



# Commune de Ste Maxime








Boulevard des Mimosas  
83120 SAINTE MAXIME

## Note de calcul : stabilité des digues immergées en géotubes

Septembre 2018 – Indice C



## DIAGNOSTIC DU LITTORAL DE SAINTE MAXIME PUIS ETUDE ET PRODUCTION D'UN PROJET D'AMENAGEMENT DU LITTORAL

Maîtrise d'œuvre			
Mandataire		Cotraitants	
<b>Bureau d'études ICTP</b> 90 avenue Notre Dame 06700 ST-LAURENT DU VAI. 	Lotissement Attaoufik Zénith II. Sidi Maarouf 20001 CASABLANCA - Maroc 	<b>SARL Allain CHAUVET</b> 4 rue Joseph Quaranta 83990 ST-TROPEZ 	
Sous-traitants			
<b>SCUBA Marine</b> 	<b>SEMANTIC</b> 	<b>Rémy MATTIOLI</b> Architecte DPLG 	<b>SDP Conseils</b> 
N° 16/02 – NDC Géotubes – Indice C			

**SOMMAIRE**

1. Préambule .....	3
2. Rappel des conditions hydrodynamiques .....	3
2.1 Climatologie de houle .....	3
2.2 Niveaux d'eau .....	4
3. Rappel du projet.....	5
4. Methodologie .....	5
4.1 Calcul des efforts de la houle sur les géotubes et stabilité externe .....	5
4.1.1 Présentation des formules .....	5
4.1.2 Houle de projet .....	6
4.1.3 Calculs de stabilité .....	7
4.2 Protection contre les affouillements .....	8
4.3 Dimensionnement de l'enveloppe géo-synthétique .....	9
4.3.1 Résistance à la traction.....	9
4.3.2 Perméabilité.....	9
4.3.3 Ouverture de filtration de l'enveloppe.....	10
4.3.4 Espace entre cheminées de remplissage et d'exhaure .....	10
4.4 Durabilité de l'ouvrage dans le temps .....	10
4.4.1 Résistance aux ultra-violets .....	11
4.4.2 Résistance chimique.....	11
4.4.3 Résistance aux agressions physiques .....	11
4.4.4 Précautions contre les aléas .....	12
5. Synthèse et recommandations.....	12
6. Références bibliographiques.....	12

**TABLES DES FIGURES ET TABLEAUX**Figures

Figure 1 : Houle annuelle de secteur Est [090°N ; Hs large : 2,7m ; Tp : 7,2s ; niveau d'eau : +0,6m IGN69] - ICTP, 2017 .....	4
Figure 2 : Vue en coupe de de la digue submergée en géotextile proposée pour la Nartelle Nord (ICTP, 2017) .....	5
Figure 3 : Schématisation des forces sur un géotube immergé .....	7

Tableaux

Tableau 1: Résultats du modèle d'approche sur le secteur de la Nartelle nord (ICTP, 2017) .....	4
Tableau 2 : Niveaux d'eau extrêmes (CETMEF, 2013) .....	4
Tableau 3 : Données d'entrée (houle et ouvrage) pour les calculs de stabilité .....	7
Tableau 4 : Calcul des efforts sur l'horizontale .....	8
Tableau 5 : Calcul des efforts sur la verticale .....	8
Tableau 6 : Caractéristiques granulométriques du sable de remplissage .....	10

## 1. PREAMBULE

Dans le cadre du projet d'aménagement des plages la plage de Sainte Maxime, la mise en place d'ouvrages immergés (digues) est prévue pour stabiliser les plages et limiter les franchissements notamment durant les tempêtes.

Durant la phase AVP, Il a été prévu d'implanter les ouvrages en géotubes suivants (ICTP, 2017) :

- Secteur Nartelle Nord : 1 digue submergée (100ml) ;
- Secteur Croisette Sud : 3 digues submergée (85ml tronçon Nord, 40ml tronçon central, 100ml tronçon Sud soit 225ml total).

Les plans et coupes des ouvrages sont présentés en Annexe.

Du fait de son orientation plein Est, la plage de la Croisette est sujette à des conditions hydrodynamiques relativement élevées et les ouvrages seront soumis à des efforts hydrodynamiques importants, à la fois sur le secteur Nord et Sud.

