

AMÉNAGEMENT D'UN BRISE-LAMES EN TUBES GÉO-SYNTHÉTIQUES POUR LA RÉGÉNÉRATION DE LA FAÇADE MARITIME D'UN HÔTEL DE LUXE À TABARKA, TUNISIE

ARRANGEMENT OF A GEO-SYNTHETIC WAVE BREAKER FOR THE REGENERATION OF THE MARITIME FACADE OF A LUXURY HOTEL IN TABARKA, TUNISIA

Okba BOUGHANMI, Habib HOUES, Samir ENNOUR
MECATER Ingénierie, Tunis, Tunisie

RÉSUMÉ – La plage d'un hôtel de luxe situé dans la zone touristique de Tabarka en Tunisie, est caractérisée par une érosion marine intense. Afin de régénérer la façade maritime de l'hôtel, MECATER a étudié l'aménagement d'un brise-lames qui permet de réduire l'énergie de la houle dominante et des courants littoraux correspondants. Le brise-lames préconisé sera en tubes géosynthétiques. Il aura une longueur de 400 m et une hauteur de 4,5 m. Il sera implanté à -5 m du Nivellement Général de la Tunisie - NGT, soit à 200 m du trait de côte. Le dimensionnement de l'ouvrage garantit sa stabilité interne et externe pendant plus de 20 ans, vis-à-vis des houles centennales. Le brise-lames garantit un coefficient de transmission de la houle de moins de 50 %, ce qui permet de limiter de façon significative l'érosion de la plage et contribue ainsi au rechargement naturel.

Mots-clés : brise-lames, érosion, géosynthétique, houle, stabilité

SUMMARY – An intense marine erosion characterizes the beach of a luxury hotel located in the tourist area of Tabarka in Tunisia. In order to regenerate the beach side of the hotel, MECATER undertook a study for the construction of a breakwater, which reduces the energy of the dominant swell and the corresponding littoral currents. The breakwater will be made of geo-synthetic tubes. It will have a length of 400 m and a height of 4.5 m and it will be established to -5 m under water. The design of the wave breakwater guarantees its internal and external stability for more than 20 years, with respect to the 1 in 100 years swells. The breakwater guarantees a coefficient of transmission of the swell of less than 50%. Which limits significantly beach erosion and contributes to natural recharging.

Keywords: breakwater, erosion, geo-synthetic, swell, stability

1. Introduction

Afin de lutter contre l'érosion marine, l'aménagement de brise-lames en tubes géosynthétiques représente une solution moins coûteuse, rapide à exécuter et réversible comparée aux brise-lames en béton ou en enrochements (Kim et al., 2013 ; Shin et al., 2002 ; Shin et Oh, 2007). En plus, l'utilisation des tubes en géosynthétiques offre des avantages environnementaux appréciables tels que :

- très bonnes interactions avec l'écosystème marin, il fonctionne comme un récif artificiel ;
- réduction significative de l'utilisation de l'agrégat rocheux ;
- source de sable de remplissage située à proximité du site du projet ;
- réduction significative du transport routier de camions lourds sur les infrastructures routières.

Ainsi, nous avons préconisé l'aménagement d'un brise-lames en géosynthétique pour régénérer la façade maritime d'un hôtel de luxe situé à Tabarka en Tunisie.

2. Description du projet de brise-lames en tubes géosynthétique

Le brise-lames proposé pour régénérer la façade maritime de l'hôtel aura une longueur de 400 m et une hauteur de 4.5 m. Il sera implanté à -5 m NGT, soit à 200 m du trait de côte (figure 1).

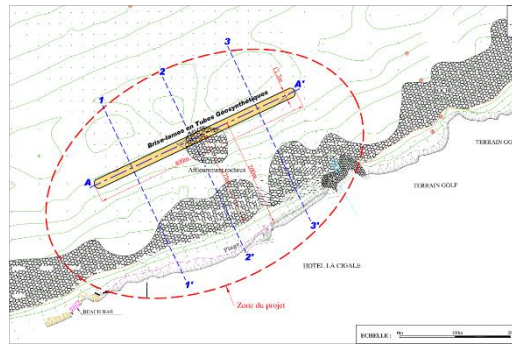


Figure 1. Vue en plan du brise-lames en tubes géosynthétiques

Le brise-lames sera composé des éléments suivants (figure 2) :

