



Interreg



UNION
EUROPÉENNE



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional



Protection de la plage du Veillat

SYNTHESE DU PROJET



RESUME

Cette note rassemble les diverses conclusions et recommandations tirées des différents volets d'étude réalisés sur la plage du Veillat (études AVP du projet de protection et étude de recomposition spatiale).

Le projet final envisagé au stade AVP est présenté en réponse aux attentes exprimées par le Maître d'Ouvrage à travers les évolutions du cahier des charges initial, et selon les conclusions de la dernière phase d'étude complémentaire intégrant le volet de recomposition spatiale.

SOMMAIRE

1	REFERENCES	5
1.1	Récapitulatif des principaux rapports et rendus.....	5
1.2	Récapitulatif des réunions	6
1.3	Ouvrage de référence technique	6
2	OBJET DE L'ETUDE ET EVOLUTION DES REFLEXIONS ET DU CAHIER DES CHARGES.....	7
2.1	Contexte d'étude initial tiré du CCTP	7
2.2	Objectifs initiaux du projet.....	7
2.3	Réorientation des objectifs du programme et du déroulement de l'étude.....	7
3	RISQUE SUBMERSION	9
3.1	Références concernant les submersions et débits de franchissement	9
3.2	Première phase de l'étude du risque submersion : état actuel de référence	10
3.3	Seconde phase de l'étude du risque submersion : projet final	12
3.4	Analyse hydrosédimentaire du projet final.....	16
4	NATURE ET CONCEPTION DES OUVRAGES	18
4.1	Dimensionnement des blocs de carapace constituant les extensions sous-marines des épis	18
4.2	Validation de la stabilité : campagne d'essais sur modèle physique 2D en canal à houle.....	19
4.3	Plan et coupes des ouvrages	20
4.4	Ecoconception : modules artificiels en butée de pied.....	22
4.5	Ecoconception : dispositifs biomimétiques Sargass	23
5	ENVELOPPE ESTIMATIVE.....	26
5.1	Travaux maritimes.....	26

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

Figure 1 : seuils de hauteur d'eau et de vitesse d'écoulement favorisant le déplacement des personnes (guide PPR inondations, note complémentaire sur le ruissellement péri-urbain).....	9
Figure 2 : illustrations extraites de la vidéo de la tempête du 04 Mai 2010.....	10
Figure 3 : zones submergées et hauteur maximale atteinte par le niveau d'eau.....	10
Figure 4 : segments de contrôle où ont été calculés et extraits les franchissements et les lames d'eau.....	11
Figure 5 : vue en plan des aménagements envisagés dans le cadre de la recomposition spatiale et de la lutte contre le risque submersion.....	12
Figure 6 : segments de contrôle où ont été calculés et extraits les franchissements et les lames d'eau.....	13
Figure 7 : niveau de risque sur le cas actuel.....	14
Figure 8 : niveau de risque sur le cas projet.....	14
Figure 9 : estimation numérique du transport sur la situation actuelle (conditions du 04 Mai 2010).....	17
Figure 10 : estimation numérique du transport sur la situation projet (conditions du 04 Mai 2010).....	17
Figure 11 : Modèle physique : illustration du déferlement d'une vague au passage de la digue immergée (gauche) et au niveau du profil de plage (droite).....	19
Figure 12 : Modèle numérique (M3WFM) : champ de vitesses instantanées lors du passage d'une vague au-dessus de la digue immergée.....	20
Figure 13 : Vue en plan des ouvrages immergés (extensions des épis) et repérage des coupes.....	20
Figure 14 : profil en long de l'extension de l'épi Bonaparte.....	21
Figure 15 : coupe transversale de l'extension de l'épi Bonaparte.....	21
Figure 16 : profil en long de l'extension de l'épi Diana.....	21
Figure 17 : coupe transversale de l'extension de l'épi Diana.....	21
Figure 18 : dimensions et rendu 3D d'un module de pied de digue à disposer en section droite.....	22
Figure 19 : dimensions et rendu 3D d'un module de pied de digue à disposer en musoir (agencement courbe).....	22
Figure 20 : rendu 3D des modules disposés en pied de talus de l'extension sous-marine de l'épi Bonaparte (option 1 à gauche, option 2 à droite).....	23
Figure 21 : rendu 3D des modules disposés en pied de talus de l'extension sous-marine de l'épi Diana (option 1 à gauche, option 2 à droite).....	23
Figure 22 : dispositif Sargass implanté sur substrat meuble (à gauche) et sur substrat dur (à droite).....	24
Figure 23 : Emprise de principe de l'option 1 avec l'installation d'un dispositif linéaire de 93 modules Sargass destinés à réduire les vitesses hydrodynamiques à proximité du fond avant la plage sans impacter les zones de matte morte de l'herbier de posidonie..	24
Figure 24 : Emprise de principe de l'option 2 avec l'installation d'un dispositif linéaire de 205 modules Sargass destinés à réduire les vitesses hydrodynamiques à proximité du fond avant la plage.....	24
Figure 25 : Emprise de principe de l'option 3 avec les surfaces envisagées pour l'implantation des 400 boutures.....	25

1 REFERENCES

1.1 Récapitulatif des principaux rapports et rendus

- Etat des lieux des études existantes

[1] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2018, « Etat des lieux des études et données existantes » réf. CORSR-20-2017-EDL-01-0

- Etat des lieux de la bathymétrie, de la biocénose, et des matériaux sédimentaires

[2] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2018, « Levé topo/bathy et cartographie des biocénoses » réf. CORSR-20-2017-EDL-02-0

- Etude du fonctionnement hydrosédimentaire de la plage

[3] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2018, « Modélisation hydrosédimentaire » réf. 21802818

- Etude des solutions et des perspectives d'aménagement

[4] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2018, « Analyse des solutions et perspectives d'aménagements » réf. CORSR-20-2017-AVP-01-0

- Etude complémentaire écologique

[5] DHI-CORINTHE Ingénierie, P2A Dév., 2019, « Diagnostic écologique » réf. CORSR-20-2017-AVP-03-0

[6] DHI-CORINTHE Ingénierie, P2A Dév., 2019, « Notice d'écoconception » réf. CORSR-20-2017-AVP-02-0

[7] DHI-CORINTHE Ingénierie, P2A Dév., 2019, « Stratégie d'écoconception » réf. CORSR-20-2017-AVP-06-0

