

Sols grossiers renforcés pour ouvrages en sites instables

Jean-Marc Tacnet, Philippe Gotteland, Abdel-Aziz Aboura

Les dispositifs de protection contre les risques naturels en montagne nécessitent souvent la réalisation d'ouvrages en remblai. Il peut s'agir, par exemple, de digues de protection contre les crues torrentielles (protection de berges, plages de dépôt), contre les avalanches, contre les chutes de blocs. La conception de ces ouvrages, soumis à des phénomènes d'un type et d'une intensité particuliers ou construits dans un contexte géotechnique difficile, répond à deux contraintes essentielles :

– Pour que les dispositifs de protection soient efficaces, les concepteurs sont amenés à rechercher un raidissement des pentes des talus permettant soit d'agir plus efficacement en vue de l'arrêt des masses solides en mouvement liées au phénomène naturel (digue pare-blocs, digue paravalanches), soit d'augmenter la capacité de stockage et diminuer l'emprise au sol des équipements (digue de plage de dépôt, digue longitudinale de protection de berges). En raison du contexte géotechnique d'implantation et de la géométrie des ouvrages, des dispositifs techniques pouvant absorber les déformations et mouvements de berges sont également recherchés.

– Les difficultés d'accès aux sites (photo 1) ne permettent souvent pas d'effectuer l'approvisionnement en matériau de remblai à partir des sources classiques (carrières) ou imposent des coûts prohibitifs. L'utilisation de matériaux de remblai du site est alors une alternative intéressante et économique.

Intérêt de la technique de renforcement de sols par géosynthétiques pour les ouvrages de protection

Dans ce contexte de sites instables, les ouvrages géotechniques renforcés par géosynthétiques utilisant des sols hétérogènes à forte granulométrie ont a priori, plusieurs intérêts. Ils peuvent absorber les déformations liées à l'impact de phénomènes dynamiques ou à des mouvements de versants instables et peuvent être réalisés à l'aide de matériaux hétérogènes prélevés sur les sites. Le renforcement peut ici avoir deux fonctions :

– améliorer la stabilité de l'ouvrage lorsque les caractéristiques du sol sont mauvaises ;
– pallier le caractère imparfait des conditions de mise en œuvre (compactage notamment).

Jean-Marc Tacnet

*Cemagref
URE Erosion
torrentielle, neige
et avalanches
Domaine
universitaire - BP 76
38402 St Martin
d'Hères cedex*

**Philippe Gotteland,
Abdel-Aziz Aboura**

*LIRIGM - ISTG
UJF
BP 53
38041 Grenoble
cedex 9*



▲ Photo 1. – Travaux d'urgence sur un barrage de correction torrentielle en site instable (photo J.M. Tacnet).

Pour permettre l'application de ces techniques aux ouvrages de protection contre les risques naturels, les méthodes classiques de conception et calcul doivent être adaptées aux cas de charges appliqués et conditions d'exécution parfois délicates de ces ouvrages. De plus, les sols (éboulis, moraines, dépôts torrentiels) susceptibles d'être utilisés appartiennent à la catégorie des sols grossiers et sont mal connus au niveau géotechnique. La plupart du temps, le dimensionnement est effectué sur la base de valeurs de caractéristiques mécaniques forfaitaires.

Photo 2. – Torrent du Rif-Fol (Isère, France) : vue générale du barrage avant travaux (photo J.M. Tacnet). ▼



des caractéristiques des sols hétérogènes à forte granulométrie à l'aide d'une boîte de cisaillement de très grande dimension sur un sol de torrent modèle.

■ Exemple d'application : réalisation d'une aile de barrage de correction torrentielle

Le Torrent du Rif-Fol est situé sur la commune de Roissard en Isère. Un dispositif de correction torrentielle de type protection active a été mis en place pour limiter les risques de glissement de berges dans la partie supérieure du bassin versant. Les travaux ont été réalisés en urgence par le service départemental de Restauration des Terrains en Montagne de l'Isère à la suite d'un basculement de l'aile rive gauche d'un barrage de consolidation de type poids (structure raccordant le corps central du barrage avec la berge). Cet exemple a essentiellement pour but d'illustrer les difficultés de réalisation et le contexte particulier d'implantation de ces ouvrages. En raison de l'absence totale d'autres moyens d'accès, l'approvisionnement des matériaux a été effectué par hélicoptère (photo 1). Un massif de sol renforcé a été mis en place en rive gauche au contact de la berge en glissement (photo 2, figure 1). Ce type d'ouvrage constitue une première expérience avec de telles contraintes liées à l'environnement géotechnique et aux conditions d'accès ; la conception et le mode de réalisation sont donc largement perfectibles.

