

Modélisation numérique de la distribution des efforts et déformations dans les géosynthétiques à l'aide de la méthode MERAMOG

B.F.G Tano, F. Olivier, D. Dias, G. Stoltz, N. Touze-Foltz

► **To cite this version:**

B.F.G Tano, F. Olivier, D. Dias, G. Stoltz, N. Touze-Foltz. Modélisation numérique de la distribution des efforts et déformations dans les géosynthétiques à l'aide de la méthode MERAMOG. 11èmes Rencontres Géosynthétiques, Mar 2017, Lille, France. pp.10. hal-02607497

HAL Id: hal-02607497

<https://hal.inrae.fr/hal-02607497>

Submitted on 18 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA DISTRIBUTION DES EFFORTS ET DÉFORMATIONS DANS LES GÉOSYNTHÉTIQUES À L'AIDE DE LA MÉTHODE MERAMOG

NUMERICAL MODELLING OF FORCE AND STRAIN DISTRIBUTION WITHIN GEOSYNTHETICS USING THE MERAMOG METHOD

Bekoin Francis Guillaume TANO¹, Franck OLIVIER¹, Daniel DIAS², Guillaume STOLTZ³ et Nathalie TOUZE-FOLTZ³

¹ Ecogeos, Île de France et Arras, France

² 3SR, Communauté Université Grenoble Alpes, France

³ Irstea, Aix-en-Provence et Antony, France

RÉSUMÉ – Lorsqu'ils sont utilisés dans la construction des ouvrages géotechniques, hydrauliques et environnementaux et de génie-civil, les géosynthétiques sont soumis à des charges mécaniques qui peuvent être importantes. Ces charges sont susceptibles d'engendrer d'importants efforts et déformations de traction et ainsi la perte d'intégrité structurelle (rupture) de ces géosynthétiques. Ce risque de rupture est accru lorsque les géosynthétiques sont installés sur des talus comme cela est le cas pour les installations de stockage de déchets. Afin d'éviter toute perte d'intégrité structurelle, il est donc important d'évaluer l'amplitude des efforts/déformations de traction développés au sein des différentes couches de géosynthétiques utilisées lors de la construction. Cet article présente une méthode rigoureuse basée sur le principe de modélisation numérique, qui permet d'évaluer l'intégrité structurelle des géosynthétiques tout en prenant en compte la complexité de leur comportement mécanique : il s'agit de la **Méthode Rationnelle de Modélisation des systèmes Géosynthétiques (MeRaMoG)**.

Mots-clés : géosynthétiques, intégrité structurelle, efforts et déformations, modélisation numérique.

ABSTRACT – When geosynthetics are used in engineering, geotechnical and environmental constructions, they can be subjected to high loads. These loads can induce excessive forces/strains within the various geosynthetics and then their tear (loss of structural integrity). This risk of tearing increases when the geosynthetics are installed on slopes as is the case in landfills. To avoid the tear of the geosynthetics, it is then important to assess the magnitude of the forces/strains developed within the various geosynthetics. This paper aims to present a rigorous method, based on numerical modelling approach, which can be used to assess the forces/strains within the various geosynthetics while considering the complexity of their mechanical behaviour: this is a rigorous method to numerical model the mechanical behaviour of geosynthetic systems (MeRaMoG).

Keywords: geosynthetics, structural integrity, forces and strains, numerical modelling

1. Introduction et problématique

Les géosynthétiques sont utilisés dans la construction d'ouvrages géotechniques, hydrauliques, environnementaux et de génie-civil en remplacement ou en complément des matériaux naturels pour des applications variées (étanchéité, drainage, renforcement, etc.). Dans le cadre de ces utilisations, ces géosynthétiques sont souvent installés sur des talus et soumis à des sollicitations mécaniques importantes liées à la fois aux charges induites par les matériaux sus-jacents et aux tassements des matériaux sous-jacents dans le cadre d'ouvrages en appui sur des matériaux compressibles (sols mous, rehausse d'installations de stockage de déchets (ISD)). Dans ces conditions, comme cela peut être le cas pour les ISD, la surcharge apportée par les matériaux (déchets dans ce cas) et les mouvements d'interfaces entre les géosynthétiques peuvent engendrer des efforts de traction importants susceptibles d'entraîner la perte d'intégrité structurelle (rupture) de ces géosynthétiques. Malheureusement, les ingénieurs disposent de très peu de retours d'expérience sur ce mode de rupture car les géosynthétiques sont souvent confinés sous plusieurs mètres de matériaux.

Toutefois, des cas de rupture de géosynthétiques par traction sous l'action de déformations excessives ont pu être mis en évidence sur quelques ISD après excavation des déchets. La Figure 1 donne un aperçu de la rupture d'une géomembrane PEHD le long d'un talus d'ISD qui a pu être observée après excavation des déchets.



Figure 1. Rupture par traction sur talus d'une géomembrane PEHD 2 mm observée sur une ISD en Asie du sud, après excavation des déchets (Fowmes, 2007)

En outre, même si les recommandations en vigueur en France préconisent de ne pas solliciter mécaniquement les géomembranes, quelle que soit la conception adoptée (pente plus ou moins forte) et le type de géomembrane (lisse ou texturée), elles sont en réalité toujours soumises à un certain niveau de contrainte et de déformation. Dans des mêmes conditions d'installation et d'utilisation, une géomembrane lisse va reprendre globalement moins d'efforts qu'une géomembrane texturée ; mais dans le cas d'une géomembrane lisse, si un géotextile (de protection) est disposé en recouvrement de cette dernière comme c'est le cas dans les ISD, les risques de déformation excessive du géotextile sus-jacent et de mise à nu de la géomembrane seront plus importants.

