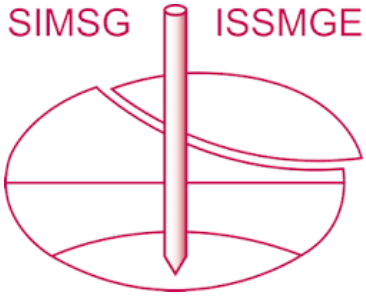
INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

https://www.issmge.org/publications/online-library

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

XIII ICSMFE, 1994. New Delhi, India / XIII CIMSTF, 1994. New Delhi, Inde

UTILISATION DES GEOSYNTHETIQUES ET DES FIBRES NATURELLES EN GEOTECHNIQUE

UTILISATION OF GEOSYNTHETICS AND NATURAL FIBERS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

F. Schlosser[1] *Ph. Unterreiner*[2] *Ph. Delmas*[3]

[1]TERRASOL, Immeuble Hélios, Montreuil, France
[2]CERMES (ENPC/LCPC), Noisy-le-Grand Cedex, France
[3]Bidim Geosynthetics, Bezons Cedex, France

RESUME

Le développement remarquable en Génie Civil des géotextiles, géomembranes et produits apparentés, durant ces vingt dernières années, amène à se poser un certain nombre de questions d'importance aussi bien pour la conception que le dimensionnement des ouvrages. L'état actuel des connaissance est relativement bien développé pour les produits et applications traditionnelles. Cependant, le développement de nouveaux produits, comme par exemple, les géocomposites qui assurent plusieurs fonctions dans une structure, ou de nouvelles applications, comme les centres d'enfouissement techniques, amènent à se poser de nouvelles questions. Cet article aborde quelques unes des questions encore ouvertes sur les fibres naturelles, les géocomposites ainsi que deux types d'ouvrages, les culées de pont et les murs renforcés par géosynthétique.

INTRODUCTION

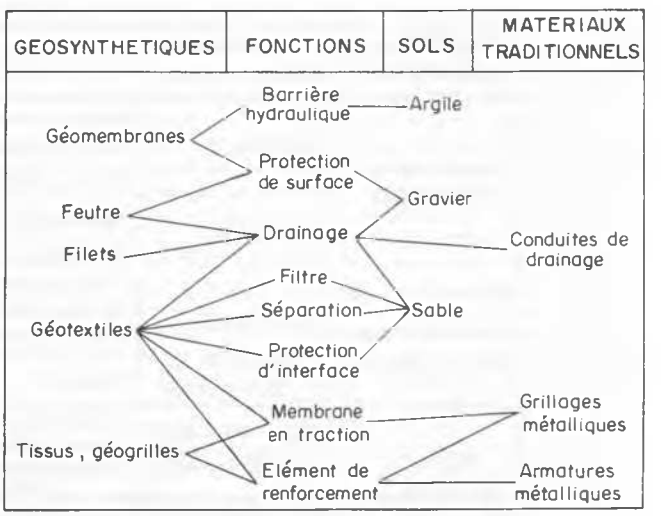
Durant les vingt dernières années, les géosynthétiques ont connu un développement remarquable en Génie Civil. Les domaines d'application se sont multipliés et de nos jours les géosynthétiques sont présents dans la plupart des ouvrages de Génie Civil. Les géosynthétiques sont habituellement classés en (1) géotextiles et produits apparentés en et (2) géomembranes et produits apparentés. Sont définis comme géotextiles, les produits issus de l'industrie textile, ce qui inclut les géotextiles d'origine naturelle ou synthétique. Les produits apparentés aux géotextiles incluent les géogrilles ou géogrilles en polymère. Tous ces produits pouvant être utilisés en nappe ou bande suivant les applications. Sont classées comme géomembranes, les nappes continues imperméables qui sont le plus souvent à base de polymère ou de bitume. Les produits apparentés aux géomembranes comprennent par exemple des produits à base de bentonite. Les géotextiles et produits apparentés, qu'ils soient d'origine synthétique ou naturelle, ainsi que les géomembranes, peuvent être caractérisés par un certain nombre de propriétés, auxquelles correspondent des fonctions précises ainsi que des domaines d'application (Tableaux 1 et 2) (Giroud, 1986). De nombreux états de connaissances sur les différentes applications, les méthodes de construction et de dimensionnement ont déjà été écrits dont : Schlosser et al. (1985), Giroud (1986), Holtz (1990), Gourc (1990). Le lecteur pourra également se référer au rapport général de J. K. Mitchell au présent congrès. Cet article a pour but de présenter les principales questions qui se posent à propos des géosynthétiques, ainsi que les types d'ouvrages que l'on voit actuellement se développer.

FIBRES NATURELLES

L'emploi de géotextiles naturels est assez limité dans les pays industrialisés du fait des coûts relativement peu élevés des matières synthétiques et de leur durabilité nettement plus importante. En Europe, notamment, les géotextiles naturels sont essentiellement utilisés pour engazonner des talus ou pentes, en misant sur leur destruction rapide dans le temps. Pour le renforcement des remblais, les géosynthétiques sont le plus souvent préférés. On peut citer l'exemple en Italie d'un remblai renforcé par des nappes de géosynthétique avec un parement constitué d'un grillage métallique et d'un "biomatériau" à base de paille retenant le sol entre les mailles (Rimoldi et Cambiaghi, 1992).

Dans les pays où les matières synthétiques sont relativement chères par rapport au coût de la main d'oeuvre comme en Inde, on constate que des constructions très économiques peuvent être réalisées à partir de matériaux naturels tels que le jute ou le coton, combinés avec des bambous et des lanières synthétiques pour tenir le tout (Datye et Murthy, 1992). Des applications aux murs de soutènement et aux routes (Figure 1) ont été ainsi développées avec succès. Il est à noter, que pour ce qui concerne de telles techniques, les recherches effectuées dans le passé ont été assez limitées et mériteraient plus d'efforts afin de caractériser au mieux les propriétés physiques, mécaniques et hydrauliques des géotextiles naturels (Karunaratne et al., 1992).

Tableau 1 : Relations entre les produits et leurs fonctions (Giroud, 1986)



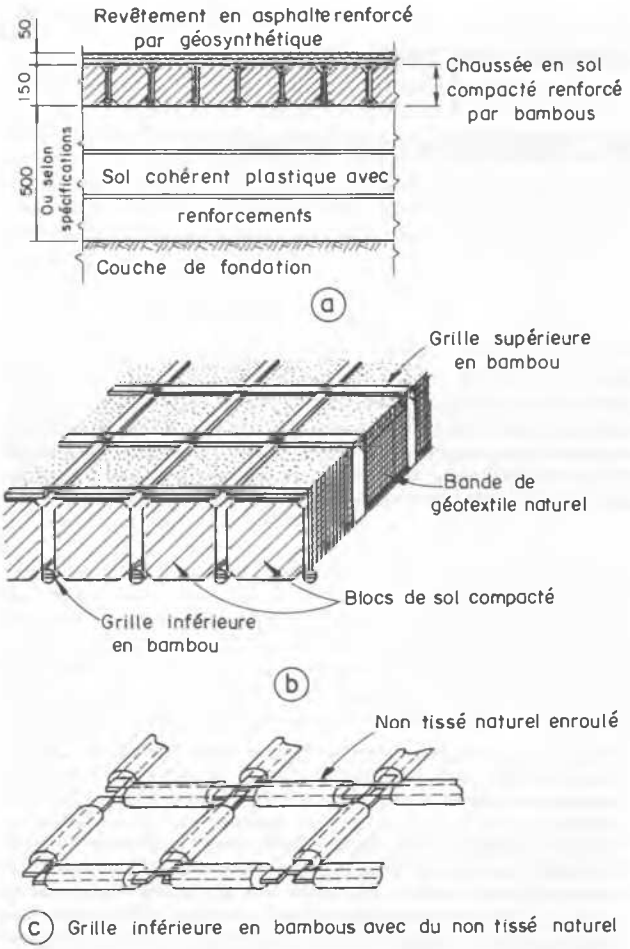


Figure 1 : Exemple d'emploi de géotextiles naturels dans une chaussée (Datye et Murthy, 1992)

