

APPLICATION DES GÉO-CONTENEURS DANS LES DOMAINES DU GÉNIE CÔTIER ET FLUVIAL

SAND-FILLED GEOSYSTEMS IN RIVER AND COASTAL ENGINEERING BASED ON CASE STUDY APPLICATIONS

Luciana DAS NEVES, Abbass TAVALLALI, Christophe NOËL, Florian BREHIN, Leen BAELUS, Justine MOLLAERT

International Marine and Dredging Consultants (IMDC nv), Anvers, Belgique

RÉSUMÉ – L'utilisation de géo-systèmes ou géo-conteneurs remplis de sable dans le génie hydraulique présente un intérêt grandissant. Dans cet article, deux cas d'application sont présentés. Le premier cas concerne la conception d'une plage artificielle suspendue pour un bâtiment résidentiel au Moyen Orient, avec une butée de pied en géo-conteneur rempli de sable. Le second cas présente l'application de géo-conteneurs pour l'amélioration de la navigabilité d'un fleuve en Amérique Latine.

Mots-clés : géo-systèmes, géo-conteneurs, chenal navigable, dragage d'entretien, impact environnemental.

ABSTRACT – The interest in using sand-filled geosystems in hydraulic engineering is gradually increasing. In this article two case studies of the application of sand-filled geosystems are presented. The first case study concerns the design of the artificial perched private beach of a residential building in the Middle East using a sand-filled geosystem as toe retaining structure. The second case presents the application of geo-systems to improve navigability in a river in Latin America.

Keywords: geosystems, geocontainer, navigable channel, maintenance dredging, environmental impact.

1. Introduction

Les géo-conteneurs ou géo-systèmes remplis de sable sont de plus en plus utilisés dans le domaine du génie hydraulique. Le dimensionnement de ces structures en géo-conteneurs s'appuie néanmoins souvent sur l'expérience d'autres projets, et il n'existe pas de document général et reconnu internationalement regroupant les règles de dimensionnement. Les règles généralement appliquées pour le dimensionnement de ces structures (Bezuijen et Vastenburg, 2013 ; das Neves, 2011 ; das Neves et al., 2015) sont de nature empirique, d'où l'importance du retour d'expérience de l'application des géo-conteneurs partout dans le monde pour des projets hydrauliques.

Deux applications de géo-conteneurs, dans lesquelles les auteurs du présent document ont été concernés, sont discutées ci-après. Le premier cas concerne une structure de butée de plage artificielle suspendue, au Moyen-Orient, et le deuxième cas concerne des aménagements pour améliorer la navigabilité d'une rivière en Amérique Latine.

Le premier projet concerne la construction d'une plage purement récréative. Les contraintes de dimensionnement étaient principalement architecturales (changer l'orientation générale de la côte), et incluaient la présence d'un chenal d'accès près de la plage. Afin de créer une plage à pente faible, tout en respectant les contraintes susmentionnées, une butée sous-marine composée de géo-conteneurs a été construite pour intercepter la plage artificielle à une certaine distance et profondeur de la côte. Les étapes du dimensionnement incluent la définition des exigences fonctionnelles de la structure, le dimensionnement géométrique des géo-conteneurs (hauteurs de remplissage, superposition, longueur...), la stabilité et le dimensionnement hydraulique et géotechnique, et la définition des caractéristiques des matériaux utilisés. Les exigences générales des géo-conteneurs sont : (a) une perméabilité à l'eau suffisante, (b) le blocage et la rétention du sable, (c) la résistance à la pression durant le remplissage, (d) la résistance aux tensions locales (déchirure, vandalisme...), et (e) la résistance aux rayons UV. En plus, une résistance minimale à la tension est exigée, pour les conditions d'installation des conteneurs. Il est par ailleurs proposé de suivre l'état de l'ouvrage avec un programme de diagnostics, afin d'éviter que des endommagements éventuels puissent causer des pertes de sable et la dégradation de la plage. Les géo-conteneurs sont placés avec différentes longueurs et épaisseurs (extrémités aplatis) pour améliorer la cohésion de l'ouvrage. Plusieurs méthodes existent pour le remplissage et le placement des géo-conteneurs, à la fois par voie maritime ou terrestre. Pour le remplissage sur terre, des pompes et conduites d'eau sont nécessaires pour préparer le mélange de

remplissage composé de sable et d'eau de mer. Puisque la plupart des dommages aux géo-conteneurs se produit lors du remplissage et du placement, il est fortement conseillé d'effectuer ces travaux avec une équipe expérimentée. Enfin, il faut noter que la solution d'une butée composée de géo-conteneurs a été retenue comme solution à la demande du propriétaire de la plage, malgré d'autres alternatives plus économiques (p. ex. butée en gravier).