La présente note vise à :

- Déterminer la stabilité externe des ouvrages à la houle (approche analytique) ;
- Déterminer la protection contre les affouillements (voir Annexe 1 – Note de calcul : justification technique des ouvrages immergés de la plage de la Nartelle) ;
- Déterminer le dimensionnement de l'enveloppe géo-synthétique ;

La note se décompose comme suit : un rappel des conditions hydrodynamiques (chapitre 2) et du projet (Chapitre 3), une partie méthodologie avec présentation des formules (Chapitre 4), suivi d'une partie résultats subdivisée en fonction des calculs réalisés (chapitre 4). Enfin, une synthèse et des recommandations sont présentés (Chapitre 5).

## 2. RAPPEL DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

### 2.1 Climatologie de houle

Les conditions de houle pour les secteurs directionnels du NNE au SSE ainsi que différentes périodes de retour ont été déterminées dans une phase antérieure du projet (ICTP, 2017), et sont reprises dans le Tableau 1. Le rapport AVP a notamment mis en avant :

- Le secteur le plus pénalisant correspond au secteur Est (090°N) ;
- Les valeurs de houle à la côte varient entre 2,0m et 3,1m pour des conditions annuelles et décennales, respectivement.

La propagation d'une houle annuelle d'Est, illustrée dans la Figure 1 (gauche) montre clairement que la houle impacte le secteur de la Croisette avec un faible amortissement. L'effet des ouvrages immergés (arasés à -1m NGF) est clairement visible dans la figure de droite.

<i>Incidence</i>	<i>Période de retour</i>	<i>H<sub>s, large</sub> [m]</i>	<i>T<sub>p, large</sub> [s]</i>	<i>H<sub>s, côte</sub> [m]</i>	<i>T<sub>p, côte</sub> [s]</i>	<i>C<sub>a</sub> [-]</i>	<i>Θ - Angle d'incidence [°N]</i>	<i>Z [IGN69]</i>
<i>Est (090°N)</i>	<i>1 an</i>	<i>2,7</i>	<i>7,2</i>	<b><i>2,0</i></b>	<b><i>7,2</i></b>	<i>0,75</i>	<i>88</i>	<i>-5,9m</i>
	<i>10 ans</i>	<i>4,4</i>	<i>8,7</i>	<b><i>3,1</i></b>	<b><i>8,7</i></b>	<i>0,70</i>	<i>86</i>	<i>-5,9m</i>
	<i>30 ans</i>	<i>5,2</i>	<i>9,4</i>	<b><i>3,4</i></b>	<b><i>9,4</i></b>	<i>0,70</i>	<i>86</i>	<i>-5,9m</i>
	<i>50 ans</i>	<i>6,0</i>	<i>10,1</i>	<b><i>3,8</i></b>	<b><i>10,1</i></b>	<i>0,64</i>	<i>85</i>	<i>-5,9m</i>
	<i>100 ans</i>	<i>6,6</i>	<i>10,8</i>	<b><i>4,2</i></b>	<b><i>10,8</i></b>	<i>0,63</i>	<i>85</i>	<i>-5,9m</i>

Tableau 1: Résultats du modèle d'approche sur le secteur de la Nartelle nord (ICTP, 2017)