GEOSYNTHETIQUES MULTIFONCTIONS

L'une des caractéristiques des géosynthétiques est qu'ils peuvent, en général, assurer plusieurs fonctions dans un ouvrage ainsi que le montre le tableau 2 (Giroud, 1986). Dans les ouvrages hydrauliques, les géotextiles assurent le plus souvent deux fonctions, une fonction de filtre et une fonction de drain. Dans le domaine des remblais sur sols mous, un géotextile peut avoir à assurer trois fonctions : il sépare le remblai du sol en place; il peut jouer un rôle de renforcement et améliorer la stabilité; en outre, il peut drainer les sols de fondation. Plus récemment, sont apparus dans le domaine des soutènements en sol renforcé, des géosynthétiques qui jouent à la fois un rôle de renforcement mais permettent aussi de drainer les sols de remblai. Enfin, dans le domaine de l'environnement, les dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques associent le plus souvent des géomembranes avec des géotextiles drainants pour former des géocomposites complexes.

Filtre et Drainage

Les géotextiles, du fait de leur structure, ont la propriété de jouer un rôle de filtre tout en restant perméables à l'eau. Dans les applications en Génie Civil, ils peuvent ainsi remplacer de manière très économique une couche de matériau granulaire, solution qui était classiquement utilisée avant l'apparition des géotextiles pour drainer la base d'un remblai. Quand un géotextile est utilisé seul, le choix de ses caractéristiques résulte d'un compromis entre un géotextile ouvert avec une grande perméabilité et un géotextile plus fermé pour retenir les particules du squelette. Très récemment, des géocomposites combinant une géogrille, qui joue le rôle de séparateur, prise en sandwich entre deux géotextiles, sont apparus. Ils permettent ainsi de choisir indépendamment les caractéristiques de filtre et de drainage.

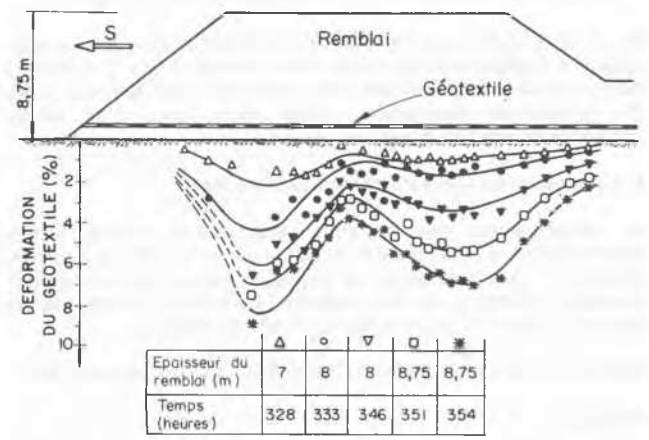
Renforcement, Filtre et Séparation

Les géotextiles sont très utilisés dans le domaine de la construction routière, que ce soit, pour une route provisoire ou permanente, ou pour une piste de chantier ainsi que pour les remblais sur sols mous. Quelle que soit l'utilisation du remblai : route (Nishigata et Yamaoka, 1992), voie ferroviaire (Yakovleva et al., 1990), piste d'aéroport (Haliburton et al., 1980) ou remblai sur sols mous (Magnan et al., 1993), il convient de distinguer deux cas : les remblais de grande hauteur et ceux de faible hauteur. Dans les remblais de grande hauteur, les surcharges sont relativement petites par rapport au poids propre du remblai. Même si le géotextile a une fonction de séparation, son rôle est d'éviter une rupture localisée en renforçant le remblai.

Tableau 2 : Relations entre les fonctions et les applications des géosynthétiques (Giroud, 1986)

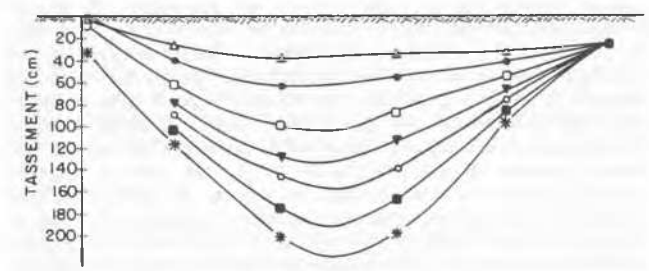
APPLICATIONS CATEGORIES	DOMAINES D'APPLICATION	TYPES D'APPLICATION	FONCTIONS: Drainage	Filtre	Protection	Séparation	Membrane en tension	Elément de renforcement
Applications hydrauliques	DRAINAGE	Drains en géosynthétique sans filtre	●					
		Drains en géosynthétique avec filtre (géocomposites)	●	●				
		Gravier drainant, buses		●				
	CONTROLE DE L'EROSION	Revêtement de remblai		●				
		Protection contre l'érosion			●			
		Filtres pour les limons		●			●	
Constructions en géosynthétiques	CONTENEURS	Coffrage béton, sacs de sable (remblais hydrauliques)		●			●	
		Gabions, sacs de sable					●	
	SUPPORTS DE GEOMEMBRANE	Coussin			●			
Structures géotechniques	VOIES ROUTIERES ET FERROVIAIRES	Revêtements asphaltés			●			
		Routes à faible traffic (déflexion importante)				●	●	
		Couche de fondation d'une route à fort traffic (petite déflexion), Ballast				●		●
	RENFORCEMENT DES SOLS	Murs renforcés, pentes et remblais						●

Pour les remblais de faible hauteur, les surcharges dynamiques peuvent être élevées, comparées au poids du remblai. Le géotextile, généralement placé à la base, assure alors une fonction de séparation entre le matériau de remblai et le sol de fondation ainsi qu'un rôle de renforcement en reprenant en traction une partie des efforts apportés par la surcharge. De plus, quel que soit le type de remblai, de grande ou faible hauteur, le géotextile peut servir aussi de drain. En ce qui concerne la construction et le dimensionnement de remblais sur sols mous renforcés par géotextile, l'état actuel des connaissances sur les mécanismes de rupture et les méthodes de dimensionnement correspondantes est relativement complet (Schlosser et al., 1985; Holtz, 1990; Rowe et Mylleville, 1990). Cependant, les méthodes de dimensionnement utilisées en pratique, ne permettent pas encore de prendre en compte dans les calculs, de manière simple et complète, les déformations des sols et des géotextiles. Elles permettent cependant de prendre en compte tous les types de rupture observés sur des ouvrages réels (Haliburton et al., 1978). Les méthodes de calcul en déformations des remblais sur sols mous renforcés par géotextile sont actuellement bien développées mais restent encore du domaine de la recherche. Pour pouvoir être utilisés couramment en pratique, ces méthodes ont besoin d'être validées sur des remblais expérimentaux en vraie grandeur complètement instrumentés tels celui de Guiche (Quaresma, 1992; Magnan et al., 1993; Delmas et al., 1994) (Figure 2).



