



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Recent Development of the Displacement Method for the Design of Geosynthetically Reinforced Slopes

Lemonnier, P.; Soubra, A. H.

Publication date:
1997

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Lemonnier, P., & Soubra, A. H. (1997). *Recent Development of the Displacement Method for the Design of Geosynthetically Reinforced Slopes*. Geotechnical Engineering Group. AAU Geotechnical Engineering Papers: Soil Mechanics Paper Vol. R 9713 No. 17

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Recent development of the displacement method for the design of geosynthetically reinforced slopes

P. Lemonnier, A.H. Soubra

1997

Soil Mechanics Paper No 17



**GEOTECHNICAL ENGINEERING GROUP
AALBORG UNIVERSITY DENMARK**

Lemonnier, P., Soubra, A.H. (1997). Recent development of the displacement method for the design of geosynthetically reinforced slopes - Comparative case study.

AAU Geotechnical Engineering Papers, ISSN 1398-6465 R9713.

Soil Mechanics Paper No 17

The paper has been published in *Colloquy on geosynthetics, Rencontres97, CFG*, Reims, France, Vol 2, pp. 28AF-31AF (10pp).

© 1997 AAU Geotechnical Engineering Group.

Except for fair copying, no part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the Geotechnical Engineering Group.

Papers or other contributions in AAU Geotechnical Engineering Papers and the statements made or opinions expressed therein are published on the understanding that the author of the contribution is solely responsible for the opinions expressed in it and that its publication does not necessarily imply that such statements or opinions are or reflect the views of the AAU Geotechnical Engineering Group.

The AAU Geotechnical Engineering Papers - AGEP - are issued for early dissemination and book keeping of research results from the Geotechnical Engineering Group at Aalborg University (Department of Civil Engineering). Moreover, the papers accommodate proliferation and documentation of field and laboratory test series not directly suited for publication in journals or proceedings.

The papers are numbered ISSN 1398-6465 R<two digit year code><two digit consecutive number>. For internal purposes the papers are, further, submitted with coloured covers in the following series:

Series	Colour
Laboratory testing papers	sand
Field testing papers	grey
Manuals & guides	red
Soil Mechanics papers	blue
Foundation Engineering papers	green
Engineering Geology papers	yellow
Environmental Engineering papers	brown

In general the AGEP papers are submitted to journals, conferences or scientific meetings and hence, whenever possible, reference should be given to the final publication (journal, proceeding etc.) and not to the AGEPPaper.

RÉCENT DÉVELOPPEMENT DE LA «MÉTHODE EN DÉPLACEMENT» POUR LE DIMENSIONNEMENT DES TALUS RENFORCÉS PAR DES NAPPES GÉOSYNTHÉTIQUES - ÉTUDE COMPARATIVE

RECENT DEVELOPMENT OF THE «DISPLACEMENT METHOD» FOR THE DESIGN OF GEOSYNTHETICALLY REINFORCED SLOPES - COMPARATIVE CASE STUDY

P. LEMONNIER

UNIVERSITÉ D'AALBORG (DANEMARK)

A.-H. SOUBRA

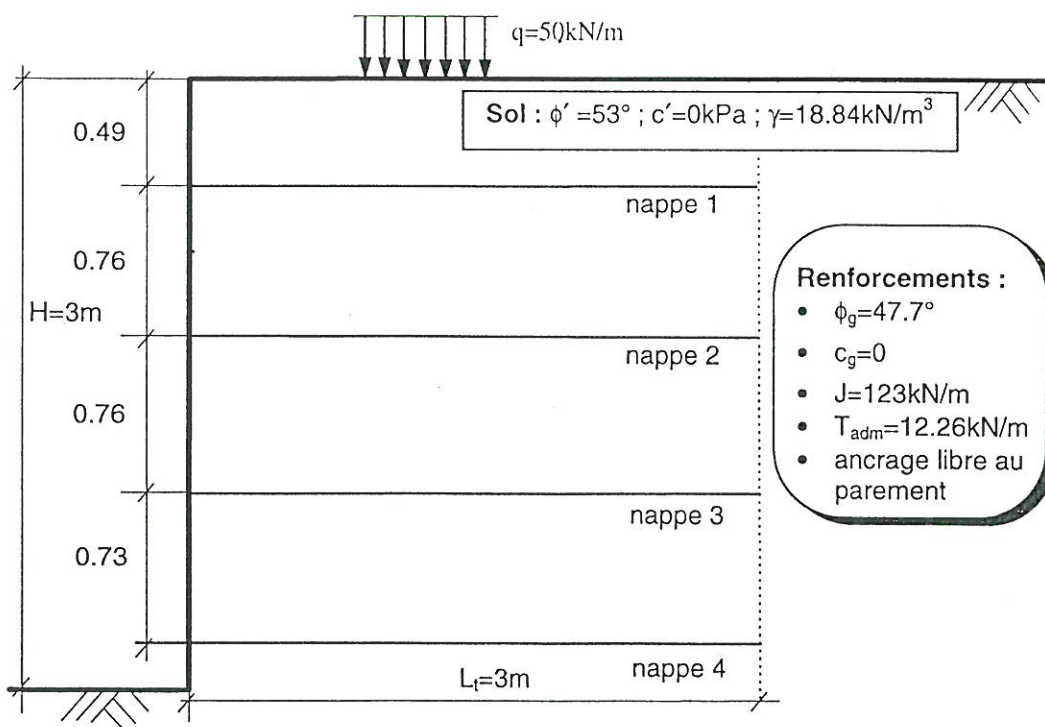
E.N.S.A.I. STRASBOURG

RÉSUMÉ

Un récent développement de la "méthode en déplacement" (Gourc et al, 1986), basé sur l'application de l'approche variationnelle (Lemonnier, 1995), a été appliqué à un mur expérimental de 3 m de hauteur renforcé par quatre nappes de géogrilles (Bathurst et al., 1988). Cet article présente la comparaison entre ce développement, la "méthode en déplacement" originale et l'expérience.

ABSTRACT

A recent development of the "displacement method" (Gourc et al, 1986), based on the application of the variational approach (Lemonnier, 1995), has been applied to an experimental 3 m high wall reinforced by four layers of geogrids (Bathurst et al., 1988). This paper presents the comparison between this development, the original "displacement method" and the experience.