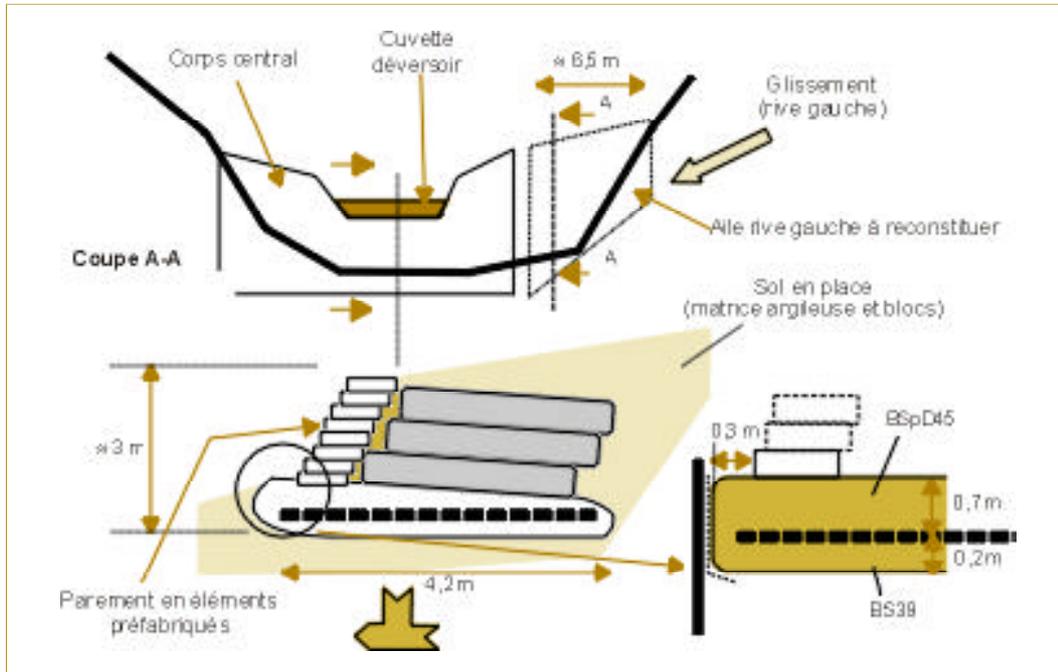
Etude expérimentale des caractéristiques des sols à forte granulométrie

■ Caractérisation du sol

Le sol étudié provient du torrent du Manival (département de l'Isère – France). Le prélèvement a été effectué dans le lit torrentiel. Le choix s'explique par la proximité du site et par son caractère représentatif d'une majorité de sols de torrents.

Ce matériau (classe C2B5 selon la classification du Guide des terrassements Routiers) est constitué de grains anguleux calcaires et marnocalcaires enrobés dans une matrice fine limono-argileuse. La granulométrie est très étendue et

▼ Figure 1. – Torrent du Rif-Fol (Isère, France) : principe des travaux d'urgence.



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 (figure 2). Les propriétés de la matrice argileuse sont : VBS mesurée de 0,27 à 0,56 (début de sensibilité à l'eau), limite de liquidité $W_L = 31,5$; indice de plasticité $I_p = 11,5$. A l'optimum proctor (NFP94093), les valeurs moyennes sont $W_{OPN} = 7,5\%$, $\gamma_{d,OPN} = 21,7 \text{ kN/m}^3$, le poids volumique mesuré sur site est égal à $\gamma_d = 20,5 \text{ kN/m}^3$.

■ Géosynthétiques

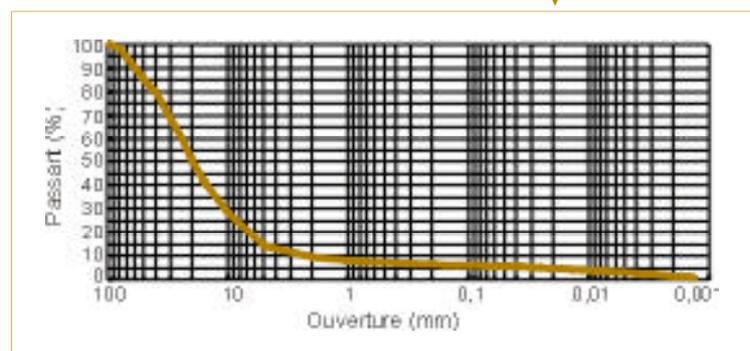
Des essais de frottement d'interface ont été effectués sur deux géosynthétiques utilisés dans des applications de renforcement de sol : un géotextile composite (noté BDR 200) et une géogrille (notée TSR 110).