Dans tous les cas de figure et afin d'éviter la perte d'intégrité structurelle (rupture) des géosynthétiques dans les ouvrages, il est important d'évaluer l'amplitude des efforts/déformations développés dans chacune des couches de géosynthétiques mises en œuvre. Cette évaluation qui doit être réalisée lors des études de conception en phase AVP et PRO, permet de s'assurer que les niveaux d'efforts/déformations développés dans chaque couche de géosynthétique restent inférieurs aux limites acceptables des géosynthétiques. A cet effet et comme recommandé par l'Eurocode 7 dans le cas des sollicitations et mécanismes de rupture complexes, le recours à la modélisation numérique est possible. En effet, la modélisation numérique est un outil robuste qui permet d'évaluer l'intégrité structurelle des géosynthétiques.

Toutefois, afin d'obtenir des résultats probants, il est nécessaire de prendre en compte la complexité du comportement mécanique des matériaux modélisés (géosynthétiques, sols et déchets) et de leurs interactions (notamment au niveau des interfaces).

C'est dans ce sens qu'une méthode de modélisation appelée Méthode Rationnelle de Modélisation des systèmes Géosynthétiques a été développée récemment (Tano, 2016) au sein du bureau d'études Ecogeos dans le cadre d'un projet de recherche impliquant plusieurs acteurs majeurs de la profession (Irstea, LTHE et 3SR). Cet article a pour but de présenter les principes fondamentaux de cette méthode, de préciser les différentes étapes à suivre pour son application et enfin de présenter quelques résultats d'application de cette méthode sur des exemples de projets d'ISD.

2. Origine et spécificités de la méthode de calcul proposée

2.1 Origine de cette méthode de calcul

La modélisation des systèmes géosynthétiques en interaction avec des matériaux naturels et anthropiques (déchets) date de plus de 20 ans avec notamment les travaux de Wilson-Fahmy et Koerner (1993), Byrne (1994), Long et al. (1995), etc. Les techniques de modélisation ont évolué

progressivement avec le progrès de l'informatique et le développement de logiciels et d'ordinateurs plus puissants. Afin d'obtenir des résultats plus réalistes, des techniques de modélisation de plus en plus complexes ont vu le jour. On peut notamment citer la technique de modélisation développée par Fowmes et al. (2008) qui a permis de prendre en compte un certain nombre de critères clé du comportement mécanique des systèmes géosynthétiques. Cette approche a d'ailleurs été reprise récemment par Sia et Dixon (2012) et Zamara et al. (2014) dans le cadre de leurs travaux de thèse.

Avec le souci d'amélioration continue et afin d'obtenir des résultats encore plus réalistes, cette nouvelle méthode de modélisation développée récemment par Tano (2016) dans le cadre de ses travaux de thèse s'inspire des études antérieures (une trentaine) et particulièrement des travaux de Fowmes et al. (2008) et de Zamara et al. (2014), permet de représenter le comportement mécanique des géosynthétiques et de leurs interfaces. Elle permet ainsi d'évaluer l'intégrité structurelle des géosynthétiques dans les ouvrages en mettant en évidence les champs d'efforts/déformations développés dans chaque couche de géosynthétique. Cela est rendu possible grâce à la prise en compte de cinq critères clé qui constituent les fondements de la méthode de calcul proposée. Ces spécificités sont explicitées dans la section suivante.

2.2 Spécificités de cette méthode de calcul

Cette section vise à présenter et détailler les cinq critères clés (Tano et al., 2016a) relatifs au comportement mécanique des interfaces et des géosynthétiques sur lesquelles est basée la Méthode de calcul proposée. Ce sont d'abord la modélisation du nombre réel de géosynthétiques et d'interfaces dans l'ouvrage (critère 1) ; ensuite la prise en compte du phasage de construction (remblaiement) et de l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux avec ce phasage (critère 2) ; puis la prise en compte du comportement radoucissant des interfaces (critère 3) ; la différenciation entre le comportement en traction et le comportement en compression des géosynthétiques (critère 4) ; et enfin l'évolution de la raideur des géosynthétiques avec la déformation (critère 5). Ces points essentiels qui constituent les fondements de cette méthode sont détaillés ci-dessous :

- Critère n°1 : nombre réel de géosynthétiques et d'interfaces dans le modèle

Dans la plupart des ouvrages, ce sont plusieurs couches de géosynthétiques en contact qui sont installées. Dans les ISD par exemple, le dispositif d'étanchéité et de drainage comprend souvent trois géosynthétiques qui sont de haut en bas un géotextile de protection, une géomembrane et un géosynthétique bentonitique. Ces couches de géosynthétiques interagissent entre elles par le biais des interfaces (contact entre les géosynthétiques) sous l'effet des sollicitations mécaniques extérieures. Comme conséquence, la réponse d'un géosynthétique ne dépendra pas uniquement de ses propriétés mécaniques, mais aussi des caractéristiques des interfaces qui matérialisent le contact entre cette couche de géosynthétique et les matériaux et/ou géosynthétiques environnants. Ainsi, en modélisant le nombre réel de géosynthétiques et d'interfaces présent au niveau de l'ouvrage, la méthode de calcul proposée permet ainsi de prendre en compte l'ensemble des interactions présentes au niveau du multicouches géosynthétique.

- Critère n°2 : étapes de construction (phases de remblaiement) et évolution de la densité des matériaux avec la contrainte

Lors de la construction d'un ouvrage, une digue d'ISD par exemple, les matériaux et déchets sont mis en place par étapes successives (phases de remblaiement). La réponse mécanique du système géosynthétiques, c'est-à-dire les champs d'efforts/déformations développés seront étroitement liés à ces phases de remblaiement. On distinguera ainsi plusieurs situations de calcul, notamment les situations de projet transitoire (ouvrage en cours d'exécution) et la situation de projet durable, à long terme (permanent). Par ailleurs, si l'on considère le domaine des ISD, il est à signaler que les déchets peuvent présenter des propriétés (densité par exemple) variables en fonction du niveau de la contrainte de confinement. Les champs de contraintes ainsi que les efforts/déformations développés dans les géosynthétiques dépendent directement des caractéristiques mécaniques des déchets, et en particulier de leur densité. Il convient donc lors de l'utilisation de la Méthode de calcul proposée de prendre en compte les différentes étapes de construction de l'ouvrage ainsi que l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux avec le niveau de confinement.