- Etude complémentaire du risque submersion

[8] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2019, « Etude du risque submersion » réf. CORSR-20-2017-AVP-04-1

- Etude complémentaire de recomposition spatiale

[9] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2020, « ANNEXE Etude du risque submersion » réf. CORSR-20-2017-AVP-05-1

[10] Agence GUILLERMIN-A&TU-CORINTHE Ingénierie, 2019, « Plan de masse » (et coupes associées) réf. 2019-10-07 PM

- Campagne d'essais en canal à houle sur modèle physique 2D

[11] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2020, « Rapport de campagne d'essais » réf. CORSR-20-2017-AVP-07-1

1.2 Récapitulatif des réunions

- [12] Réunion de démarrage le 31/08/2017 (réf. du compte-rendu : CORSR 20 - 2017_CR _20170831_V00)
- [13] Réunion de présentation des résultats d'étude du fonctionnement hydrosédimentaire le 29/03/2018
- [14] Réunion de recadrage des études le 15/06/2018 (réf. du compte-rendu : CORSR 20 - 2017_CR _20180615_V02)
- [15] Réunion de prise de contact amont avec la DDTM le 19/07/2018 (réf. du compte-rendu : CORSR 20 - 2017_CR _20180719_V00)
- [16] Réunion de présentation du diagnostic écologique et de réorientation des études et du projet le 21/01/2019 (réf. du compte-rendu : CORSR 20 - 2017_CR _20190121_V01)
- [17] Réunion de présentation de l'étude du risque submersion le 25/07/2019 (réf. du compte-rendu : CORSR 20 - 2017_CR _20190725_V00)
- [18] Réunion de présentation du scénario de recomposition spatiale en Mairie le 05/11/2019

1.3 Ouvrage de référence technique

- [19] CIRIA; CUR; CETMEF 2009, « Guide enrochement »

2 OBJET DE L'ETUDE ET EVOLUTION DES REFLEXIONS ET DU CAHIER DES CHARGES

2.1 Contexte d'étude initial tiré du CCTP

La commune de Saint-Raphaël, comme l'ensemble du littoral méditerranéen, a vu au cours de ces dernières années une aggravation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes maritimes.

Ces tempêtes ont des effets à court et à long terme.

A court terme, la submersion liée à l'intensité de la houle présente un danger pour les riverains et pour les biens situés à proximité.

A long terme, ces tempêtes répétées ont un effet néfaste favorisant l'érosion des secteurs exposés. Cette érosion, souvent accentuée par les aménagements d'origine anthropique (murs en front de mer, ouvrages portuaires et côtiers...), amoindrit le rôle tampon des plages naturelles et conduit à une augmentation des dommages sur les ouvrages lors des épisodes de tempêtes.

Il est donc apparu nécessaire d'examiner les solutions techniques et environnementales pour sauvegarder le littoral.

Fort de ce constat, la commune de Saint Raphaël s'est engagée à participer à la définition de la stratégie transfrontalière de lutte contre l'érosion du trait de côte dans le cadre d'un partenariat global à l'échelle Européenne (programme de collaboration Marittimo).

La commune, ayant pris les devants, a déjà fait réaliser plusieurs études pour ces plages du centre-ville, notamment la plage du Veillat. Depuis, la commune avait mis en attente la poursuite des projets du fait des investissements importants à prendre en charge.

L'aménagement et la protection de ces plages revêt par conséquent un intérêt majeur pour la poursuite et la pérennisation de l'attractivité de la commune.

Les enjeux sont extrêmement forts et prédisposeront les aménagements à envisager à moyen et long terme selon leur nature :

- Enjeux économiques : Diminution des charges courantes d'entretiens, pérennisation du statut balnéaire de la commune et de ses activités nautiques et estivales.
- Enjeu social : rendre possible un usage plus confortable des plages et des espaces publics de la zone, et ce, tout au long de l'année.
- Enjeu environnemental : réduire les effets de dispersion des rechargements annuels ainsi que leur nécessité, agir en faveur de la protection des milieux naturels connexes aux espaces balnéaires, préserver les écosystèmes marins au-delà des considérations éthiques pour maintenir puis renforcer leur fonctionnalité en matière notamment de défense contre l'érosion, de maintien de la qualité des eaux de baignade, de production halieutique.

2.2 Objectifs initiaux du projet

Ceux-ci sont indiqués comme suit au CCTP :

1. Protéger contre l'érosion de la plage du Veillat, en caractérisant les zones d'érosion et d'engraissement de la plage et connaître les solutions pouvant être mises en œuvre pour la stabilisation du trait de côte, en favorisant les procédés éco-technologiques (récifs artificiels).
2. Créer ou restaurer un écosystème riche et diversifié par l'implantation de ces récifs artificiels.

2.3 Réorientation des objectifs du programme et du déroulement de l'étude

La réorientation de l'étude et des objectifs du projet a été entreprise avec le Maître d'Ouvrage et les représentants MAREGOT au Département du Var à l'occasion de la réunion qui s'est tenue fin Janvier 2019 (ref [16]), notamment suite :

- au constat d'absence d'érosion réalisé au cours des premières phases d'étude portant sur l'évolution historique du site et de ses aménagements successifs, confirmé par l'analyse du fonctionnement hydrosédimentaire de la plage dans sa configuration actuelle (cf. réf. [3]),
- à la réception de la lettre de cadrage à l'issue de la réunion avec la DDTM de Juillet 2018 (cf. réf. [15]),
- à la mission complémentaire d'état des lieux écologique (cf. réf. [5]) rendue début 2019.

Etant établi que le « risque érosion » n'est pas significatif sur la plage du Veillat, il a été convenu que l'objectif du projet se recentrerait sur le risque de submersion marine.

La mise au point initialement souhaitée d'un dispositif de lutte contre le recul du trait de côte a donc évolué vers la mise au point d'un dispositif de protection contre les submersions marines, notamment pour la moitié Ouest de la plage, très impactée par les coups de mer en raison de son exposition aux vagues et aux jets de rives intenses.

L'état des lieux écologique et les recommandations émises dans le cadre du volet « écoconception » (rapports [5] et [6]) ont conduit à limiter les choix techniques concernant la nature des ouvrages qui pourraient être mis en œuvre : les enrochements des ouvrages classiques (digues, épis, etc.) constituant un habitat plutôt bien adapté aux espèces locale, l'innovation en termes d'écoconception s'appuie sur des blocs artificiels se substituant aux enrochements de butée de pied et comportant à leur surface des petites anfractuosités offrant un habitat adapté aux espèces les plus petites et aux juvéniles (rapport [7]).

