



Ville de Sainte-Maxime

Commune de Sainte Maxime









Boulevard des Mimosas
83120 SAINTE MAXIME

PHASE PROJET Note de calcul : dimensionnement des enrochements

Juin 2018 – Indice B



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

Maîtrise d'œuvre			
Mandataire	Cotraitant		Cotraitant
Bureau d'études ICTP 90 avenue Notre Dame 06700 ST-LAURENT DU VAR 	ERAMM 06901 SOPHIA ANTIPOLIS Cedex 	ERAMM Conseil en Environnement et Génie côtier	SARL Allain CHAUVET 4 rue Joseph Quaranta 83990 ST-TROPEZ 
Sous-traitants			
SCUBA Marine 	SCUBA MARINE TRAVAIL EN MER 	SEMANTIC 	Rémy MATTIOLI – Architecte DPLG 
			SDP Conseils 

N° 16/02 – NDC dimensionnement enrochements – Indice B

SOMMAIRE

1. Dimensionnement des ouvrages en enrochements.....	3
1.1. Préambule.....	3
1.2. Dimensionnement.....	3
1.2.1. Rappel sur les processus d'établissement de profil de digue.....	3
1.2.2. Hypothèses générales pour le dimensionnement des ouvrages.....	4
1.2.3. Dimensionnement de la carapace d'une digue en enrochements.....	6
1.2.4. Dimensionnement du filtre support d'une digue.....	7
1.2.5. Dimensionnement des épaisseurs de couches de matériaux.....	7
1.2.6. Dimensionnement de la butée de pied.....	7
1.2.7. Dimensionnement de la crête de l'ouvrage.....	7
1.2.8. Récapitulatif du dimensionnement des ouvrages.....	8

Tableaux

Tableau 1: Conditions de houles retenues au large de Sainte-Maxime en entrée du modèle d'approche (ERAMM 2016).....	4
Tableau 2 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Croisette.....	5
Tableau 3 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Centre-Ville.....	5
Tableau 4 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Sortie de Ville.....	5
Tableau 5 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Nartelle.....	5
Tableau 6 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Nartelle.....	5
Tableau 7 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Garonnette.....	5
Tableau 8 : Caractéristiques des ouvrages en enrochement Plage de la Croisette.....	8
Tableau 9 : Caractéristiques des ouvrages en enrochement Plage de la Nartelle.....	9

1. DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES EN ENROCHEMENTS

1.1. Préambule

L'avant-projet d'aménagement du littoral de Sainte-Maxime nécessite la réalisation d'ouvrage de protection en enrochements.

Afin de déterminer précisément les caractéristiques de ces différents ouvrages de protection, il a été établi cette annexe permettant de dimensionner les ouvrages en fonction des différentes caractéristiques hydrodynamiques de chaque zone.

Ce document définit la méthodologie de dimensionnement des ouvrages : les résultats seront définis dans le projet.

1.2. Dimensionnement

1.2.1. Rappel sur les processus d'établissement de profil de digue

Le dimensionnement d'un ouvrage de protection contre les houles se déroule sur plusieurs critères importants permettant de définir ces ouvrages. Ces critères sont indiqués ci-dessous :

- a) Détermination des conditions climatiques au large. Généralement on définit les hauteurs de houles H_s , $H_{1/10}$ et H_{max} ainsi que les périodes T_p suivant les différentes provenances géographiques. Ces données sont normalement extrapolées de mesures in situ ou de modèles de prévisions météorologiques. Elles sont ensuite raccrochées à une période de retour événementiel, on parle ainsi de conditions annuelles (houle qui revient en principe tous les ans), décennales (tous les 10 ans), cinquantennales (50 ans) et centennales (100 ans).
- b) Détermination du niveau moyen des eaux au repos à savoir les plus basses eaux (communément appelé zéro hydrographique) ainsi que des différentes marées (astronomique, ...) et des surcotes événementielles.
- c) Une fois ces données établies, le maître d'ouvrage détermine avec le maître d'œuvre les conditions pour lesquelles l'ouvrage devra rester sain sans dommage. Ces conditions peuvent varier en fonction du degré de protection voulue, des installations situées à l'arrière de l'ouvrage, du montant des travaux, du montant des éventuels entretiens à réaliser...
- d) En règle générale, pour un ouvrage portuaire sans risques majeurs, on dimensionne l'ouvrage pour un événement cinquantennal ; en cas de risques très importants, on peut étendre la protection à un niveau centennal.
- e) Ensuite par des modèles mathématiques et des simulations de propagation de houle depuis le large vers l'ouvrage de protection en fonction de la bathymétrie des fonds, on détermine la houle (hauteur, période, direction) qui s'abat sur l'ouvrage : en effet, par exemple, la houle peut déferler avant l'ouvrage et diminuer en intensité ou alors s'amplifier dans des zones de convergences...
- f) Cette houle de projet ainsi déterminée permet de dimensionner la carapace de l'ouvrage. Ce dimensionnement s'établit en fonction de sa pente, sa composition (enrochements naturels, blocs artificiels, ...) afin de subir un pourcentage de dégât maximum pour l'évènement considéré.
- g) Une fois la carapace choisie, on définit ensuite le filtre support situé sous la carapace.