- Critère n°3 : comportement radoucissant des interfaces

Les interfaces entre géosynthétiques présentent souvent un comportement radoucissant caractérisé par une évolution de la résistance au cisaillement selon le déplacement relatif à l'interface (Stark et al., 1996, Izgin et Wasti, 1998, Fleming et al., 2006, Fowmes, 2007, Eid, 2011, Tano et al., 2016a, Tano et al., 2016b). L'angle de frottement augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale (le pic) avant de diminuer et se stabiliser à une valeur plus faible (résiduel). Considérer uniquement les caractéristiques résiduelles peut donc conduire à une surestimation des mouvements d'interface tandis que les caractéristiques au pic conduisent nécessairement à une sous-estimation des déplacements aux interfaces. De plus, ces caractéristiques constantes peuvent induire une modification de la distribution des contraintes de cisaillement le long des interfaces, donc des efforts/déformations dans les différents géosynthétiques. La méthode de calcul proposée permet ainsi de prendre en compte le comportement radoucissant des interfaces afin de modéliser fidèlement leur comportement.

- Critère n°4 : différenciation entre le comportement en traction et le comportement en compression des géosynthétiques

Pour simuler la flexibilité des géosynthétiques et en particulier l'effet membrane, une inertie nulle est souvent attribuée aux géosynthétiques de manière à ce qu'elles ne résistent pas à la flexion. Lorsqu'on applique des efforts de compression dans l'axe d'un géosynthétique non confiné (à l'air libre), des plis se forment. Ces plis matérialisent le fait que le géosynthétique ne reprend pratiquement pas d'efforts de compression lorsqu'il n'est pas confiné. Cependant sous confinement, le comportement en compression des géosynthétiques est mal connu. Il est à noter qu'il n'existe actuellement aucun essai normalisé permettant d'évaluer ce comportement en compression. Pour prendre en compte cette différence de comportement, une des approches souvent utilisée consiste à réduire la valeur du module en compression à l'aide d'un rapport $1/x$. Cette approche a été utilisée par Villard et al. (1999) et Fowmes et al. (2008). Plus récemment, les études paramétriques comparatives réalisées par Tano et al. (2016a) et publiées dans la revue Géotextile et Géomembrane ont montré qu'un rapport de $1/100$ permet d'aboutir à des résultats sécuritaires et à peu d'efforts de compression repris par les géosynthétiques.

- Critère n°5 : non-linéarité du module de rigidité en traction avec la déformation

Lorsqu'un géosynthétique est soumis à un effort de traction, il s'allonge progressivement avec un taux de déformation fonction de sa raideur à l'instant t . Ainsi, la raideur d'un géosynthétique détermine directement son comportement en traction et donc l'amplitude des efforts/déformations qui s'y développent. L'analyse des courbes d'essais de traction met en évidence une évolution de la raideur (donc du module de rigidité) avec la déformation. Ainsi lors des simulations numériques, l'utilisation d'un module de rigidité constant peut conduire à une sous-estimation ou à une surestimation des efforts calculés dans les géosynthétiques, selon le niveau de déformation atteint. Afin de modéliser au mieux le comportement en traction réel du géosynthétique, il convient donc de faire évoluer la raideur des produits au fur et à mesure qu'ils se déforment. Cette évolution souvent non linéaire de la raideur avec la déformation est considérée systématiquement dans la Méthode de calcul proposée.

Par ailleurs, pour la mise en œuvre de la méthode de calcul proposée et la prise en compte des cinq critères précédemment définis, il a été nécessaire de développer six codes de calcul avec le langage de programmation FISH interne au logiciel FLAC 2D. Les sections précédentes se sont attachées à présenter les fondements de cette méthode ; la section suivante précisera les différentes étapes à suivre pour l'application de cette méthode.

3. Procédure à suivre lors de l'application de la méthode de calcul proposée

Afin d'aboutir à des résultats fiables et réalistes, l'application de la méthode de calcul proposée nécessite de suivre quatre phases qui sont présentées sur la Figure 2 (rectangles grisés) :

- **Phase n°1** : il s'agit de modéliser tous les géosynthétiques, interfaces et matériaux présents au niveau de l'ouvrage de manière à prendre en compte les cinq critères de la Méthode de calcul proposée (cf. section 2.2) grâce au développement et l'adaptation des codes FISH. Ces codes sont ensuite incorporés dans le logiciel de calcul avant les simulations.

