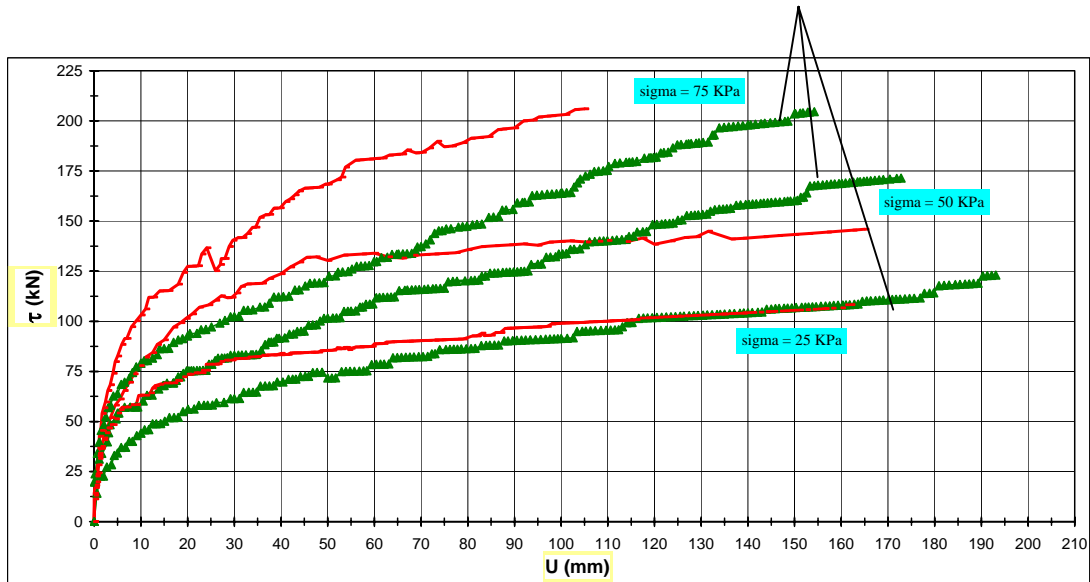


Planche 11 : Courbes efforts-déplacements - Cisaillement sol/sol (Matériau Manival) – Influence de la rugosité des plaques ( hauteur échantillon 0,65 m)

**Variations Volumiques des échantillons testés,  
mesurées sur la plaque supérieure de la boîte de cisaillement,  
aux quatre coins extrêmes:  
(cf. schéma ci-dessous)**

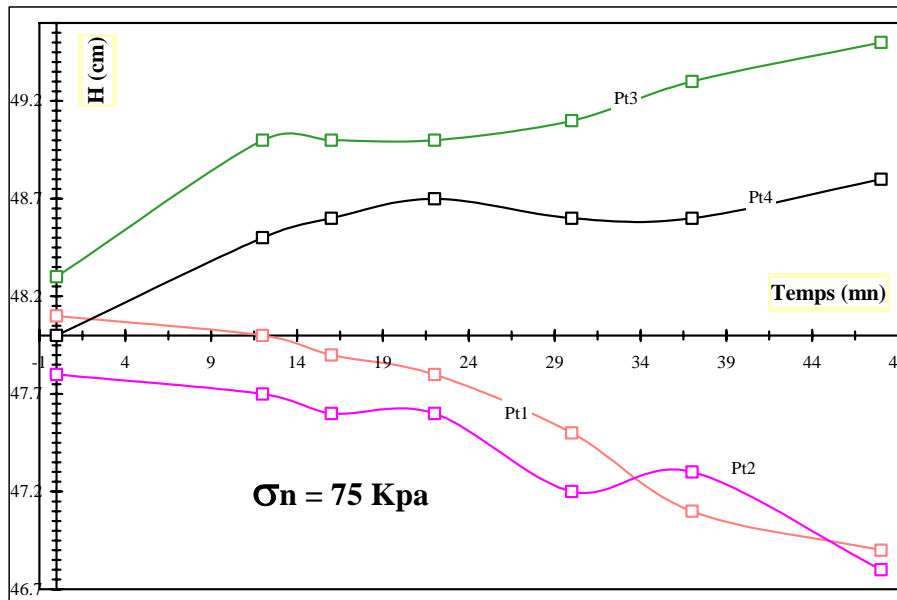
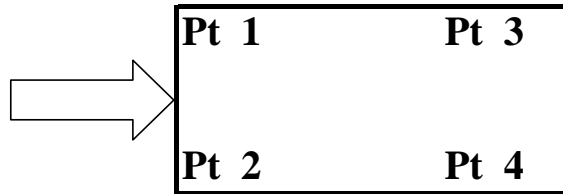