Pour le deuxième projet, les auteurs du présent article étaient chargés de la révision des études de dimensionnement des aménagements pour améliorer la navigabilité d'un fleuve, incluant des travaux de dragage et des mesures de détournement du fleuve, pour lesquelles des géo-conteneurs sont considérés (en forme de tubes, sacs ou géobags et matelas). Les exigences fonctionnelles des géo-conteneurs concernent le maintien d'un chenal navigable en période de sécheresse, par travaux de dragage et/ou des ouvrages en géo-conteneurs déflecteurs de courant, la protection des berges et la fermeture de chenaux secondaires du fleuve. Quelques problèmes spécifiques ont été étudiés, notamment les déformations des géo-conteneurs causées par l'affouillement, et la perte de fonctionnalité et la défaillance des structures par déformation et/ou déchirure par mouvement interne du sable.

2. Création d'une plage artificielle pour un bâtiment résidentiel (Moyen Orient)

Le projet de plage artificielle est présenté dans les paragraphes ci-dessous. Dans un premier temps, les conditions hydrodynamiques sont présentées. Ensuite, des informations générales sur le dimensionnement de plages et d'ouvrages sont présentées, ainsi que sur les alternatives de butées de pied. Ensuite les aspects de dimensionnement hydraulique et géotechniques sont présentés dans les chapitres quatre et cinq. Enfin, les techniques d'exécution sont présentées ainsi que les recommandations pour le suivi et l'entretien des unités.

La durée de vie de conception du projet est de 25 ans. Le projet comprend la conception et la construction du bâtiment et du paysage, légèrement tournés par rapport à l'alignement existant et aux infrastructures marines. Les infrastructures marines consistent en les ouvrages suivants le long du front de mer :

- Rechargement de plage avec sable sur l'ensemble du linéaire côtier, dont la seule fonction est récréationnelle ;
- Un géo-système rempli de sable submergé pour retenir la butée de la plage artificielle ;
- Démantèlement du brise-lames existant – à enlever tandis que la nouvelle plage est partiellement construite au-dessus ;
- Deux nouvelles parois latérales le long de la promenade et de la plage du bâtiment résidentiel.

2.1. Forçage hydrodynamique (conditions de dimensionnement)

Étant donné que la zone est abritée, les conditions d'exposition aux forçages hydrodynamique au droit du bâtiment résidentiel sont assez limitées. Les principaux forçages sont les changements de niveau d'eau dus à la marée et la hausse future du niveau de la mer (et surcote). Les ondes de batillage ont également été prises en compte dans le dimensionnement mais elles ne sont pas significatives et ne dépassent pas 0,5 m.

2.2. Dimensionnement de la plage et de l'ouvrage (butée de pied)

Le trait de côte final de la plage est caractérisé par une forme en spline, selon la conception architecturale et structurelle du bâtiment résidentiel. Une spline est une courbe définie par un minimum de deux points de contrôle. Un diamètre de 300 μm , correspondant à un sable fin, est considéré pour la conception de la plage. Le profil d'équilibre de Dean (USACE, 2002) est utilisé pour le dimensionnement de la plage comme première approche. La théorie du profil d'équilibre est basée sur le fait que la plage réponde au forçage de la houle en ajustant sa forme à une forme constante attribuable à une onde incidente et/ou aux caractéristiques des sédiments. L'utilisation d'un profil de Dean suppose que la forme du profil ne dépend que de la taille des sédiments, et que la houle incidente ne régit que la position du trait de côte (ligne de rivage).

