

REMBLAI LÉGER RENFORCÉ PAR NAPPES GÉOSYNTHÉTIQUES

LIGHT EMBANKMENT REINFORCED BY GEOSYNTHETIC

Sophie LANGARD
Terageos, Grenoble, France

RÉSUMÉ - La recherche d'une solution technique et économique en remblai, à la fois auto-stable et compatible avec des sols compressibles, fut l'une des grandes problématiques de la conception et de la réalisation du projet de «Valenton». L'association de matériaux en broyats de pneus réutilisés en remblai à des nappes de géotextile tissé à haute ténacité en renforcement a permis de concevoir et réaliser un ouvrage souple et léger adapté aux contraintes du site. La méthode de dimensionnement aux ELU communément utilisée pour les remblais renforcés par nappes géosynthétiques n'aura cependant pas permis de prévoir le comportement en déformation de l'ouvrage.

Mots clés : remblai, renforcement, géosynthétique, sol compressible, broyats de pneus.

ABSTRACT - The search of a technical and economical solution for a stable embankment adapted to soft soils was one of the big problems raised during the conception and the building of the project "Valenton". The combination of tyres pieces reused in embankment to high stress geosynthetic reinforcement enabled to conceive and build a flexible and light structure adapted to the constraints of the site. The method of calculation at failure, commonly applied for the reinforcement by geosynthetic, has not allowed to assess the behaviour and deformations of the building.

Keywords: embankment, reinforcement, geosynthetic, soft soil, pieces of tyres.

1. Introduction

Le projet de VALENTON consiste à monter un remblai à la périphérie d'une cuve de repompage sur toute sa hauteur (figure 1). Ce chantier à première vue simple a du faire l'objet d'une étude de solution technique et économique adaptée aux contraintes imposées par :

- des terrains de fondation compressibles,
- l'ouvrage en béton contigu au remblai sur lequel aucune poussée ne doit être exercée.

Le choix d'un remblai léger et souple, renforcé par des nappes géotextile haute ténacité fût adopté. L'article qui suit développe les différentes étapes du projet, de la conception à la mise en oeuvre, en passant par la présentation de la méthode de dimensionnement des nappes de renfort.

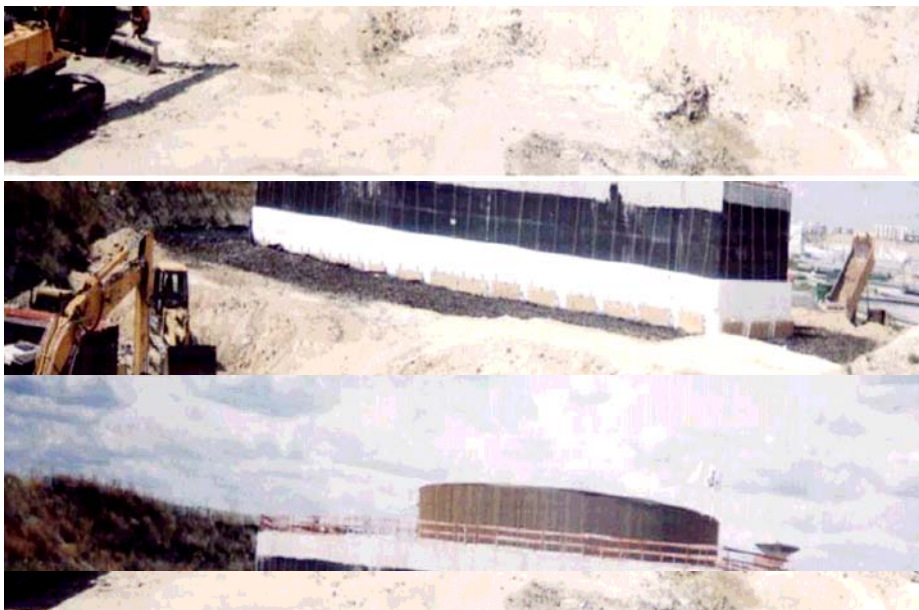


Figure 1. Vue globale de la mise en oeuvre du remblai autour de la cuve de repompage.