Planche 12 :variations volumiques – essai de cisaillement sol/sol – (75 kpa) – plaques rugueuses

## 5.6 Essais d'interface Sol (Manival)/ Géotextile (Bidim Rock 200)

### Essai de cisaillement direct sol-géotextile à la boîte 1000x1000 mm (LGM/IRIGM/CEMAGREF)

Cas 2: plaque lisse en couverture du matériau

Nature du sol: sol grossier alluvionnaire écrêté 0/100mm (lave du Manival)

Origine: Massif de la Chartreuse (Commune de S<sup>t</sup>-Ismier)

Géotextile: Bidim Rock 200

Teneur en eau moyenne:  $w = 5,1 \%$

$\gamma = 22.1 \text{ kN/m}^3$

Hauteur de l'échantillon = 0.325 m

Energie de compactage = 92.2 kJ/m<sup>3</sup>

La vitesse moyenne de cisaillement est:  $v = 4 \text{ mm/mn}$

### DROITES de Coulomb (sol-géotextile):

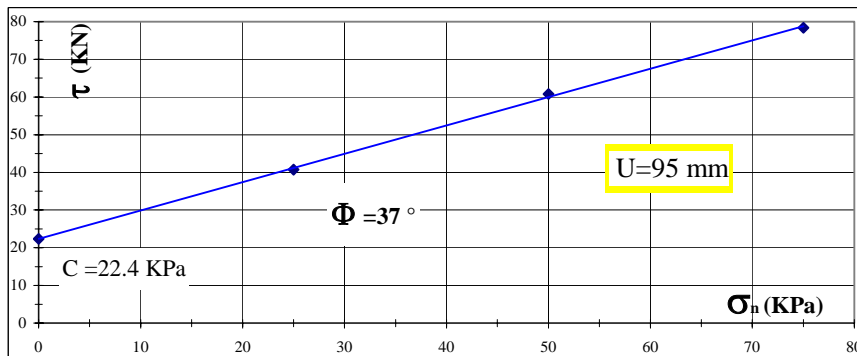
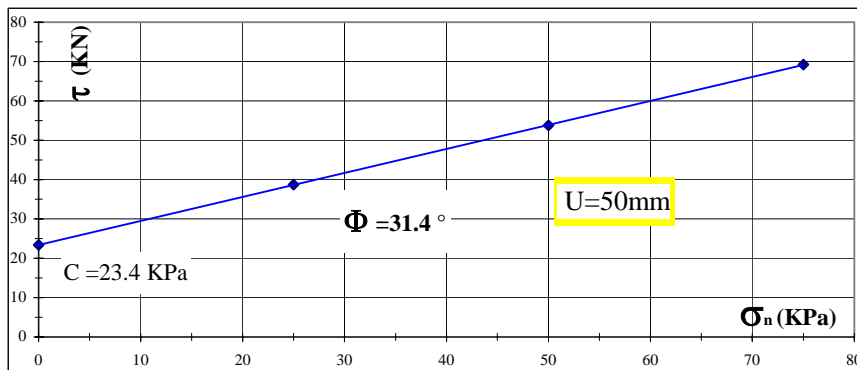
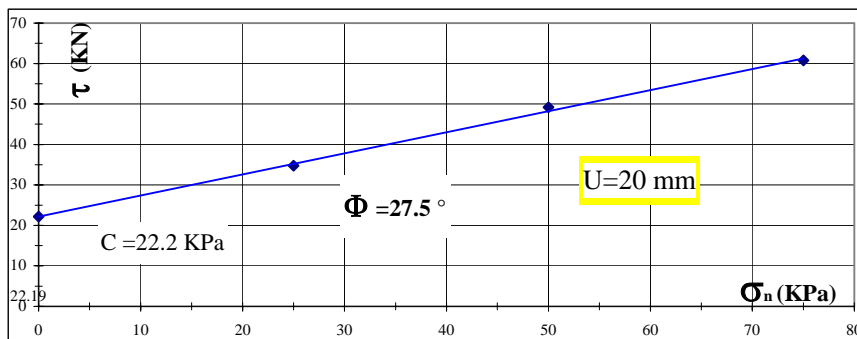