Le concept de profil d'équilibre a pour avantage de limiter les modifications à apporter au profil après la construction. De plus, la pente faible supposée par la forme du profil de Dean a permis de rendre compatibles les élévations existantes et proposées, qui étaient impossibles à atteindre, compte tenu de l'espace limité disponible pour confiner le profil avant d'atteindre le chenal de navigation situé au large devant le bâtiment résidentiel. Les études concernant les volumes de rechargement nécessaires et la

perte de fonctionnalité (i.e. navigation) ont abouti à la proposition d'un concept de plage suspendue, à savoir l'intersection de la pente de la plage à un certain point au large avec un ouvrage de type butée de pied. Des ouvrages de confortement de la plage (butée) sont nécessaires aux extrémités nord et sud, ainsi qu'à l'extrémité du chenal de navigation. La forme du profil de Dean est utilisée pour prédire le niveau de crête de la butée sous-marine. Le dimensionnement des ouvrages de confortement des extrémités nord et sud est basé sur des murs verticaux en béton et n'est pas traité dans cet article, seulement l'ouvrage de retenue de la butée de pied l'est.

2.3. Options de butées de pied

Au cours du dimensionnement préliminaire, il a été considéré d'utiliser l'ouvrage brise-lames existant comme structure de confortement (butée de pied), lorsque cela était possible. Cette solution, bien que plus rentable à cause du volume de sable moins important nécessaire pour construire la plage a été rejetée, principalement car le brise-lames existant n'aurait été que partiellement détruit. En résumé, les principaux problèmes sont décrits ci-dessous:

- Les infrastructures du bâtiment résidentiel et le brise-lames existant sont placés à une distance proche l'un de l'autre, et la largeur de plage disponible serait donc limitée dans une grande partie de la nouvelle plage ;
- La portée du brise-lames existant est située au-delà de la butée au sud, et donc une nouvelle butée d'au moins 50 m de long devrait être construite. De plus, la forme du trait de côte en spline atteint sa position la plus au large à cet endroit ce qui rend donc la compatibilité difficile entre les élévations. De plus, des conditions hydrodynamiques plus complexes sont attendues lorsque des transitions sont présentes;
- Le brise-lames existant devra être partiellement démoli à différentes hauteurs, et ensuite être préparé afin qu'il ne cause pas de danger aux divers usagers de la plage.

Trois options de butée de pied de la plage ont été évaluées: une couche en gravier, des palplanches et géo-conteneurs remplis de sable. Parmi ces options, l'utilisation d'une couche en gravier et de géo-conteneurs remplis de sable ont été retenues. L'option palplanche a été rejetée dès les premiers stades de conception. L'évaluation a été basée sur les coûts, le savoir-faire régional et les dangers potentiels posés à l'usager de la plage. Les solutions à base de gravier et de géo-conteneurs offrent un potentiel égal de stabilisation de plage. Cependant, il est prévu que le géo-conteneur exige un suivi supplémentaire, afin de garantir que les dommages éventuels ne donnent pas lieu à des pertes de plage et de matériau de remplissage. Le placement des éléments du géo-système sera plus coûteux que le placement d'une couche en gravier, en raison des coûts des matériaux et de construction.

Dans les paragraphes suivants, de nouvelles alternatives de butées de pied de plage reposant soit sur une couche de gravier soit sur des géo-conteneurs sont développées. En consultation avec le propriétaire, l'option choisie était celle utilisant le géo-conteneur rempli de sable. De nouvelles alternatives basées sur différentes pentes de plage ont donc été conçues à partir de ce choix.

2.4. Dimensionnement hydraulique des géo-conteneurs

Globalement, il n'existe pas de document général ou des directives valides pour le dimensionnement des éléments en géotextile. Une grande partie des connaissances provient de l'expérience pratique et des diverses applications dans le monde (Bezuijen et Vastenburg, 2013 ; das Neves, 2011 ; das Neves et al., 2015). La plupart des règles de dimensionnement appliquées aux géo-conteneurs remplis de sable est de nature empirique, ce qui signifie que les retours d'expérience sont nécessaires. Sur la base des exigences fonctionnelles et des conditions locales (en particulier les conditions hydrauliques et géotechniques), les dimensions clés de l'ouvrage, et particulièrement la section transversale caractéristique, le profil longitudinal, la hauteur de crête et la pente, ont été déterminées.