Le BDR 200 est constitué de deux parties : une nappe support (non-tissé aiguilleté à base de filaments continus en polypropylène), des éléments unidimensionnels de renfort (fils de hauts modules en polyester) liés à la nappe support. Ses caractéristiques principales sont, une résistance à la traction de 200 kN/ml, une défor-

mation à l'effort maximal de 11% dans le sens de sollicitation, une masse surfacique de 580 g/m², une épaisseur (sous 2 kPa) de 2.9 mm.

La TSR 110 est une grille uniaxiale en polyéthylène haute densité (PEHD) contenant un minimum de 2% de carbone. L'interface sol-géogrille se situe, non seulement au niveau du frottement de surface, mais aussi par interaction avec les grains du sol. Ses caractéristiques principales sont une résistance à la traction de 110 kN/ml, un maillage (longi. 150 mm, trans. 16 mm), une épaisseur de 5.5 à 5.9 mm, une déformation à l'effort maximal de 11.2 % dans le sens de sollicitation, une masse surfacique de 1100 g/m².

Figure 2. – Torrent du Manival : courbe granulométrique (fraction 0/100 m).



■ Expérimentations

Dispositif expérimental

Le boîtier de cisaillement de très grande dimension (1000 x 1000 mm) est de conception modulaire permettant le démontage rapide de tout ou partie des éléments constitutifs pour permettre un transport rapide sur site. La contrainte maximale de confinement en tête d'échantillon est 150kPa. L'effort est appliqué par l'intermédiaire de quatre vérins agissant sur une plaque de répartition (plaque lisse ou rendue rugueuse par soudure de cornières de blocage), en contre-réaction avec le boîtier supérieur. L'effort transite donc par des roulements inter-boîtiers et la résistance induite a été systématiquement déduite. La contrainte tangentielle est appliquée à l'aide d'un vérin à commande manuelle d'une capacité de 500kN. La vitesse de cisaillement ainsi que la contrainte de confinement sont contrôlées manuellement. Ce dispositif prototype à capacités limitées (capacité des équipements hydrauliques, rigidité du boîtier et des roulements...) limite l'étude aux faibles contraintes, mais proches de celles correspondant à la réalité d'une construction.

Spécificité de la préparation des échantillons de sols grossiers

Par rapport à des essais classiques de laboratoire, les difficultés majeures portent sur le volume des échantillons (1430 kg de matériau), la difficulté de réalisation des échantillons (compactage et contrôle du compactage, me-

sure de la teneur en eau...). Le remplissage s'effectue en cinq couches successives compactées à l'aide d'une dame prototype. Le plan de cisaillement se situe au milieu d'une couche.

Pour les essais de frottement sol-géosynthétique, certains points délicats apparaissent (photo 3) :

- fixation des géosynthétiques au boîtier ;
- altération rapide du géosynthétique par frottement des éléments grossiers ;
- choix du support (support rigide ou support sol).

Les conditions de réalisation des essais de cisaillement (granulométrie de l'échantillon, compacité, teneur en eau, vitesse de cisaillement, niveau de contraintes appliqué) et les courbes contraintes-déformations sont des informations importantes. L'étude a porté sur l'influence des différents paramètres. Les résultats doivent être analysés en prenant en compte les limitations du dispositif et les conditions de réalisation des essais (figure 3). Les valeurs (C et ϕ) obtenues résultent d'une interprétation notamment pour le choix de la déformation correspondant à la rupture en l'absence de pic visible sur les courbes de cisaillement obtenues à partir de ce dispositif (figures 4 et 5).