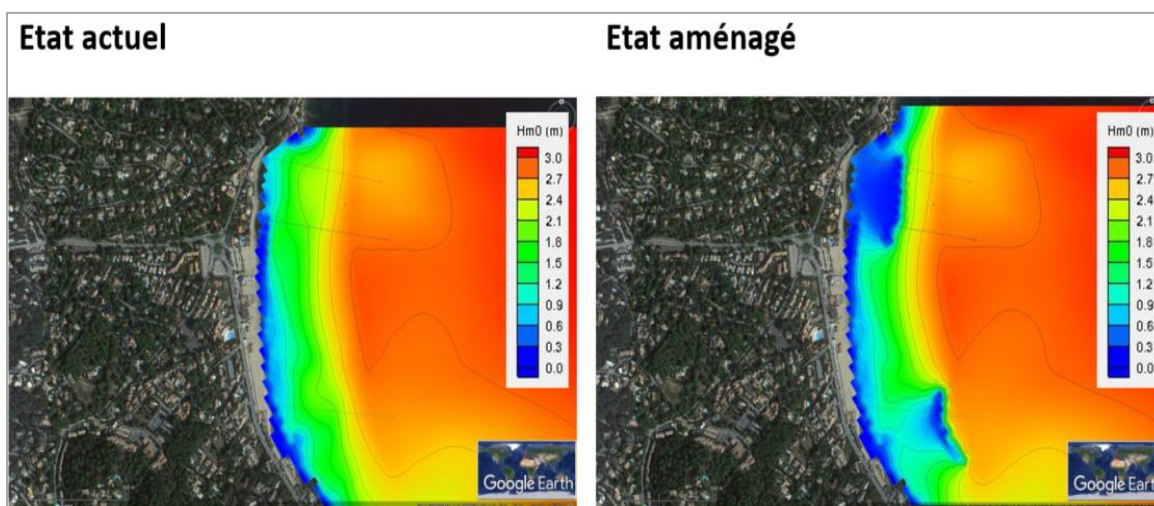


Figure 1 : Houle annuelle de secteur Est [090°N ; H<sub>s</sub> large : 2,7m ; T<sub>p</sub> : 7,2s ; niveau d'eau : +0,6m IGN69] - ICTP, 2017

La durée de vie de l'ouvrage étant prévue à 30 ans, le dimensionnement (calculs de stabilité) prendra en compte des conditions de houle cinquantennales.

## 2.2 Niveaux d'eau

Le dimensionnement des ouvrages prendra en compte un niveau extrême correspondant à une période de retour cinquantennale.

<i>Période de retour</i>	<i>Niveau d'eau (m, IGN69)</i>
<i>1 an</i>	<i>0,6</i>
<i>10 ans</i>	<i>0,8</i>
<i>30 ans</i>	<i>0,9</i>
<i>50 ans</i>	<i>1,0</i>
<i>100 ans</i>	<i>1,2</i>

Tableau 2 : Niveaux d'eau extrêmes (CETMEF, 2013)

### 3. RAPPEL DU PROJET

L'ouvrage ci-dessous a été prévu dans le cadre de l'AVP sur la partie Nord de la plage de la Nartelle.

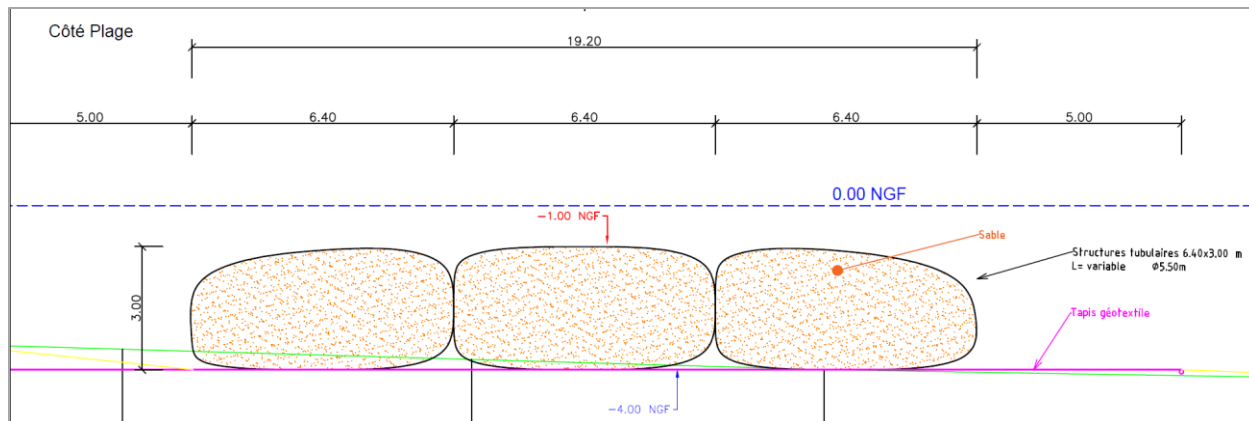


Figure 2 : Vue en coupe de de la digue submergée en géotextile proposée pour la Nartelle Nord (ICTP, 2017)

### 4. METHODOLOGIE

#### 4.1 Calcul des efforts de la houle sur les géotubes et stabilité externe

##### 4.1.1 Présentation des formules

La détermination des efforts de la houle sur une structure cylindrique immergée (géotube isolé de 6m de large et 3m de haut) est réalisée en appliquant la formule de Morrison en écoulements non permanents. Celle-ci comprend deux termes distincts représentatifs des deux types d'efforts qui sont exercés sur la structure :

- Une force de traînée proportionnelle au carré de la vitesse des particules d'eau environnantes. Ce terme représente les efforts liés aux perturbations des écoulements à l'arrière de la structure.