	Δ	○	▽	□	✱
Epaisseur du remblai (m)	7	8	8	8,75	8,75
Temps (heures)	328	333	346	351	354

a) Evolution de la déformation du géotextile pendant la construction du remblai



	Δ	•	□	▽	○	■	✱
Epaisseur du remblai (m)	5	7	8	8	8	8,75	8,75
Temps (heures)	320	328	333	340	348	351	354

b) Evolution des tassements en surface pendant la construction du remblai

Figure 2 : Remblai expérimental de Guiche, renforcé par géotextile (Delmas et al., 1994)

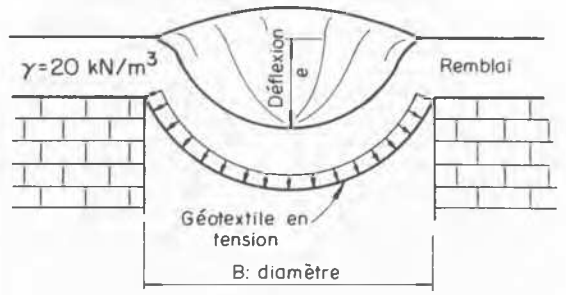


Figure 3 : Déformée d'une géomembrane sur une cavité circulaire (Perrier, 1983)

Dans le cas de chargements répétés sur des chaussés ou des voies ferrées, la présence d'un géotextile, permet d'augmenter très sensiblement la capacité portante à long terme pour un nombre important de cycles (Gourc et al., 1982). Le CBR d'une chaussée peut être ainsi multiplié par un coefficient trois sous chargements répétés (Omoto, 1992). L'état des connaissances sur l'amélioration apportée par les géotextiles dans les sous-couches d'une chaussée est encore relativement limité même si un certain nombre d'études ont permis de développer des relations empiriques. Enfin, il existe plusieurs applications particulières des géotextiles pour les remblais sur des sols présentant de fortes hétérogénéités tels que les sols karstiques avec fontis (Gabr et al., 1992) ou les sols mous renforcés par pieux flottants (Kempton et Jones, 1992). Dans ce type d'application, les géotextiles fonctionnent comme séparateur, mais surtout comme une membrane, en reprenant une partie des efforts induits par les tassements différentiels de la fondation (Perrier, 1983) (Figure 3).

Renforcement et drainage

Les géotextiles depuis leurs origines ont été utilisés avec des sols de remblai très variés, depuis les sols granulaires les plus frottants jusqu'aux sols purement cohérents. Dans le cas des sols cohérents, les teneurs en eau sont toujours relativement faibles; cela afin de pouvoir développer des efforts limites d'arrachement suffisants dans les renforcements. Très récemment, Tatsuoka et al. (1990) ont étudié, à l'aide de cinq remblais en vraie grandeur renforcés par géotextiles, ayant un très léger fruit et des longueur de renforcement relativement courtes (environ 30% de la hauteur), la possibilité d'utiliser la cendre volcanique argileuse de Kanto comme matériau de remblai (teneur en eau moyenne variant entre 100 et 120% avec un degré de saturation de 80 à 90%). Pour stabiliser un tel remblai, les auteurs ont eu recours à un géotextile non tissé à base de polypropylène (Figure 4). Les géotextiles ont très bien fonctionné comme drains, en maintenant constamment une succion importante à leur niveau, alors que dans le sol de remblai entre deux nappes de géotextiles, des pressions interstitielles positives furent mesurées pendant les pluies. La succion, en augmentant la résistance au cisaillement du sol, contribue de manière significative à la stabilité du remblai. Le rôle direct des géotextiles comme renforcement dans la stabilité est ainsi complété par un rôle indirect sur la résistance au cisaillement propre du sol. Des mesures tout à fait similaires ont été faites en France sur un mur en vraie grandeur utilisant comme remblai un limon, compacté à l'optimum Proctor plus 5%. Les pressions interstitielles se sont dissipées dès la construction avec le développement de succions de l'ordre de -5 kPa au niveau des renforcements composés d'un géocomposite non tissé de haut module tandis que des pressions d'environ +5 kPa étaient mesurées au niveau des renforcements composés d'un tissé (Perrier et al., 1986). Même si ces premières études donnent des résultats très prometteurs, de nombreux points restent encore à étudier, notamment la prise en compte, dans le dimensionnement, du couplage entre les fonctions de drainage et de renforcement, tant à court terme qu'à long terme. Si à court terme de fortes succions se développent, à long terme, celles-ci diminuent et sont en partie compensées par l'amélioration des propriétés mécaniques résultant de la consolidation du sol. Si la prise en compte de la succion pour un dimensionnement peut être délicate, par contre, il est possible de tenir compte de l'amélioration des propriétés mécaniques résultant de la consolidation du sol, en supposant celui-ci saturé (Gotteland, 1991) (Figure 5).

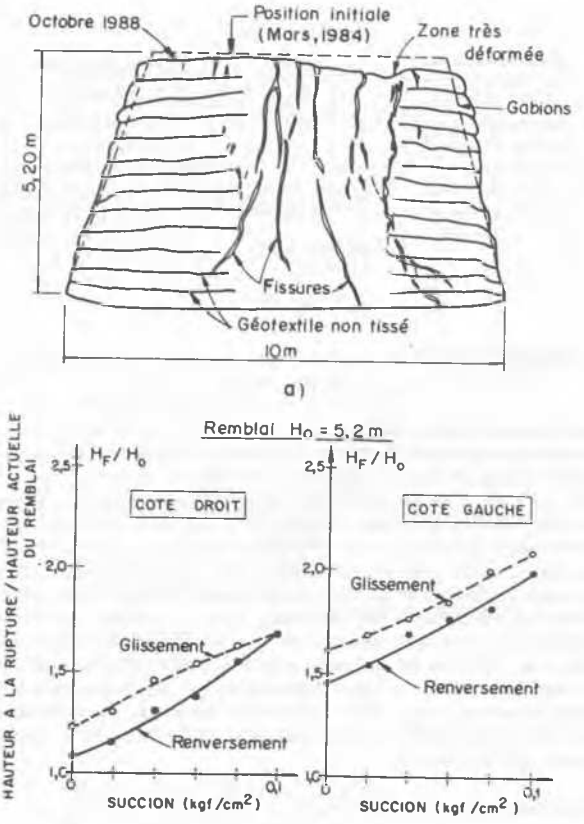


Figure 4 : Talus pentu en argile renforcée par un géotextile non tissé drainant (Tatsuoka et al., 1990)

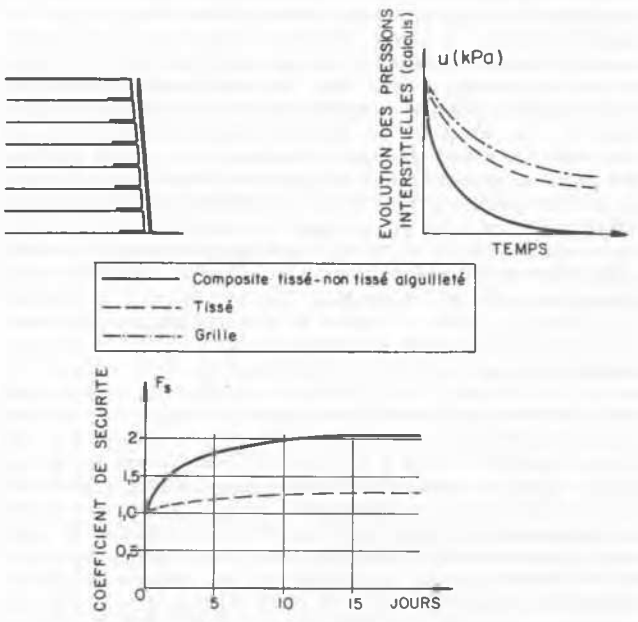


Figure 5 : Evolution de la pression interstitielle et du coefficient de sécurité pour différents types de renforcement (Gotteland, 1991)