Configuration du mur expérimental de Bathurst et al. (1988) / Experimental model wall configuration of Bathurst et al. (1988)

1 INTRODUCTION

Un développement de la "méthode en déplacement" de Gourc et al (1986) a récemment été proposé (Lemonnier, 1995) dans le cadre de l'analyse de la stabilité des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. Il repose sur une double application de l'approche variationnelle couplée au principe de base de la "méthode en déplacement" (i.e. concept de la membrane ancrée et prise en compte d'un champ de déplacement le long de la surface de rupture). Il permet de s'affranchir de certaines hypothèses arbitraires couramment émises concernant d'une part, la forme de la surface de rupture et de la distribution des contraintes normales le long de celle-ci, et d'autre part, la détermination des tensions de renforts (celles agissant dans les nappes au niveau de la surface de rupture).

Cet article se propose de montrer une validation de ce nouveau développement (nommé dans la suite "méthode en déplacement variationnelle") en l'appliquant à un mur expérimental à grande échelle qui fût réalisé au Royal Military College par Bathurst et al (1988). La présente validation considère la comparaison en termes de tensions de renfort, de longueur effective des nappes de géosynthétiques, de facteur de sécurité et de surface de rupture, entre le présent développement, la "méthode en déplacement" originale ainsi que l'expérience.

Dans un premier temps, la "méthode en déplacement" originale et son nouveau développement sont brièvement explicités, puis dans un deuxième temps, la confrontation des résultats théoriques et expérimentaux est présentée et analysée.

2 "MÉTHODE EN DÉPLACEMENT" ORIGINALE

La "méthode en déplacement" originale (Gourc et al, 1986, logiciel "Cartage") est basée sur la prise en compte (i) d'un champ de déplacement le long de la surface de rupture caractérisé par un déplacement en tête y_t , qui permet la mobilisation des nappes (voir fig. 1), et (ii) de l'extensibilité des nappes. Pour cela, on considère, pour chaque nappe, l'équilibre local couplé avec la loi de comportement en traction de la nappe et celle en friction de l'interface sol-nappe (voir fig. 2). De plus, trois modélisations possibles de la membrane ($idefo=1, 2$ et 3) sont proposées dans cette méthode de dimensionnement :

- $idefo=1$: schématisation du comportement du géosynthétique en "petits déplacements" et T_t horizontale (voir fig. 1);
- $idefo=2$: "grands déplacements" et T_t tangent à la surface de rupture;
- $idefo=3$: "grands déplacements" et T_t horizontale.

Enfin notons que cette méthode permet la détermination du facteur de sécurité pour une ligne de glissement donnée (pas de recherche automatique de la surface critique). Ainsi, les résultats de "Cartage" présentés sur les figures (5a) et (6) concernent les surfaces de rupture critiques déterminées par le présent modèle.

3 MÉTHODE EN DÉPLACEMENT VARIATIONNELLE

3.1 Equilibre global de la masse en glissement

En appliquant la méthode du prisme de rupture variationnelle, mise au point par Baker et Garber (1977) dans le cas des talus non renforcés, au cas des talus renforcés, on a montré que (i) la trace de la surface de rupture est une spirale logarithmique (voir fig. 1), et (ii) la seule équation d'équilibre des moments de tous les efforts agissant sur la masse en glissement suffit à déterminer le facteur de sécurité F_s , défini vis à vis des caractéristiques de cisaillement du sol.

3.2 Equilibre local des nappes

En vue d'évaluer la contribution des renforts sur la stabilité, le calcul variationnel a été appliqué à l'équilibre de la membrane au voisinage de la ligne de glissement en considérant le principe de la "méthode en déplacement" (voir §2). L'approche variationnelle permet de déterminer la forme optimale (spirale logarithmique, voir fig. 3) ainsi que la position optimale de la nappe pour lesquelles on obtient la tension extrême au niveau de l'intersection nappe - surface de rupture. En outre, on obtient la répartition des tensions et des déplacements relatifs sol-nappe le long des nappes. Cette modélisation est basée sur des hypothèses arbitraires sur la répartition des contraintes agissant sur la face supérieure de la membrane amont représentée sur la figure 3. Cependant, les résultats numériques apparaissent très peu sensibles à ces hypothèses (voir Lemonnier, 1995 et Lemonnier et al, 1995).

4 MODÈLE EXPÉRIMENTAL

En vue de la valider, la présente méthode est appliquée à un modèle expérimental à grande échelle. Il s'agit d'un mur de 3m de hauteur, constitué d'un sol pulvérulent d'angle de frottement interne 53° , et qui fut construit et testé dans le cadre d'un projet de recherche au Royal Military College (RMC) du Canada (Bathurst et al, 1988). Il fut renforcé par quatre nappes de géogrilles en polyéthylène haute densité (HDPE) possédant une tension ultime obtenue par l'essai de traction sur grande largeur (ASTM D 4595) de 12.26kN/m, correspondant à une déformation de 14% dans la direction où elles étaient orientées. Ce modèle fut chargé en crête par incréments de surcharges jusqu'à la rupture (50kN/m).

Concernant le déplacement relatif sol/géosynthétique u_p correspondant au palier du comportement en friction de l'interface (voir fig. 2b) considéré dans le présent modèle, il n'est pas disponible dans le rapport concernant le mur RMC. Nous avons donc dû choisir la valeur la plus réaliste possible ($u_p=2.5$ cm) compte tenu des matériaux en présence et de différentes études expérimentales sur la détermination de ce paramètre (Ratel, 1987 et Gotteland, 1991). Notons toutefois, que l'influence de ce paramètre sur la détermination de la tension de renfort est négligeable (Ratel, 1987).

5 ÉTUDE COMPARATIVE

5.1 Influence du champ de déplacement

La figure (4) présente les variations des tensions de renfort (fig. 4a) et de leurs inclinaisons (fig. 4b) obtenus par le présent modèle, dans le cas du mur RMC, lorsque y_1 varie de 5 à 27mm. Notons que les tensions augmentent de façon significative avec y_1 , alors que les inclinaisons diminuent sensiblement.

La figure 5 présente les variations d'une part du facteur de sécurité (fig. 5a) donné par le présent modèle et "Cartage", et d'autre part, des surfaces de rupture (fig. 5b) données par le présent modèle, lorsque y_1 varie de 5 à 27mm. En terme de facteur de sécurité, on note que le présent modèle donne (i) en moyenne les valeurs les plus fortes, et (ii) des valeurs relativement proches de celles de "Cartage $id_{efo}=3$ ". Le présent modèle semble donc moins conservateur que la méthode originale.