Résultats significatifs

Pour les essais de cisaillement sol-sol, malgré un compactage soigné du sol, il n'a pas été observé de pics sur les courbes effort-déplacement, rarement de palier (figure 4). Ceci peut résulter en partie de la conception même du dispositif ou la dilatance des matériaux est gênée par les interactions avec le boîtier supérieur. L'interprétation des résultats en tant que droites de Coulomb peut donc être discuté. Le tableau 2 donne les valeurs de C et ϕ pour différentes hypothèses de déplacement relatif ($\Delta U/U = 5\%$; $\Delta U/U = 7,5\%$; $\Delta U/U = 10\%$; $\Delta U/U = 15\%$), après correction liée aux efforts résiduels de la boîte à vide ("paramètres corrigés").

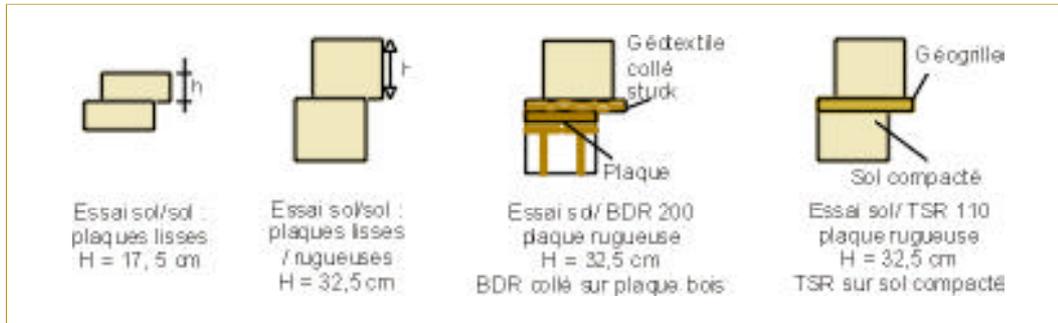
Les angles de frottement obtenus avec les plaques rugueuses sont plus importants qu'avec les plaques lisses. Ceci peut s'expliquer par une mobilisation d'une plus grande zone de sol dans la demi-boîte supérieure avec une répartition de l'effort de la contrainte tangentielle plus uni-

Photo 3. – Boîtier de cisaillement 1000x1000 mm : essai de frottement sol/géogrille (photo J.M. Tacnet). ▼

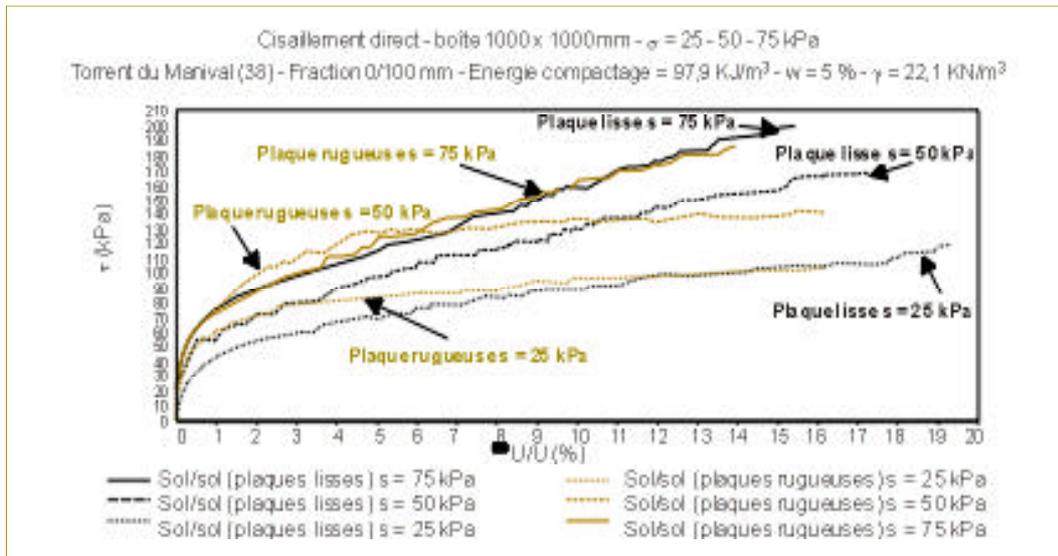


Sols grossiers renforcés pour ouvrages en sites instables

▼ Figure 3. – Différents types d'essais de cisaillement présentés (sol/sol ; sol/géosynthétique ; sol/géogridde).



▼ Figure 4. – Essais de cisaillement sol/sol : influence de la rugosité du boîtier.



▼ Figure 5. – Comparaison des courbes contraintes-déplacements relatifs.