$$F_t = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot C_d \cdot V^2$$

- Une force d'inertie proportionnelle à l'accélération des particules d'eau environnantes de la structure. Ce terme correspond à la perturbation des déplacements de la masse d'eau environnante.

$$F_i = \rho \cdot C_M \cdot W \cdot (dV/dt)$$

Afin de déterminer chacun de ces termes, on utilisera le modèle de houle d'Airy se propageant en houle peu profonde. Les équations qui régissent alors les mouvements des particules d'eau sont les suivantes :

$$X=X_0 - a \operatorname{ch}[k(Z_0+h)] / \operatorname{sh}(kh) \cdot \sin(kX_0-\omega t)$$

$$Z=Z_0 + a \operatorname{ch}[k(Z_0+h)] / \operatorname{sh}(kh) \cdot \cos(kX_0-\omega t)$$

Avec :

$a = H/2 =$  amplitude de la houle

$k = 2\pi/\lambda$

$\omega = 2\pi/T$

$h =$  hauteur d'eau

A partir de ces formules, on peut aisément retrouver la vitesse et l'accélération des particules d'eau au voisinage de la conduite.

La variable CM correspond à un coefficient de masse ajouté :

$$CM=1+Cm$$

Pour une ellipsoïde, comme c'est le cas ici, on peut prendre  $Cm=1$  et donc  $CM=2$

La variable Cd se détermine à partir de diagrammes paramétrés par le nombre de Reynolds :

$$Re = a \cdot \omega \cdot D / \nu$$

Avec :

$a =$  amplitude du mouvement des particules d'eau

$\omega = 2\pi/T$

$D =$  diamètre de l'ouvrage

$\nu = 10^{-6} =$  viscosité cinématique

La valeur de Cd sera donc déterminée dans chaque configuration de houle et de profondeur.

#### 4.1.2 Houle de projet

L'ouvrage en géotube devra être en mesure de résister à une houle de période de retour de 50 ans. Cette houle a les caractéristiques suivantes au niveau de l'ouvrage (à 550m du trait de côte soit légèrement en amont de l'ouvrage) :

- **Hauteur significative : 3,8 m**
- **Période : 10,1 s**

### 4.1.3 Calculs de stabilité

Les calculs permettent de vérifier la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis des efforts cités ci-dessus. La stabilité de l'ouvrage au renversement est vérifiée. Les forces s'exerçant sur le géotube sont illustrées dans la Figure 3.

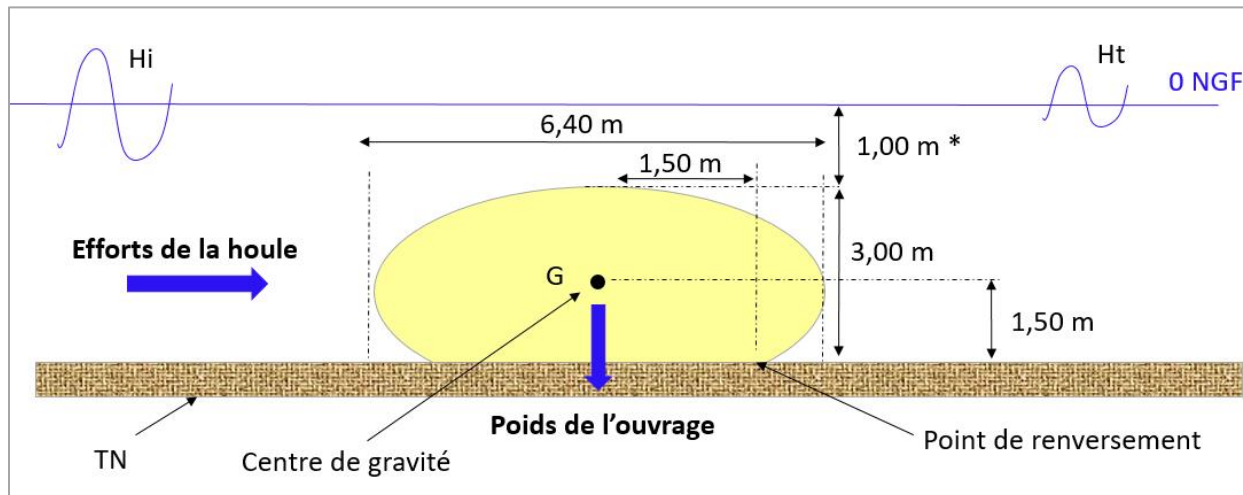


Figure 3 : Schématisation des forces sur un géotube immergé

Les données d'entrée (conditions hydrodynamiques pour une période de retour cinquantennale et caractéristiques de l'ouvrage) sont présentées dans le Tableau 3.