2. Définition du projet

2.1. Caractéristiques du remblai

Il s'agit d'élever un remblai contre le voile béton vertical d'une cuve de repompage des eaux usées de Valenton, sur une hauteur maximale de 10m, une emprise d'une vingtaine de mètre en arrière de la cuve et un périmètre d'ouvrage de 95ml

2.2. Contraintes de conception

Deux contraintes importantes sont à prendre en compte dans la conception du remblai :

- tout d'abord, le voile béton de la cuve de repompage existant a été dimensionné pour reprendre des efforts en poussée maximum de 12,5 kPa. Par principe de précaution, on demande à la structure en remblai de reprendre en totalité les efforts de poussée et ainsi de supprimer tout effort sur mur béton.

- le terrain d'assise du remblai est une ancienne décharge constituée de matériaux de remblai hétérogènes et compressibles (module pressiométrique $E_M=2\text{MPa}$) sur 10m à partir de la surface. Les sous couches sont constituées d'alluvions anciennes sur 2m ($E_M=30\text{MPa}$), de calcaire de St Ouen et de marnes ($E_M=30\text{MPa}$), et de marnes consolidées ($E_M = 100\text{MPa}$). Des tassements importants, de l'ordre de 45cm sous une surcharge équivalente à 10m de matériaux de remblai de densité 2, sont attendus pendant et après la phase d'élévation du remblai.

Il s'agit par conséquent de trouver une solution technique et économique pour la réalisation d'un ouvrage capable d'absorber les efforts de poussée des terres à l'arrière d'une part, et suffisamment souple d'autre part pour subir les tassements différentiels du sol d'assise sans se rompre.

2.3. Définition de la solution

2.3.1. Une solution en remblai renforcé par nappes géotextiles

Le choix de la technique d'ouvrage s'est donc orienté vers un massif renforcé par nappes géotextile, auto-stable et souple en flexion (figure 2). Les nappes de renfort permettent d'apporter une cohésion d'ensemble au remblai et de reprendre en traction les efforts de poussée des terres à l'arrière, de surcharge du poids du remblai et des véhicules de chantier pendant la construction. Au même titre que les remblais sur sols mous, le renforcement par nappes géotextile apportent ici un grand intérêt, du fait de leurs déformabilités requises pour des tassements différentiels importants.

Compte tenu du comportement chimique des broyats de pneus méconnu à long terme, le choix du renfort s'est orienté vers des nappes géotextile tissées en polypropylène de haute ténacité. La résistance, la longueur d'ancrage et l'espacement nécessaire à la stabilité de l'ouvrage seront définis par la suite dans l'étude de dimensionnement.

2.3.2. Un espace de sécurité au parement

La souplesse apportée par les nappes géotextile à l'ouvrage s'accompagne forcément d'un risque de déformation latéral du massif, ne résolvant pas le problème de poussé du parement contre le voile béton de la pompe de relevage. Cette nouvelle contrainte a été résolue en imposant un espace de vide et une épaisseur de matériaux compressibles contre le voile.

2.3.3. Des matériaux de remblai techniques légers

Afin de limiter au maximum les amplitudes des tassements du sol d'assise prévues, et ainsi réduire les risques de déformation et de poussée du massif sur la cuve, une solution innovante a été avancée : les matériaux de remblai courants adoptés en premier lieu pour la réalisation du remblai technique, ont été remplacés par des broyats de pneus armés de dimensions 15cmx15cm en moyenne. Ces matériaux, de poids volumique de l'ordre de 5 kN/m³, allègent considérablement la charge exercée sur le terrain d'assise, et ont des caractéristiques mécaniques en frottement estimées favorables au réemploi en remblai. Ainsi les tassements différentiels estimés entre l'amont et l'aval de l'ouvrage passent de 45cm à 12cm.

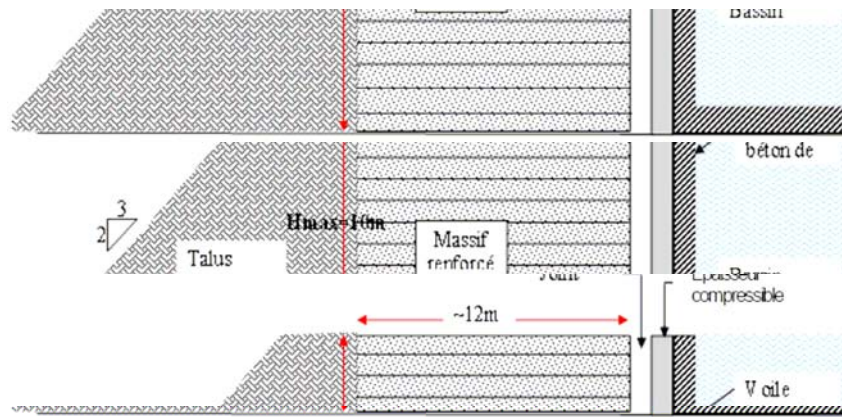


Figure 2. Coupe de principe de l'ouvrage renforcé.