L'étude du risque submersion lancée mi-2019 (voir rapport [8]) a été suivie d'une étude de recomposition spatiale intégrant notamment une réflexion sur les infrastructures existantes en haut de plage, et sur l'implantation, l'emprise et le nombre de concessions privées.

Le scénario global final qui en ressort comprend notamment un rechargement massif de la plage, seule solution à même de diminuer les submersions et l'impact des jets de rive en haut de plage (voir [9] et [10]).

Cette synthèse résume les éléments d'étude qui justifient la composition de ce scénario final.

3 RISQUE SUBMERSION

3.1 Références concernant les submersions et débits de franchissement

Le tableau ci-dessous reprend les seuils de franchissement retenus pour l'étude. Le débit franchissant moyen « q » (sur la durée de l'épisode) et le volume franchissant maximum « V_{max} » (pour une seule vague) sont considérés pour évaluer le niveau de risque auquel les piétons sont exposés en circulant en haut de plage ou dans les locaux situés sous la promenade de Lattre de Tassigny :

Débit moyen (l/s/ml)	Volume maximum (m ³ /ml)	
q < 0.03	V _{max} < 0.002	Danger faible
0.03 < q < 0.1	0.002 < V _{max} < 0.02	Danger modéré
0.1 < q < 1.0	0.02 < V _{max} < 0.5	Danger fort
1.0 < q	0.5 < V _{max}	Danger extrême

Au-delà de ces valeurs de référence liées au franchissement en termes de débit moyen et de volume maximal, on trouve également des références sur le niveau de risque d'entraînement d'une personne en fonction de la submersion (hauteur d'eau et vitesse d'écoulement), illustrées par le graphique ci-dessous :

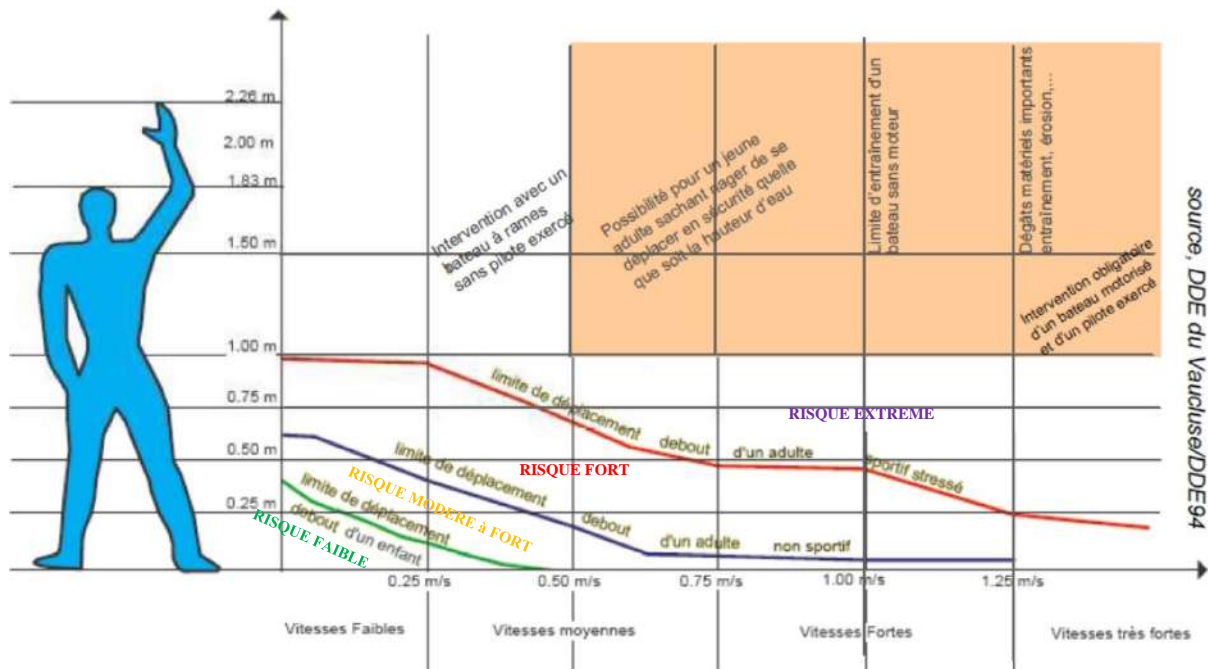


Figure 1 : seuils de hauteur d'eau et de vitesse d'écoulement favorisant le déplacement des personnes (guide PPR inondations, note complémentaire sur le ruissellement péri-urbain)

Ce graphique, tiré de la note complémentaire au guide PPR inondations sur le ruissellement péri-urbain, permet d'identifier les caractéristiques du jet de rive (épaisseur de lame d'eau et vitesse d'écoulement) favorisant l'entraînement d'un piéton stationnant ou circulant sur une zone submersible selon ses capacités physiques (enfant, adulte non-sportif, adulte sportif).

3.2 Première phase de l'étude du risque submersion : état actuel de référence

Cette première phase a permis d'établir un constat quantitatif de référence du risque submersion du haut de plage dans sa configuration actuelle sur la base d'un évènement type (tempête du 04 Mai 2010).

Les zones submergées constatées au cours de la simulation sur modèle numérique et les ordres de grandeur des franchissements sont cohérents avec le constat visuel de l'époque.