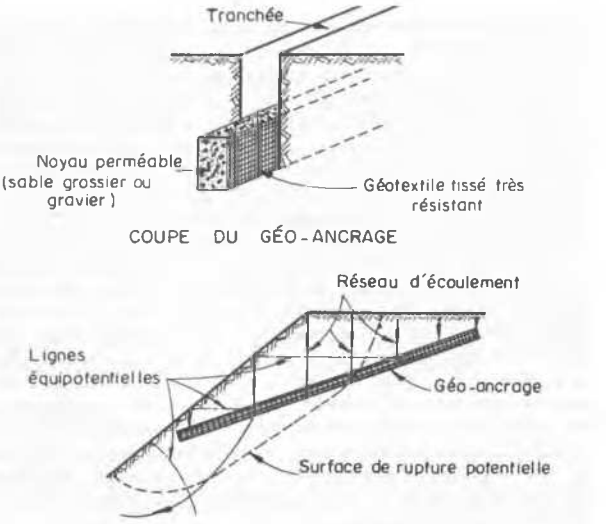


Figure 6 : Pente stabilisée par géoancrages drainants (Broms, 1992)

Sur le même sujet, on peut mentionner la stabilisation d'une pente instable réalisée à Singapour à l'aide de géotextiles (Broms, 1992). Un géotextile tissé de grande résistance a été associé à un matériau granulaire pour former des géoancrages fonctionnant comme drains mais aussi comme renforcements passifs (Figure 6).

Conclusion sur les Géosynthétiques Multifonctions

Le développement des géotextiles multifonctions, encore appelés géocomposites, ne pourra aller de pair qu'avec le développement de méthodes de calculs permettant de prendre en compte tous les couplages introduits. Cependant, de telles méthodes devront être validées sur des géotextiles monofonction avant de pouvoir être généralisées.

APPLICATIONS DES GEOSYNTHETIQUES EN SOUTENEMENT

Parement

Dans les ouvrages renforcés par inclusions, le parement a pour rôle essentiel d'assurer le confinement du sol entre les différentes nappes de renforcement. Dans le cas d'un renforcement par géotextiles, le parement est, le plus souvent, constitué par les nappes repliées sur elles-mêmes. Ce type de configuration, qui a pour effet de minimiser les poussées sur le parement en état de service, a par contre le désavantage de donner un parement peu esthétique. Pour y remédier, une grande variété de parements ont été imaginés et utilisés. Un premier type consiste à cacher le parement en géotextiles derrière un mur préfabriqué, constitué d'un ou plusieurs éléments, montés en avant et n'assurant pas de rôle mécanique. On peut citer ainsi le procédé EBAL-LCPC (Figure 7). Un autre type de parement consiste à utiliser en sandwich entre les nappes, des éléments de type cellulaire, qui peuvent être préfabriqués en béton (Gotteland et al., 1992) ou formés simplement de gabions ou sacs de sable (Miki et al., 1992). Enfin, on peut citer une technique assez répandue au Japon et moins en Europe qui consiste à couler en place un mur en béton armé continu, après que le remblai renforcé par géotextiles ait suffisamment tassé (Murata et al., 1992). A propos du parement, plusieurs questions se posent. Dans quelle mesure, le parement participe-t-il à la stabilité d'ensemble? Si sa contribution est importante, comment peut-on la prendre en compte simplement dans les méthodes de dimensionnement? Un certain nombre de recherches récentes ont été consacrées à ce sujet par Miki et al. (1992) pour les parements continus en béton coulé en place, par Murata et al. (1992) pour les parements formés de sacs de sable en sandwich entre les nappes et par Gourc et al. (1990) ainsi que Bathurst et al. (1993) pour les parements cellulaires (Figure 8). Il est à noter le développement actuel de ce dernier type de parement avec des réalisations spectaculaires telles que le mur (hauteur 12 m) de la RN 21 à Limoges en France, réalisé avec un géotextile non tissé (Gourc et al., 1990; Delmas et al., 1993).

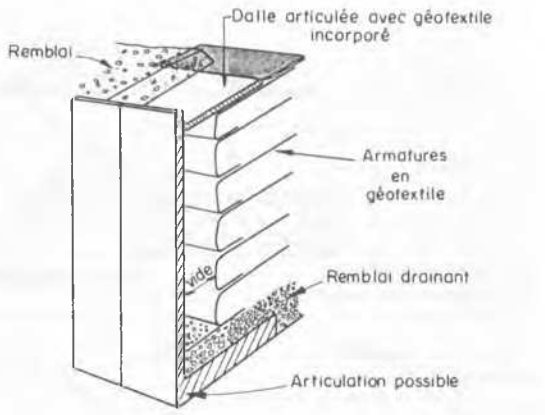


Figure 7 : Exemple de parement utilisé en renforcement des sols par géotextiles (Procédé EBAL-LCPC)

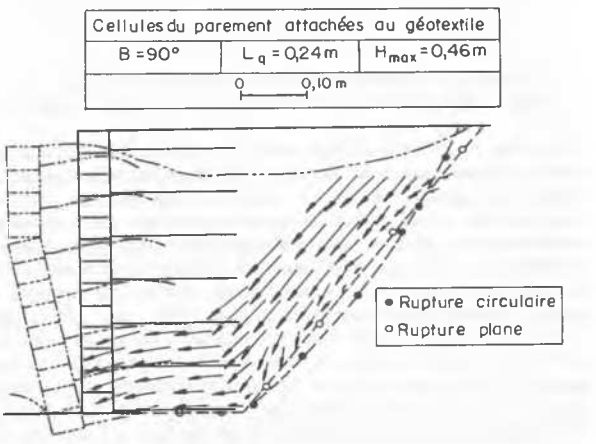


Figure 8 : Exemple, en modèle réduit, de la rupture d'un mur renforcé par géotextiles avec un parement cellulaire (Gourc et al., 1990)

Enfin, pour ce qui concerne le comportement du parement sous chargement sismique, il est intéressant de noter l'étude de Sakaguchi et al. (1992) sur différents types de parement. Il apparaît ainsi, que les éléments de parement doivent être attachés suffisamment pour ne pas se décrocher, mais surtout, que pour limiter les déplacements de l'ouvrage, le parement doit être aussi léger que possible afin de minimiser les forces d'inertie.

Culée de Pont

Depuis quelques années, une partie des recherches en renforcement des sols s'est concentrée sur l'emploi des géosynthétiques dans les culées de pont. On peut ainsi citer plusieurs gros programmes de recherche sur ouvrages expérimentaux en vraie grandeur : au Japon notamment pour le train à grande vitesse Tokaido Shinkansen (Kasugai et Tateyama, 1992) et en Europe un programme plus général développé en coopération entre la France et l'Allemagne sur l'emploi des géosynthétiques pour des culées de pont (Balzer et al., 1990). Ces études ont notamment montré l'importance de la mise en place sur le comportement de l'ouvrage. Le dimensionnement d'une culée doit satisfaire deux critères : la charge limite supportable et le tassement du remblai. Il semblerait que les géotextiles, à densité de renforcement comparable avec celle d'un ouvrage en renforcement inextensible, peuvent supporter des charges plus importantes car les déformations qui se produisent avant la rupture ont un effet positif sur la stabilité. Par contre, les déformations et déplacements du parement en service sont d'un ordre de grandeur très nettement supérieur (Smith, 1990).