Planche 13 : Droites de Coulomb -Essai d'interface sol (Manival)/géotextile(Bidim Rock) – 25-50-75 kPa

**Essai de cisaillement direct sol-géotextile à la boîte 1000x1000 mm (LGM/IRIGM/CEMAGREF)**

Géotextile : BIDIM ROCK 200

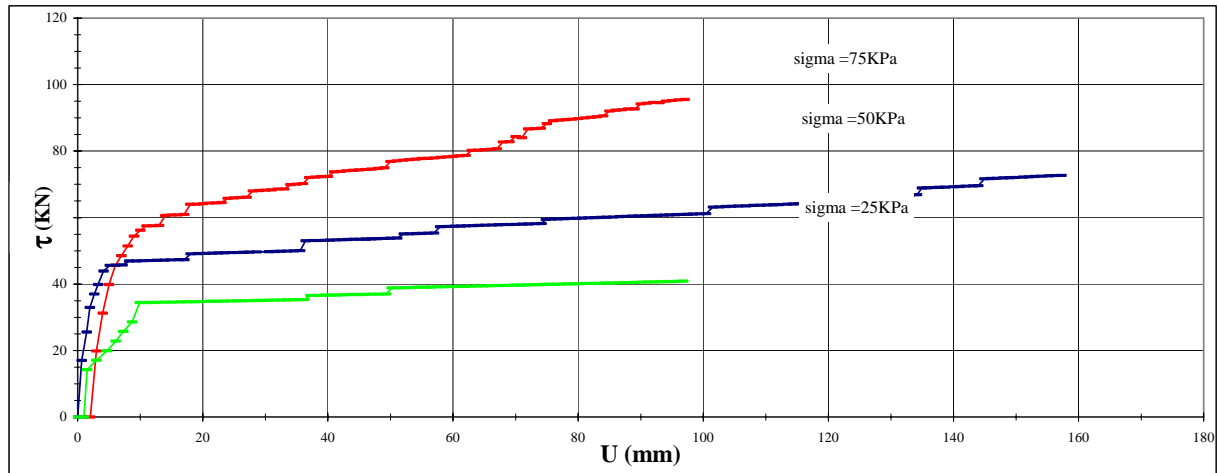


Planche 14 : Courbes efforts-déplacements - Essai d'interface sol (Manival)/géotextile(Bidim Rock) – (25-50-75 kPa)

$\gamma = 22.2 \text{ kN/m}^3$

vitesse moyenne de cisaillement :  $v = 3 \text{ mm/mn}$

Variations Volumiques des échantillons testés, mesurées sur la plaque supérieure de la boîte de cisaillement, aux quatre coins extrêmes:

(cf. schéma)