- un tapis anti-affouillement ancré de part et d'autre par des petits tubes en géosynthétique de 1 m de diamètre ;
- une première couche de tubes en géosynthétique composée de trois rangées de tubes. Les deux premières rangées composées de tubes de 4 m de diamètre et faisant 2,25 m de hauteur et 5,2 m de largeur. La troisième rangée située du côté large est composée de tubes de 5 m de diamètre et faisant 2,25 m de hauteur et 6,8 m de largeur ;
- une deuxième couche des tubes en géosynthétique composée de deux rangées de tubes de Φ 4 m faisant 2,25 m de hauteur et de 5,2 m de largeur.

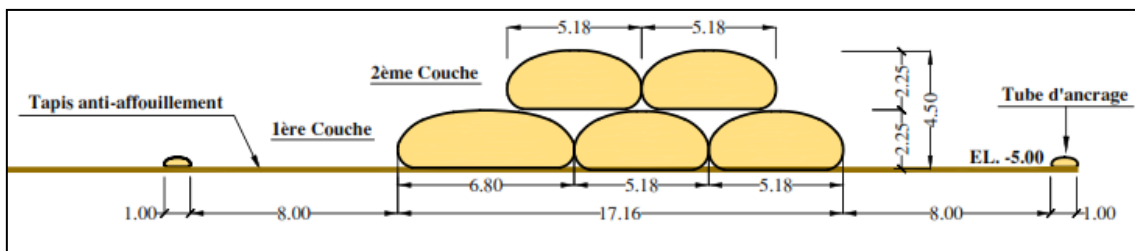


Figure 2. Coupe schématique du brise-lames

Cette disposition permet d'obtenir un brise-lames avec une largeur à la base de 17,2 m, une largeur en crête de 10,4 m, une hauteur totale de 4,5 m et une pente de 1/2 du côté large et 1/1 du côté plage.

3. Hypothèses de calcul

La stabilité des tubes en géosynthétique dépend des facteurs suivants :

- la profondeur d'eau et les conditions de houles ;
- les dimensions et la déformabilité du géosynthétique ;
- le coefficient de remplissage des tubes ;
- les caractéristiques du sable de remplissage ;
- les caractéristiques mécaniques des tubes géosynthétiques.

Nous présentons ci-après les différentes données utilisées pour la justification de la stabilité et de la résistance mécanique du brise-lames.

3.1. Données des houles

Les données de la houle rapportées au pied de l'ouvrage, à savoir la hauteur de la houle significative (H_s) et la période correspondant au maximum de la densité spectrale (T_p) sont déduites des résultats de la modélisation numérique réalisée par (Maritec et Sirus, 2013) et sont présentées dans le tableau 1. Ces données seront utilisées pour le dimensionnement et pour l'évaluation de l'efficacité de l'ouvrage :

Tableau 1 : Caractéristiques des houles au pied de l'ouvrage

Condition des houles	H _s (m)	T _p (s)	Niveau d'eau (m NGT)
Houle annuelle (1 an)	3,50	12	+0,5
Houle décennale (10 ans)	3,70	13,5	+0,6
Houle centennale (100 ans)	4,00	14	+1,0

3.2. Hypothèses générales

Le tableau 2 présente les différentes hypothèses de calcul de la stabilité des tubes géosynthétiques.

Tableau 2. Hypothèses générales de calcul de la stabilité des tubes en géosynthétique

Géométrie du brise-lames	
Longueur minimale du brise-lames	400 m
Profondeur du brise-lames	-5 m NGT
Revanche de la crête du brise-lames par rapport au niveau statique	0,5 m
Hauteur du brise-lames	4,5 m
Pente du talus amont de l'ouvrage (côté large)	1V/2H
Pente du talus aval (côté terre)	1V/1H
Durée de vie de l'ouvrage	20 ans
Sable de remplissage des tubes géosynthétiques	
Porosité	0,4
Masse volumique des grains solides	2700 kg/m ³
Poids volumique apparent	18 kN/m ³
Cohésion	0 KPa
Angle de frottement	27 degrés
Assise rocheuse	
Poids volumique apparent	20 kN/m ³
Cohésion	>50 kPa
Angle de frottement	>40 degrés
Masse volumique de l'eau	1000 kg/m ³

3.3. Caractéristiques mécaniques des tubes en géosynthétique

Le tableau 3 présente les différentes caractéristiques mécaniques des tubes en géosynthétique qui seront utilisés dans les calculs de stabilité mécanique du brise-lames.