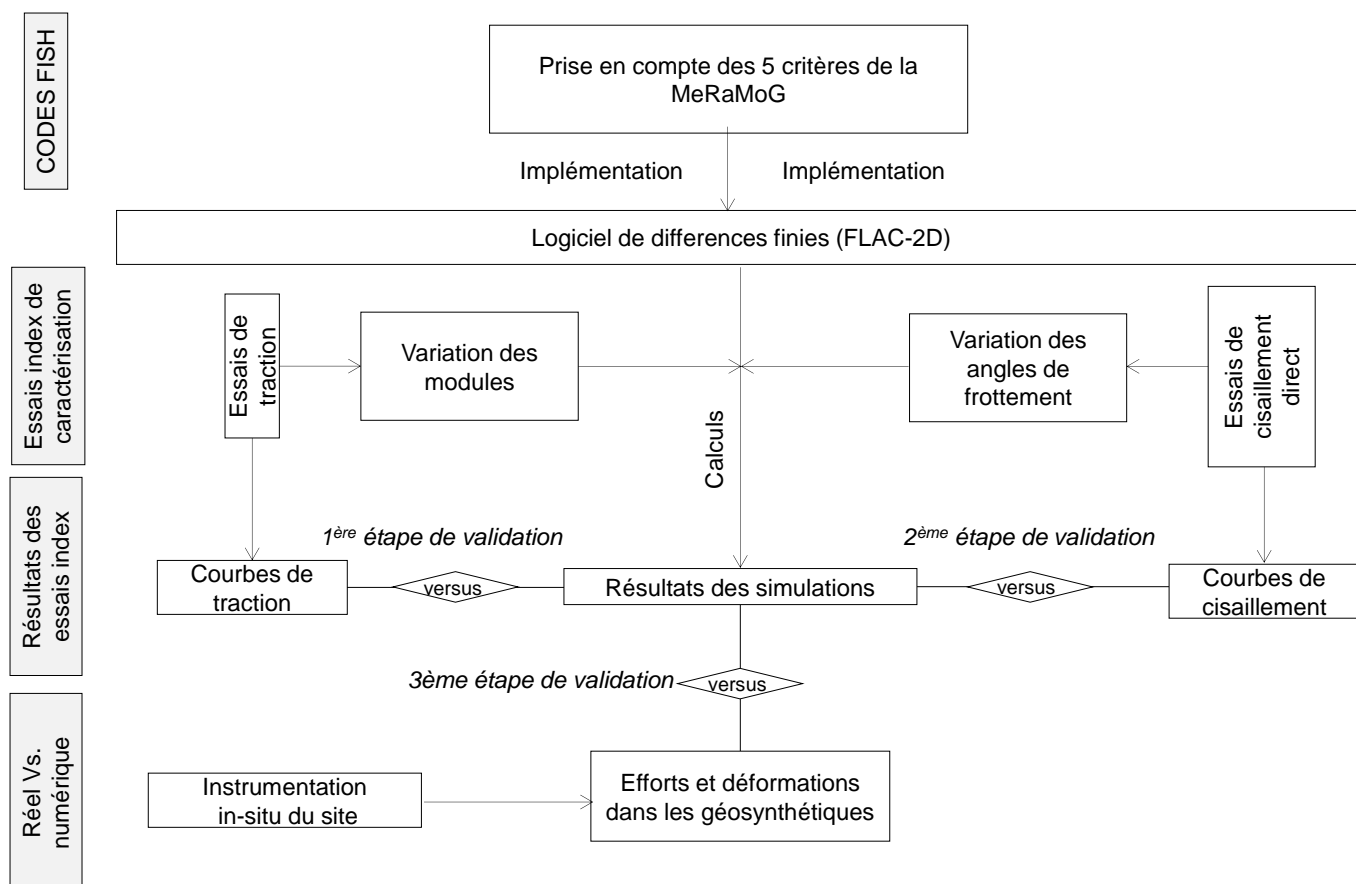


Figure 2. Les différentes étapes à suivre lors de l'application de la méthode de calcul proposée

- **Phase n°2** : cette phase consiste à caractériser mécaniquement les différents géosynthétiques et les différentes interfaces à l'aide des essais de référence (index). Il s'agit notamment des essais de traction uniaxiale pour les géosynthétiques et les essais de cisaillement direct pour les interfaces. Les essais de traction doivent être réalisés conformément à la norme NF EN ISO 10319 (AFNOR, 2008) pour la géomembrane et à la norme NF EN 12311-2 (AFNOR, 2013) pour les autres géosynthétiques (géotextile, géosynthétique bentonitique et géogrille éventuellement). Les courbes de traction obtenues permettent par la suite d'établir des courbes d'évolution des raideurs avec la déformation. En ce qui concerne les essais de cisaillement direct, ils doivent être réalisés selon la norme NF EN ISO 12957-1 (AFNOR, 2005) afin d'en déduire les courbes d'évolution des angles de frottement avec les déplacements relatifs aux interfaces. Idéalement pour les matériaux à structure ajourée (telle que les géogrilles), des essais d'extraction selon la norme NF EN 13738 (AFNOR, 2005) peuvent être utilisés. Une fois les jeux de paramètres définis et calés, les simulations peuvent être réalisées.

- **Phase n°3** : cette phase constitue la première partie de validation des résultats simulés. D'abord pour les géosynthétiques, les courbes de traction expérimentales sont confrontées aux courbes simulées numériquement grâce à cette méthode de calcul (1^{ère} étape de validation sur la Figure 2). Ensuite, en ce qui concerne le comportement en cisaillement des interfaces, les courbes expérimentales obtenues à partir des essais de cisaillement sont comparées aux courbes simulées par cette méthode proposée (2^{ème} étape de validation sur la Figure 2).

- **Phase n°4** : c'est la dernière étape de validation qui consiste à confronter les résultats des simulations numériques portant sur le cas réel (ouvrage) modélisé aux mesures réalisées sur le terrain. Cette phase constitue un idéal car elle permet non seulement d'appréhender le comportement réel de l'ouvrage en conditions de service par instrumentation, mais aussi de valider la technique de modélisation dans des conditions réelles de chantier. Toutefois, l'instrumentation de sites en vraie grandeur reste malheureusement rare en l'absence de support des pouvoirs publics.

Validation expérimentale de la méthode de calcul proposée

La section précédente a présenté les différentes phases à suivre pour l'application de la méthode de calcul proposée. Il s'agissait notamment des trois étapes de validation essentielles pour aboutir à des

résultats fiables. Dans cette section, nous donnons un exemple de validation expérimentale réalisé dans le cadre d'un projet de recherche en 2016.

3.1 Présentation des dispositifs expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux utilisés sont le dispositif d'essai de traction uniaxiale (Fig. 3a), la boîte d'essai de cisaillement direct (Fig. 3b) et enfin un dispositif expérimental grande échelle de simulation de cavité sous un système géosynthétique renforcé (Fig. 3c). Ce dernier dispositif expérimental grande-échelle appelé DEPGeC (Tano, 2016) qui a été mis au point représente en fait la dernière étape de validation (cf. Fig. 2) en l'absence de mesures expérimentales de terrain. Une présentation des trois dispositifs expérimentaux utilisés est faite sur la Figure 3.