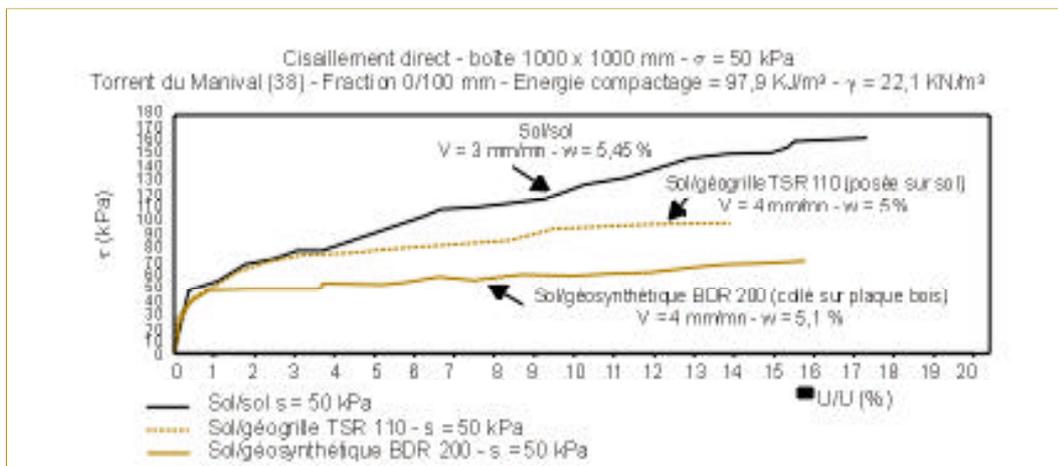


Tableau 1. – Influence des conditions aux limites du boîtier. ►

Essais de cisaillement complet sol/sol , boîtier 1000x1000 (3 points, hauteur cisailée = 32.5 cm, hauteur totale échantillon = 65 cm, fraction 0/100mm du sol, contraintes normales (25 kPa ; 50 kPa ; 75 kPa ; V = 3mm/mn)			
Configuration boîte	Déplacement relatif	Paramètres corrigés	
plaques lisses	U = 50mm (ΔU/U=5%)	φ = 41,1°	C = 49,2 kPa
	U = 100mm (ΔU/U=10%)	φ = 54°	C = 55,7 kPa
	U = 150mm (ΔU/U=15%)	φ = 60,9°	C = 60,4 kPa
plaques rugueuses	U = 50mm (ΔU/U=5%)	φ = 57,7°	C = 44,4 kPa
	U = 75mm (ΔU/U=7,5%)	φ = 61,7°	C = 39,4 kPa
	U = 100mm (ΔU/U=10%)	φ = 63,6°	C = 41,7 kPa

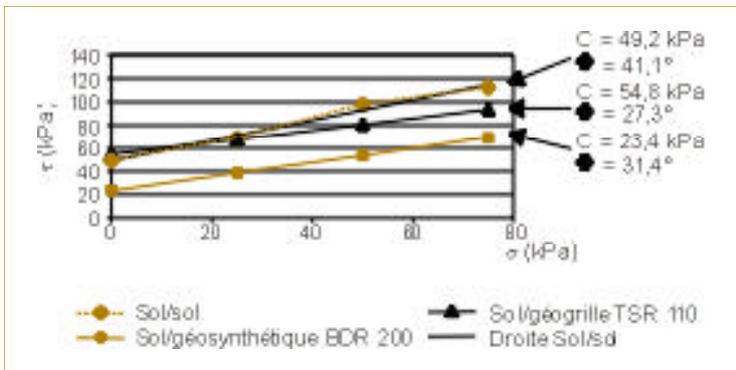
forme le long de la surface de cisaillement. Les différences sur les valeurs de cohésion de l'ordre de 5 kPa ne sont pas significatives.

Le rapport entre la hauteur du sol cisailé (H) et la taille maximale des plus gros éléments D_{max} contenus dans l'échantillon intervient, probablement dans le même esprit que le respect d'un

rapport L/D_{max} . L'effort tangentiel mobilisé est supérieur avec une hauteur de sol cisailé plus importante.

Les essais de cisaillement sol/sol ont été comparés avec d'autres obtenus sur des boîtiers de cisaillement direct 300 x 300 mm, soit du Cemagref Aix-en-Provence, soit du Lirigm, sur des fractions réduites du matériau. Les angles de frottement interne φ mesurés sont du même ordre de grandeur. Les valeurs de la cohésion obtenues pour les fractions les plus grossières des échantillons sont très largement supérieures aux valeurs mesurées à l'aide du boîtier 1000x1000 mm.