En terme de surface de rupture, on peut noter que celle-ci s'éloigne du parement lorsque y_1 augmente (ce qui correspond à une plus grande mobilisation des renforts). Ces surfaces sont à comparer à celle observée lors de l'essai et représentée en pointillée sur la fig. (5b). Cette surface est très proche de celle théorique obtenue par le présent modèle et correspondant à $y_1=15$ mm, donc à un facteur de sécurité égal à (0.83).

5.2 Analyse des résultats du présent modèle pour $F_s=1$

Les résultats complets de l'équilibre local, obtenus par le présent modèle dans le cas où $F_s=1$ (voir fig. 5a), sont présentés dans le tableau 1. Remarquons les points suivants :

- le *déplacement local* y_1 (voir fig. 3) diminue avec la profondeur;
- les *taux de comportement linéaire* (voir fig. 2b) dans les zones d'ancrage sont tous égaux à 100%. Cela montre qu'il n'y a pas de risque de glissement des nappes par défaut d'adhérence;
- concernant les *longueurs de renforcement*, nous avons considéré pour chaque nappe une longueur effective qui est celle au delà de laquelle on ne peut théoriquement pas améliorer la sécurité de l'ouvrage. En considérant une longueur de nappe unique pour tous les renforts du massif, on obtient donc avec le présent modèle une longueur effective de 1.065m pour $F_s=1$ et 1.30m (valeur non présentée dans le tableau 1) pour $F_s=1.28$. Ces deux valeurs encadrent bien celle de 1.189m obtenue à partir des contraintes mesurées dans les renforts lors de l'essai.

La longueur effective de renfort se décompose, pour chaque nappe, en trois longueurs distinctes : celle de la membrane ($2 \cdot AB_1$, cf. fig. 3) et celles des ancrages amont et aval de la surface de rupture. Notons les faibles valeurs des longueurs de l'ancrage amont qui sont à relier aux faibles tensions agissant en B_1 , ainsi qu'à la valeur relativement élevée de la surcharge appliquée en tête du mur;

- les *déplacements relatifs sol-nappe* augmentent avec la profondeur en aval de la rupture, et diminuent en amont. Les valeurs des déplacements en F (en fond de nappe, voir fig. 1) données dans le tableau 1 correspondent aux longueurs d'ancrage effectives;
- les *tensions* agissant en B_1 diminuent avec la profondeur, alors que celles en B_2 (symétrique de B_1 par rapport au point A) augmentent. Cela est dû au fait que la longueur d'ancrage amont augmente avec la profondeur, alors que celle aval diminue;
- les *inclinaisons* des tensions de renfort augmentent avec la profondeur, alors que celles maximales (correspondant aux tangentes à la surface de rupture) diminuent. Notons que les premières restent bien inférieures aux secondes.

5.3 Comparaison en termes de tensions de renfort

La comparaison entre la théorie (comprenant le présent modèle et la "méthode en déplacement" originale) et l'expérience, en terme d'intensité des tensions de renfort, est présentée sur la figure (6), dans le même cas que précédemment ($F_s=1$).

En ce qui concerne les résultats de "Cartage", nous avons recherché, pour la surface de rupture obtenue par le présent modèle (voir fig. 5b, $y_t=19.7\text{mm}$), la valeur du déplacement vertical en tête qui aboutit également à un facteur de sécurité égal à l'unité. Les déplacements obtenus sont respectivement $y_t=60, 31.2$ et 20.7mm pour $ideto=1, 2$ et 3 . Notons, que le présent modèle donne le déplacement le plus faible, qui est cependant relativement proche de celui obtenu par la troisième modélisation de "Cartage".

Les résultats de la figure (6) montrent que, mise à part la nappe la plus basse, les intensités mesurées des tensions de renfort sont relativement bien prédites par "Cartage" $ideto=1$ et 3 , et par notre modèle. Les écarts, entre les valeurs expérimentales et celles du présent modèle, varient de 39% (pour la nappe 1) à 6% (pour la nappe 3). Concernant la nappe la plus basse, pour laquelle "Cartage" ne donne aucun résultat, il est à noter que Bathurst et al (1988) ont indiqué dans leur rapport que la faible tension obtenue a dû être influencée par la mise en œuvre du modèle expérimental. Pour la nappe 1, "Cartage" $ideto=1$ et 3 donnent la meilleure prédiction, tandis que pour les nappes 2 et 3, c'est le présent modèle qui est le meilleur. Remarquons que seul le présent modèle donne les trois tensions inférieures à celles mesurées, ce qui est dans le sens de la sécurité. Notons également que les modélisations de la membrane dans lesquelles les tensions de renfort sont considérées agir horizontalement ($ideto=1$ et 3) donnent des résultats très proches. Quant à la modélisation autorisant une inclinaison des tensions de renfort ($ideto=2$), elle donne des tensions très supérieures à celles mesurées.

6 CONCLUSION

En vue de diminuer le nombre des hypothèses arbitraires couramment utilisées dans les méthodes d'analyse de la stabilité des talus renforcés par des nappes géosynthétiques, un développement de la "méthode en déplacement" de Gourc et al (1986) a récemment été proposé (Lemonnier, 1995). En vue de le valider, celui-ci a été appliqué à un ouvrage expérimental, qui fût construit et testé par Bathurst et al (1988). Une étude comparative en termes de tensions de renfort, de longueur effective des nappes, de facteur de sécurité et de surface de rupture, en considérant la "méthode en déplacement" originale, le présent développement et les mesures expérimentales, est présentée et analysée.

On a ainsi montré que la présente méthode donne une bonne prédiction du comportement de l'ouvrage renforcé en termes d'intensité des tensions de renfort et de longueur d'ancrage effective. De plus, la prédiction de la surface de rupture par le présent modèle s'est révélée satisfaisante.