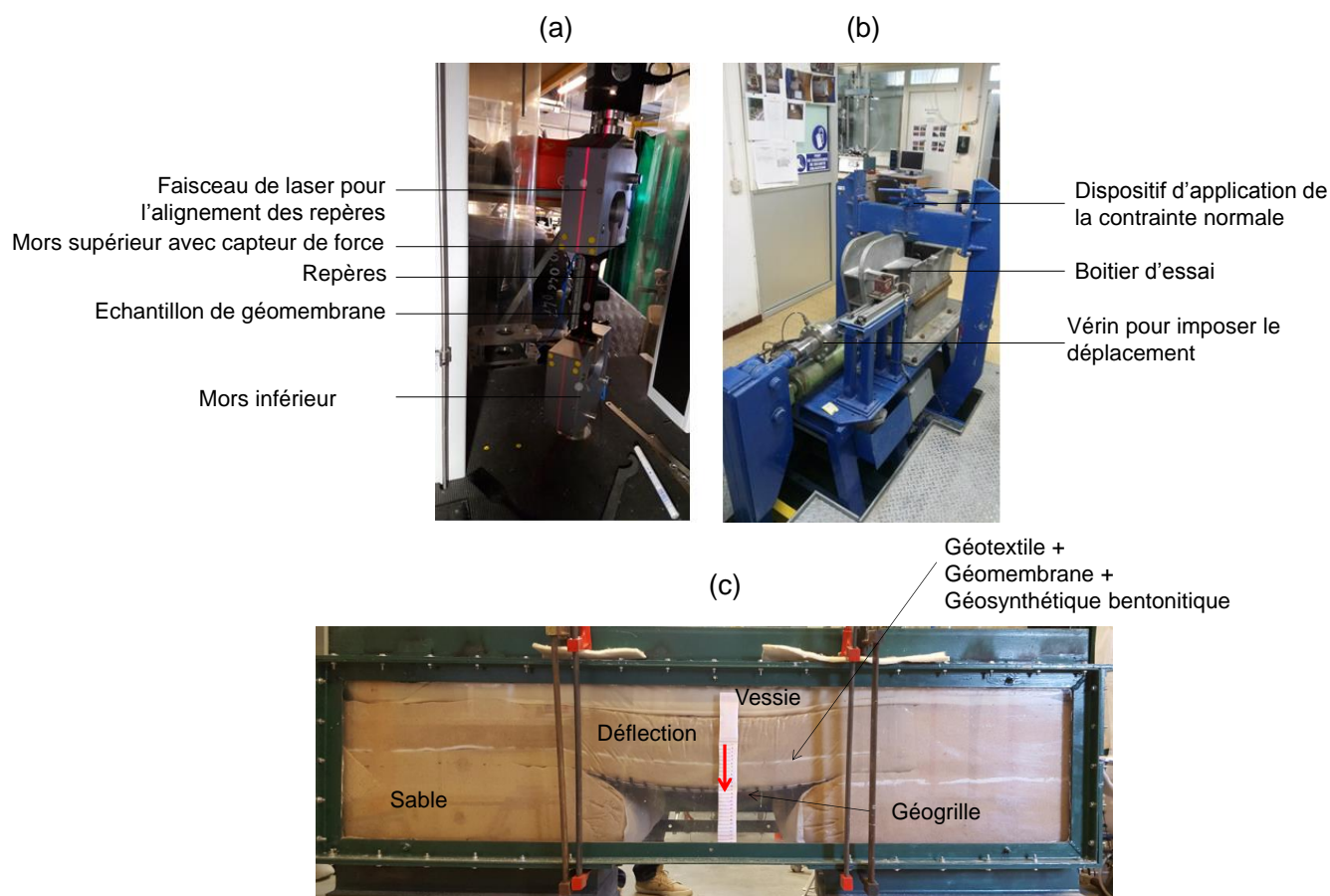


Figure 3. (a) Dispositif d'essai de traction uniaxiale ; (b) dispositif d'essai de cisaillement direct ; (c) dispositif grande-échelle de simulation de cavité sous un système géosynthétique renforcé

3.2 Traction des géosynthétiques : résultats expérimentaux Vs résultats numériques

La Figure 4 montre la comparaison entre les courbes de traction de quatre géosynthétiques différents obtenues à partir de l'essai de traction uniaxiale et les résultats numériques obtenus par l'application de la méthode de calcul proposée. Les courbes de traction de la géomembrane et de la géogrille sont données sur la Figure 4a et celles propres au géosynthétique bentonitique et au géotextile de protection sont présentées sur la Figure 4b.

L'analyse de ces comparaisons fait ressortir une excellente concordance entre les données expérimentales et les données simulées numériquement par application de cette méthode de calcul proposée. Cette concordance est vérifiée pour tous les géosynthétiques et quel que soit le niveau de déformation atteint. Par exemple, en considérant la courbe de traction de la géomembrane qui présente la forme la moins linéaire, on observe à 4 % de déformation, un effort de traction expérimental de 29,6 kN/m et un effort de traction simulé numériquement de 29,0 kN/m, soit une différence de 0,6 kN/m (2 %).

Ainsi en se basant sur ces résultats, il est possible de conclure que l'application de la méthode de calcul proposée permet de modéliser fidèlement le comportement en traction uniaxial des géosynthétiques.