Figure 2 : illustrations extraites de la vidéo de la tempête du 04 Mai 2010

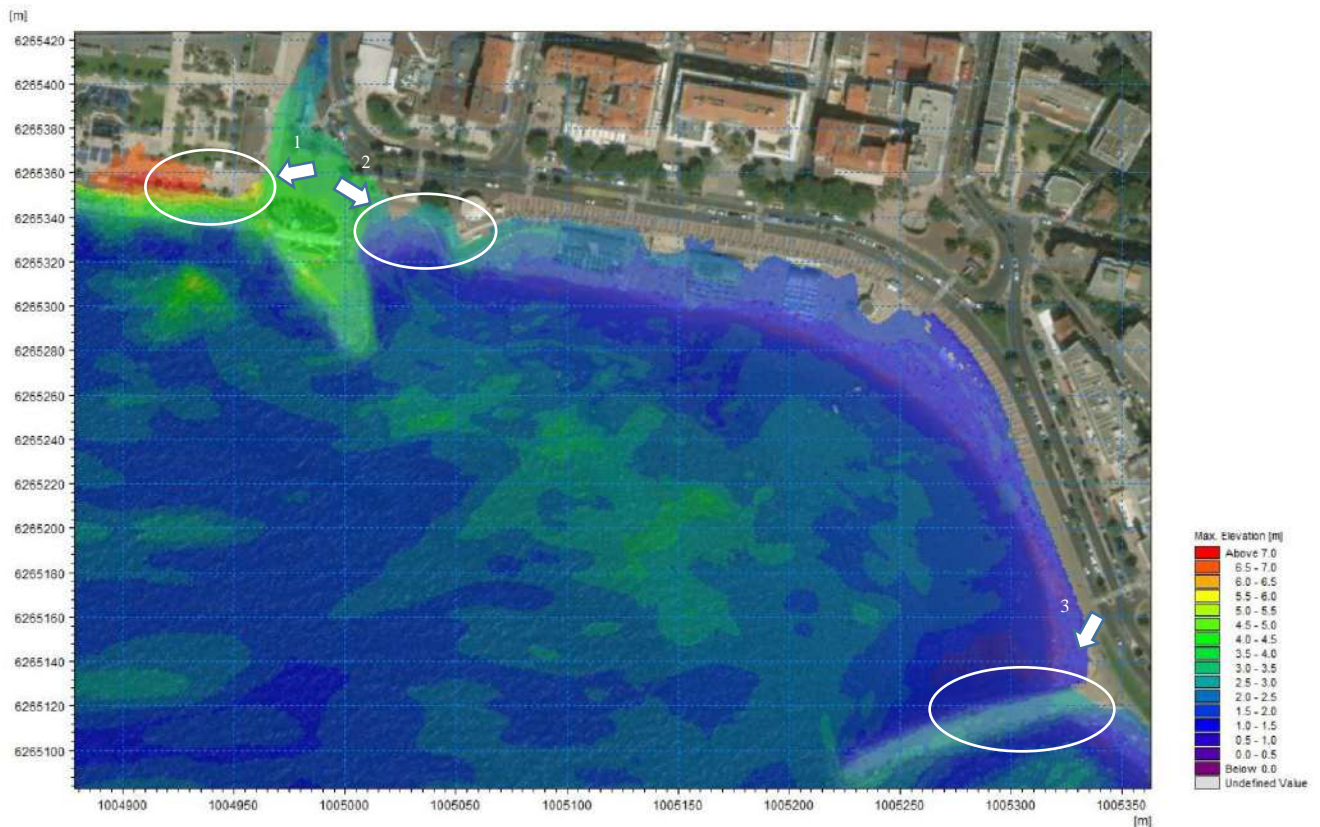


Figure 3 : zones submergées et hauteur maximale atteinte par le niveau d'eau

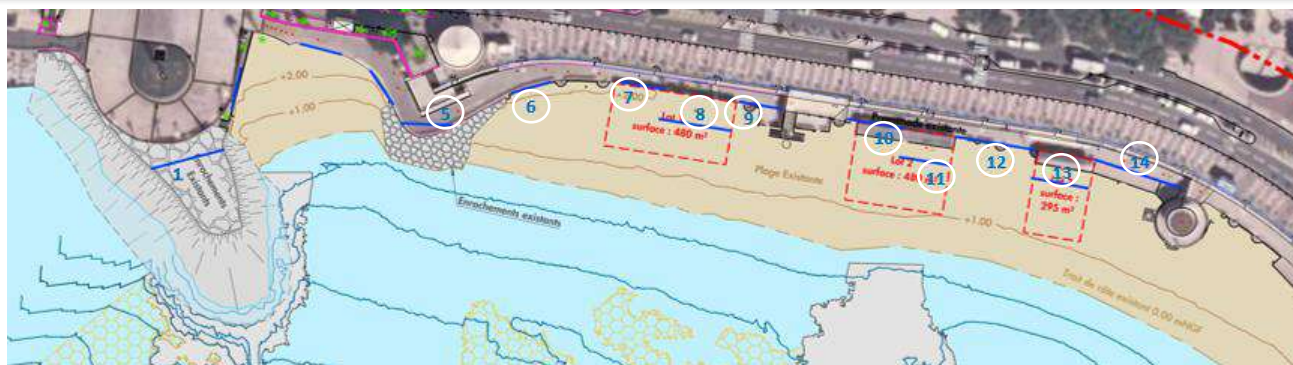


Figure 4 : segments de contrôle où ont été calculés et extraits les franchissements et les lames d'eau

Segment #		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Franchissement (débit moyen et volume maximum)											
Actuel	q (l/s/ml)	11.17	0.62	2.33	2.49	0.06	0.33	0.76	0.23	1.70	0.09
	V _{max} (m ³ /ml)	2.75	0.17	0.61	0.73	0.03	0.08	0.42	0.13	0.60	0.03
Épaisseur et vitesse max de lame d'eau											
Actuel	h _{lame d'eau} (m)	0.6	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.1
	U _{max} (m/s)	2.0	0.5	0.6	0.5	0.1	0.2	0.5	0.7	0.6	0.2

Franchissement

Débit moyen (l/s/ml)	Volume maximum (m ³ /ml)
q < 0.03	V _{max} < 0.002
0.03 < q < 0.1	0.002 < V _{max} < 0.02
0.1 < q < 1.0	0.02 < V _{max} < 0.5
1.0 < q	0.5 < V _{max}

Danger faible
Danger modéré
Danger fort
Danger extrême

Lame d'eau (épaisseur et vitesse)

Niveau de risque de déplacement
FAIBLE
MODERE (adulte) à FORT (enfant)
FORT (adulte)
EXTREME

Suite à l'étude de différentes solutions visant à diminuer le risque submersion sur la plage du Veillat (voir rapport [8]), il a été constaté que la seule extension des ouvrages existants (épîs Bonaparte et Diana) jusqu'aux limites d'emprise des herbiers protégés ne suffisent pas à apporter une réponse satisfaisante.

Parvenir à diminuer les submersions du haut de plage nécessiterait d'avoir recours à des ouvrages émergés massifs dont l'impact irait à l'encontre de certains des objectifs poursuivis, notamment environnementaux. De tels ouvrages ne peuvent donc pas être envisagés.

Un rechargement massif de la plage représente la seule alternative capable de constituer une zone tampon suffisamment large pour amortir et limiter les jets de rive submergeant le haut de plage.