Les valeurs à l'interface sol-inclusion (C_g, ϕ_g), sont globalement inférieures aux valeurs de cisaillement sol-sol (figure 6) . Pour U=50mm, les résultats sont donnés dans le tableau 3. Dans le cas de l'essai sol-TSR110, l'augmentation de C peut s'expliquer par l'effet de blocage du sol dans les mailles de la géogridde.



▲ Figure 6. – Comparaison des droites de Mohr-Coulomb.

Tableau 2. – Comparaison des essais de cisaillement sol/sol, sol/géotextile composite et sol/géogridde sur le dispositif 1000x1000. ►

(plaques lisses, fraction 0/100 mm du sol "Manival", essais 25 - 50 - 75 kPa, h = 32.5 cm ; U = 50mm (ΔU/U=5%)		
Sol – Sol	Sol – BDR 200 (collé sur plaque bois)	Sol – TSR 110 (posé sur sol compacté)
Paramètres corrigés	Paramètres corrigés	Paramètres corrigés
C = 49,2 kPa (p.m. C = 44,4 kPa plaques rugueuses)	$C_g = 23,4$ kPa	$C_g = 54,8$ kPa
φ = 41,1° (p.m. φ = 57,7° plaques rugueuses)	$\phi_g = 31,4^\circ$	$\phi_g = 27,3^\circ$

Conclusion

La construction d'un premier ouvrage a mis en évidence les difficultés de réalisation d'ouvrages en sols renforcés dans un site d'accès très difficile. Le suivi du comportement de l'ouvrage permettra d'analyser l'évolution des fortes déformations et tassement prévisibles, inévitables en raison des conditions de réalisation et l'état du sol lors de la mise en œuvre (gel). Ces conditions extrêmes présentent l'intérêt d'éprouver la technique sur un premier ouvrage de taille modeste.

L'étude expérimentale confirme les difficultés opératoires liées à la caractérisation du comportement mécanique des sols grossiers à l'aide

d'un dispositif de cisaillement de grande dimension. L'étude du comportement d'interface entre le sol et une inclusion géosynthétique est l'un des aspects les plus notables. Il est intéressant de noter la chute des valeurs des caractéristiques observées à l'interface.

Cette étude devrait être poursuivie par la réalisation d'un ouvrage de référence en vue de :

- confronter le comportement réel d'un ouvrage avec les calculs de dimensionnement ;
- comparer différentes techniques de renforcement de sols en utilisant des sols grossiers. ■

Résumé

Des pentes de remblai importantes et l'utilisation de sols prélevés sur place sont recherchés pour la réalisation de dispositifs de protection contre les risques naturels (éboulements, avalanches, crues torrentielles...). La technique de renforcement de sols par géosynthétiques a été utilisée dans le cadre d'un barrage de correction torrentielle. Un sol grossier de torrent est étudié à l'aide d'un boîtier de cisaillement de très grande dimension (mesure des caractéristiques de frottement sol/sol et sol/géosynthétique).

Abstract

Research is being carried out into the use of taken on-site coarse-grained soils in order to build defences against natural risks (landslides, avalanches, torrential floods, etc.). The geosynthetic soil reinforcement technique was used for a torrent control dam. A torrent bed coarse-grained soil was studied, using a very large shear box to measure the soil/soil and soil/geosynthetic friction properties.

Bibliographie

[GOT1] GOTTELAND (P), TACNET (J.M.) 2000 – *Caractérisation des sols grossiers : application aux sols de torrent* – Revue française de génie civil, 14 p., à paraître.

[SAU1] SAURY (G.), 1997 – *Caractérisation géomécanique d'un sol de torrent* - Mémoire de DEA M.M.G.E. – Université Joseph Fourier, Grenoble

[TAC1] TACNET (J.M.), GOTTELAND (P.) 1998 – *Amélioration de la connaissance des caractéristiques géotechniques des sols grossiers : application aux sols de torrent* - Rapport – Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche Pour la Prévention des Risques Naturels – Grenoble.

TACNET J.M., GOTTELAND Ph., ABOURA A., 1999 – *Sols grossiers renforcés par ouvrages de protection en site instable*. Rencontres Géosynthétiques 99, Comité Français des Géosynthétiques, Bordeaux, 12-13 octobre 1999.

photo F. Dinger