3. Dimensionnement de l'ouvrage

3.1. Méthode de dimensionnement

Le dimensionnement du renforcement de l'ouvrage a été étudié aux États Limites Ultimes. En effet aucune méthode de dimensionnement ne permet dans l'état actuel des connaissances de justifier les renforcements par géosynthétiques aux ELS. Le calcul utilise la méthode de Bishop modifiée et considère les surfaces critiques de glissement qui recoupent les nappes de renfort. La surface est de forme circulaire et passe par le pied de l'ouvrage. Le facteur de sécurité sur la stabilité est calculé à partir de l'équilibre général des moments. Les inclusions sont prises en compte dans les équations d'équilibre par la résistance propre en traction et le frottement maximal mobilisé sur la longueur d'ancrage à l'arrière de la surface de rupture.

Le dimensionnement tient compte par ailleurs des coefficients de pondération sur les actions annoncés dans le projet de Norme pour l'utilisation des géotextiles en ouvrages renforcés XP G 38064, dans le cadre des ouvrages sensibles permanents.

3.2. Hypothèse de dimensionnement

Les hypothèses de dimensionnement concernent essentiellement les caractéristiques mécaniques des matériaux de broyats de pneus utilisés en remblai technique :

- angle de frottement interne effectif $\varphi' = 27$ degrés ;
- cohésion effective $c' = 0$ kPa ;
- poids volumique $\gamma = 5$ kN/m³.

Une surcharge d'exploitation de 10kN/m a été imposée en amont du parement pour modéliser les véhicules de chantier pendant la phase d'exécution.

Aucun effort stabilisateur n'a été pris en compte au parement.

Aucune nappe phréatique n'a été considérée au calcul, conformément aux conditions réelles du site.

3.3. Critères et coefficients pondérateurs propres aux nappes de renfort

Le dimensionnement par l'étude de la stabilité interne s'appuie sur deux critères : la résistance du renfort à long terme, et le frottement mobilisable à l'interface entre les matériaux de remblai et le géotextile.

3.3.1. Résistance à long terme

La résistance du renfort géotextile à long terme est déterminée à partir de la résistance nominale donnée par le fournisseur, pondérée dans les calculs par des coefficients réducteurs afin de tenir compte des facteurs qui affaiblissent la résistance des nappes au cours de la mise en oeuvre et de la vie de l'ouvrage :

$$T_{\text{calc}} (F_{\text{flu}} F_{\text{comp}} F_{\text{env}} F_{\text{gé0}}) = R \quad (1)$$

avec :

- T_{calc} = la résistance à long terme utilisée dans les calculs de dimensionnement ;
 R = la résistance nominale (ou à court terme) du géotextile donnée par le fournisseur ;
 F_{flu} = le coefficient correcteur qui tient compte de la perte de résistance par fluage du polymère qui compose géotextile ($F_{\text{flu}} = 4$ pour le polypropylène pour un ouvrage > 70 ans) ;
 F_{comp} = le coefficient correcteur vis-à-vis des endommagements mécaniques qui ont lieu lors du compactage des matériaux de remblai (compte tenu de la présence de certains éléments en acier agressif pour les nappes, et malgré le fait que le compactage des broyats de pneus soit en pratique limité, nous avons opté pour un coefficient maximum : $F_{\text{comp}} = 1,4$ en sol agressif) ;
 F_{env} = le coefficient correcteur vis-à-vis des modifications de résistances en traction liées à l'environnement (compte tenu du contexte chimique en broyats de pneus et des conséquences chimiques méconnues sur ces matériaux, le coefficient a été pris au maximum de sa valeur : $F_{\text{env}} = 1,2$) ;
 $F_{\text{géo}}$ = le coefficient correcteur vis-à-vis de la résistance nominale annoncée par le fournisseur, qui tient compte des incertitudes de fabrication et de mesures de résistance.