- h) Le noyau de l'ouvrage est généralement constitué de matériaux dit TVC Tout Venant de Carrière de granulométrie 0 à 500 kg. Suivant la catégorie du filtre support, il doit être envisagé la réalisation de filtre de transition afin d'éviter la perte de matériau : ces filtres de transition ne sont pas forcément nécessaires.
- i) Un sous-bassement et une fondation sous la digue peut être mis en place à l'aide de matériaux dans l'éventualité où l'on disposerait de grande quantité de matériaux (issus de dragage éventuellement) pour rehausser légèrement les fonds et diminuer d'éventuels tassements.
- j) Une fois ce profil de protection établi (carapace, filtre support, filtre de transition et noyau), il doit être déterminé l'ancrage dans le fond ou la butée de pied à mettre en place au pied de l'ouvrage côté mer.
- k) En parallèle de la détermination de la carapace, on définit l'arase supérieure de la digue en fonction des franchissements admissibles.

1.2.2. Hypothèses générales pour le dimensionnement des ouvrages

1.2.2.1. Conditions de houles au large de Sainte-Maxime

A partir de la base de données de l'Atlas Numérique d'États de Mer Océaniques et Côtiers (ANEMOC), il a pu être établi les conditions de houles au large par direction ainsi que les élévations du niveau de la mer.

Conditions de Houles au large par direction						
Direction	Caractéristiques	Période de retour	1 an	10 ans	50ans	100ans
NNE 30°N	Houle significative	H _s (en m)	2,42	3,68	4,49	4,83
	Période	T _p (en s)	6,9	8,1	8,8	9,1
ENE 60°N	Houle significative	H _s (en m)	2,66	3,78	4,77	5,22
	Période	T _p (en s)	7,1	8,2	9,1	9,5
Est 90°N	Houle significative	H _s (en m)	2,68	4,41	5,93	6,64
	Période	T _p (en s)	7,2	8,7	10,1	10,8
ESE 120°N	Houle significative	H _s (en m)	2,65	3,55	4,21	4,5
	Période	T _p (en s)	7,6	8,6	9,2	9,5
SSE 150°N	Houle significative	H _s (en m)	2,65	3,68	4,37	4,67
	Période	T _p (en s)	7,6	8,7	9,4	9,7
Sud 180°N	Houle significative	H _s (en m)	2,74	3,74	4,33	4,58
	Période	T _p (en s)	7,7	8,8	9,4	9,6
Élévation du niveau de la mer		Ne (en mCM)	+0,70 mCM	+ 0,90mCM	+1,10mCM	+1,3mCM

Tableau 1: Conditions de houles retenues au large de Sainte-Maxime en entrée du modèle d'approche (ERAMM 2016)

1.2.2.2. Conditions de houles au niveau de chaque plage

Les modélisations de propagation réalisées en phase avant-projet ont permis de définir les houles au niveau des différentes plages.

Ainsi, nous retiendrons les valeurs suivantes pour les différentes plages :

Secteur CROISETTE : Plage de la CROISETTE					
Période de retour		1 an	10 ans	50ans	100ans
Houle significative à l'approche de la plage	H _s (en m)	1,47	2,31	3,04	3,44
Période	T _p (en s)	7,2	8,7	10,1	10,8
Direction	Dir (en °N)	105	107	109	110

Tableau 2 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Croisette

Secteur CENTRE-VILLE : Plage du Centre-Ville					
Période de retour		1 an	10 ans	50ans	100ans
Houle significative à l'approche de la plage	H _s (en m)	1,03	1,71	2,52	2,85
Période	T _p (en s)	7,2	8,7	10,1	10,8
Direction	Dir (en °N)	124	126	127	128