Le dimensionnement et le nombre d'éléments a été déterminé à l'aide d'applications et d'exemples pratiques donnés dans la littérature (Bezuijen et Vastenburg, 2013), qui constituent la source de documentation la plus complète à ce jour pour la conception de nouveaux ouvrages en géotextile.

Pour le projet actuel, le diamètre théorique du géo-conteneurs est de 3.25 m, qui est défini principalement sur le dimensionnement géométrique plutôt que sur les conditions hydrodynamiques, qui sont limitées sur le site de projet. Le fait que l'ouvrage consiste en un empilement de multiples couches les unes sur les autres n'apporte pas de stabilité supplémentaire à l'ouvrage en général. Ceci est valable pour les éléments de la couche du fond, étant donné que sans connexions structurelles, deux tubes n'ont pas une plus grande stabilité qu'un seul tube (Bezuijen et Vastenburg, 2013).

2.5. Dimensionnement géotechnique des géo-conteneurs

L'analyse de stabilité géotechnique est réalisée avec le logiciel SLOPE/W 2007 (SLOPE/W, 2007), basé sur la théorie de Morgenstern-Price (défaillance par glissement). Le logiciel, qui est sur le marché depuis 1977, utilise les formulations d'équilibre limite et la méthode des éléments finis. Il existe plusieurs façons de décrire la résistance des matériaux géotechniques dans une analyse de stabilité des pentes. Dans ce projet, le critère de Mohr-Coulomb est appliqué, comme il s'agit du moyen le plus courant de décrire la résistance au cisaillement des matériaux géotechniques (sol et roche). Le logiciel SLOPE/W 2007 permet le calcul du facteur de sécurité pour la stabilité de la pente. Les facteurs de sécurité calculés sont alors comparés avec les facteurs recommandés de 1.5 pour la stabilité des pentes à long terme, comme suggéré, entre autres, par le US Army Corps of Engineers (USACE, 2003). Pour la stabilité à court terme, un facteur de 1.3 est acceptable. Les règles de dimensionnement de l'USACE ont été suivies du fait de l'absence de régulation nationale.

Le plan masse le plus critique de l'alternative de plage artificielle suspendue a été choisi pour l'analyse de la stabilité géotechnique. La coupe transversale sélectionnée pour l'analyse de la stabilité est située exactement sur l'extrémité supérieure de la pente du chenal de navigation. Dans toutes les autres sections côté terre du géo-système, une berme horizontale existe. La section mentionnée a donc le plus faible facteur de sécurité de stabilité.

Les études géotechniques et les campagnes de mesure ont démontré que la structure du sol dans la zone au sud du bâtiment résidentiel consistait en deux couches. La couche supérieure de la fondation est un sable limoneux et argileux. L'épaisseur de cette couche est toutefois limitée. Pour rester conservatif, une épaisseur de 2 m est prise en compte pour la couche limon/argile.

La couche inférieure (du fond) consiste en des sables de densité moyenne à dense. Dans cette couche, des valeurs élevées (N-values) de tests de pénétration standard (SPT) ont été enregistrées. L'analyse de la stabilité de la pente prend en compte à la fois le niveau d'eau le plus bas et le niveau le plus haut. L'analyse et les résultats sont basés sur la condition statique, et les calculs sismiques n'ont pas été pris en compte. On observe que la variation du niveau d'eau a un effet négligeable sur la stabilité de la plage et du géo-système.

La Figure 1 illustre la stabilité de la pente du bâtiment résidentiel sur le long terme. Pour les deux niveaux d'eau considérés (hauts et bas), le facteur de sécurité de stabilité de la pente reste plus élevé que les exigences et est donc acceptable.

2.6. Méthode d'exécution

Les géo-conteneurs préfabriqués sont livrés sur site avec seulement le nombre d'ouvertures nécessaires pour le remplissage. Il est recommandé que chacun des éléments du géo-conteneur soit de taille différente, afin de permettre aux jonctions entre les éléments d'être décalées. L'installation du géo-système, effectuée par une équipe expérimentée, consiste en deux phases : la pose du géo-conteneur sur le fond et le remplissage (pompage). Pendant la phase de pose, le géo-conteneur composé de polypropylène (gravité spécifique inférieure à l'eau de mer) est déroulé et déplié avec soin dans sa position correcte de flottaison, et est temporairement fixé pour le remplissage. Le remplissage du géo-conteneur est ensuite réalisé par pompage hydraulique d'un mélange de sable et d'eau dans le système. En général, toute pompe capable de pomper un mélange de sable et d'eau peut être utilisée pour remplir un géo- conteneur. Les travaux sont actuellement en cours d'exécution (2016).