Il a donc été proposé, conjointement à une optimisation des aménagements de haut de plage (bâti urbain de front de mer, emprise des concessions privées, etc.), de tester une solution intégrant un rechargement massif de la plage sur son ensemble, ainsi qu'une modification majeure du haut de plage sur sa partie Ouest, et une extension sous-marine des épîs existants jusqu'en limite d'emprise des herbiers protégés pour stabiliser au mieux le rechargement.

3.3 Seconde phase de l'étude du risque submersion : projet final

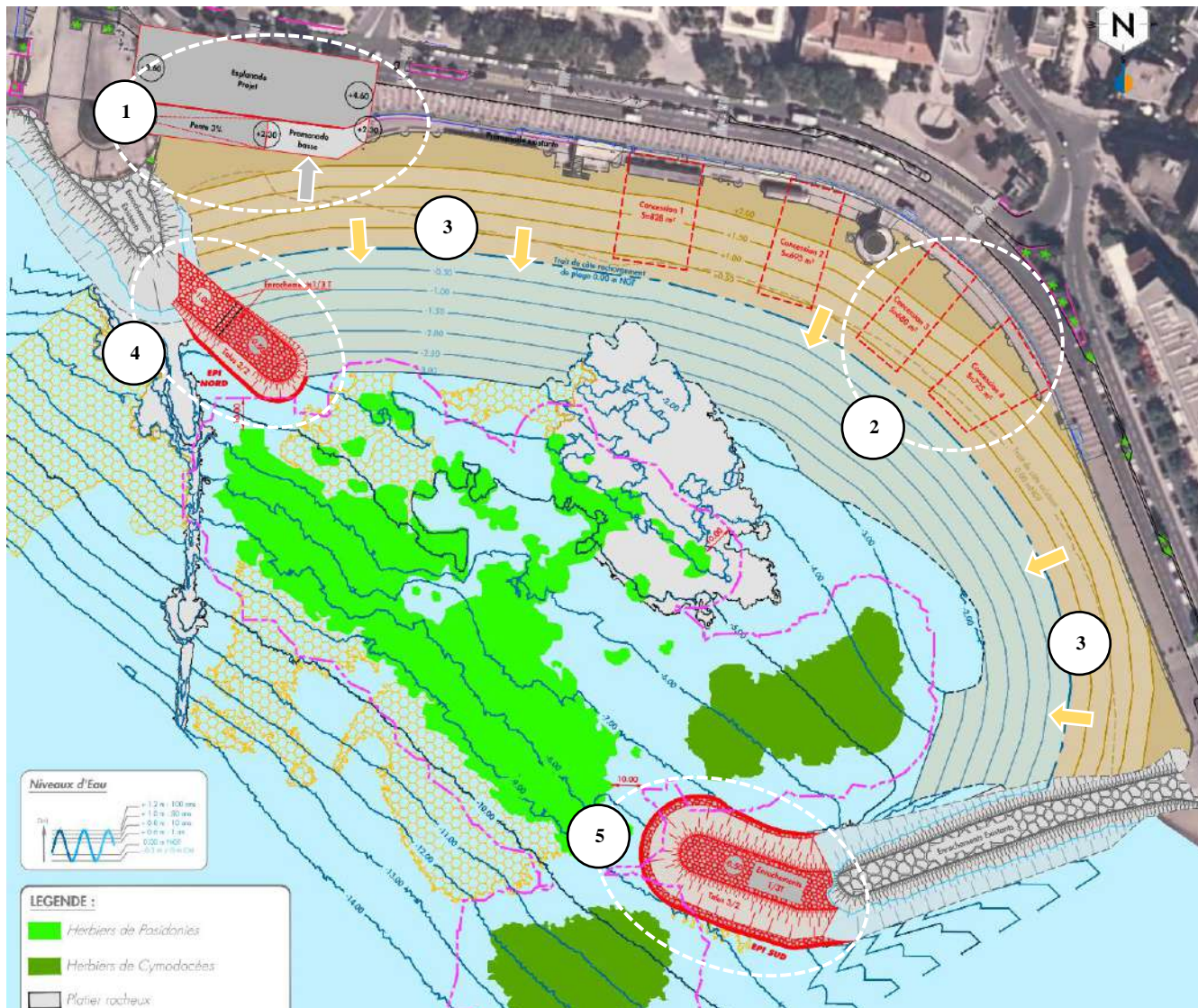


Figure 5 : vue en plan des aménagements envisagés dans le cadre de la recomposition spatiale et de la lutte contre le risque submersion

Points issus des réflexions menées dans le cadre de l'étude de recomposition spatiale :

1. Recul du point dur formé par la chicane de la promenade basse autour de l'escalier du carrousel ; suppression de l'enrochement de protection de la chicane ; élargissement de la promenade haute ; réaligement de la promenade basse avec recollement à l'existant à l'Est de l'actuel escalier.
2. Déplacement du lot de concession n°1 à l'Est de la tour et ajout potentiel d'un quatrième lot de concession ; les 4 lots de concessions sont ainsi rassemblés de part et d'autre de la tour en partie centrale de la plage du Veillat ; deux vastes zones de plage publique sont conservées de part et d'autre ; l'ensemble du linéaire représente ainsi 1/3 de plage publique, 1/3 de concessions privées, et 1/3 de plage publique.

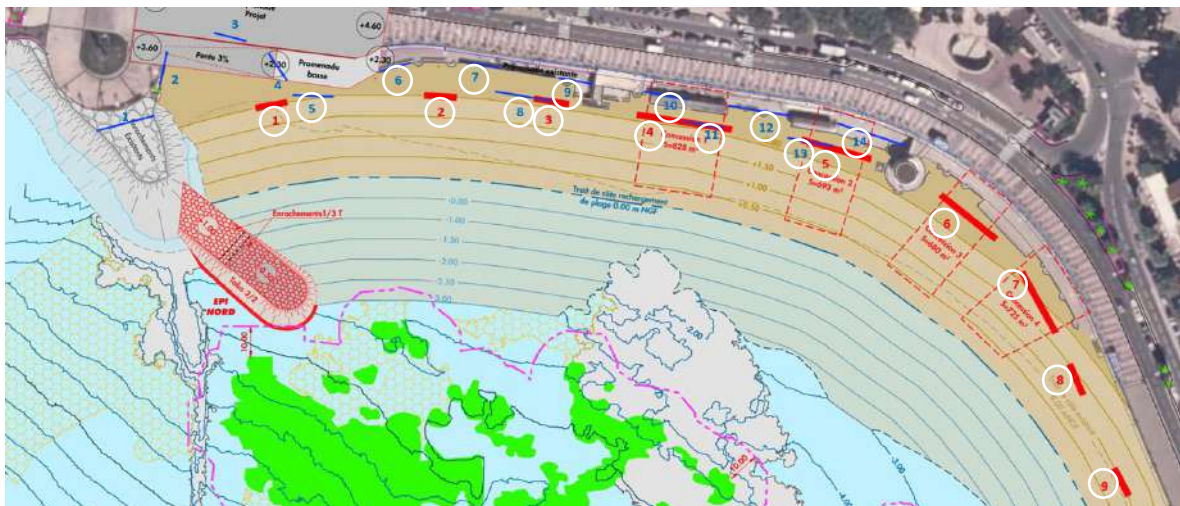
Points issus des réflexions menées dans le cadre de l'étude du risque submersion :