Enfin, la comparaison avec la "méthode en déplacement" originale (logiciel "Cartage"), en considérant les trois modélisations simplifiées de la membrane, a permis de montrer l'amélioration de la méthode.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Baker, R. & Garber, M. - Variational Approach to Slope Stability. *9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan, 1977*. Vol. 2, p. 9-12.
- Bathurst, R. J., Benjamin, D. J. & Jarrett, P. M. - Laboratory study of Geogrid Reinforced Walls. *Royal military College of Canada, Kingston, Ontario. Proc. of the Symposium on Geosynthetics for Soil Improvement, ASCE Geotechnical Special Publication, No. 18, R. D. Holtz, Ed., 1988*, p. 178-192.
- Gotteland, Ph. - Renforcement des sols par géosynthétiques ; dimensionnement et validation. *Thèse de Doctorat : Université Grenoble I, France, 1991*. 384 p.
- Gourc, J. P., Ratel, A. & Delmas Ph. - Design of fabric retaining walls : the Displacements Method. *Third Int. Conf. on Geotextiles and geomembranes, Vienna, Austria, 1986*, session 3A/1, p. 289-294.
- Lemonnier, P. - Application de la méthode variationnelle au problème de la stabilité des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. *PhD thesis. I.N.S.A Lyon, France, 1995*. 483 p.
- Lemonnier, P., A.H. Soubra & R. Kastner - Étude de la stabilité des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. *Communication GEO 1995, Aussois, France, 1995*. 3 p.
- Ratel, A. - Modélisation d'un sol renforcé par géosynthétique : application de la « méthode en déplacements ». *Thèse : Doct. Ing. : Université Scientifique et Médicale et l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1987*. 357 p.

1 INTRODUCTION

A development of the "displacement method" of Gourc et al (1986) has recently been proposed (Lemonnier, 1995) in the framework of the geosynthetically reinforced slope stability analysis. It is based on a double application of the variational approach coupled with the basic principle of the "displacement method" (i.e. concept of the anchored membrane and the consideration of a displacement field along the failure surface). It allows to eliminate some a priori assumptions currently considered concerning, on the one hand, the shape of the failure surface and the normal stress distribution along this surface, and on the other hand, the determination of the reinforcement tensions (the ones acting in the geosynthetic sheets at the failure surface). In this article, a validation of this new development (named in the following "variational displacement method") is presented, applying it to an experimental large scale model wall which has been performed at the Royal Military College by Bathurst et al (1988). The present validation considers the comparison in terms of reinforcement tensions, effective length of the geosynthetic sheets, safety factor and failure surface. Firstly, the original "displacement method" together with its new development are briefly presented. Secondly, the confrontation of the theoretical results with the experimental ones is presented and analysed.

2 ORIGINAL "DISPLACEMENT METHOD"

The original "displacement method" (Gourc et al, 1986, "Cartage" software) is based on the consideration of (i) a displacement field along the failure surface defined by a top displacement y_t (see fig. 1), and (ii) the geosynthetic extensibility. Indeed, the local equilibrium of each sheet is considered, coupled with the tension constitutive model of the reinforcement and of that in friction of the soil-geosynthetic interface (see fig. 2). Furthermore, three possible modelisations of the membrane ($idefo=1, 2$ and 3) are proposed in this design method :

- $idefo=1$: modelisation of the geosynthetic behaviour with a "small displacements" assumption and T_i remains horizontal (see fig. 1);
- $idefo=2$: "large displacements" and T_i remains tangent to the failure surface;
- $idefo=3$: "large displacements" and T_i remains horizontal.

Finally note that this method allows the determination of the safety factor for a given failure surface (no automatic process to find the critical surface). Thus, the results of "Cartage" presented in figures (5a) and (6) concern the critical failure surfaces determined by the present model.

3 VARIATIONAL DISPLACEMENT METHOD

3.1 Global equilibrium of the sliding mass

Applying the variational limit equilibrium method, elaborated by Baker and Garber (1977) in the case of unreinforced slopes, to the one of reinforced slopes, it has been shown that (i) the trace of the critical failure surface is a log spiral (see fig. 1), and (ii) the only moment equilibrium equation of all forces acting on the sliding mass is enough for the determination of the safety factor F_s , defined with respect to the shear strength parameters of the soil.

3.2 Local equilibrium of the reinforcement sheets

In order to assess the reinforcements contribution on the stability, the variational calculus has been applied to the equilibrium of the membrane in the neighbourhood of the failure surface, considering the principle of the "displacement method" (see §2). The variational approach allows the determination of the optimal shape (log spiral, see fig. 3) as well as the optimal position of the sheet for which one obtains the extremal tension at the intersection with the failure surface. Furthermore, one obtains the tension distribution and the relative soil-geosynthetic displacements along the sheets. This modelisation is based on a priori assumptions concerning the stress distribution acting on the above face of the upstream membrane presented on figure 3. Nevertheless, the influence of these a priori assumptions on the numerical results is not significant (see Lemonnier, 1995 and Lemonnier et al, 1995).

4 EXPERIMENTAL MODEL

In order to validate the present development, it has been applied to a large scale model wall, 3m high, and made of cohesionless soil with a friction angle of 53° . This wall has been built and tested in the framework of

a research project at the Royal Military College (RMC) of Canada by Bathurst et al (1988). It was reinforced by four geogrid sheets made of high density polyethylene (HDPE) having an ultimate wide width tensile strength (ASTM D 4595) of 12.26kN/m at 14% strain in the direction it was oriented. This model was surcharged on top in increments to the rupture (50kN/m).

Concerning the relative soil/geosynthetic displacement u_p corresponding to the plastic friction behaviour of the interface (see fig. 2b) considered in the present model, it was not available in the RMC wall report. Thus, one has chosen a value as realistic as possible ($u_p=2.5$ cm) taking into account the nature of materials in presence and the different experimental studies on the determination of this parameter (Ratel, 1987 and Gotteland, 1991). It is to be noted however, that the influence of this parameter on the determination of the reinforcement tension is not significant (Ratel, 1987).

5 COMPARATIVE STUDY

5.1 Influence of the displacement field

Figure (4) presents the variations of the reinforcement tensions (fig. 4a) and of their inclinations (fig. 4b) obtained by the present model, in the case of the RMC wall, when y_t varies from 5 to 27mm. Note that the tensions increase significantly with y_t , and the inclinations decrease slightly.

Figure (5) presents on the one hand, the variations of the safety factor (fig. 5a) given by the present model and "Cartage", and on the other hand, the failure surfaces (fig. 5b) given by the present model, when y_t varies from 5 to 27mm. In terms of safety factor, note that the present model gives (i) in average the larger values, and (ii) values relatively close from the ones of "Cartage $id\text{efo}=3$ ". Thus, the present model seems to be less conservative than the original method.