Tableau 3. Caractéristiques des tubes en géosynthétique

Type du matériau	Tissé
Type du polymère	Polypropylène avec additif long life pour milieu marin
Résistance à la rupture selon ISO 10319	
En sens axial	200 kN/m
En sens circonférentiel	200 kN/m
Allongement à la rupture selon ISO 10319	
En sens axial	20%
En sens circonférentiel	15%
Résistance à la couture selon ISO 10321	160 kN/m
Résistance au poinçonnement selon ISO12 236	20 kN
Perforation dynamique selon EN 13433	8 mm
Résistance à la thermo-oxydation selon ISO EN 5132	classe B
Résistance résiduelle après 500 heures d'exposition aux UV selon ASTM D4355	85% de la résistance initiale
Essai Xenon (50MJ/m ²) selon ENV 12224 - UTS	95%
Perméabilité normale au plan ISO 11058 sous h 50 mm	1000 l/m ² /min
Ouverture de filtration selon ISO 12956	250 ≤ ≤ 450 micromètres

4. Justification du dimensionnement des tubes élémentaires

4.1. Stabilité hydrodynamique des tubes élémentaires

D'après (Bezuijen et Vastenburg, 2013), un tube élémentaire posé sur le fond marin sera stable vis-à-vis des sollicitations hydrodynamiques lorsque la condition suivante sera satisfaite :

$$\frac{H_s}{\Delta_t D_k} \leq 1 \quad (1)$$

avec :

- H_s : hauteur de la houle significative [m]
- $\Delta_t = (1-n) \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$: densité relative du tube géosynthétique [-]
- n : porosité du matériau de remplissage [-]
- ρ_s : masse volumique du matériau de remplissage [kg/m³]
- ρ_w : masse volumique de l'eau [kg/m³]
- D_k : épaisseur effective du tube géosynthétique [m]
 $D_k = l$ avec l = longueur du tube géotextile [m] si les tubes sont parallèles à la direction de la houle
 $D_k = b$ avec b = largeur du tube géotextile [m] si les tubes sont perpendiculaires à la direction de la houle.

Sur la base des données de houles présentées dans le tableau 1, la hauteur de la houle significative adoptée est $H_s = 4$ m. Cette valeur correspond à une récurrence centennale.

L'application de la formule de Bezuijen et Vastenburg (2013) montre que la stabilité hydrodynamique du tube élémentaire sera assurée pour une largeur minimale du tube de 3,9 m.

Ainsi, nous confirmons que les largeurs des tubes élémentaires adoptées pour la conception de l'empilement, soit 5,2 m et 6,8 m, permettent de garantir la stabilité hydrodynamique des géotubes, notamment vis à vis du phénomène de soulèvement.

4.2. Analyse de la résistance mécanique des tubes élémentaires

Le calcul de la résistance à la traction d'un tube en géosynthétique est effectué par la méthode développée par (Leshchinsky et Leshchinsky, 1996). Cette méthode est basée essentiellement sur l'équilibre d'un tube soumis à des forces de traction qui sont divisées en deux types selon la direction (figure 3) :

- T_{axial} : Force de traction axiale ;
- $T_{circonf}$: Force de traction circonférentielle.

En général, la force circonférentielle est plus importante que la force axiale.

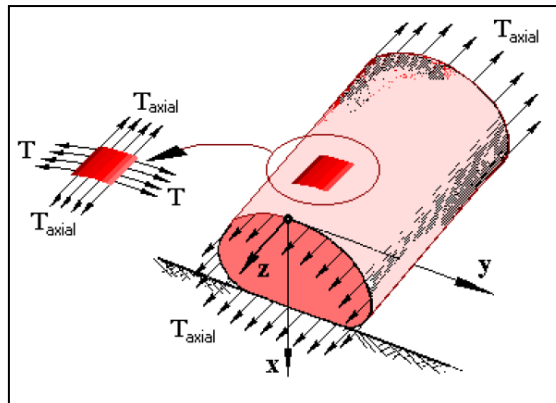


Figure 3. Force de traction directionnelle appliquée à un géotube

La résistance ultime du tube T_{ult} est donnée par la formule suivante :

$$T_{ult} = T_{work} (RF_{id} \cdot RF_d \cdot RF_c \cdot RF_{ss}) \quad (2)$$

avec :