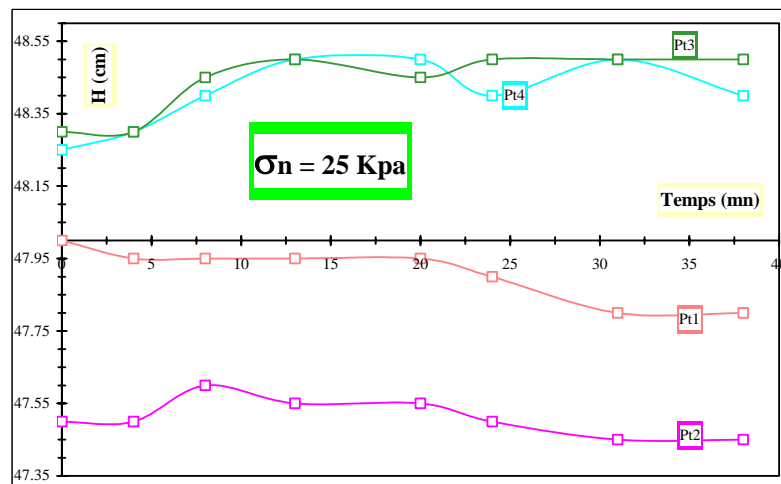
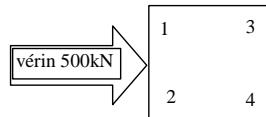


Planche 15 : variation volumique – essai d'interface sol(Manival)/géotextile(BidimRock 200) – 25kPa – plaques lisses

## 5.7 Essais d'interface Sol (Manival)/ Géogrille (Tensar SR 110)

**Essai de cisaillement direct sol-géogrille à la boîte 1000x1000 mm**  
(LGM/IRIGM/CEMAGREF)

Cas 2: plaque lisse en couverture du matériau

Nature du sol: sol grossier alluvionnaire écrêté 0/100mm (lave du Manival)

Origine: Massif de la Chartreuse (Commune de S<sup>t</sup>-Ismier)

Géogrille: Tensar SR 110

Teneur en eau moyenne:  $w = 5\%$

$\gamma = 22.1 \text{ kN/m}^3$

Hauteur de l'échantillon = 0.325 m

Energie de compactage =  $92.2 \text{ kJ/m}^3$

La vitesse moyenne de cisaillement est:  $v = 4 \text{ mm/mn}$

**DROITES de Coulomb (sol-géogrille):**

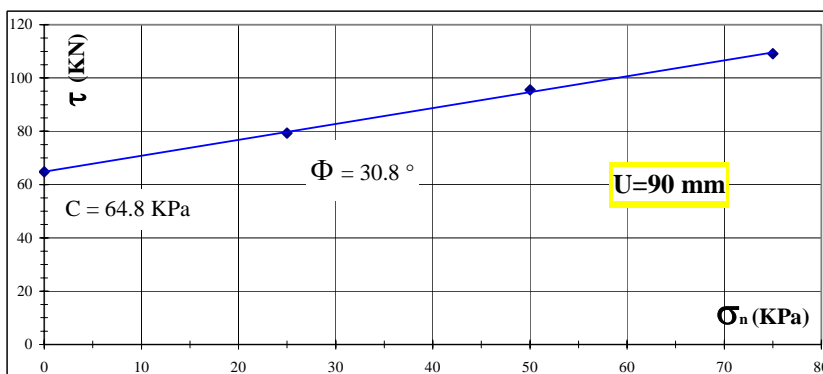
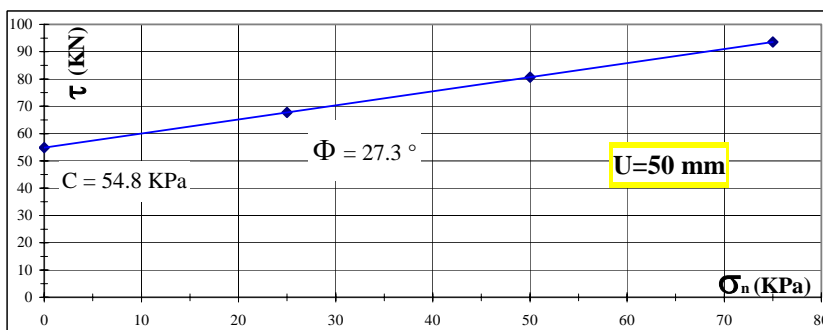
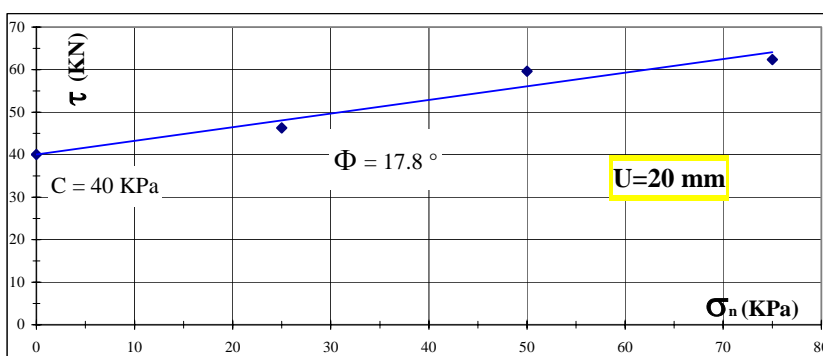