Concerning the failure surface, note that it moves off the facing when y_t increases (which corresponds to a larger mobilisation of the reinforcements). These surfaces are to be compared to the one observed at the time of the experiment and represented with a dotted line on fig. (5b). This surface is very close to the theoretical one obtained from the present model and corresponding to $y_t=15$ mm, i.e. to a safety factor of (0.83).

5.2 Analysis of the results of the present model for $F_s=1$

The complete results of the local equilibrium, obtained by the present model in the case where $F_s=1$ (see fig. 5a), are presented in table 1. Note the following remarks:

- the *local displacement* y_1 (see fig. 3) decreases with the depth;
- the *linear behaviour rates* (see fig. 2b) in the anchorage zones are all equal to 100%. This shows that there is no risk of sliding of the sheets by lack of adherence;
- concerning the *reinforcement lengths*, one has considered for each sheet an effective length which is the one over which it is theoretically impossible to improve the safety of the structure. Considering an unique length for all the reinforcements of the wall, one obtains with the present model an effective length of 1.065m for $F_s=1$ and 1.30m (value not presented in table 1) for $F_s=1.28$. These two values can be compared to the one obtained from the measured stresses in the reinforcements during the experiment (1.189m). Note that this value lies well between the two others obtained from the present model. The effective reinforcement length includes, for each sheet, three different parts: the one of the membrane ($2*AB1$, cf. fig. 3) and these of the upstream and downstream anchorage zones to the failure surface. Note the small values of the lengths of the upstream anchorage zones which are to be related to the small tensions acting in $B1$, together with the value relatively high of the applied surcharge on top of the wall;
- the *soil-geogrid relative displacements* increase with the depth in the downstream zone, and decrease in the upstream one. The values of displacements in F (in the bottom of the sheet, see fig. 1) given in table 1 correspond to the effective anchorage lengths;
- the *tensions* acting in $B1$ decrease with the depth, and these in $B2$ (symmetric of $B1$ with respect to point A) increase. This is due to the fact that the upstream anchorage length increases with the depth, and the downstream one decreases;
- the *inclinations* of the reinforcement tensions increase with the depth, and the maximal values (corresponding to the tangents to the failure surface) decrease. Note that the first ones are significantly lower than the second ones.

5.3 Comparison in terms of reinforcement tensions

The comparison between the theory (including the present model and the original "displacement method") and the experience, in term of magnitude of reinforcement tensions, is presented one figure (6), in the same case as in the preceding section (i.e. $F_s=1$).

Concerning the results of "Cartage", considering the failure surface obtained from the present model (see fig. 5b, $y_t=19.7\text{mm}$), we have searched the value of the vertical top displacement which also gives a safety factor equal to 1. The obtained displacements are respectively $y_t=60, 31.2$ and 20.7mm for $idefo=1, 2$ and 3 . Note, that the present model gives the smaller displacement, which is however relatively close to the one obtained by the third modelisation of "Cartage".

The results of figure (6) show that, apart the lowest sheet (i.e. sheet 4), the measured magnitudes of the reinforcement tensions are relatively well predicted by "Cartage" $idefo=1$ and 3 , and by the present model. The scatter between the experimental values and these of the present model, vary from 39% (for sheet 1) to 6% (for sheet 3). Concerning the lowest sheet, for which "Cartage" does not give any result, it is to be noted that Bathurst et al (1988) have indicated in their report that the small tension value obtained was probably influenced by the model set-up. For sheet 1, "Cartage" $idefo=1$ and 3 give the best prediction, and for sheets 2 and 3, the present model is the best. Note that only the present model gives the three tensions lower than the measured ones, which is on the safety side. Note also that the modelisations of the membrane in which the reinforcement tensions are considered to act horizontally ($idefo=1$ and 3), give very similar results. Concerning the modelisation allowing an inclination of the reinforcement tensions ($idefo=2$), it gives tensions much larger to the measured ones.

6 CONCLUSION

In order to decrease the number of the a priori assumptions usually considered in the geosynthetically reinforced slopes stability analysis, a development of the "displacement method" of Gourc et al (1986) has recently been proposed (Lemonnier, 1995). To validate it, this model has been applied to an experimental model wall which has been built and tested by Bathurst et al (1988). A comparative study in terms of reinforcement tensions, of effective lengths of the sheets, of safety factor and of failure surface, considering the original "displacement method", the present development and the experimental measures, is presented and analysed.

It has shown that the present method gives a better prediction of the behaviour of the reinforced structure in terms of magnitude of the reinforcement tensions and of the effective length of the reinforcements. Moreover, the prediction of the failure surface by the present model is satisfying.

Finally, the comparison with the original "displacement method" ("Cartage" software), considering the three simplified modelisations of the membrane, has allowed us to show the improvement of the method.

7 REFERENCES

- Baker, R. & Garber, M. - Variational Approach to Slope Stability. *9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Japan, 1977*. Vol. 2, p. 9-12.
- Bathurst, R. J., Benjamin, D. J. & Jarrett, P. M. - Laboratory study of Geogrid Reinforced Walls. *Royal military College of Canada, Kingston, Ontario. Proc. of the Symposium on Geosynthetics for Soil Improvement, ASCE Geotechnical Special Publication, No. 18, R. D. Holtz, Ed., 1988*, p. 178-192.
- Gotteland, Ph. - Renforcement des sols par géosynthétiques ; dimensionnement et validation. *Thèse de Doctorat : Université Grenoble I, France, 1991*. 384 p.
- Gourc, J. P., Ratel, A. & Delmas Ph. - Design of fabric retaining walls : the Displacements Method. *Third Int. Conf. on Geotextiles and geomembranes, Vienna, Austria, 1986*, session 3A/1, p. 289-294.
- Lemonnier, P. - Application de la méthode variationnelle au problème de la stabilité des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. *PhD thesis. I.N.S.A Lyon, France, 1995*. 483 p.
- Lemonnier, P., A.H. Soubra & R. Kastner - Étude de la stabilité des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. *Communication GEO 1995, Aussois, France, 1995*. 3 p.
- Ratel, A. - Modélisation d'un sol renforcé par géosynthétique : application de la « méthode en déplacements ». *Thèse : Doct. Ing. : Université Scientifique et Médicale et l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1987*. 357 p.