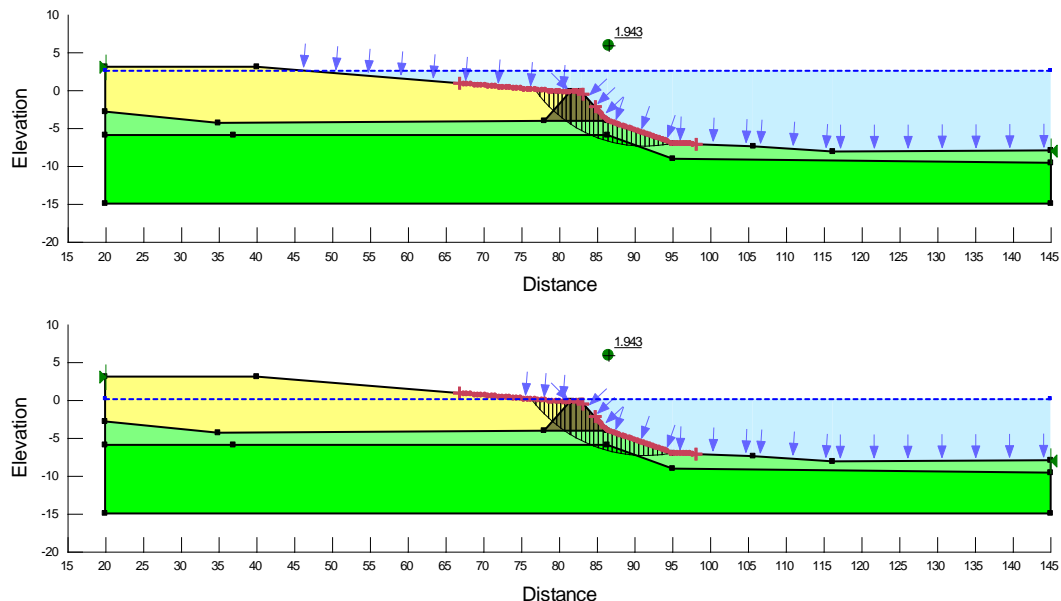


Figure 1. Analyse de stabilité de la pente de la plage du bâtiment résidentiel à long terme.

2.7. Inspections périodiques et entretien

Les niveaux de la plage et la position du trait de côte doivent être régulièrement inspectés. Des rechargements d'urgence ou de routine peuvent s'avérer nécessaires pour assurer le niveau de performance désiré du projet. De plus, les opérations d'entretien suivantes sont à prévoir (liste non-exhaustive): redistribution mécanique du sable dans la zone de projet, classement, nettoyage et enlèvement périodique des débris de la zone. Le suivi de la performance et des conditions sont nécessaires tout au long de la vie économique du projet.

Des dommages aux géo-conteneurs peuvent être dus à de nombreuses raisons – collision avec bateaux, matériel de pêche, tempêtes, vandalisme, dommages durant l'installation, et défaillance du matériau géotextile ou usure naturelle au cours de la durée de vie nominale. Il est recommandé que des inspections de plongeurs soient menées pendant les 10 premières années pour évaluer l'intégrité et les conditions des géo-conteneurs remplis de sable. Le temps entre les inspections peut être étendu à 3 ans pendant les 25 années suivantes.