APPLICATIONS DES GEOSYNTHETIQUES EN ENVIRONNEMENT

L'emploi des géotextiles et géomembranes en environnement et plus particulièrement pour les centres d'enfouissement, est en plein développement. Les géotextiles et les géomembranes peuvent être utilisés, soit seuls, soit le plus souvent en combinaison avec d'autres matériaux de manière à former des géocomposites. Les géotextiles peuvent être utilisés comme renforcement horizontal pour les déchets, de manière à les stabiliser pendant le remplissage, ou pour les talus et digues délimitant les lieux de stockage (Lee et al., 1990). Ils peuvent aussi servir à améliorer la stabilité des dispositifs d'étanchéité, aussi bien sur les versants que dans le système de couverture (Hoekstra et Berkhout, 1990). En combinaison avec les géomembranes, les géotextiles sont utilisés dans les dispositif d'étanchéité et de drainage par géosynthétique (DEDG) pour servir de drains mais aussi pour protéger les géomembranes de dégradations mécaniques éventuelles durant leur mise en place. Deux types de géomembranes existent : les géomembranes synthétiques, à base de plastique (PVC-P, HDPE, etc.) ou d'élastomère (EPDM), et les géomembranes bitumineuses, qui sont le plus souvent des géotextiles non-tissés imprégnés de bitume. En plus des dispositif d'étanchéité par géomembrane, simples ou doubles, qui sont très utilisés aux Etats-Unis, il convient de mentionner un deuxième type d'étanchéité. Son principe développé en France consiste à associer une étanchéité passive (couche argileuse d'épaisseur importante) avec une étanchéité active constituée d'une géomembrane, d'un système de drainage et d'un filtre (Artières et al., 1993). De nombreux problèmes sont posés par l'emploi des géosynthétiques en environnement. Outre les problèmes géotechniques de fondation (Gabr et al., 1992) ou de stabilité de pentes (Mitchell et al., 1990) qui sont relativement bien maîtrisés, se posent des problèmes hydrauliques pour calculer la perméabilité à long terme des dispositifs d'étanchéité aux différents polluants (Gross et al., 1990) et des problèmes physico-chimiques, notamment la compatibilité à long terme des géocomposites avec les déchets stockés (Verschoor et al., 1990). Dans ce domaine, qui fait appel à de multiples disciplines, il reste encore beaucoup de recherches à effectuer.

DURABILITE DES GEOSYNTHETIQUES ET FIBRES NATURELLES

Fibres Naturelles

La durabilité des matériaux à base de fibres naturelles tels que le jute ou le coton est relativement limitée par leur nature même. En ce qui concerne les fibres de bambous, une durabilité plus grande peut être escomptée. Cependant, l'emploi de tels matériaux dans le renforcement des sols est à proscrire pour des ouvrages permanents (durées de vie s'étendant suivant les applications et la réglementation des pays de 75 à 150 ans). Si la faible durabilité des fibres naturelles est un défaut majeur de celles-ci pour le renforcement, il existe des applications telles que l'engazonnement des talus ou pentes, où elle peut devenir un avantage. En effet la qualité principale demandée pour de telles applications est la biodégradabilité à très court terme. Cela est sans doute la seule application de tels matériaux en Europe.

Géosynthétiques

En ce qui concerne la durabilité et le comportement à long terme des géosynthétiques, il reste encore à l'heure actuelle de nombreuses questions ouvertes. L'un des problèmes qui se posent est de savoir s'il est possible d'extrapoler sur plusieurs dizaines d'années, les résultats d'essais de fluage réalisés sur quelques jours ou quelques mois (Matichard et Delmas, 1988). En l'occurrence, les agressions physiques et chimiques subies par le géosynthétique enterré ne font-elles pas évoluer son comportement, de "ductile" à "fragile", ce qui ne permettrait plus d'extrapoler linéairement? Le débat sur ce sujet reste ouvert d'autant plus qu'à la première génération des HDPE (PolyEthylène Haute Densité) des années 1950, a succédé dans les années 1960 de nouveaux types de HDPE qui ne manifestent pas le même changement de comportement près de la rupture (Wrigley, 1990).

On constate aussi l'apparition de nouveaux produits combinant un HDPE avec des fibres d'aramides, qui sont connues pour leur faible déformabilité, leur grande résistance à la traction et leur faible fluage, pour former des géogrilles (Kasahara, 1992). La multiplication des produits vient donc compliquer le problème et en ce domaine seuls des essais à long terme en laboratoire et sur le terrain, peuvent apporter une réponse précise pour chacun des produits. C'est en ce sens qu'un grand nombre de programmes de recherches sur l'évolution à long terme des propriétés hydrauliques et mécaniques des géotextiles sont actuellement en cours en se basant sur des échantillons prélevés sur des ouvrages déjà en service depuis plusieurs années. Parmi les nombreux sujets étudiés on peut citer : la durabilité des géotextiles en réparation de talus instables en Grande Bretagne par le TRRL (O'Reilly et al., 1990), la dégradation des géotextiles sous les voies ferrées au Canada (Raymond et Bathurst, 1990) et en Australie (Hausmman et al, 1990), l'évolution des caractéristiques hydrauliques d'un géotextile filtre dans un barrage en France (Alonso et al., 1990; Delmas et al., 1992), l'évolution des caractéristiques de résistance en traction de géotextiles dans des murs de soutènement (Leclerc et al., 1990). Les résultats français en ce domaine sont conformes à ce qui a été trouvé dans les autres pays. En ce qui concerne l'évolution des propriétés hydrauliques, des essais réalisés sur des échantillons prélevés sur le barrage de Valcros construit en 1977, ont donné une perméabilité deux fois plus faible après 22 ans de service, confirmant que les géotextiles filtres se comportent bien à long terme (Delmas et al., 1992). En ce qui concerne les propriétés mécaniques, la réduction de résistance en traction, mesurée sur des bandes de géotextiles prélevées dans un remblai, à quelque distance du parement en béton, après 17 ans de service, est seulement de quelques pour cents, ce qui est plus faible que la réduction de résistance due à la mise en place et notamment la compactage (Leclerc et al., 1990). La perte de caractéristiques mécaniques due aux agressions mécaniques pendant la mise en place, est donc nettement plus grande que la perte à attendre due au fluage. C'est ainsi qu'un programme de recherche sur l'influence de la mise en place sur 13 géotextiles a été lancé en France. Des pertes de résistance variant de 5 à 30% ont été mesurées. Pour prévenir de telles dégradations, des géotextiles particuliers, combinant un tissé avec un non tissé aiguilleté, ont été développés (Figure 9).