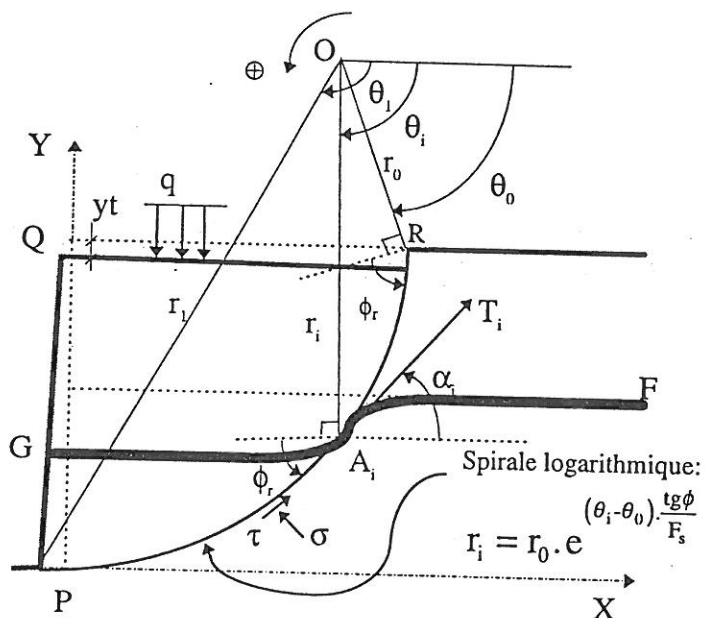


Figure 1 : Stabilité globale du talus renforcé. Surface de rupture extrême / Global stability of the reinforced slope. Extremal failure surface

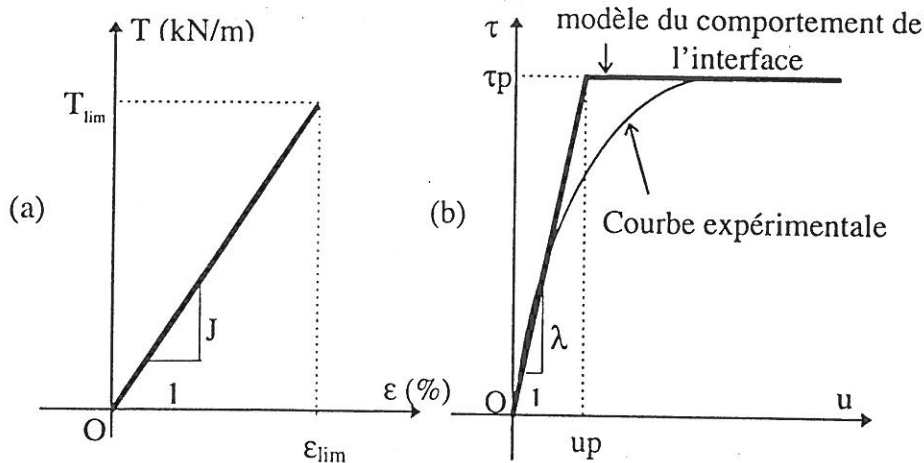


Figure 2 : Comportement (a) en traction et (b) en friction de l'inclusion - (Gourc et al., 1986) / (a) Tensile and (b) friction behaviour of the inclusion - (Gourc et al., 1986)

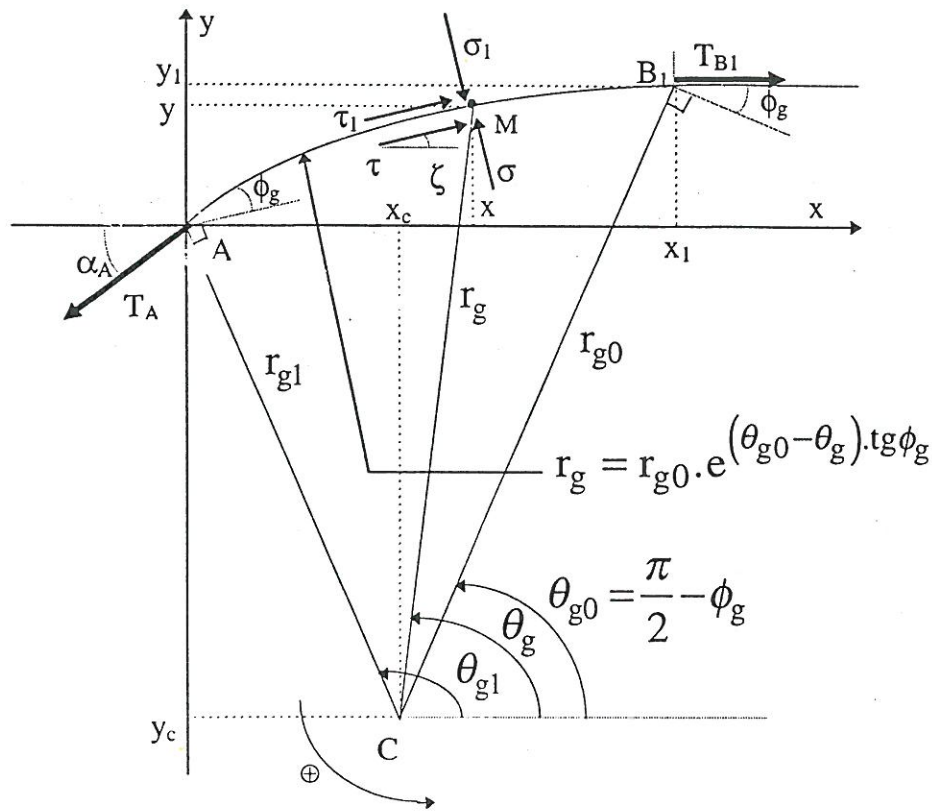


Figure 3 : Forme de la membrane amont résultant de l'analyse variationnelle / Shape of the upstream membrane from the variational analysis

		nappe 1	nappe 2	nappe 3	nappe 4
Déplacement local	y1 (mm)	9.8	9.7	9.5	9.4
Taux de comportement linéaire (%)	amont	100	100	100	100
	aval	100	100	100	100
Longueurs de renforcement (m)	effective	1.065	0.806	0.515	0.206
	ancrage amont	0.071	0.072	0.073	0.074
	membrane	0.057	0.055	0.054	0.052
	ancrage aval	0.937	0.679	0.388	0.080
Déplacements relatifs sol - nappe (mm)	en F (fond)	0.8	0.6	0.4	0.3
	en B1 (amont)	0.9	0.7	0.5	0.4
	en B2 (aval)	2.9	2.9	3	5.2
	en G (parement)	0.04	0.05	0.3	4.2
Tensions (kN/m)	en B1	0.32	0.29	0.26	0.24
	en A	5.87	6.92	7.94	8.89
	en B2	2.31	2.63	2.95	3.25
Inclinaisons (°)	de TA	48.71	50.47	51.69	52.52
	maximales	72.31	70.14	68.04	66.09