Le facteur correcteur obtenue et imposé au dimensionnement est de 8 : on diminue par conséquent de 87% la résistance nominale du produit.

3.3.2. Frottement sol/géotextile

Le frottement de l'interface sol/géotextile tissé est pris égal à 70 % du frottement interne des matériaux utilisés en remblai. Ce même paramètre est pondéré dans les calculs d'un coefficient d'incertitude sur la valeur de 2/3.

3.4. Stabilité externe

L'étude de la stabilité externe en considérant un ouvrage monolithique rigide, a amené à considérer une longueur d'ancrage des nappes minimale à l'arrière du parement de 12 m, afin d'assurer la sécurité vis-à-vis du glissement à la base. Des tassements différentiels ont été évalués en fonction des caractéristiques des terrains de fondation et des surcharges exercées par le poids du remblai et les surcharges d'exploitation. Ces tassements peuvent atteindre 12 cm entre l'amont et l'aval du remblai.

3.5. Stabilité interne et définition du renforcement

La recherche d'un facteur de sécurité en stabilité interne supérieur à 1 nous a amené à considérer deux types de nappes tissées en polypropylène à haut module (figure 3) :

- à la base du remblai sur 1,5m, où les efforts en traction exercées sont les plus importants, des nappes de 200kN/m dans le sens du renforcement pour un allongement de 13%,
- sur la partie supérieure du remblai des nappes de 100kN/m dans le sens du renforcement pour un allongement de 15%.

Ces nappes sont espacées de 50 cm et sont ancrées sur 12 m à l'arrière du parement. Le coefficient de sécurité obtenu sur la stabilité interne de l'ouvrage est de 1,40 (figure 4).

4. Construction du remblai et suivi

4.1. Construction du remblai

Le remblai a été monté par couches successives de broyats de pneus disposées directement sur les nappes géotextile (figure 5). Un système de coffrage rigide, reposant contre l'épaisseur compressible du voile, et amovible par le haut du remblai, a permis de réaliser le parement droit dans un espace offrant peu d'emprise.

La composition du remblai technique en broyats de pneu rend difficile le compactage des couches sur les nappes de renforcement. Hors le compactage est une phase nécessaire pour mettre en pré-tension les nappes de renfort et pour assurer un parement fini et stabilisé. Pour palier à cette contrainte, les nappes furent tendues manuellement dans le sens du renforcement. Au parement, elles furent retournées à l'horizontale sur une longueur relativement importante de 1,50m et également tendues puis fichées dans le remblai au moyen de fers à béton, de manière à maintenir la tension tout au long du remblayage.