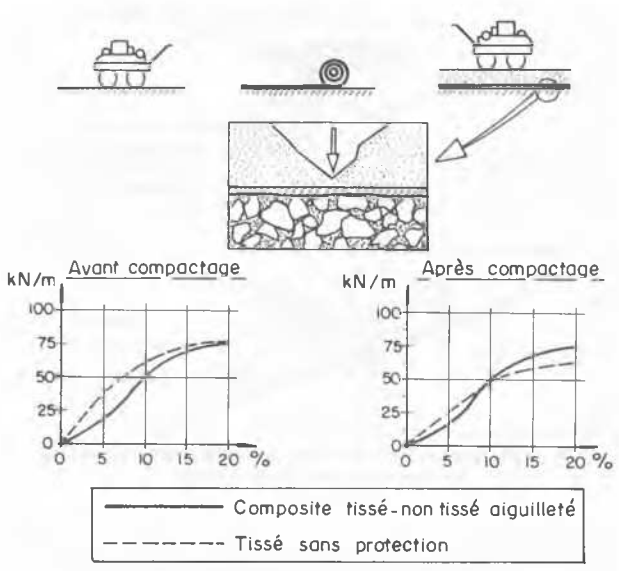


Figure 9 : Comparaison des caractéristiques mécaniques avant et après compactage pour différents types de géotextiles

CONTINUITE DU COMPORTEMENT ET DES METHODES DE DIMENSIONNEMENT

La notion d'extensibilité ou d'inextensibilité d'un renforcement a été introduite en mécanique des sols pour la première fois par Mc Gown et al. (1978). Sont appelés renforcements inextensibles, les éléments dont la déformation en traction à la rupture est très faible par rapport à celle nécessaire au sol pour atteindre un état de plastification en poussée. Sont appelés renforcements extensibles, ceux dont la déformations à la rupture est du même ordre de grandeur ou plus grande que celle du sol pour atteindre un état de plasticification. Historiquement, les armatures Terre Armée sont les premiers types de renforcement inextensible à avoir été utilisés. Sous charges de service, la déformation des renforcements en acier est de l'ordre de 0,1%. Se classent dans la catégorie des renforcements extensibles, les ouvrages renforcés par nappes de géotextiles ou géogrilles. En moyenne, les géotextiles et géogrilles se déforment sous charges de service entre 3 et 7 % suivant le type de polymère (Delmas, 1988). Il est à noter que la définition de l'extensibilité donnée par Mc Gown et al. (1978) est basée uniquement sur les propriétés respectives des matériaux, indépendamment de l'ouvrage renforcé et plus particulièrement de la densité de renforcement utilisée. Une autre définition, qui tient compte de la densité de renforcement, a été proposée notamment par Mitchell et Villet (1987) et est utilisée actuellement en France pour classer les techniques de renforcement (Norme Française NF P 94-210). Cette définition est basée sur la définition d'un module équivalent E_{eq} défini de la façon suivante pour les nappes de renforcement :

$$E_{eq} = J / S_v$$

et pour les armatures constituées de bandes en géotextiles :

$$E_{eq} = J\, b / (S_v\, S_h)$$

où J est la raideur du renforcement dans son état non altéré, b, la largeur de l'armature, S_v et S_h les espacements vertical et horizontal. La limite entre les ouvrages renforcés de type extensible et inextensible est prise à 20 MPa.

Quelle que soit la définition adoptée pour l'extensibilité, les deux techniques les plus anciennes que sont la Terre Armée et le renforcement par géotextiles, se situent aux deux extrémités des échelles mesurant l'extensibilité. Par contre, depuis 20 ans, de nombreuses autres techniques intermédiaires sont apparues. On peut citer notamment deux catégories intermédiaires : les grillages métalliques déformables (Lo et Nanetti, 1990) et les inclusions linéaires en géosynthétique comme par exemple les armatures en Paraweb (Schlosser et Unterreiner, 1992; Jones, 1992) (Figure 10). Vis à vis du comportement, aussi bien pendant la construction que sous charges de service, on constate une continuité du comportement depuis les ouvrages en Terre Armée jusqu'aux ouvrages renforcés par les géotextiles les plus extensibles. L'étude menée sur ce sujet par Smith et Segrestin (1992) est particulièrement intéressante. Ils ont modélisé à l'aide d'un code d'éléments finis tridimensionnels trois structures renforcées : la première par des armatures haute adhérence Terre Armée, la deuxième avec des bandes en polyester et la troisième avec des géogrilles en polyéthylène. Il est à noter que dans ces trois ouvrages, les armatures Terre Armée sont environ 10 fois moins extensibles que les bandes en géosynthétique, qui sont elles-mêmes 10 fois moins extensibles que les géogrilles alors que les tractions à la limite des ces trois renforcements sont du même ordre de grandeur. Les résultats des simulations montrent une continuité du comportement aux états de service, avec des déplacements du parement augmentant avec l'extensibilité. A la rupture, le volume de sol renforcé par armatures inextensibles se comporte comme un bloc monolithique avec des déformations plastiques de cisaillement à l'intérieur de celui-ci quasiment nulles. Par contre, dans le cas d'éléments extensibles des déformations plastiques de cisaillement importantes à l'intérieur du volume de sol renforcé se développent et conduisent progressivement à l'apparition d'une surface de rupture interne. Cette différence de comportement entre armatures et nappes, extensibles et inextensibles, a été aussi mise en évidence par Chaoui (1993) dans un calcul aux éléments finis tridimensionnels. Si, à la rupture, les trois types de structures ont des comportements différents, nécessitant des méthodes de dimensionnement à la rupture différentes, par contre, aux états de service, les comportements sont similaires. Il est donc possible, aux états de service, d'utiliser une même méthode de dimensionnement pour toutes ces techniques, par exemple de type équilibre local. C'est le choix qui a été fait aux Etats-Unis par Christopher et al., (1990). La ligne des tractions maximales, qui limite la zone active de la zone résistante, varie suivant le type de renforcement, inextensible ou extensible. De plus, le coefficient, qui permet de calculer l'équilibre local d'une tranche de sol, est modulé suivant la technique de renforcement et son extensibilité et est déterminé à partir de mesures réalisés sur des ouvrages en vraie grandeur en service.