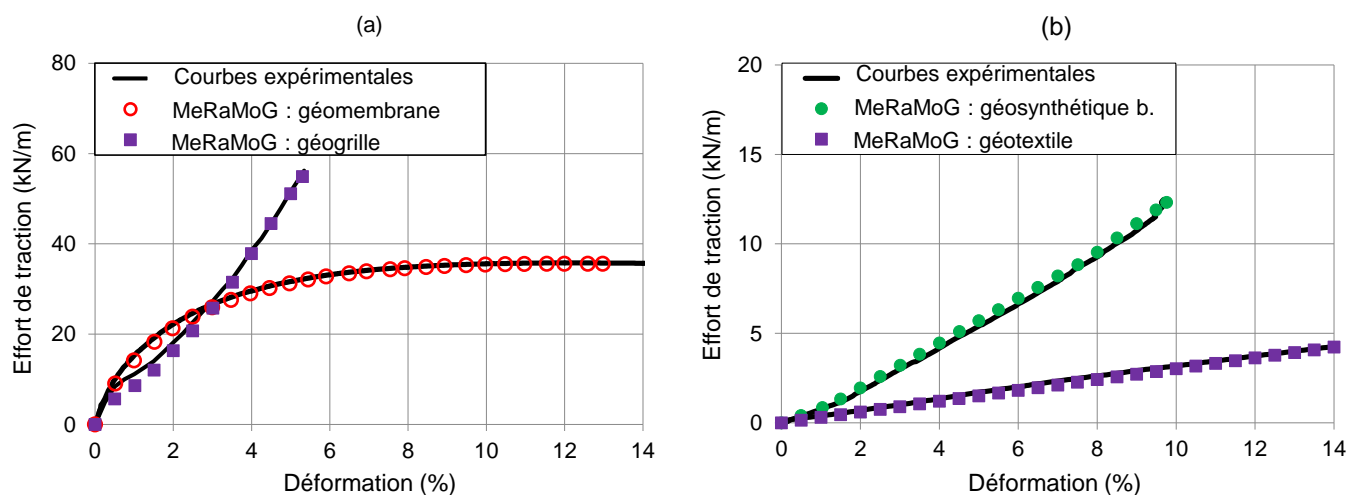


Figure 4. Confrontation entre les courbes de traction expérimentales et celles obtenues par simulation numérique à l'aide de la méthode de calcul proposée (a) cas d'une géomembrane lisse en PEHD 2 mm et d'une géogrille en PVA de 50 kN/m de résistance en traction ; (b) cas d'un géosynthétique bentonitique et d'un géotextile non tissée en PP

3.3 Contraintes de cisaillement aux interfaces : résultats expérimentaux Vs résultats numériques

À l'instar de la Figure 4 qui concernait les géosynthétiques, la Figure 5 compare cette fois-ci les courbes de cisaillement des interfaces obtenues expérimentalement à partir des essais de cisaillement direct avec les résultats numériques obtenues par l'application de la méthode de calcul proposée.

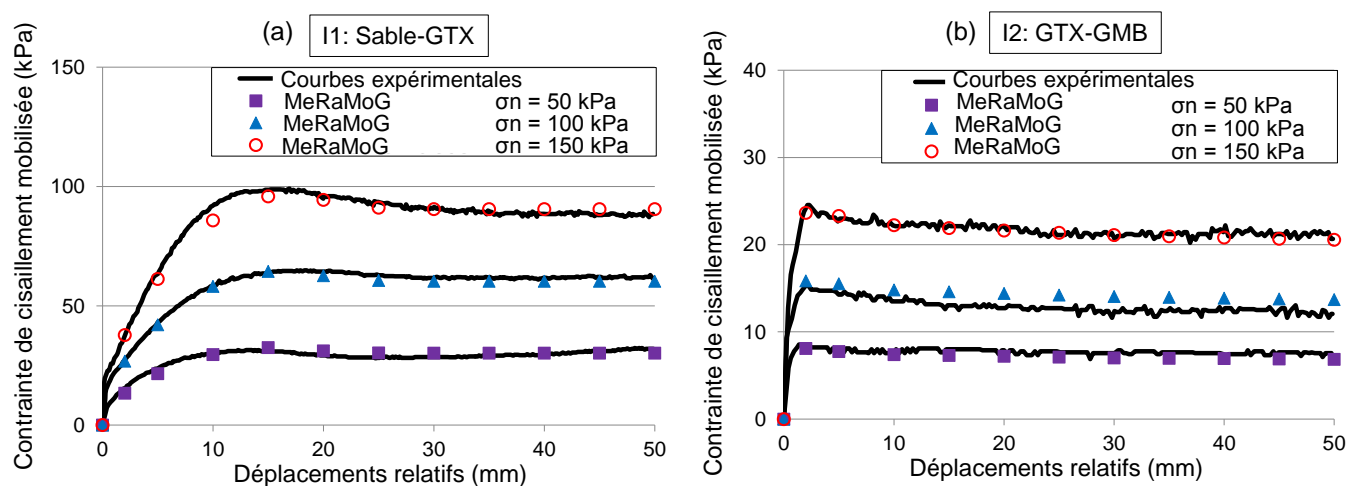


Figure 5. Confrontation entre les courbes de cisaillement expérimentales et celles obtenues par simulation numérique à l'aide de la Méthode de calcul proposée (a) cas de l'interface entre un sable et un géotextile non-tissé en PP (b) cas de l'interface entre un géotextile non-tissé en PP et une géomembrane lisse en PEHD 2 mm

Les résultats de deux types d'interface sont présentés ; il s'agit de l'interface entre un sable et un géotextile (Fig. 5a) et de l'interface entre un géotextile et une géomembrane (Fig. 5b).

Une fois encore, les courbes expérimentales sont très proches des résultats simulés numériquement. Cette très bonne concordance est observée pour toutes les interfaces, toutes les contraintes de confinement (50 à 150 kPa) et pour tous les niveaux de déplacements relatifs aux interfaces. En considérant par exemple l'interface entre le sable et le géotextile, une contrainte normale de confinement de 100 kPa et un déplacement relatif de 50 mm, on observe que la contrainte de cisaillement mesurée expérimentalement lors de l'essai atteint une valeur de 61,8 kPa quand la valeur simulée numériquement est de 60,3 kPa, soit une différence de seulement 1,5 kPa (2,5 %).

Ainsi, en se basant sur ces résultats, il est possible de conclure que l'application de la méthode de calcul proposée permet de modéliser fidèlement le comportement en cisaillement des interfaces entre géosynthétiques et matériaux.

3.4 Evolution des déformations avec le dispositif grande-échelle : résultats expérimentaux Vs résultats numériques

Dans le cas idéal, cette dernière étape de validation (Phase 4, cf. § 3 et Fig. 2) doit porter sur l'ouvrage réel modélisé. Dans cette étude, nous présentons une comparaison à partir du dispositif grande échelle (DEPGeC) présenté précédemment à la Figure 3c. Ce dispositif implique une combinaison de sollicitation complexe constituée d'efforts de flexion, d'efforts de traction, de fortes interactions entre plusieurs couches de géosynthétiques et de contraintes de confinement importantes pouvant atteindre 100 kPa.