Tableau 3 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Centre-Ville

Secteur SORTIE DE VILLE : Plage du Saint-hilaire					
Période de retour		1 an	10 ans	50ans	100ans
Houle significative à l'approche de la plage	H _s (en m)	0,85	0,85	0,85	0,88
Période	T _p (en s)	7,1	8,7	10,1	10,8
Direction	Dir (en °N)	132	132	132	132

Tableau 4 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Sortie de Ville

Secteur NARTELLE : Plage de la Nartelle SUD					
Période de retour		1 an	10 ans	50ans	100ans
Houle significative à l'approche de la plage	H _s (en m)	1,86	3,00	3,43	4,29
Période	T _p (en s)	7,2	8,7	10,1	10,8
Direction	Dir (en °N)	75	74	73	73

Tableau 5 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Nartelle

Secteur NARTELLE : Plage de la Nartelle NORD					
Période de retour		1 an	10 ans	50ans	100ans
Houle significative à l'approche de la plage	H _s (en m)	2,00	3,07	3,42	4,18
Période	T _p (en s)	7,2	8,7	10,1	10,8
Direction	Dir (en °N)	88	86	85	85

Tableau 6 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Nartelle

Secteur EST : Plage de la Garonnette					
Période de retour		1 an	10 ans	50ans	100ans
Houle significative à l'approche de la plage	H _s (en m)	2,04	2,70	3,42	3,94
Période	T _p (en s)	7,6	8,6	10,1	10,8
Direction	Dir (en °N)	131	131	125	126

Tableau 7 : Conditions de houle à la côte pour le secteur Garonnette

À la suite de ces modélisations, il a été retenu de se protéger contre une houle cinquantennale. D'après le « Guide des enrochements - Utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques - Version française du Rock Manual (2^{ème} édition) », un évènement de période de retour cinquantennale (50 ans) a 45% de chance de se produire durant ces 30 ans de vie, ce qui représente un bon compromis.

1.2.3. Dimensionnement de la carapace d'une digue en enrochements

Afin de dimensionner les blocs de carapaces de la digue, le guide des enrochements préconise d'utiliser la **formule de Van der Meer en eau très peu profonde** car la hauteur d'eau h est inférieure à 2 x la Houle significative H_s .

$$h/H_s < 2$$

Ainsi on utilise les formules suivantes :

Pour un déferlement plongeant $\xi_{s-1,0} < \xi_{cr}$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_{pl} \times P^{0.18} \times \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \times \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \times \xi_{s-1,0}^{-0.5}$$

Pour un déferlement glissant $\xi_{s-1,0} \geq \xi_{cr}$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = C_s \times P^{-0.13} \times \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \times \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \times \sqrt{\cot\alpha} \times \xi_{s-1,0}^p$$

Avec

$\xi_{s-1,0}$: paramètre de déferlement qui est calculé à partir de la période énergétique de la houle $T_{m-1,0}$

$$\xi_{s-1,0} = \tan \alpha / \sqrt{\frac{(2\pi H_s)}{(g T_{m-1,0}^2)}} \quad \text{et} \quad T_{m-1,0} = T_p / 1.1$$

ξ_{cr} : valeur critique du paramètre de déferlement qui est calculé

$$\xi_{cr} = \left[\frac{C_{pl}}{C_s} \times P^{0.31} \times \sqrt{\tan \alpha} \right]^{\frac{1}{P+0.5}}$$

$C_{pl} = 8.4$: coefficient

$C_s = 1.3$: coefficient

$P = 0.4$: paramètre de perméabilité nominale de l'ouvrage

$N = 7500$: nombre de vagues incidentes

$S_d = 4$ pour la section droite de l'ouvrage et $S_d = 2$ pour le musoir : niveau de dommage

$H_{2\%}$: Hauteur dépassée par 2% des hauteurs de vagues incidentes ($H_{2\%} = 1.22 \times H_s$)

$$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_{eau})}{\rho_{eau}} = \left(\frac{\rho_s}{\rho_{eau}} - 1\right)$$

ρ_s : densité enrochements : 2.6 t/m³

ρ_{eau} : densité eau de mer : 1.025 t/m³

$\cot\alpha = 3/2$: pente de la carapace à 3H/2V (3m horizontal pour 2m vertical)

D_{n50} : Dimension de l'enrochement moyen

L'application de ces formules nous permet ainsi de définir le diamètre nominal des enrochements.