- T_{work} : la force de traction calculée dans les conditions de remplissage soit dans la direction circonférentielle ($T_{work} = T$), soit dans la direction axiale ($T_{work} = T_{axial}$) ;
- RF_{id} : Facteur de réduction sur les défauts d'exécution (Par exemple : augmentation supplémentaire de la pression de pompage) ;
- RF_d : Facteur de réduction sur la dégradation biologique ou chimique des géotextiles (essentiellement les radiations UV du soleil) ;
- RF_c : Facteur de réduction sur le fluage des géotextiles (résistance des géotextiles à long terme) ;
- RF_{ss} : Facteur de réduction sur la résistance de la couture (en cas d'une couture défectueuse).

L'analyse de la résistance mécanique d'un tube élémentaire a été effectuée avec le logiciel GeoCoPS. Il s'agit d'un programme interactif pour la conception de tubes géosynthétiques. Pour un problème donné, ce logiciel permet de déterminer la géométrie du tube et la force circonférentielle et longitudinale requise du géosynthétique. Les calculs tiennent compte des facteurs de réduction liés à la résistance de la couture, à la durabilité, au fluage et aux dommages à l'installation. Les résultats sont obtenus en résolvant une équation différentielle soumise à des contraintes de conception.

Les calculs sont réalisés avec les coefficients de sécurité issus des normes techniques d'«ASTM», indiqués dans le tableau 4.

Tableau 4. Coefficients de sécurité partiels sur la résistance des tubes en géosynthétique

Facteur de sécurité	Valeur
RF_{id}	1,20
RF_d	1,10
RF_c	2,00
RF_{ss} (axiale / circonférentielle)	2,50/2,50

Dans ces calculs, nous avons fixé le diamètre du tube élémentaire (4 et 5m) et la hauteur unitaire correspondant à la hauteur requise de la couche, soit à 2,25 m. Ensuite, nous avons déduit la pression de pompage, les efforts de tractions au niveau de géosynthétique et la largeur finale du tube élémentaire.

Les calculs ont été réalisés pour les deux conditions hydrauliques suivantes :

- Condition normale : Tube totalement immergé à -5m de profondeur
- Condition extrême : Remplissage des tubes hors d'eau.

Les résultats de calcul d'un tube élémentaire, pour une hauteur maximale du tube de 2,25 m, sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 5. Résultats de calcul pour un tube élémentaire ayant une hauteur unitaire de 2,25m

Tube	Condition hydraulique	Pression de pompage (kPa)	Résistance requise à la traction axiale (kN/m)	Résistance requise à la traction circonférentielle (kN/m)
Tube de 4 m de diamètre	Condition normale	2,5	64	88
	Condition extrême	5,0	137	188
Tube de 5 m de diamètre	Condition normale	1	60	78
	Condition extrême	2,3	133	171

Note : La résistance requise est égale à l'effort calculé majoré par les différents coefficients de sécurité indiqués dans le tableau 4.

Les valeurs de la résistance à la traction requise (188 kN/m pour un tube de 4m de diamètre et de 171 kN/m pour un tube de 5 m de diamètre) restent inférieures à la résistance à la rupture du géosynthétique adoptée (200 kN/m) dans les deux directions axiale et circonférentielle.

Les largeurs des tubes élémentaires adoptées pour la conception de l'empilement après remplissage sont 5,2 m pour un tube de diamètre de 4 m et 6,8 m pour un tube de diamètre de 5 m.

4.3. Définition de la pression de pompage maximale

La phase de sollicitation critique du tube est la phase de remplissage pendant laquelle le tube sera soumis à une forte pression d'eau. Nous avons déterminé dans cette partie la pression de pompage maximale que peut supporter un tube en géosynthétique ayant une résistance à la traction de 200 kN/m.

Les résultats de calculs montrent que les géosynthétiques ayant une résistance à la traction de 200 kN/m peuvent résister à des pressions de pompage de 9,6 kPa pour un tube de 4 m de diamètre et de 6,2 kPa pour un tube de 5 m de diamètre.