Les mesures des déformations de la géogrille et de la géomembrane installées au sein du dispositif grande échelle ont été réalisées au moyen de micro-jauges (10^{-6} ϵ) de déformation soigneusement calibrées (Tano, 2016).

Les comparaisons entre ces mesures expérimentales et les résultats simulés sont présentés sur la Figure 6a et la Figure 6b respectivement pour la géogrille et la géomembrane. L'analyse des deux figures montre que même dans un cas de sollicitation complexe comme décrit précédemment, l'application de la méthode de calcul proposée permet de prédire raisonnablement les déformations des différentes couches de géosynthétiques. En considérant les géogrille, les valeurs simulées sont toutes contenues dans les barres d'erreurs des mesures expérimentales. En ce qui concerne la géomembrane, l'écart maximal entre les déformations mesurées et les déformations simulées n'est que de 0,3 % (à 30 kPa) ; la précision pour ce cas augmentant après 1% de déformation (50 kPa). A 100 kPa de contrainte de confinement, la déformation mesurée dans la géomembrane est de 1,74% tandis que la déformation simulée à l'aide la Méthode de calcul proposée atteint 1,65%, soit un écart de déformation de seulement 0,09 point.

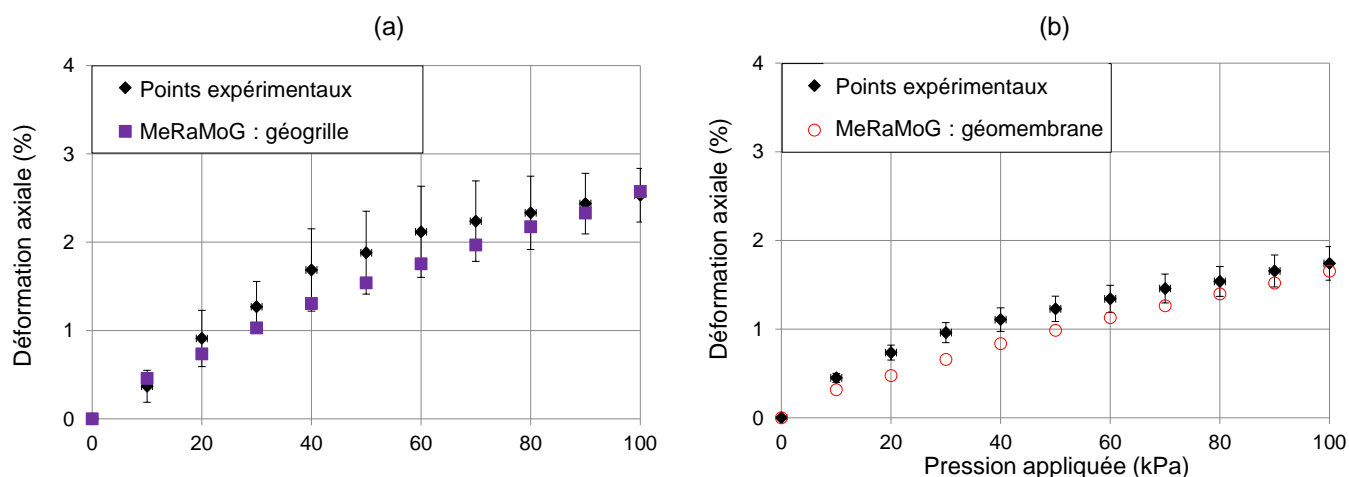


Figure 6. Confrontation entre les mesures de déformation expérimentales et celles obtenues par simulation numérique à l'aide de la Méthode de calcul proposée (a) cas d'une géogrille PVA de 50 kN/m de résistance en traction (b) cas d'une géomembrane lisse PEHD 2 mm

4. Application de la méthode de calcul proposée à des ouvrages en vraie grandeur

À ce jour, la méthode de calcul proposée a été déjà appliquée avec succès sur plusieurs projets d'ISDND en France et à l'international. Dans la majorité des cas, les calculs de stabilité au glissement plan réalisés montraient que la mise en place d'une géomembrane lisse sur l'intégralité de la barrière ne permettait pas d'assurer pleinement la stabilité. Des simulations ont donc été réalisées afin d'estimer dans quelle mesure la mise en place d'une géomembrane non conventionnelle (type texturée) sur une section de la barrière de fond du d'un casier en rehausse permettrait de garantir la stabilité au glissement plan. Dans ce cas, l'application de la méthode de calcul proposée permet d'évaluer le maintien de l'intégrité structurelle des géomembranes (lisse et texturée) mises en œuvre et ainsi de valider la solution envisagée. La figure 7 présente un exemple de simulation montrant la distribution des efforts et déformations respectivement au sein d'une géomembrane lisse et d'une géomembrane texturée sur un cas type d'extension d'ISDND. La Figure 7 indique que la géomembrane texturée reprend en moyenne cinq fois plus d'efforts concentrés en tête de talus que la géomembrane lisse (7,6/1,5). Toutefois, il est à noter, que la faible résistance au cisaillement de l'interface de la géomembrane lisse conduit à un transfert des contraintes de cisaillement vers le pied de talus, entraînant ainsi localement une augmentation notable des efforts de traction et des déformations (9,5 kN/m et 0,9 %).