3. Travaux d'aménagement d'un fleuve d'Amérique Latine

Il s'agit d'un des plus longs fleuves d'Amérique Latine qui est dans les 10 plus importants au monde en termes de transport sédimentaire. Dans le passé, le fleuve était utilisé pour le transport de marchandises. Cependant, de nos jours, la plupart des marchandises est transporté par voie terrestre, ce qui entraîne une perte d'activité pour le transport fluvial et maritime. Par conséquent, le gestionnaire gouvernemental du fleuve a obtenu une concession de 14 ans pour restaurer et maintenir la navigabilité des 908 km de voies navigables. La navigabilité est améliorée et maintenue à l'aide d'opérations de dragage et des travaux d'aménagement. Ces travaux consistent en différents ouvrages, comme des déflecteurs de courant, des ouvrages de protection des berges et de fermeture des chenaux secondaires. Les ouvrages guideront l'écoulement dans le chenal navigable pendant les périodes de sécheresse. La protection des berges réduit le risque d'instabilité en particulier au niveau des zones étroites du fleuve. Enfin, les structures de fermeture pour les chenaux secondaires ont pour objectif de rediriger l'écoulement pendant les épisodes vers le chenal principal, résultant en une augmentation du niveau d'eau dans le chenal principal et dans le chenal de navigation. Etant donné l'absence de carrières à proximité de la zone de projet et des quantités significatives de matériaux de dragage causées par les charges sédimentaires, l'utilisation de géo-conteneurs remplis de sable est considérée pour les travaux d'aménagement. Les auteurs ont fourni une assistance technique pendant la phase d'ingénierie, qui a inclus un examen approfondi des études de dimensionnement pour un linéaire d'environ 270 km, et une évaluation des fabricants de géotextile. La première étape de la révision a focalisé sur le dimensionnement fonctionnel. Dans une seconde étape, le processus de dimensionnement structurel a été examiné, étant donné qu'il garantit la stabilité de l'ouvrage face aux forces hydrodynamiques. La stabilité des ouvrages dépend autant du dimensionnement des éléments

du géo-conteneur même, que des caractéristiques du géotextile utilisé comme mesure de protection contre l'affouillement. En raison de l'impact du développement de fosses d'affouillement sur la déformation des géo-systèmes, un ouvrage peut perdre sa fonctionnalité ou même être sujet à une défaillance ou déchirure du tissu.

3.1. Dimensionnement fonctionnel

Le dimensionnement fonctionnel des ouvrages d'aménagement a été soigneusement examiné et une méthodologie de dimensionnement des ouvrages déflecteurs de courant a été mise au point. Le but principal de cette méthodologie est de limiter les dragages d'entretien après la construction des ouvrages et les travaux d'aménagement du fleuve. Une représentation spatiale (cartographie) des travaux d'aménagement du fleuve le long du tronçon étudié peut être obtenue. L'examen du dimensionnement fonctionnel des travaux d'aménagement, basé sur cette méthodologie, a abouti à la suppression, à l'ajout et à l'adaptation d'ouvrages par rapport au dimensionnement fonctionnel initial du concepteur. En se basant sur un événement de sécheresse (niveau d'eau bas), qui est le cas déterminant le dimensionnement pour améliorer la navigabilité du fleuve, les dimensions des ouvrages déflecteurs de courant et de fermeture de chenaux secondaires sont déterminées. Sur la base d'un événement de niveau d'eau haut, qui détermine l'évolution morphologique du lit du fleuve, la méthodologie permet d'obtenir une hauteur de crête qui permettra de minimiser les travaux de dragage dans le chenal principal. La longueur et la hauteur de crête de ces ouvrages sont la base du dimensionnement structurel.

3.2. Dimensionnement structurel

L'utilisation de géo-conteneurs remplis de sable pour des travaux d'aménagement possède des avantages par rapport aux autres solutions plus classiques, comme les enrochements ou les gabions. Etant donné qu'une partie des matériaux dragués peut être utilisée comme matériau de remplissage des géo-conteneurs, ceci limitera ainsi significativement l'impact environnemental des opérations de dragage. De plus, l'utilisation de géo-conteneurs remplis de sable a l'avantage d'avoir un impact réduit et non permanent sur les processus naturels du fleuve. Pour les raisons énumérées ci-dessus et le manque de carrières à proximité, l'utilisation de géo-conteneurs remplis de sable a été fortement recommandée.