5. Justification du dimensionnement du brise-lames

5.1. Évaluation du coefficient de transmission de la houle

Le rôle principal du brise-lames consiste à atténuer l'énergie transmise par la houle sur la côte. Ce qui permet de réduire le potentiel érosif des houles et contribue à la stabilisation de la plage.

La houle incidente, provenant du large arrive au pied du brise-lames avec une hauteur H_i , en passant au-dessus du brise-lames, la hauteur de la houle sera réduite à une valeur :

$$H_t = K_t H_i \quad (3)$$

avec :

- H_t hauteur de la houle transmise en aval de l'ouvrage,
- K_t coefficient de transmission.

Le coefficient de transmission est estimé par la formulation empirique proposée par Briganti (2007). Pour les ouvrages étroits ($B/H_s < 10$) :

$$K_t = 0,4 R_c/H_i + 0,64 (B/H_i)^{-0,31} (1 - \exp(-0,5 \xi)) \quad (4)$$

avec :

- R_c : revanche de la crête du brise-lames par rapport au niveau statique,
- H_i : hauteur significative de la houle incidente,
- B : largeur en crête du brise-lames.
- $\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s/L_0}}$: Paramètre de déferlement local
- $\tan \alpha$: Pente du talus amont de l'ouvrage ;
- $L_0 = gT^2/2\pi$: Longueur d'onde de la houle pour une période T .

Le tableau 6 donne les coefficients de transmission pour les différentes largeurs en crête du brise-lames, pour une revanche $R_c = 0,5$ m et une hauteur de houle au pied de l'ouvrage fixée à 3,7 m pour une récurrence décennale et 4 m pour une récurrence centennale.

Tableau 6. Coefficient de transmission du brise-lames pour les houles décennales et centennales

	B(m)	Tg α (-)	Récurrence centennale		Récurrence décennale	
			K_t (%)	H_t (m)	K_t (%)	H_t (m)
Brise lames en tubes géosynthétiques	5,2	1	63	2,5	62	2,3
	10,4	1	52	2,1	51	1,9
	15,6	1	46	1,8	46	1,7
	10,4	0,50	48	1,9	48	1,8
Essais en canal à houle pour un brise-lames en enrochement (Maritec et Sirius, 2013)	15	0,5		1,9		1,7

L'analyse comparative présentée dans le tableau 6 montre que le coefficient de transmission varie pour la récurrence décennale de 46% à 62%, pour une largeur en crête variant de 5,2 m à 15,6 m. La largeur optimale serait de 10,4 m, elle donne un coefficient de transmission de 51% pour une pente de talus amont de 1/1. La réduction de la pente du talus amont à 1/2 permet d'obtenir un coefficient de transmission de 48% et une hauteur de houle transmise proche de 1,8 m pour la récurrence décennale.

5.2. Analyse de la stabilité du brise-lames

Afin d'étudier le comportement d'ensemble du brise-lames, nous avons utilisé le code de calcul aux éléments finis PLAXIS pour modéliser les différentes phases de construction de l'ouvrage et calculer ainsi les déformations et les contraintes résultantes.

Ces calculs sont basés sur la méthode aux éléments finis en contraintes effectives et utilisent les caractéristiques intrinsèques des matériaux constitutifs de sable de remplissage et de l'assise rocheuse.

5.2.1. Paramètres de calcul des sols aux éléments finis

Les lois de comportement du sol retenues pour les calculs aux éléments finis sont les suivantes :

- une loi élastique linéaire pour l'assise rocheuse ;
- un critère de rupture Mohr-Coulomb pour le sable de remplissage.

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques mécaniques complémentaires utilisées pour les calculs aux éléments finis.

Tableau 7. Paramètres de calcul des sols aux éléments finis

Paramètres	Assise	Sable de remplissage	Unité
Modèle	Linéaire élastique	Mohr-Coulomb	-
γ_{sat}	20	18	kN/m ³
γ_{unsat}	18	17	kN/m ³
E	10 ³	100	MPa
ν'	0,27	0,3	-
c	-	0	kPa
φ	-	27	degré
R_{inter}	0,33	0,33	-

avec :

- poids volumique saturé (γ_{sat} en kN/m³),
- poids volumique non saturé (γ_{unsat} en kN/m³),
- module d'Young (E en MPa),
- coefficient de Poisson (ν'),
- angle de frottement (φ en degrés),
- cohésion (c en kPa),
- coefficient d'interface sol-structure (R_{inter}).