Les résultats des calculs sont présentés dans le Tableau 4 et le Tableau 5 pour les efforts sur l'horizontale et la verticale, respectivement. **Les efforts de houle maximum sur l'horizontale sont de 2,47 T/ml (Tableau 4) et les efforts de houle maximum sur la verticale sont de 0,32 T/ml.**

**Les résultats montrent la stabilité de l'ouvrage, avec un rapport de 5 entre les moments de renversement et le moment résistant.** Par ailleurs, l'accolement de deux géotubes à proximité immédiate du premier ne pourra qu'améliorer la stabilité de l'ensemble, chacun des tubes permettant la protection de l'autre vis à vis des courants de houles.

Paramètres	Unité	Valeur
Hauteur de houle	[m]	3,8
Période	[s]	10,1
Longueur d'onde	[m]	61
Hauteur d'eau	[m]	5
Hauteur du géotube	[m]	3
Distance du point de retournement	[m]	1,5
Poids du géotube	[T]	15,2
Profondeur centre gravité	[m]	3,5

Tableau 3 : Données d'entrée (houle et ouvrage) pour les calculs de stabilité

Paramètres	Unité	Valeur
Amplitude	[ m ]	3,57
Vitesse	[m/s]	2,25
Accélération	[m/s <sup>2</sup> ]	1,41
R <sub>e</sub>	[-]	6 735 441
K <sub>c</sub>	[-]	7,48
Béta = Re/Kc		900 000
C <sub>m</sub>		1,0
C <sub>dx</sub>		2,0
Force de trainée (N)	[N/ml]	12 412
Force de trainée (Kg)	[N/Kg]	1 265
Force d'inertie (N)	[N/ml]	20 842
Force d'inertie (Kg)	[N/Kg]	2 125
<b>Effort de houle max</b>	<b>[T/ml]</b>	<b>2,47</b>
<b>Poids du géotube dans l'eau</b>	<b>[T/ml]</b>	<b>15,20</b>
<b>Moment de renversement</b>	<b>[T, m/ml]</b>	<b>4,19</b>
<b>Moment résistant</b>	<b>[T, m/ml]</b>	<b>22,80</b>
<b>Conclusion : renversement</b>	<b>STABLE</b>	

Tableau 4 : Calcul des efforts sur l'horizontale

Paramètres	Unité	Valeur
Amplitude	[ m ]	0,55
Vitesse	[m/s]	0,34
Accélération	[m/s <sup>2</sup> ]	0,22
R <sub>e</sub>	[-]	1 032 454
K <sub>c</sub>	[-]	1,15
Béta = Re/Kc	[-]	900 000
C <sub>m</sub>	[-]	1,0
C <sub>dx</sub>	[-]	2,0
<b>Force de trainée (N)</b>	<b>[N/ml]</b>	<b>365</b>
<b>Force de trainée (Kg)</b>	<b>[N/Kg]</b>	<b>37</b>
<b>Force d'inertie (N)</b>	<b>[N/ml]</b>	<b>3 136</b>
<b>Force d'inertie (Kg)</b>	<b>[N/Kg]</b>	<b>320</b>
<b>Effort de houle max</b>	<b>[T/ml]</b>	<b>0,32</b>

Tableau 5 : Calcul des efforts sur la verticale

## 4.2 Protection contre les affouillements

Les géotubes seront posés sur un substrat sableux, sensible aux affouillements. Les affouillements seront particulièrement importants dans le cas du déferlement de la houle à proximité directe de l'ouvrage (effet recherché).



Les modélisations 1D du transport sédimentaire (XBeach) ont montré des profondeurs d'affouillement côté mer pouvant atteindre 0,5m dans le cas d'une tempête annuelle (voir Annexe 1 – Note de calcul : justification technique des ouvrages immergés de la plage de la Nartelle).

Il est donc primordial d'installer les tubes sur un tapis anti-affouillement, ancré et lesté en extrémité par un petit tube assurant rigidité relative et lestage du tapis.