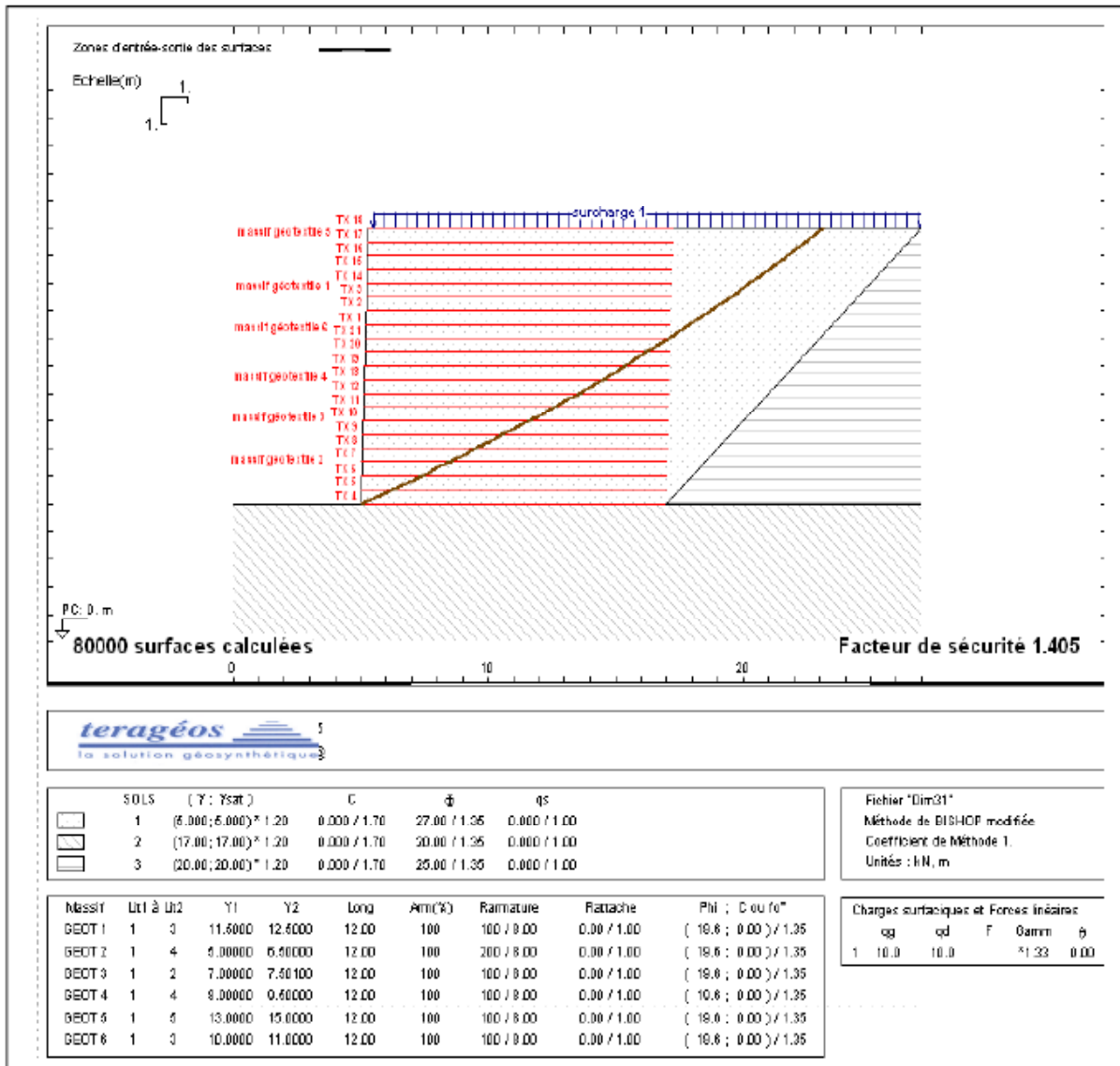


Figure 3. Modélisation et dimensionnement du remblai renforcé en stabilité interne.

4.2. Évolution des déformations et des tassements

Des tassements importants ont été, comme prévus, constatés dès la réalisation de la base du remblai : les 3 premières couches sur 1,50 m de hauteur se sont tassées d'environ 50 cm. Par ailleurs des déformations horizontales du parement à la base du remblai ont été observées sur une dizaine de centimètre pendant la phase d'exécution. A ce jour, soit plus de 5 mois après la fin de la construction du remblai renforcé, aucun déplacement significatif n'a été observé, et le remblai semble s'être normalement stabilisé

4.3. Intérêts de la technique de pose

Les économies réalisées de par le choix d'une technique de renforcement par géotextile tissé, la facilité de manœuvre et de pose des nappes, l'efficacité et la rapidité d'exécution, le nombre réduit de véhicules de chantier et du matériel utilisé, le faible investissement du système de coffrage, furent les points positifs soulignés dans le bilan de la réception du chantier.