5.2.2. Paramètres de calcul des tubes en géosynthétique

Les tubes en géosynthétique sont modélisés par des éléments de type «Géogrids» associés à une loi élastique linéaire dont les principaux paramètres sont :

- le module d'Young du matériau (E),
- la section de l'élément (A).

Le tableau 8 présente les paramètres de modélisation de ces éléments.

Tableau 8. Paramètres retenus pour la modélisation des tubes en géosynthétique

Élément	Épaisseur (mm)	E (MPa)	EA (kN/m)
Tube en géosynthétique	2	7 000	14 000

5.2.3. Phasage de calcul

Le phasage de calcul adopté dans la modélisation du brise-lames est le suivant :

Phase 0 : Chargement gravitaire du modèle permettant de créer l'état de contraintes initiales du terrain avant la mise en place du brise-lames. À la fin de cette phase, les déplacements sont annulés ;

Phase 1 : Mise en place de la première couche des tubes en géosynthétique ;

Phase 2 : Mise en place de la deuxième couche des tubes. À la fin de cette phase, les déplacements sont annulés ;

Phase 3 : Houle incidente.

Dans cette phase, nous avons modélisé la houle incidente centennale avec un coefficient de majoration de 1,5 pour tenir compte de l'effet dynamique de la houle.

En effet, la hauteur de la houle côté large est égale à 4 fois 1,5 = 6 m Hydro.

Afin de modéliser le creux de la houle côté plage, nous avons considéré un niveau d'eau de -1,5 m Hydro.

Phase 4 : Houle transmise

Dans cette phase, nous avons modélisé la houle transmise centennale avec un coefficient de majoration de 1,5.

En effet, la hauteur de la houle coté plage est égale à 1,9 fois 1,5 = 2,85 m Hydro.

Dans l'analyse suivante, nous avons considéré les trois conditions hydrodynamiques suivantes :

- Niveau statique (Sans agitation) : Niveau d'eau à 0 m Hydro ;
- Passage de la houle incidente : +6 m Hydro côté large et -1,5 m Hydro côté plage ;
- Passage de la houle transmise : -1,5 m côté large et +2,85 m Hydro côté plage.

5.2.4. Analyse des déformations au niveau du brise-lames

Le brise-lames subit un tassement progressif au cours de sa construction avec une valeur maximale de 12 mm. Ce tassement est dû au chargement gravitaire du sable après remplissage.

Le passage de la houle incidente provoque un déplacement global de l'ordre de 30 mm décomposé comme suit :

- un déplacement horizontal de l'ordre de 20 mm vers la plage (cf. figure 4) au niveau du tube n°5 qui se situe à l'opposé de point d'attaque de la houle incidente ;
- un tassement de l'ordre de 20 mm (figure 5) au niveau du tube n°5 ;
- les tubes ne subissent pas de glissement ni de soulèvement

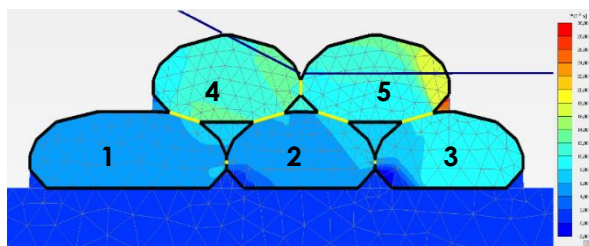


Figure 4. Iso valeur des déplacements horizontaux des tubes au passage de la houle incidente

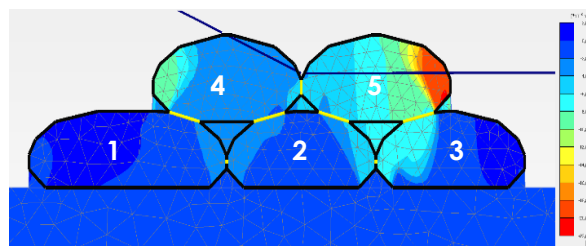


Figure 5. Iso-valeur des déplacements verticaux des tubes au passage de la houle incidente

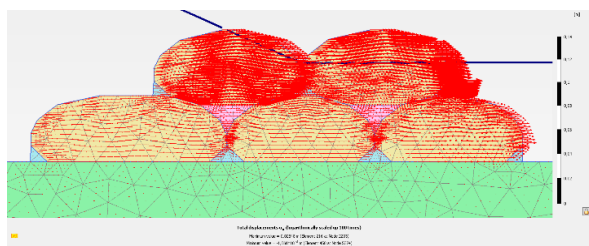


Figure 6. Direction du déplacement horizontal des tubes au passage de la houle incidente