3. Rechargement massif de la plage (22 000 m³) permettant un élargissement significatif sur l'ensemble de son linéaire pour constituer une zone tampon et amortir du mieux possible les jets de rives. Cet élargissement permet d'augmenter significativement la surface potentiellement exploitable au niveau des concessions ainsi que la surface de plage publique.
4. Extension de l'épi Bonaparte (ouvrage sous-marin affleurant, légèrement émergé au niveau du raccordement avec l'existant) formant une butée de maintien du rechargement du côté Ouest de la plage.

- Extension de l'épi Diana (ouvrage sous-marin affleurant) constituant un brise-lame immergé destiné à limiter l'impact de la houle sur la partie centrale et Est de la plage ; cet ouvrage est également destiné à faire obstacle au courant de chasse remontant le long de l'épi existant afin de limiter la fuite de matériau de rechargement vers le large.

En raison du rechargement massif, les simulations montrent que la partie centrale de la plage du Veillat n'est plus submergée jusqu'aux infrastructures de haut de plage. Néanmoins, les extrémités Ouest et Sud-Est sont encore partiellement ou totalement submergées, notamment la zone de plage Ouest et l'esplanade Delayen en raison des franchissements par l'Ouest de l'épi (absence de plage amortissante, talus étroit en enrochement).

Les franchissements et les lames d'eau ont été extraits au niveau de 9 segments de contrôle identiques à ceux de la configuration actuelle (en bleu). 9 nouveaux segments de contrôle (en rouge) ont été ajoutés pour affiner l'analyse du risque submersion en haut de plage à +2.00 m NGF, et sur la partie Sud-Est.



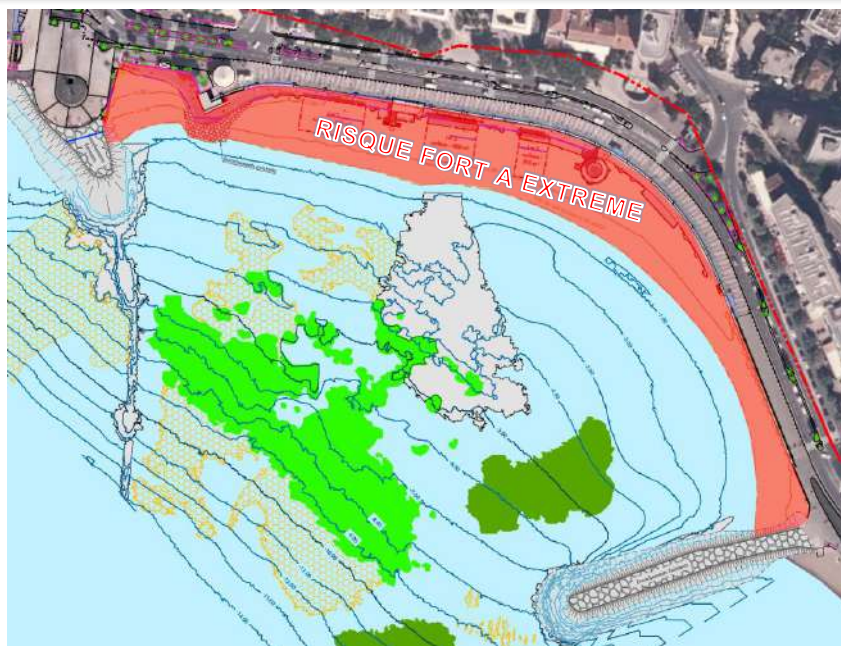


Figure 7 : niveau de risque sur le cas actuel

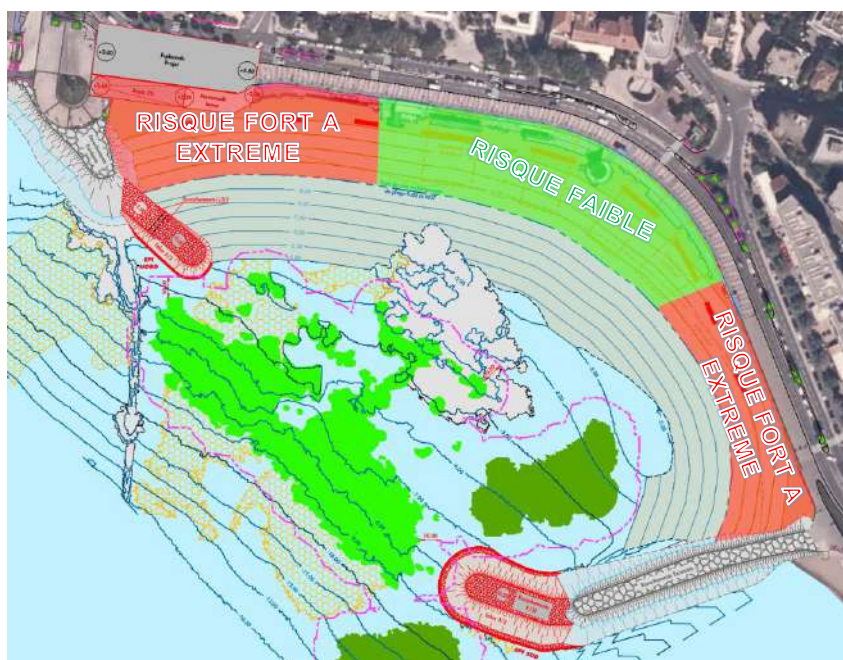
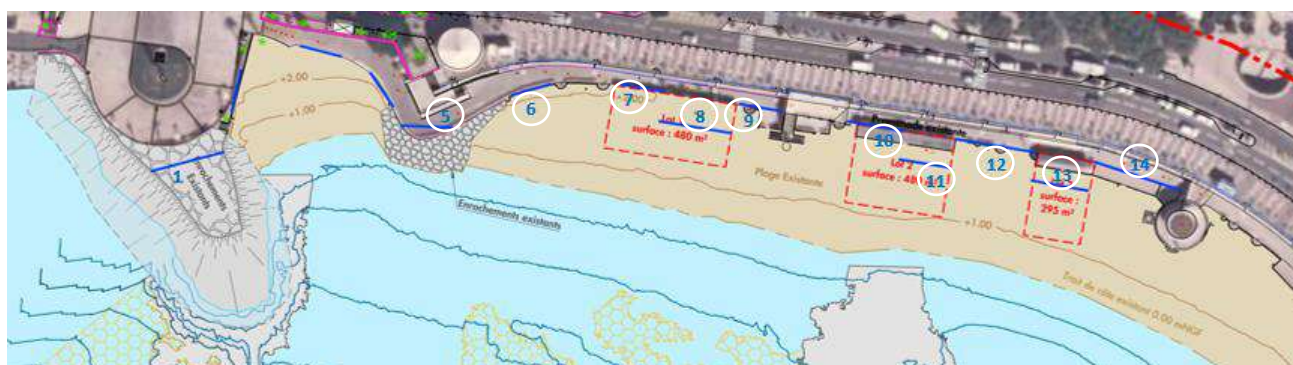