Planche 16 : Droites de Coulomb – Essai d'interface sol (Manival)/géogrille (Tensar SR 110) – 25-50-75kPa – plaques lisses

**Essai de cisaillement direct sol-géogridde à la boîte 1000x1000 mm  
(LGM/IRIGM/CEMAGREF)**

**Cas 2:** plaque lisse en couverture du matériau

Nature du sol: sol grossier alluvionnaire écrêté 0/100mm (lave du Manival)

Origine : Massif de la Chartreuse (Commune de S<sup>t</sup>-Ismier)

Géogridde: Tensar SR 110

Teneur en eau moyenne:  $w = 5\%$

$\gamma = 22.1 \text{ kN/m}^3$

Hauteur de l'échantillon = 0.325 m

Energie de compactage = 92.2 kJ/m<sup>3</sup>

La vitesse moyenne de cisaillement est :  $v = 4 \text{ mm/mn}$

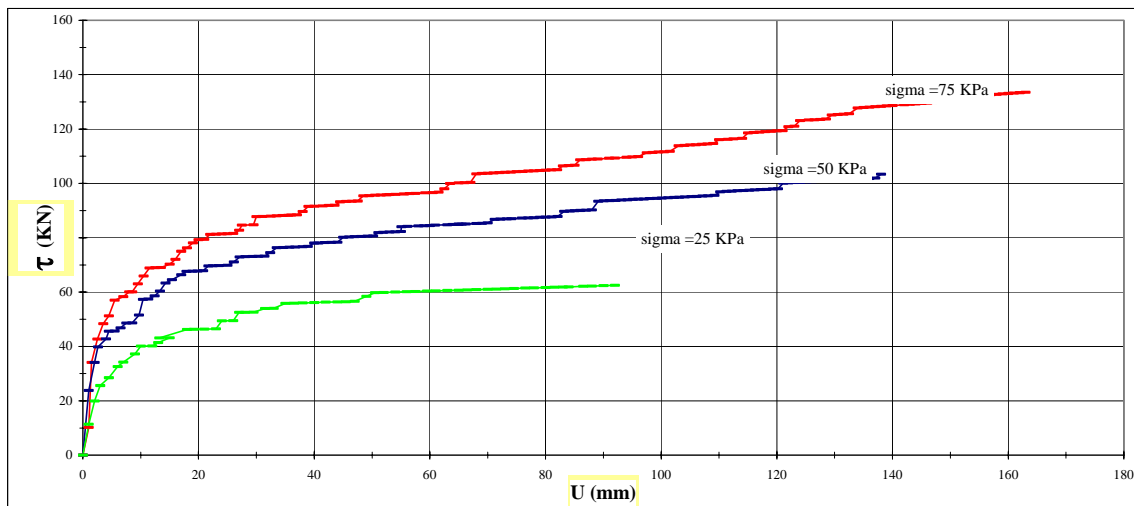


Planche 17 : Courbes efforts-déplacements – Essai d'interface sol(Manival)/géogridde(Tensar SR 110)  
–25-50-75 kPa – plaques lisses