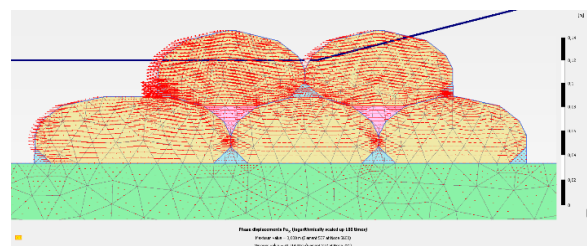


Figure 7. Direction du déplacement horizontal des tubes au passage de la houle transmise

Le passage de la houle incidente provoque un déplacement horizontal vers la plage proche de 20 mm. Ce déplacement correspond à une déformation du contour des tubes supérieurs sans glissement. Les déplacements sont quasiment nuls à la base des tubes.

Le passage de la houle transmise à l'aval de l'ouvrage provoque un déplacement horizontal de même ordre dans le sens opposé (vers le large). Ces déplacements sont réversibles et restent très faibles par rapport à la taille de l'ouvrage et par rapport à la limite de déformabilité du géosynthétique (figures 6 et 7).

5.2.5. Analyse du taux de cisaillement au niveau du brise-lames

L'analyse du taux du cisaillement relatif¹ montre qu'en absence de la houle (niveau hydrostatique), les zones les plus sollicitées se trouvent dans la partie centrale de l'ouvrage (couleur rouge). Le sable est bien confiné et malgré sa faible cohésion, il peut supporter de fortes sollicitations (figure 8).

Par ailleurs, les sables situés sur les périphéries sont peu sollicités et leur stabilité est assurée par le confinement exercé par le géosynthétique.

Le passage de la houle incidente provoque une légère augmentation du taux de cisaillement du côté large (figure 9). Le passage de la houle transmise, provoque au contraire une augmentation des taux de cisaillement du côté plage (figure 10). Ces sollicitations normales sont compensées par une augmentation des efforts de traction au niveau du géosynthétique.

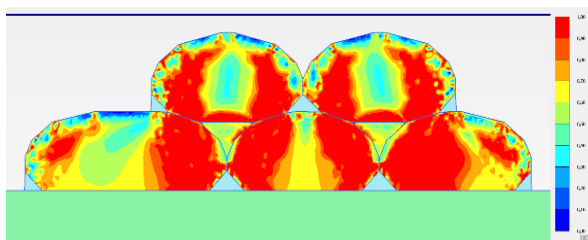


Figure 8. Iso-valeur des taux de cisaillement relatif en condition hydrostatatique

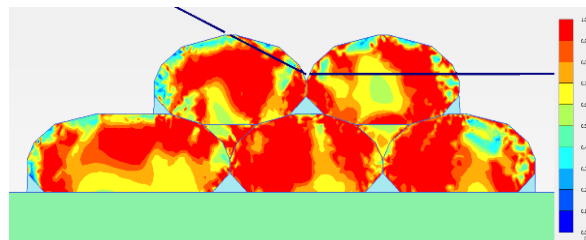


Figure 9. Iso-valeur des taux de cisaillement relatif au passage de la houle incidente

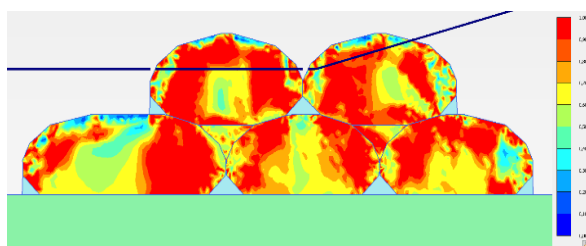


Figure 10. Iso-valeur des taux de cisaillement relatif au passage de la houle transmise

5.2.6. Analyse des efforts dans les tubes

Les efforts de traction circonférentielle et axiale dans le géosynthétique sont présentés sur les figures 11 et 12. L'effort maximum dans le géosynthétique varie de 9 kN/m pour la condition hydrostatatique à 18 kN/m au passage de la houle incidente.