Figure 8 : niveau de risque sur le cas projet

Différentiel aux résultats de référence (en pourcentage) :

Segment #		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Franchissement (débit moyen et volume maximum)											
Actuel	q (l/s/ml)	11.17	0.62	2.33	2.49	0.06	0.33	0.76	0.23	1.70	0.09
	V _{max} (m ³ /ml)	2.75	0.17	0.61	0.73	0.03	0.08	0.42	0.13	0.60	0.03
PROJET FINAL	q (l/s/ml)	17%	10%	-100%	-84%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	V _{max} (m ³ /ml)	24%	98%	-100%	-72%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Epaisseur et vitesse max de lame d'eau											
Actuel	h _{lame d'eau} (m)	0.6	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.1
	U _{max} (m/s)	2.0	0.5	0.6	0.5	0.1	0.2	0.5	0.7	0.6	0.2
PROJET FINAL	h _{lame d'eau} (m)	-33%	-50%	-100%	-20%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	U _{max} (m/s)	43%	209%	-100%	-32%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%

Echelle -100% 0% 100% (et plus)



En termes de franchissement, le projet final permet une diminution significative des débits et volumes entre les segments 7 et 14. Sur l'extrémité Ouest, les franchissements ne diminuent pas et seraient même en légère augmentation.

En termes de jets de rive (lame d'eau et vitesse d'écoulement), on observe une diminution significative du segment 7 au segment 14 corrélée avec le constat concernant les franchissements.

Cette configuration aménagée semblerait apporter la réponse la plus satisfaisante vis-à-vis du risque submersion, essentiellement sur la partie centrale de la plage du Veillat où pourraient être regroupés 4 lots de concession. La protection de cette zone centrale serait ainsi théoriquement assurée jusqu'à un niveau de tempête de référence similaire à celle du 04 Mai 2010.

3.4 Analyse hydrosédimentaire du projet final

Le scénario final a été étudié à l'aide de simulations numériques dans les conditions de la tempête du 4 Mai 2010. Ces modélisations ne prennent pas en compte les modules habitats optionnels évoqués dans la note complémentaire de stratégie d'écoconception [7] (options 1, 2 et 3) qui pourraient être mis en place dans les petits fonds entre l'épi Bonaparte et la dalle rocheuse (récif) centrale.

L'analyse des résultats montre que pour ce cas projet, en comparaison avec la situation actuelle :

- La hauteur des vagues approchant la plage du Veillat est significativement réduite ;
- Les courants, en revanche, sont accélérés, avec une circulation en sens horaire à l'intérieur de l'ensemble de la cellule sédimentaire de la plage (deux circulations opposées sont observées de part et d'autre du récif central pour le cas actuel) ;
- Le transport sédimentaire suit la même tendance : une inversion du transport sédimentaire pour la partie ouest de la plage, principalement due :
 - Au reprofilage de plage qui modifie l'orientation du rivage par rapport à l'incidence des vagues ;
 - Au prolongement vers le sud-est de l'épi Bonaparte, qui induit localement une forte accélération des courants ;

De plus, sur la partie est de la plage, le prolongement de l'épi Diana renforce le transport de sable depuis le centre vers l'extrémité est.

L'orientation et l'intensité du transport sédimentaire seront donc modifiés, en particulier sur la partie ouest de la plage :

- ⇒ Cela devrait entraîner un cumul du stock sédimentaire plus important à l'est, et donc une translation/rotation de la position d'équilibre vers l'est ;
- ⇒ L'aménagement des ouvrages **ne peut se concevoir sans un rechargement conséquent de sable**, tel qu'envisagé dans le cas projet final.

L'extrémité nord-ouest de la plage, bien que mieux protégée des vagues par le prolongement de l'épi Bonaparte, sera soumise à un courant et un transport plus important en cas de tempête. Cette zone restera donc soumise à terme à un risque d'érosion plus important :

- ⇒ Pour cette partie exposée, si l'implantation actuellement envisagée du projet n'est pas modifiée, il est alors recommandé d'augmenter significativement la granulométrie des matériaux destinés au rechargement.