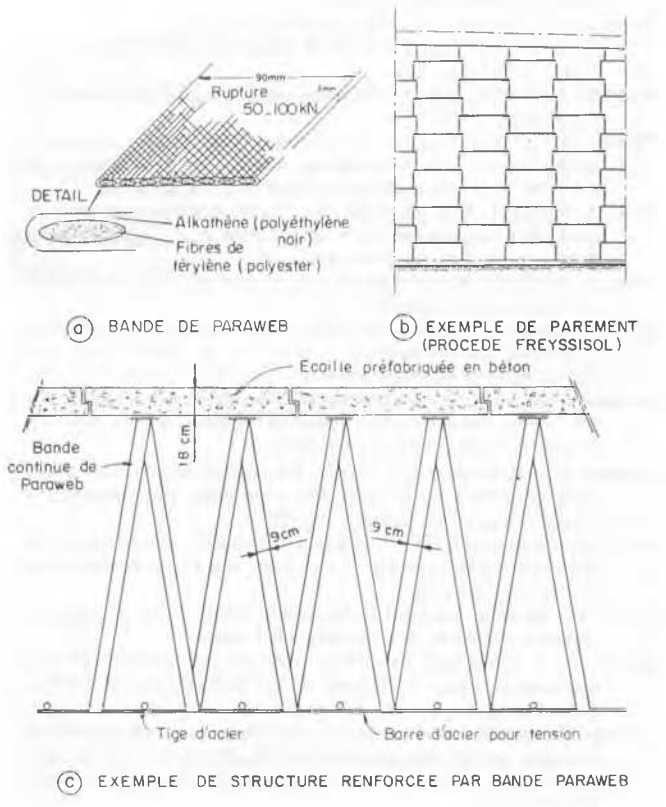


Figure 10 : Exemple de soutènement en sol renforcé par bandes de Paraweb

Outre la méthode de l'équilibre local qui permet de dimensionner aux états de service, on peut mentionner comme méthode de calcul, la méthode des éléments finis qui reste cependant encore du domaine du laboratoire. Dans la pratique, ce sont les méthodes d'analyse limite qui sont le plus répandues pour le dimensionnement. Celles-ci ne permettent pas de prendre en compte les déformations du sol et de plus, ne permettent d'étudier la stabilité limite de l'ouvrage que dans la configuration géométrique initiale. Des efforts ont été faits en France notamment, pour tenir compte de l'extensibilité des renforcements dans le dimensionnement à la rupture. Un programme CARTAGE a été développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) pour prendre en compte l'élongation des nappes de renforcement et leur comportement en ancrage (Delmas et al., 1986). Des comparaisons ont été faites entre la méthode allemande utilisant un mécanisme de rupture à deux blocs qui ne prend pas en compte de déplacements et la méthode du programme CARTAGE, sur des ouvrages en vraie grandeur, construits par le Bundesanstalt für Strassenwesen (BaSt) en coopération avec le LCPC. L'analyse à la rupture (mécanisme à deux blocs) donne une charge limite sous estimée d'environ 20% tandis que la méthode CARTAGE donne des résultats moins conservatifs avec une charge limite sous estimée d'environ 10%. La conclusion que l'on peut tirer d'une telle étude, conclusion qui est par ailleurs corroborée par d'autres résultats, est qu'un calcul à l'équilibre limite sans prise en compte des déplacements est relativement conservatif. La prise en compte des déformations, qui est parfois désignée sous le terme générique de "compatibilité des déformations" reste encore l'axe de recherche sur lequel les efforts devraient se concentrer pendant les prochaines années. L'objectif à atteindre est de pouvoir disposer d'une méthode de dimensionnement suffisamment générale de manière à pouvoir l'utiliser de façon continue depuis les renforcements inextensibles jusqu'aux renforcements les plus extensibles qui soient.

NORMALISATION

Le développement des géosynthétiques ces dix dernières années s'est traduit par une multiplication des produits disponibles sur le marché (Giroud, 1986). La caractérisation de ces matériaux pour une utilisation rationnelle dans des structures n'est pas actuellement standardisée. La Société Internationale des Géosynthétiques (GIS) a mené récemment une étude sur les différents essais existants pour évaluer les propriétés des géotextiles et a trouvé qu'il existait plus de 300 essais (Rigo et al., 1990). Il y a donc un effort important à faire pour atteindre une standardisation suffisante des matériaux géosynthétiques et produits apparentés. Dans le prolongement des travaux de l'International Standards Organisation ISO TC 38 SC 21, un Comité technique européen, dénommé CEN TC 189, a été créé. Il est consacré aux Géotextiles et Produits Apparentés, et Géomembranes (Rigo et Delmas, 1992). Ce TC prépare des normes européennes qui remplaceront les normes nationales des 12 pays de la Communauté Economique Européenne CEE ainsi que des 6 pays de l'Association Européenne de Libre Echange (AELE). Ces normes sont de type performanciel.

CONCLUSION

L'état actuel des connaissances sur les géotextiles s'est bien développé ces dernières dix années sur les applications classiques des géotextiles en Génie Civil. Le développement de nouveaux produits, comme les géocomposites, et de nouvelles applications nécessitent de continuer les recherches aussi bien sur les géosynthétiques que sur les fibres naturelles.

REFERENCES

Alonso, E., Degoutte, G. et Girard, H. (1990). Results of seventeen years of using geomembranes in dams and basins. *C. R. Conf. Int. Géotextiles, Géomembranes et Produits Apparentés*, La Haye, Pays-Bas.

Artières, O., Soyez, B., and Delmas, P. (1993). Composite Liner Systems (natural/geosynthetics) to Confine Waste Sites. *C. R. Geoconfine 1993*, Montpellier, France.

Balzer, E., Delmas, Ph., Matichard, Y., Sere, A. et Thamm, B. R. (1990). Geotextile reinforced abutment; full sale test and theory. *C. R. Conf. Int. Performance Reinforced Structures*, Glasgow, GB.

Bathurst, R. J., Simac, M. R., Berg, R. R. et Lothspeich, S. E. (1993). Design Manual for Segmental Retaining Walls, *Report for the National Concrete Masonry Association*, Etats-Unis.

Broms, B. B. (1992). Slabilization of slopes with geo-anchoors. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Chaoui, F. (1992). Etude tridimensionnelle du comportement des pieux dans les pentes instables. *Thèse de l'ENPC.*

Christopher, B. R., Gill, S. A., Giroud, J. P., Juran, I. Mitchell, J. K., Schlosser, F. et Dunnicliff, J. (1988). Reinforced soil structures Vol. I. Design and Construction Guidelines. *FHWA-RD-89-043.*

Datye, K. R. et Murthy, B. R. S. (1992). A low cost earth reinforcement system. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Delmas, P. (1988). Ouvrages de soutènement renforcés par géotextiles. L'expérience du réseau des LPC. *Bulletin de liaison des LPC 153.*

Delmas, Ph., Berche, J. C. et Gourc, J. P. (1992). Méthode de dimensionnement des structures renforcées par géotextiles; Programme Cartage. *Bulletin de Liaison des LPC* No. 142.

Delmas, Ph., Faure, Y. H., Farkouh, B. et Nancey, A. (1993). Comportement à long terme d'un géotextile non-tissé dans un barrage de plus de 20 ans. *C. R. Rencontres 1993, Géotextiles et Géomembranes*, Joué-les-Tours, France.

Delmas, Ph., Magnan, J. P., Quaresma, M., Gourc, J. P. et Haidar, S. (1994). Remblai experimental sur sol mou renforcé par géotextile. *C. R. XIII^{ème} ICSMFE*, New Delhi, Inde.

Gabr, M. A., Hunter, T. J. et Collin, J. G. (1992). Stability of geogrid-reinforced ladnfill over sinkholes. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Giroud, J. P. (1986). From geotextiles to geosynthetics : a revolution in geotechnical engineering. *C. R. III^{ème} Conf. Int. Geotextiles*, Vienne, Autriche.

Gotteland, Ph. (1991). Le renforcement par géosynthétiques dimensionnement et validation. *Thèse de Doctorat de l'IRIGM, Université de Grenoble*, 378 p.

Gotteland, Ph., Gourc, J.-P., Wilson Jones, H. et Baraize, J. (1992). Cellular walls assocaited with geosynthetics : A laboratory model study. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Gourc, J. P. (1990). State of the Art report. *C. R. Conf. Int. Geotextiles, Geomembranes & Related Products*, The Hague, Netherlands.

Gourc, J. P., Gotteland, P. et Wilson Jones, H. (1990). Cellular retaining walls reinforced by geosynthetics : behavior and design. *C. R. Conf. Int. Performance Reinforced Structures*, Glasgow, GB.

Gourc, J. P., Perrier, H., Riondy, G., Rigo, J. M., Perfetti, J. (1982).Chargement cyclique d'un bicouche, sable sur sol mou, renforcé par géotextile. *C. R. IInd Conf. Int. Geotextiles*, Las Vegas, USA.

Gross, B. A., Bonaparte, R. et Giroud, J. P. (1990). Evaluation of flow landfill leakage detection layers. *C. R. Conf. Int. Géotextiles, Géomembranes et Produits Apparentés*, La Haye, Pays-Bas.

Haliburton, T. A., Lawmaster, J. D. et King, J. K. (1980). Potential use of geotextiles fabrics in airfield runway design. *Rep. US Air force Off. of Scientific Res.*, Oklaoma State University, Stillwaer.