### 4.3 Dimensionnement de l'enveloppe géo-synthétique

Le dimensionnement d'un tube géotextile doit être réalisé selon les règles de l'art. De façon générale la résistance à la traction maximale de l'enveloppe est mobilisée en phase de remplissage et dépend :

- De la pression de gonflage
- Du taux de remplissage de l'enveloppe synthétique.

#### 4.3.1 Résistance à la traction

La résistance à la traction est évaluée à l'aide de l'abaque de Silvester (1986) fournissant la résistance à la traction en fonction des caractéristiques géométriques de l'ouvrage.

Dans le cas d'un tube de l'ouvrage atténuateur de 3 m de haut et de périmètre égal à 15 m, rempli de sable de mer sous forme de remblai hydraulique, la résistance ultime mobilisée lors du remplissage est de 42kN/m.

Pour assurer un bon niveau de durabilité d'un géo-synthétique, il est nécessaire de prendre en compte, par des coefficients partiels représentatifs :

- De la résistance des coutures ;
- Du fluage sous contrainte de l'enveloppe ;
- De l'endommagement à la mise en œuvre ;
- De l'agressivité chimique de l'environnement dans lequel est immergé le tube.

Le coefficient global couramment utilisé pour prendre en compte ces éléments est de  $F = 3$ .

Compte tenu des enjeux sur la partie nord de la plage de la Nartelle, le maître d'œuvre propose d'adopter un coefficient global de 4.

**La résistance à la traction ultime du géo-synthétique implanté sur la plage de la Nartelle sera alors supérieure ou égale à 170kN/ml en sens production et en sens travers.**

#### 4.3.2 Perméabilité

La perméabilité du géo-synthétique à mettre en œuvre dépend du mode d'exécution des travaux. Celle-ci peut être faible si des cheminées de rejet de l'eau pompée sont installées sur le tube à remplir.

#### 4.3.3 Ouverture de filtration de l'enveloppe

Compte tenu de la nature des sables disponibles sur la zone de projet, l'ouverture de filtration devra être suffisamment faible pour retenir les particules fines du sable. Il est prévu que le sable utilisé aura des caractéristiques compatibles avec le modèle suivant :

D00	0.02 à 0.05
D05	0.05 à 0.10
D16	0.10 à 0.20
D50	0.15 à 0.30
D84	0.20 à 0.40
D95	0.30 à 1.10

Tableau 6 : Caractéristiques granulométriques du sable de remplissage

Une ouverture de filtration comprise entre 50 µm et 110 µm apparaît satisfaisante.

Compte tenu de la granulométrie des sédiments des plages de la Croisette, de la Nartelle et de l'embouchure du Préconil, D50 = 500 µm environ, des tests seront réalisés pour s'assurer de la compatibilité de ces matériaux pour le remplissage des géotubes.

#### 4.3.4 Espace entre cheminées de remplissage et d'exhaure

La distance entre une cheminée d'injection et une cheminée d'exhaure doit être suffisante pour permettre aux matériaux les plus fins de décanter. Ce principe de dimensionnement s'appuie sur la vitesse de chute des particules et sur la vitesse du courant de remplissage.

$$L = Q/(W*Vs)$$

Avec les notations suivantes :

- L : distance entre deux cheminées
- Q : Débit solide
- W : section hydraulique de l'écoulement
- Vs vitesse de chute des sédiments.

Une application numérique indique que les cheminées espacées de plus de 11 m permettront une décantation satisfaisante des matériaux.

### 4.4 Durabilité de l'ouvrage dans le temps

Un ouvrage de type tube en géotextile est constitué d'un matériau de remplissage inerte (sable) et d'un matériau de conteneurisation ou d'enveloppe (géotextile).

La résistance du tube aux agressions est généralement liée à celle de l'enveloppe. Celle-ci doit en effet résister à de multiples contraintes.

**De façon générale, il est considéré que la durée de vie d'un tube textile réalisé et mis en œuvre selon les règles de l'art est de l'ordre de 30 à 40 ans.**

#### 4.4.1 Résistance aux ultra-violets

Le géotextile est un matériau textile plan et perméable fabriqué à partir de matière naturelle (fibres coco, jute, etc.) ou synthétique (généralement : polyester, polypropylène ou polyéthylène). Ces synthétiques sont des matériaux polymérisés à partir de monomères. Les liaisons entre les monomères peuvent être cassées par l'apport énergétique du rayonnement UV.