Tab. 1: Résultats locaux du présent modèle - Cas du mur RMC (Fs=1)

Tab. 1: Local results from the present model - Case of RMC wall (Fs=1)

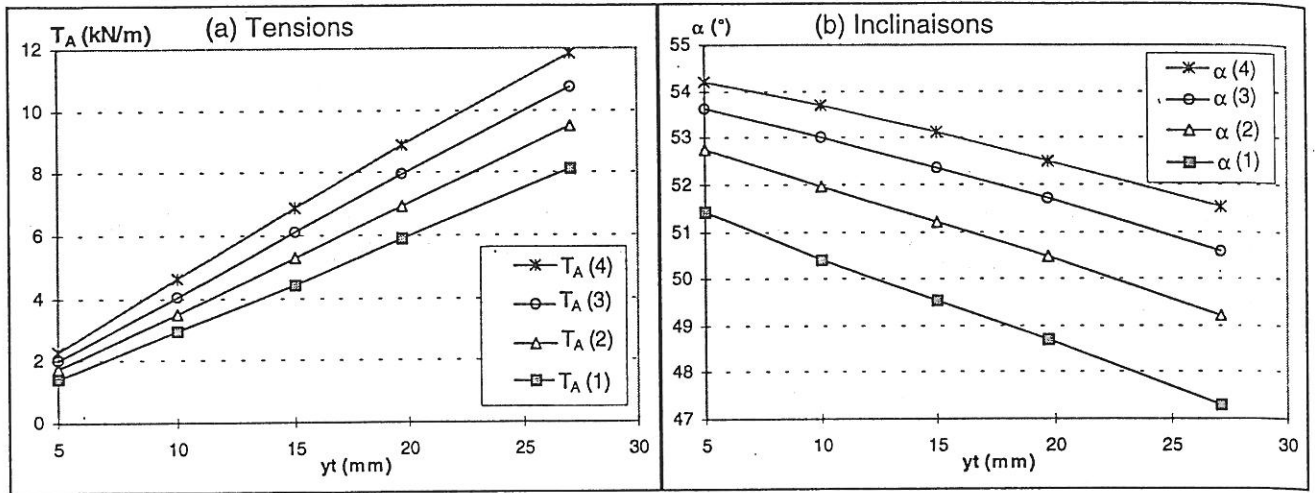


Figure 4 : Influence du champ de déplacement sur les tensions de renfort (présent modèle) / Influence of the displacement field on the tension reinforcement (present model)

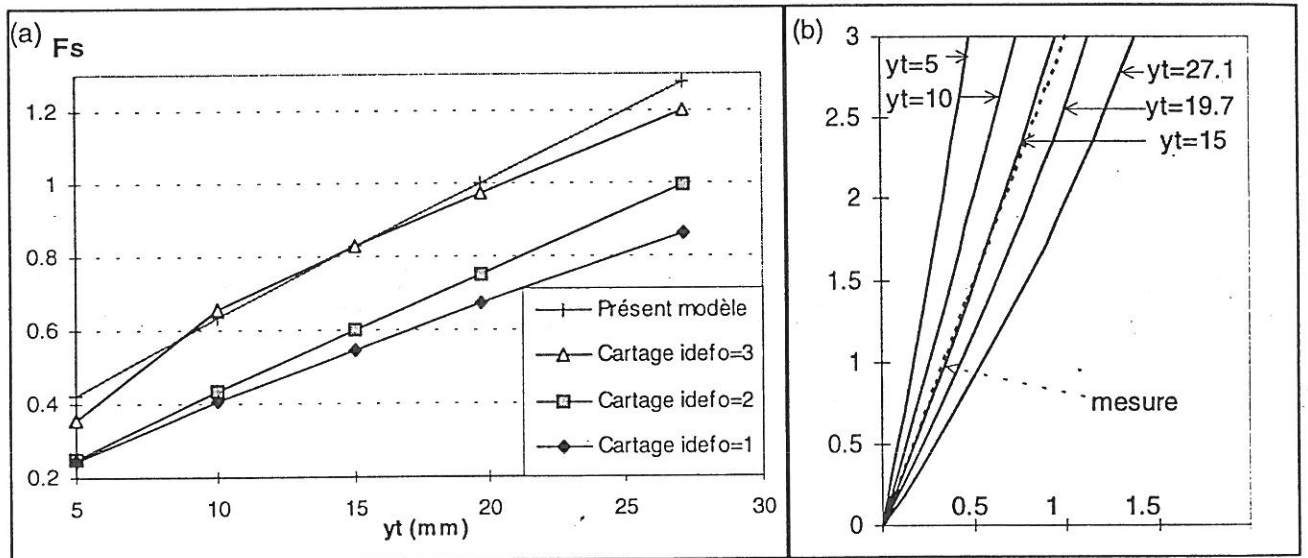


Figure 5 : Influence du champ de déplacement sur le facteur de sécurité et sur la surface de rupture / Influence of the displacement field on the safety factor and on the failure surface

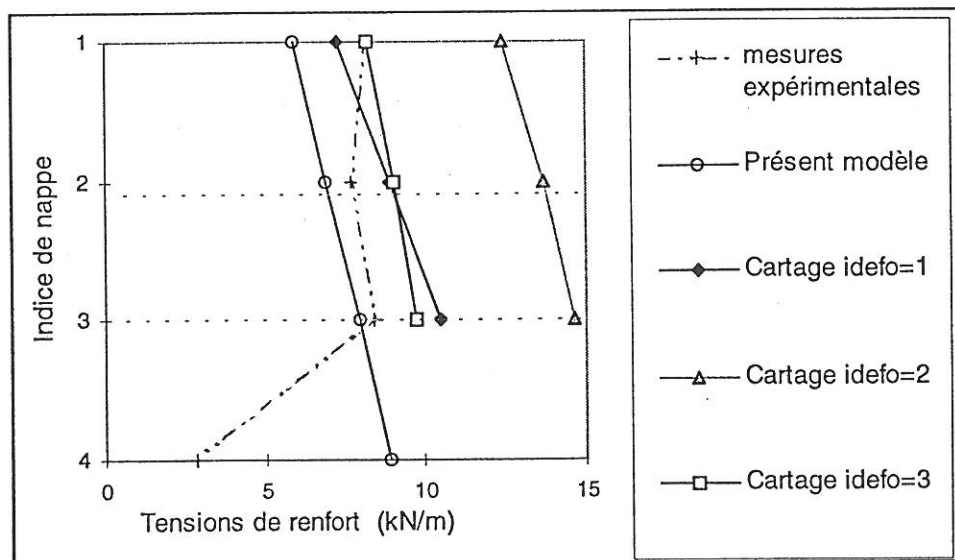


Figure 6 : Comparaison des tensions de renfort expérience/théorie ($F_s=1$) pour le mur RMC / Comparison experience versus theory ($F_s=1$) of the reinforced tensions in RMC wall