Hausmmann, M. R., Ring, G. J. et Pitsis, S. E. (1990). Abrasion of geotextiles in railway track applications. *C. R. Conf. Int. Géotextiles, Géomembranes et Produits Apparentés*, La Haye, Pays-Bas.

Hoekstra, S. E. et Berkhout, H. C. (1990). Geosynthetics for safe waste disposal. *C. R. Conf. Int. Géotextiles, Géomembranes et Produits Apparentés*, La Haye, Pays-Bas.

Holtz, R. D. (1990). Design and construction of geosynthetically reinforced embankme,ts on very soft soils. *C. R. Conf. Int. Performance Reinforced Structures*, Glasgow, GB.

Jones, C. J. F. P. (1992). Reinforced soil formed using synthetic polymeric anchors. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Karunaratne, G. P., Tan, S. A. et Muhammad, N. (1992). Geotechnical properties of jute geotextiles. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Kasahara, K., Kataoka, H.,' Yokota, Y., Arai, K., Machihara, H. et Nishikawa, S. (1992). Development of new FRTP-geogrid and its application to test embankment. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Kempton, G. T. et Jones, C. J. F. P. (1992). The use of high strength link geotextiles over piles and voids. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Kisskalt, J. et Gartung, E. (1990). Long term filter function of non woven geotextiles in landfills. *C. R. Conf. Int. Géotextiles, Géomembranes et Produits Apparentés*, La Haye, Pays-Bas.

Leclerc, B., Schaeffner, M., Blivet, J. C., Delmas, Ph. et Matichard, Y. (1990). Durability of geotextiles : pragmatic approach used in France. *C. R. Conf. Int. Géotextiles, Géomembranes et Produits Apparentés*, La Haye, Pays-Bas.

Lee, S. H., Ruei, E. et Tonus, S. (1990). The monitoring of non woven geotextiles by strain gages. *C. R. Conf. Int. Géotextiles, Géomembranes et Produits Apparentés*, La Haye, Pays-Bas.

Lo, S. C. R. et Nanneti, M. (1990). Behavior, Design and Construction of the Terramesh Wall. *C. R. Conf. Int. Performance Reinforced Structures*, Glasgow, GB.

Magnan, J. P., Quaresma, D. A. L. , and Puech M. (1993). Rembalis sur sols mous renforcés par géotextiles. Expérimentation en vraie grandeur et modélisation. *C. R. Rencontres 1993, Géotextiles et Géomembranes*, Joué-les-Tours, France.

Matichard, Y., and Delmas, P. (1988). Le fluage des géotextiles. Etat des connaissances et perspectives. *Bulletin de liaison des LPC 153.*

McGown, A., Andrawes, K. Z. et Al-Hasani, M. M. (1978). Effect of Inclusion Properties on the Behavior of Sand. *Géotechnique, 28, 3.*

Miki, H., Kudo, K., Taki, M., Fukuda, N., Iwasaki, K. et Nishimura, J. (1992). Experimental study on full scale geogrid reinforced embankment model. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Mitchell, J. K. et Villet, W. C. B. (1987). Reinforcement of Earth Slopes and Embankments. *NCHRP Report 290.*

Mitchell, J. K., Seed, R. B. et H. B. Seed (1990). Kettleman Hills Waste Landfill Slope Failure. I: Liner System Properties. *J. Geotech. Eng., ASCE*, Vol. 116, No. 4.

Murata, O., Tateyama, M. et Tatsuoka, F. (1992). Loading tests of geosynthetc walls and their stability analysis. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Nishigata, T. et Yamaoka, I. (1992). Ultimate bearing capacity of unpaved road reinforced by geotextile. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Norme NF P 94-210 (1992). Renforcement des sols, Généralités et terminologie, France.

O'Reilly, M. P., Boden, D. G. et Jhonston, P. E. (1990). Long-term performance of repairs to highway slopes using geotextiles. *C. R. Conf. Int. Performance Reinforced Structures*, Glasgow, GB.

Omoto, S., Kawabata, K. et Mizobuchi, M. (1992). Reinforcement effect of geotextiles on pavement with weak subgrade. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Perrier, H. (1982). Sol bicouche renforcé par géotextiles. *Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble.*

Perrier, H., Blivet, J. C. et Khay, M. (1986). Experimental and actual use of geotextiles reinforcement of a slope. *C. R. IIIème Conf. Int. Geotextiles*, Vienne, Autriche.

Quaresma, D. A. L. (1992). Comportement et modéliation d'un remblai sur sols mous renforcés par géotextile. *Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier - Grenoble I.*

Raymond, G. P. et Bathurst, R. J. (1990). Tests results on exhumed railway track geotextiles. *C. R. Conf. Int. Géotextiles, Géomembranes et Produits Apparentés*, La Haye, Pays-Bas.

Rigo, J. M. et Delmas, Ph. (1992). Design and-testing of geosynthetics - The European (CEN) approach. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Rigo, J. M., Mathieu, Smolders et Alexandre (1990). I.G.S. Inventory of current test methods on geotextiles. *I.G.S. report.*

Rimoldi, P. et Cambiaghi, A. (1992). The use of geogrids in road applications in Italy. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Rowe, R. K., and Mylleville, B. L. J. (1990). Implications of adopting an allowable geosynthetic strain in estimating stability. *C. R. Int. Conf. Geotextiles, Geomembranes & Related Products*, The Hague, Netherlands.

Sakaguchi, M., Muramatsu, M. et Nagura, K. (1992). A discussion on reinforced embankment structures having high earthquake resistance. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Schlosser, F., Magnan, J. P. et Holtz, R. D. (1985). Construction géotechnique. *C. R. XIème ICSMFE*, San Francisco.

Schlosser, F. et Unterreiner, P. (1992). Innovations françaises dans les soutènements, *C. R 1ères Assises du Génie Civil*, Paris.

Smith, I. M. et Segrestin, P. (1992). Inextensible reinforcements versus extensible ties - FEM comparative analysis of reinforced or stabilized earth structures. *C. R. Symp. Int. Earth Reinforcement Practice*, Fukuoka, Japon.

Smith, R. J. H. (1990). Theory and design related to the Performance Reinforced Structures. *C. R. Conf. Int. Performance Reinforced Structures*, Glasgow, GB.

Tatsuoka, F., Murata, O., Tateyama, M., Nakamura, K., Tamura, Y., Ling, H. I. et Iwasaki, I. (1990). Reinforcing steep clay slopes with a non woven geotextile. *C. R. Conf. Int. Performance Reinforced Structures*, Glasgow, GB.

Thamm, B. R., Krieger, B. et Lesniewska, D. (1990). Full scale test of a geotextile reinforced soil wall. *C. R. Conf. Int. Performance Reinforced Structures*, Glasgow, GB.

Verschoor, K. L., White, D. F. et Thomas, R. W. (1990). An overview of practices used in the United States to determine the compatibility of geosynthetics with chemical waste. *C. R. Conf. Int. Géotextiles, Géomembranes et Produits Apparentés*, La Haye, Pays-Bas.

Wrigley, N. E. (1990). The failure mode of Tensar high density polyethylene geogrids. *C. R. Conf. Int. Performance Reinforced Structures*, Glasgow, GB.

Yakovleva, T. G., Vinogradov, V. V., Savin, A. N., Mikulich, V. A. et Seredin, A. R. (1990). Application of ground reinforcement to strengthen embankments of operating railways. *C. R. Conf. Int. Performance Reinforced Structures*, Glasgow, GB.