3.3. Ouvrages d'aménagement du fleuve

Le dimensionnement des ouvrages d'aménagement du fleuve peut être divisé en deux parties. D'un côté, les ouvrages actuels doivent être considérés. Le dimensionnement de ces ouvrages – la plupart du temps réalisés sous forme de tubes, dépend de plusieurs paramètres, dont les forçages hydrodynamiques. D'après les résultats des modélisations fleuve, réalisées à la fois par le concepteur des ouvrages d'aménagement initiaux et par les auteurs, il peut être conclu que des vitesses élevées d'écoulement (jusqu' à 3 m/s) se produisent dans le tronçon étudié. Ce type d'écoulement ne convient pas à tous types de géo-système. Par exemple, des géo-conteneurs remplis de sable sous forme de sacs sont inutiles dans le cas de vitesses supérieures à 2.5 m/s et plus, puisque les matériaux de remplissage commencent à se déplacer, entraînant des déformations, qui pourraient affecter la fonctionnalité de l'ouvrage et provoquer une défaillance.

Les calculs de stabilité sont basés sur des valeurs supposées de différents paramètres. Par exemple, la conception de géo-conteneurs dépend fortement de la porosité du matériel utilisé. Pour les mêmes dimensions de géo-système, un élément avec une porosité plus élevée peut devenir instable, alors qu'un élément avec une porosité inférieure restera stable. Par conséquent les auteurs ont recommandé une analyse de sensibilité approfondie de tous les paramètres utilisés dans l'analyse de stabilité, telles que la porosité et la masse volumique des matériaux de remplissage. Le concepteur doit prendre en compte le fait que les géo-conteneurs sont plus vulnérables que les enrochements ou les gabions, et nécessitent donc un entretien régulier. Les géo-conteneurs peuvent être protégés mécaniquement contre le vandalisme ou les débris. Cette protection mécanique peut être effectuée avec d'autres géo-conteneurs en forme de tabliers, de matelas ou de sacs. D'un côté, l'utilisation de matelas ou de sacs est déconseillée, à cause des vitesses d'écoulement trop élevées, et aussi du fait que ces unités ne seront pas en contact total avec le tube à cause de sa forme, ce qui pourrait affecter la stabilité du géo-système. Par ailleurs, les tabliers sont difficiles à accrocher sur les géo-systèmes. La meilleure technique de fixation consiste à enrouler le tablier autour du tube. Les autres techniques de fixation

existantes comme les "gramps" sont moins efficaces dans des cas de transport solide important (à la fois sédiment et débris). Etant donné que toutes les mesures de protection mécanique des géo-conteneurs présentent des inconvénients, les auteurs ont suggéré au concepteur d'utiliser un tissu plus résistant pour la construction des tubes ; potentiellement le même tissu qui aurait été utilisé pour la confection des tabliers. L'utilisation de géotextiles composites (tissés/non-tissés) possède certains avantages pour ce type d'applications. Cependant, il existe une limite en ce qui concerne la masse surfacique, qui est un bon indicateur de la résistance mécanique d'un géotextile. Cette limite s'applique tout particulièrement lors de l'utilisation de matériau géotextile en tant que géo-système. Etant donné que le dimensionnement des géo-conteneurs remplis de sable est basé sur des formulations de nature empirique provenant de tests à échelle réduite et d'expériences pratiques dans des conditions qui sont différentes de celles du fleuve, les auteurs suggèrent d'effectuer un test avec un prototype complet de géo-conteneur pour un des tronçons critiques du fleuve. L'observation de ce prototype pourrait aboutir à des améliorations au niveau du dimensionnement ainsi qu'à une optimisation des coûts.

Ainsi, les auteurs recommandent donc de préparer un plan de suivi et d'entretien détaillé des géo-conteneurs pour toute la durée de la vie du projet/des tubes.

3.4. Protection contre l'affouillement

En raison de la mise en place des ouvrages d'aménagement du fleuve, les tendances d'écoulement vont être modifiées. Ces changements peuvent entraîner une augmentation de l'affouillement au niveau du pied des ouvrages et autres structures, et ainsi menacer leur stabilité structurelle et fonctionnalité. L'estimation de la profondeur d'affouillement et des évolutions des fosses d'affouillement est un sujet difficile pour les universitaires et les professionnels. C'est pourquoi une étude de sensibilité des différentes formules de calcul d'affouillement et des différents paramètres utilisés est recommandée. En raison du manque de carrières pour se procurer des enrochements, l'utilisation de géotextile est considérée pour la protection contre l'affouillement.