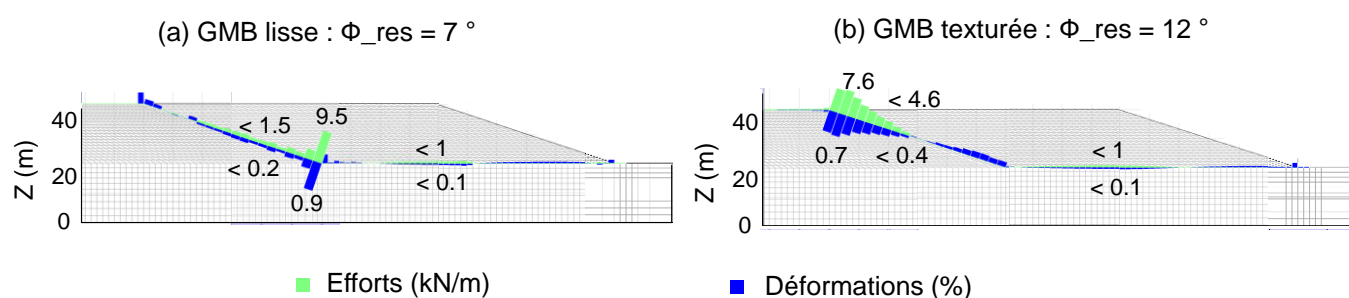


Figure 7. Distribution des efforts et déformations dans une géomembrane sur un cas type d'extension d'ISDND (a) cas d'une géomembrane lisse (b) cas d'une géomembrane texturée

5. Conclusion et perspectives

Les géosynthétiques installés dans les ouvrages génie-civil, géotechniques et environnementaux (ISDND) sont souvent soumis à de fortes sollicitations mécaniques, notamment des efforts/déformations de traction. Lorsque ces efforts/déformations de traction excèdent les capacités maximales de ces géosynthétiques, ces derniers sont susceptibles de se rompre (perte d'intégrité structurelle). Afin d'éviter ce scénario de rupture, il est possible, dès la phase de conception, d'évaluer les champs d'efforts/déformations développés dans chacune des couches de géosynthétiques mises en œuvre.

L'objectif de cet article était de présenter une nouvelle Méthode Rationnelle de Modélisation des systèmes Géosynthétiques qui permet d'évaluer rigoureusement ces champs d'efforts et de déformations au sein des géosynthétiques. La Méthode de calcul proposée est une méthode de modélisation numérique des multicouches géosynthétiques en interaction qui permet de prendre en compte fidèlement le comportement mécanique des géosynthétiques (notamment la non-linéarité de leur comportement en traction) et de leurs interfaces (par exemple le comportement radoucissant). La méthode de calcul proposée a été validée expérimentalement sur trois dispositifs expérimentaux différents que sont l'essai de traction uniaxiale, l'essai de cisaillement direct et un dispositif grande-échelle de simulation de cavité. La méthode a d'ores et déjà été appliquée à plusieurs ouvrages dont des ISDND en France et à l'international.

Dans le cas particuliers d'ISDND pour lesquels la stabilité au glissement plan n'est pas pleinement assurée (par exemple le long d'une interface géomembrane - géotextile), la méthode de calcul proposée permet d'évaluer la pertinence de l'utilisation d'une géomembrane texturée sur tout ou partie de la barrière étudiée, en fonction de la modification de la distribution des efforts et déformations au sein des géomembranes (lisse et texturée).

6. Remerciements

Nous remercions Henri Mora et Jean-Marie Miscioscia pour la fabrication du dispositif expérimental grande échelle présenté dans ce travail. Nous remercions également Philippe Mailler et Didier Croissant pour les essais de traction réalisés sur les différents produits géosynthétiques.

7. Références

- Byrne R.J. (1994). Design issues with strain-softening interfaces in landfill liners. Proc. of the Waste Technology 94, Charleston, South Carolina, USA, Session 4, Paper 4. 26 pages.
- Eid H.T. (2011). Shear strength of geosynthetic composite systems for design of landfill liner and cover slopes. *Geotextiles and Geomembranes*. 29(3), pp. 335-344.
- Fleming I.R., Sharma J.S., Jogi M.B. (2006). Shear strength of geomembrane-soil interface under unsaturated conditions. *Geotextiles and Geomembranes*. 24(5) 274-284.
- Fowmes G.J. (2007). Analysis of steep sided landfill lining systems. Univ. of Loughborough, England. Dissertation in partial fulfilment of the requirements for the award Engineering Doctorate, PhD thesis, 261 pages.
- Fowmes, G.J., Dixon, N., Jones, D.R.V. (2008) Validation of a numerical modelling technique for multilayered geosynthetic landfill lining systems. *Geotextiles and Geomembranes* 26(2) 109-121.
- Izgin, M., Wasti, Y. (1998) Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests. *Geotextiles and Geomembranes*. 16(4) 207-219.
- Long, J.H., Gilbert, R.B., Daly, J.J. (1995) Effect of waste settlement on slope lining system. Proc. of the Geosynthetics 95, Nashville, Tennessee, USA. 3, pp. 729-744.
- Stark, T.D., Williamson, T.A., Eid, H.T. (1996) Geomembrane/geotextile interface shear strength. *Journal of geotechnical engineering*, American Society of Civil Engineers. 122(3) 197-203.
- Tano, B.F.G. (2016) Etude analytique, numérique et expérimentale du comportement mécanique des systèmes géosynthétiques : application au cas des barrières de sécurité des extensions d'ISDND. Thèse de la communauté Université Grenoble Alpes ; 467 p.
- Tano, B.F.G., Dias, D., Fowmes, G.J., Olivier, F., Stoltz, G., Touze-Foltz, N. (2016a) Numerical modeling of the nonlinear mechanical behaviour of multilayer geosynthetic system for piggy-back landfill expansion. *Geotextiles and Geomembranes*. 44(6) 782-798.
- Tano, B.F.G., Dias, D., Stoltz, G., Touze-Foltz, N., Olivier, F. (2016b) Numerical modelling to identify key factors controlling interface behaviour of geosynthetic lining systems - Accepted 13-Aug-16. *Geosynthetics international*. 2016. 19 p.
- Villard, P., Gourc, J.P., Feki, N. (1999) Analysis of geosynthetic lining systems (GLS) undergoing large deformations. *Geotextiles and Geomembranes*. 17 (1) 17-32.
- Wilson-Fahmy, R.F., Koerner, R.M. (1993) Finite element analysis of stability of cover soil on geomembran lined-slope. Proc. of the Geosynthetics 93, Vancouver, Canada.vol. 3, pp. 1425-1437.
- Zamara, K.A., Dixon, N., Fowmes, G., Jones, D.R.V., Zhang, B. (2014) Landfill side slope lining system performance: A comparison of field measurements and numerical modelling analyses. *Geotextiles and Geomembranes*. 42(3) 224-235.