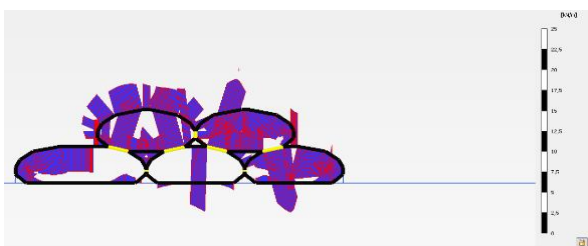


Figure 11. Effort de traction circonférentielle en kN/m en condition hydrostatatique



Figure 12. Effort de traction circonférentielle en kN/m au passage de la houle incidente

Afin de prendre en compte les incertitudes liées à la méthode de calcul aux éléments finis, nous avons appliqué un coefficient de sécurité partiel supplémentaire de 1,5. Le coefficient de sécurité global appliqué sur l'effort de traction calculé est de l'ordre de 10. Il correspond au produit des différents coefficients de sécurité partiels indiqués dans tableau 9 et du coefficient de sécurité partiel appliqué sur la méthode de calcul.

Tableau 9. Valeurs maximales des efforts de traction dans les tubes

¹ Le taux de cisaillement relatif est le rapport entre la contrainte de cisaillement dans l'ouvrage et la contrainte de cisaillement maximale

Conditions	Effort de traction (kN/m)	Résistance requise (kN/m)
Phase 2 : hydrostatique	8,8	88
Phase 4 : houle incidente	17,8	178
Phase 6 : houle transmise	15,8	158

Ces calculs montrent que les efforts dans le géosynthétique restent faibles et du même ordre que les efforts calculés par la méthode analytique présentée dans le paragraphe 3.2. L'utilisation d'un géosynthétique ayant une résistance à la traction de 200 kN/m est suffisante pour garantir l'intégrité du tube sur une durée de 20 ans.

Ces résultats confirment aussi la stabilité globale de l'ouvrage sous l'effet de la houle centennale.

6. Conclusion

Le recours à l'aménagement d'un brise-lames en tubes géosynthétiques pour lutter contre l'érosion marine de la plage d'un hôtel luxueux à Tabarka en Tunisie représente une solution réversible, moins coûteuse et rapide à exécuter, comparée aux brise-lames en béton ou en enrochements.

Les justifications du dimensionnement des tubes élémentaires ont montré qu'ils sont stables vis-à-vis des sollicitations hydrodynamiques et que les valeurs de la résistance mécanique à la traction dans les deux directions axiale et circonférentielle sont inférieures à la résistance à la rupture adoptée.

Par ailleurs, les justifications du dimensionnement du brise-lames ont montré sa stabilité interne et externe pendant plus de 20 ans, et ce vis-à-vis des houles centennales.

Le brise-lames garantit un coefficient de transmission de la houle de moins de 50 %, qui correspond à une houle transmise de 1,9 m pour une récurrence centennale. Ce qui permet de limiter de façon significative l'érosion de la plage et contribue ainsi au rechargement naturel.

7. Références bibliographiques

- Bezuijen A., Vastenburg E.W. (2013). Geosystems. Design rules and applications; *CRC Press/Balkema, P.O. Box 447, 2300 Leiden, The Netherlands.*
- Briganti R., Panizzo A. (2007). Analysis of wave transmission behind low-crested wave breakers using neural networks. *Coast Eng 54(9):643–656.*
- Hyeong-Joo Kim H.J., Jasmin J., Mission J.L. (2013). Finite element analysis of ground modification techniques for improved stability of geotubes reinforced reclamation embankments subjected to scouring, *The 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13), Jeju, Korea.*
- Leshchinsky D., Leshchinsky O. (1996). Geosynthetic confined pressurized slurry (GeoCoPS): Supplementary notes. *Technical report CPARGL-96-1, Waterways Experiment station, US Army Corps of Engineers., Washington DC, U.S.*
- Maritec, Sirius (2013). Régénération de la façade maritime de l'hôtel Tabarka beach, rapport sur l'Impact du projet sur l'environnement.
- Shin E.C., Oh Y.I. (2007). Coastal erosion prevention by geotextile tube technology, *Geotextiles and Geomembranes 25, 264-277.*
- Shin E.C., Ahn K.S., Oh Y.I., Das B.M. (2002). Construction and monitoring of Geotubes. *Proceedings of the Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, 469-473.*