Deux utilisations différentes de géo-conteneurs ont été étudiées. Tout d'abord l'utilisation de sacs, qui seraient placés directement dans les fosses d'affouillement pour les protéger et éviter un affouillement supplémentaire. Ces sacs ont pour unique objectif de combler les fosses et ne sont en aucun cas nécessaires pour la stabilité dans le cas où il n'y ait pas d'affouillement. Une deuxième solution de protection contre l'affouillement consiste en l'utilisation d'un tablier en géotextile. A l'extrémité de ce géotextile, un géo-conteneur rempli de sable (sous la forme de tube ou sac) est connecté. Si l'affouillement se produit à l'extrémité de la protection anti-affouillement, le géo-conteneur tombe dans la fosse d'affouillement, le protégeant ainsi d'un affouillement supplémentaire. Pendant ce temps, la zone entre l'ouvrage d'aménagement du fleuve et le géo-système, reliée au tapis anti-affouillement, est toujours protégée par le tablier. Les protections anti-affouillement doivent être installées au niveau des zones critiques au début des travaux d'aménagement du fleuve. Cependant, en raison des incertitudes liées à la profondeur d'affouillement et à l'évolution de ces fosses, les auteurs ont proposé d'établir un plan de suivi et d'entretien détaillé. Plusieurs méthodes de suivi ont été proposées, à l'aide de sondeurs, de colliers magnétiques coulissants, et de dispositifs flottants. L'utilisation de sondeurs est recommandée car cette méthode est la plus répandue dans le monde, et car elle donne une indication de l'évolution du lit, tandis que les autres méthodes indiquent seulement si l'affouillement a eu lieu à un endroit spécifique. Dans le cas où le suivi des ouvrages révèle des problèmes d'affouillement, la solution la plus adaptée doit être sélectionnée pour empêcher un affouillement excessif, qui peut mettre en péril la fonctionnalité de l'ouvrage. Ces solutions peuvent varier entre le placement de sacs supplémentaires et le clapage de matériaux dragués. L'expérience du concepteur et de l'entrepreneur sont donc nécessaires.

4. Conclusions

Pour la plage du bâtiment résidentiel, un diamètre théorique de 3,25 m a été considéré pour le géo-système. La section la plus critique de la plage a été prise en compte pour l'analyse de stabilité des pentes. Un facteur de sécurité de stabilité plus élevé que le facteur nécessaire a été atteint. Les niveaux de plage et la position du trait de côte doivent être inspectés régulièrement, et il est possible qu'un rechargement d'urgence ou de routine soit nécessaire pour assurer la performance souhaitée du projet. Pour l'étude du fleuve d'Amérique Latine, le but principal de la méthodologie développée était de minimiser les travaux de dragage d'entretien après la construction des ouvrages et l'aménagement du fleuve. L'utilisation de géo-conteneurs remplis de sable possède des avantages par rapport aux enrochements et aux gabions. Une partie des matériaux dragués peut être utilisée pour remplir les géo-conteneurs, et l'impact environnemental pourra donc être significativement diminué. Il faut mentionner également que les géo-conteneurs pourront être protégés mécaniquement contre le vandalisme ou les débris. Pour la phase de construction, il est recommandé que chacun des éléments des géo-conteneurs ait une longueur différente afin de permettre des jonctions décalées.

5. Références bibliographiques

- Bezuijen A., Vastenburg E.W. (2013). *Geosystems – Design rules and applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-62148-9.
- das Neves L. (2011). *Experimental stability analysis of geotextile encapsulated-sand eystems under wave-loading*, PhD Thesis University of Porto, Faculty of Engineering, Portugal (290 pp.).
- das Neves, L., Moreira A., Taveira-Pinto F., Lopes M.L., Veloso-Gomes F. (2015). Performance of submerged nearshore sand-filled geosystems for coastal protection, *Coastal Engineering, Volume 95, January, Pages 147-159, ISSN 0378-3839, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.10.005>*.
- US Army Corps of Engineers (2002). EM 1110-2-1100, *Coastal Engineering Manual*, USACE.
- SLOPE/W (2007). *Stability modeling with SLOPE/W 2007, an engineering methodology*, GEO-SLOPE International Ltd.
- US Army Corps of Engineers (2003). *Engineering and design, Slope Stability*, EM 1110-2-1902, 31 Oct 2003.