1.2.4. Dimensionnement du filtre support d'une digue

Le filtre support sous les enrochements de carapace doit être choisi en fonction de la masse des enrochements. Le guide des enrochements définit le diamètre moyen du filtre support qui doit respecter la formule suivante :

$$\frac{D_{N50carapace}}{D_{N50filtre}} = 2.2$$

1.2.5. Dimensionnement des épaisseurs de couches de matériaux

Le guide des enrochements donne une formule pour la détermination de l'épaisseur de couches de matériaux :

$$E_p = n \times k_t \times D_{N50}$$

Avec n : Nombre de couches (2 dans ce cas)
 K_t : coefficient d'épaisseur de couche (1.4)

1.2.6. Dimensionnement de la butée de pied

Le guide des enrochements préconise que la butée de pied pour des carapaces en enrochements soit constituée de 3 blocs placés en avant de la carapace.

Les digues sous-marines n'étant pas hautes (seulement 2 blocs), il n'est pas nécessaire de créer des butées de pied pour celles-ci : la mise en place de filtre suffit.

1.2.7. Dimensionnement de la crête de l'ouvrage

Le guide des enrochements préconise que la largeur de la crête doit être suffisante pour permettre qu'au moins 3 blocs d'enrochements soient placés sur la crête : ceci permet un placement et une imbrication sécurisés des blocs. On optera pour 4 blocs en tête.

En principe, on détermine également des valeurs de franchissements s'effectuant sur l'ouvrage afin de déterminer la hauteur de la digue.

Dans nos différents cas, on considère que l'ouvrage peut être franchi et que la crête de digue doit être au niveau des différents structures avoisinantes.

Pour les digues sous-marines, afin de casser la houle, il est nécessaire que la digue soit arasée à la cote -1m NGF (calcul de propagation effectué).

1.2.8. Récapitulatif du dimensionnement des ouvrages

En fonction des différentes formules et recommandations, il est possible d'établir un tableau récapitulatif de la géométrie des ouvrages. Les dimensions des enrochements sont présentées dans le Tableau 8 et le Tableau 9 pour la plage de la Croisette et de la Nartelle, respectivement.

Pour les ouvrages de la plage de la Croisette, les enrochements de la carapace seront de catégorie 5 / 7 t (Tableau 8). Pour les ouvrages de la plage de la Nartelle, les enrochements de la carapace seront de catégorie 8 / 12 t (Tableau 9).

Désignation	Symbole	Plage de la CROISSETTE				
		Epi Sud	Epi Central	Epi Nord	Perré Nord	Digue sous-marine
Diamètre nominal moyen nécessaire de la carapace	DN _{50carapace}	1.378 m	1.378 m	1.378 m	0.74 m	1.378 m
Masse moyenne de l'enrochement carapace	MN _{50carapace}	6.8 t	6.8 t	6.8 t	1.04 t	6.8 t
Catégorie des enrochements de carapace		5 / 7 t	5 / 7 t	5 / 7 t	1 / 3 t	5 / 7 t
Epaisseur de la couche de carapace	2 couches	2.85 m	2.85 m	2.85 m	1.60 m	2.85 m
Largeur de la butée de pied de la carapace	3 blocs	4.30 m	4.30 m	4.30 m	2.30 m	4.30 m
Largeur de la crête minimale	4 blocs ou autres	5.70 m	5.70 m	5.70 m	2.30 m (3 blocs butés)	15.00 m (pour casser vague)
Diamètre nominal moyen du filtre support	DN _{50filtre}	-	-	-	-	0.62 m
Masse moyenne du filtre support	MN _{50filtre}	-	-	-	-	640 kg
Catégorie du filtre support		-	-	-	-	500 kg / 800kg
Epaisseur de la couche filtre support	2 couches	-	-	-	-	1.30 m

Tableau 8 : Caractéristiques des ouvrages en enrochement Plage de la Croisette

Plage de la NARTELLE		
Désignation	Symbole	Digue sous-marine
Diamètre nominal moyen nécessaire de la carapace	$D_{N50carapace}$	1.59 m
Masse moyenne de l'enrochement carapace	$M_{N50carapace}$	10.5 t
Catégorie des enrochements de carapace		8 / 12 t
Epaisseur de la couche de carapace	2 couches	3.30 m
Largeur de la butée de pied de la carapace	3 blocs	-
Largeur de la crête minimale	4 blocs ou autres	15.00 m (pour casser vague)
Diamètre nominal moyen du filtre support	$D_{N50filtre}$	0.72 m
Masse moyenne du filtre support	$M_{N50filtre}$	980 kg
Catégorie du filtre support		500 kg / 1500kg
Epaisseur de la couche filtre support	2 couches	1.50 m

Tableau 9 : Caractéristiques des ouvrages en enrochement Plage de la Nartelle