**Essai de cisaillement direct sol-géogrille à la boîte 1000x1000 mm  
LGM/IRIGM/CEMAGREF**

Nature du sol: sol grossier alluvionnaire écrêté 0/100mm (lave du Manival)

Origine: Massif de la Chartreuse (Commune de S<sup>t</sup>-Ismier)

Hauteur de l'échantillon: H = 0.325 m

Energie de compactage = 92.2 kJ/m<sup>3</sup>

Géogrille: Tensar SR 110

$\gamma = 22.2 \text{ kN/m}^3$

vitesse moyenne de cisaillement: v = 3mm/mn

**Variations Volumiques des échantillons testés, mesurées sur la plaque supérieure de la boîte de cisaillement, aux quatre coins extrêmes:**  
(cf. schéma)

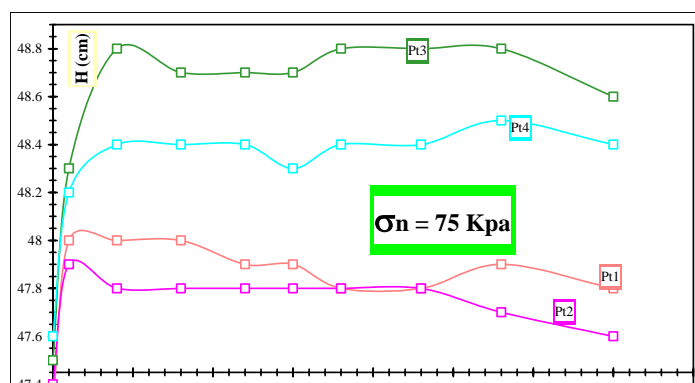
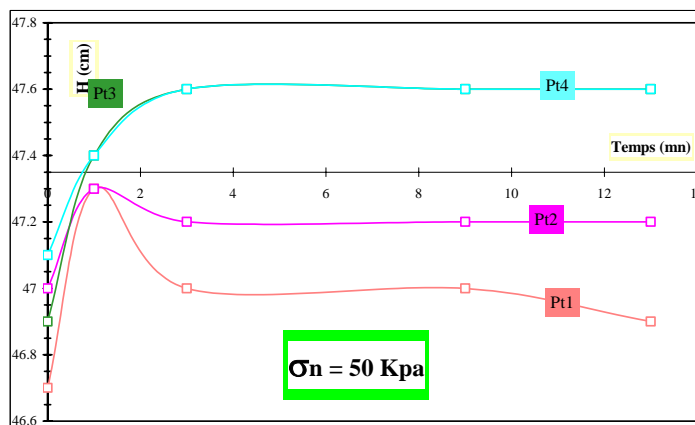
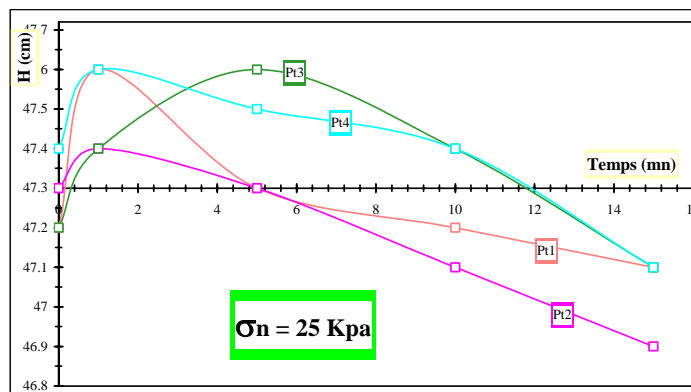
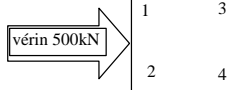


Planche 18 : variation volumique – essai d'interface sol(Manival)/ géogrille(Tensar SR 110) – 25-50-75 kPa – plaques lisses