AGEP: Soil Mechanics papers

- 6 Ibsen, L.B. (1995). Soil Parameters, Final proceedings MCS - Project MAST II, July 1995. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9514.
- 7 Sørensen, C. S., Ibsen, L. B. , Jakobsen, F. R., Hansen, A., Jakobsen, K. P., (1995) "Bearing Capacity of Caisson Breakwaters on Rubble Mounds". Proceedings of the Final Project Workshop, Monolithic (Vertical) Coastal Structures, Alderney, UK, Appendix IX, p 26. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9515.
- 8 Ibsen, L.B., Steenfelt, J.S. (1996). Terningapparatet - et middel til bedre jordforståelse (The true-triaxial-apparatus - a means to better understanding of soil behaviour; in Danish). *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, NGM-96, Reykjavik*, Vol 1, pp 111-122. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9603.
- 9 Thorsen, G., Thomsen, B., Thorsen, S. (1996). Tilsyneladende forbelastning af Eem jordarter (Apparent preconsolidation of Eemian soils; in Danish). *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, NGM-96, Reykjavik*, Vol 1, pp 147-152. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9607.
- 10 Thorsen, G. (1996). Oedometer tests - an aid in determination of the geological load history. *Bull. of the Geological Society of Denmark*, Vol. 43, pp. 41-50. Copenhagen 1996-07-14. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9608.
- 11 Ibsen, L.B., Jakobsen, K.P. (1997). Dynamic Bearing Capacity of Caisson Breakwaters Subjected to Impulsive Wave Loading. MAST III (PROVERBS Workshop, Las Palmas, Feb. 18-24-1997. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9701.
- 12 Lade, P.V., Ibsen, L.B. (1997). A study of the phase transformation and the characteristic lines of sand behaviour. *Proc. Int. Symp. on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*, Nagoya, Oct. 1997, pp. 353-359. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9702.
- 13 Bødker, L., Steenfelt, J.S. (1997). Vurdering af lodrette flytningsamplituder for maskinfundament, Color Print, Vadum (Evaluation of displacement amplitudes for printing machine foundation; in Danish). *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9706.
- 14 Ibsen, L.B., Steenfelt, J.S. (1997). Vurdering af lodrette flytningsamplituder for maskinfundament Løkkensvejens kraftvarmeværk (Evaluation of displacement amplitudes for gas turbine machine foundation; in Danish). *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9707.
- 15 Steenfelt, J.S. (1997). National R&D Report : Denmark. *Seminar on Soil Mechanics and Foundation Engineering R&D*, Delft 13-14 February 1997. pp 4. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9708.
- 16 Lemonnier, P. and Soubra, A. H. (1997). Validation of the recent development of the displacement method - geogrid reinforced wall. *Colloquy EC97 on the comparison between experimental and numerical results*, Strasbourg, France. Vol.1, pp. 95-102. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9712.

AGEP: Soil Mechanics papers

- 17 Lemonnier, P. & Soubra, A. H. (1997). Recent development of the displacement method for the design of geosynthetically reinforced slopes - Comparative case study. *Colloquy on geosynthetics, Rencontres97, CFG*, Reims, France, Vol. 2, pp. 28AF-31AF (10pp). Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9713.
- 18 Lemonnier, P., Soubra, A. H. & Kastner, R. (1997). Variational displacement method for geosynthetically reinforced slope stability analysis : I. Local stability. *Geotextiles and Geomembranes* 16 (1998) pp 1-25. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9714.
- 19 Lemonnier, P., Soubra, A. H. & Kastner, R. (1997). Variational displacement method for geosynthetically reinforced slope stability analysis : II. Global stability. *Geotextiles and Geomembranes* 16 (1998) pp 27-44. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9715.
- 20 Ibsen, L.B. (1998). Analysis of Horizontal Bearing Capacity of Caisson Breakwater. 2nd PROVERS Workshop, Napels, Italy, Feb. 24-27-98. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9802.
- 21 Ibsen, L.B. (1998). Advanced Numerical Analysis of Caisson Breakwater. *2nd PROVERS Workshop*, Napels, Italy, Feb. 24-27-98. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9803.
- 22 Ibsen, L.B., Lade P.V. (1998). The Role of the Characteristic Line in Static Soil Behavior. *Proc. 4th International Workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soil and Rocks*. Gifu, Japan. Balkema 1998. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9804.
- 23 Ibsen, L.B., Lade, P.V. (1998). The Strength and Deformation Characteristics of Sand Beneath Vertical Breakwaters Subjected to Wave Loading. 2nd PROVERS Workshop, Napels, Italy, Feb. 24-27-98. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9805.
- 24 Steenfelt, J.S., Ibsen, L.B. (1998). The geodynamic approach - problem or possibility? Key Note Lecture, *Proc. Nordic Geotechnical Meeting, NGM-96, Reykjavik*, Vol 2, pp 14. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9809.
- 25 Lemonnier, P., Gotteland, Ph. and Soubra, A. H. (1998). Recent developments of the displacement method. *Proc. 6th Int. Conf. on Geosynthetics. Atlanta, USA*, Vol 2, pp 507-510. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9814.
- 26 Praastrup, U., Jakobsen, K.P., Ibsen, L.B. (1998). On the choice of strain measures in geomechanics. 12th Young Geotechnical Engineers Conference, Tallin, Estonia. *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9815.
- 27 Ibsen, L.B. (1998). The mechanism controlling static liquefaction and cyclic strength of sand. *Proc. Int. Workshop on Physics and Mechanics of Soil Liquefaction*, Baltimore. A.A.Balkema, ISBN 9058090388, pp 29-39. Also in *AAU Geotechnical Engineering Papers*, ISSN 1398-6465 R9816.