De façon générale, ces matériaux sont stabilisés contre les UV par des produits de type noir de carbone et par des antioxydants. La résistance aux U.V. est d'autant plus importante que les filaments utilisés pour la fabrication du textile ont un diamètre important.

Par ailleurs, ils sont conçus pour l'utilisation dans des ouvrages géotechniques, enterrés ou immergés, à l'abri du rayonnement U.V. Certains fabricants garantissent leurs géotextiles 120 ans dans les sols.

Dans le cadre du projet, la lame d'eau au-dessus des enveloppes sera de l'ordre de 1 à 2 m en fonction du climat de houle. Il est considéré généralement qu'une tranche d'eau de 0,8 m est suffisante pour arrêter le rayonnement U.V. actif sur les chaînes polymériques. En outre, cette enveloppe sera rapidement colonisée par des algues qui, formant une double peau, auront aussi une fonction de protection U.V.

#### 4.4.2 Résistance chimique

Les polymères généralement utilisés (PET, PP, PE) sont des matériaux stables dans les conditions de mise en œuvre du Lido. Seul le polyester a une sensibilité (possibilité d'hydrolyse) face aux eaux basiques (au-delà de pH = 8,5).

Par mesure de précaution, il sera spécifié un matériau en polypropylène ou en polyéthylène comme base de l'enveloppe des tubes.

#### 4.4.3 Résistance aux agressions physiques

Dans la majorité des cas, les dommages infligés aux tubes sont le résultat de vandalisme et/ou de corps flottés. La position de ces tubes (Croisette : 70 m du trait de côte par 4,50 à 5,00 m NGF de fond ; Nartelle : 120 m du trait de côte par 3,75 m NGF de fond) les met hors de portée du vandalisme ordinaire.

Dans le cadre du projet, la position entièrement immergée des tubes les met à l'abri de la majorité des débris et corps flottés qui seraient susceptibles de les endommager.

Pour s'assurer de l'efficacité des géotubes, les modélisations hydrodynamiques ont été faites avec une arase à -1 m NGF. En prenant en compte le tassement des géotubes, il est préconisé que lors de leur mise en place l'arase supérieure des géotubes soit au-dessus de cette cote. Suivant les dimensions des différents tubes (diamètres) certains d'entre eux sont positionnés à -0.85 m NGF, ce qui permettra de garantir la cote de -1 m NGF après tassement.

La signalisation de la présence des ouvrages auprès des services compétents devra être faite pour sécuriser la navigation aux alentours des plages. Par ailleurs, il reste toujours possible de mettre en place des bouées ou balises à cet effet.

Note : Un tube localement endommagé est réparable par moyens simples et à faible coût. Une inspection et un entretien réguliers doivent être mis en œuvre.

#### 4.4.4 Précautions contre les aléas

Comme tout ouvrage, les tubes textiles peuvent être soumis à des aléas. De façon à en limiter l'effet, les tubes ne seront pas des pièces continues de 2400 m de longueur, mais des successions de tubes de longueur unitaire comprise entre 20 m et 40 m. Ce « fractionnement » limite l'extension et la progression d'un défaut sur le linéaire de l'opération.

L'existence de deux lignes permet d'en conserver une, d'efficacité moindre mais non nulle, en cas de défaillance ou destruction de la première.

## 5. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Dans le cadre du dimensionnement des ouvrages immergés en géotubes de la plage de la Nartelle, des calculs de stabilité externe et interne ont été réalisés.

Les résultats ont mis en avant :

- Des efforts de houle maximum de 2,47 T/ml sur l'horizontale et de 0,32 T/ml sur la verticale ;.
- La stabilité de l'ouvrage, avec un rapport de 5 entre les moments de renversement et le moment résistant.

La résistance à la traction ultime du géo-synthétique devra être supérieure ou égale à 170kN/ml en sens production et en sens travers.

Les tubes devront être posés sur un tapis anti-affouillement, ancré et lesté en extrémité par un petit tube assurant rigidité relative et lestage du tapis.

## 6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ICTP, 2017. Diagnostic du littoral de Sainte Maxime puis étude et production d'un projet d'aménagement du littoral : Rapport d'Avant-Projet / Tous Secteurs – Indice A.

Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., Schaaf, S. A. 1950. The force exerted by surface waves on piles. Petroleum Transactions, American Institute of Mining Engineers, 189: 149–154, doi:10.2118/950149-G.