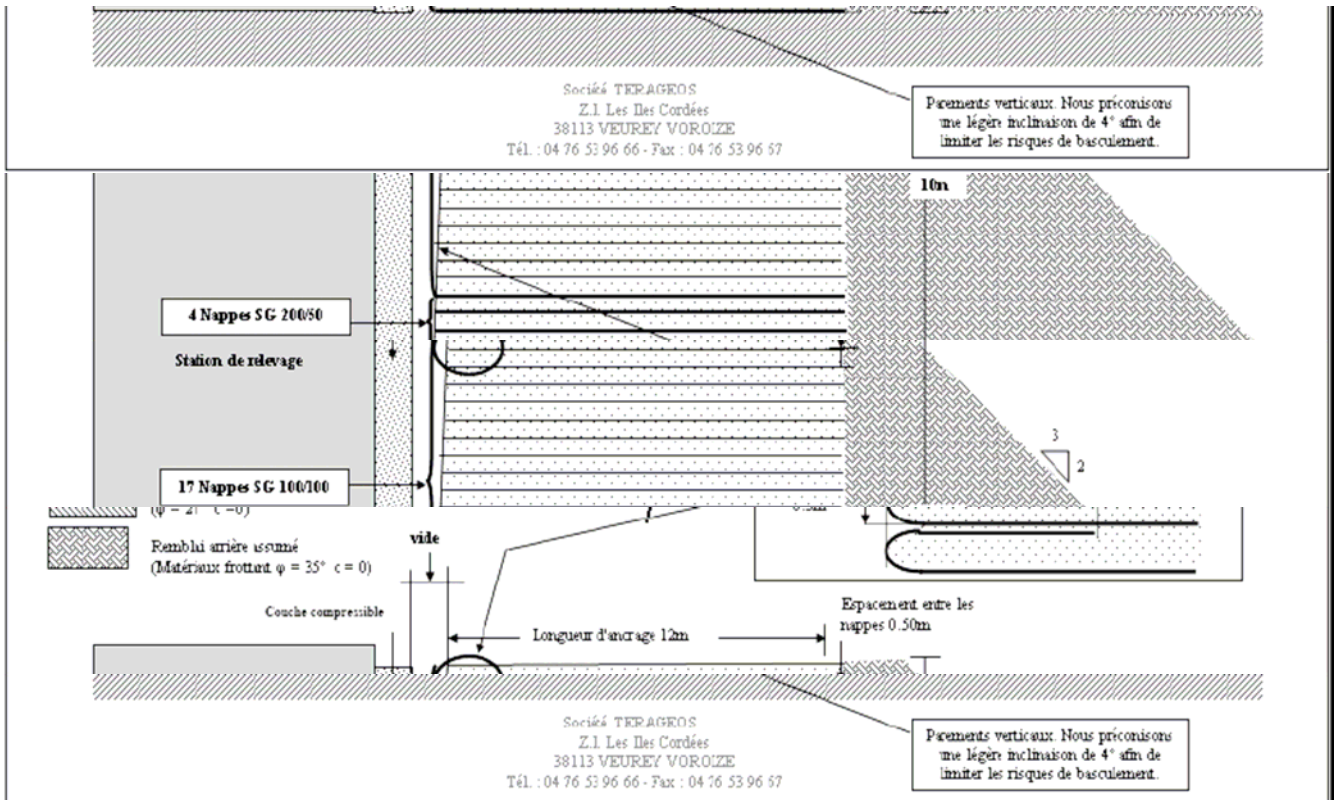


Figure 4. Coupe de principe de la solution adoptée.



Figure 5. Dernière couche de remblai et de nappe de géotextile en renfort.

5. Conclusions

Le projet de Valenton a permis de mettre en avant une méthode de conception et de réalisation encore peu commune de remblai léger renforcé par nappes géotextile : la combinaison de nappes géotextile apportant auto-stabilité et souplesse à l'ouvrage, et de matériaux de broyats de pneus armés réemployés en remblai technique pour leur faible poids volumique.

Cette technique d'ouvrage particulière apporte une solution intéressante pour des applications en renforcement sur des sols compressibles soumis à d'importants tassements différentiels. Un suivi des déformations et du comportement de cet ouvrage sur du long terme nous permettra, nous l'espérons de le confirmer.

Par ailleurs cet ouvrage, comme l'ensemble des ouvrages amenés à subir de grands tassements aux états de service, montre tout l'intérêt apporté par une méthode de dimensionnement en déformation, et non seulement à la rupture, qui permet de prévoir le comportement à long terme de l'ouvrage et du sol support.

6. Références bibliographiques

Avant Projet de Norme Expérimentale XP G 38064 (2002).

Bertaina G, Villard P (2004) Remblais renforcés sur sol compressible. *5^{ème} rencontres Géosynthétiques Francophones 2003/2004.*

Gotteland P, Dubreucq T, Guerpillon Y (2004) Ouvrages de soutènement, des techniques géosynthétiques matures ? *5^{ème} Rencontres Géosynthétiques Francophones 2003/2004.*

Schlosser F, Unterreiner P (2000) Renforcement des sols par inclusions. *Editions Techniques de l'Ingénieur.*

TBU (2003) Test report N°1.1.