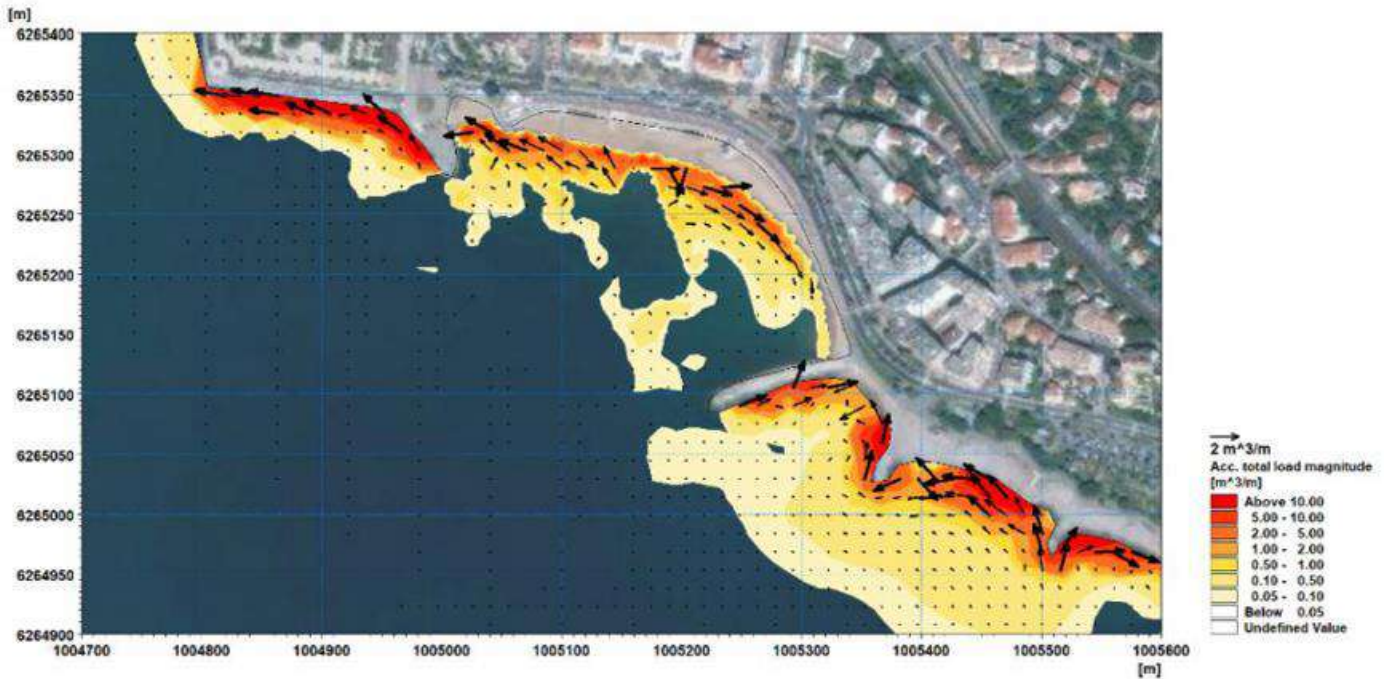


Figure 9 : estimation numérique du transport sur la situation actuelle (conditions du 04 Mai 2010)

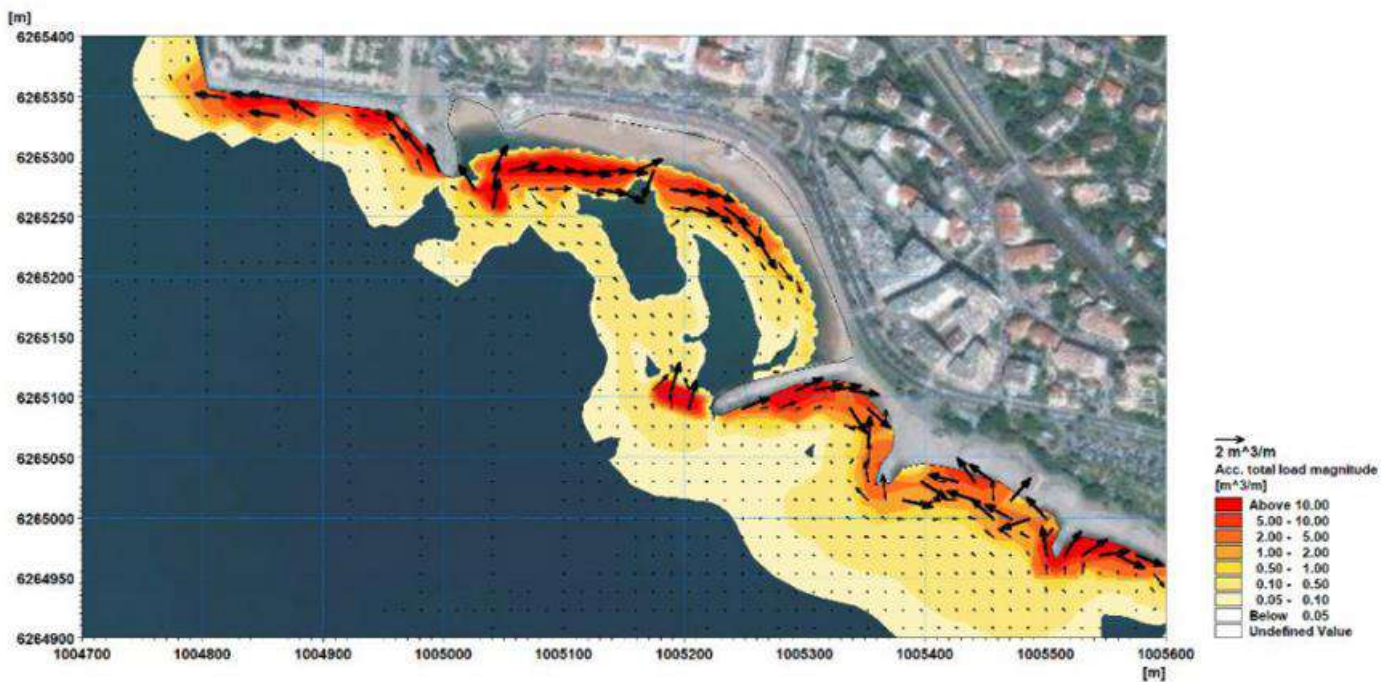


Figure 10 : estimation numérique du transport sur la situation projet (conditions du 04 Mai 2010)

4 NATURE ET CONCEPTION DES OUVRAGES

D'après le constat écologique réalisé par P2A Développement (note [5]) et les recommandations émises en termes d'écoconception (note [6]) pour un maintien et une amélioration de la qualité de l'écosystème de la zone, il s'est avéré qu'un talus en enrochements naturels offrait un habitat tout à fait propice aux espèces présentes.

Dans un premier temps, il a donc été jugé opportun d'orienter les réflexions sur des solutions techniques conservant la nature des épis existants (talus en enrochements) tout en adoptant un profil de brise-lame immergé pour limiter les volumes de matériaux et l'impact environnemental et visuel des nouveaux aménagements.

L'emprise, contrainte dans un premier temps par la présence étendue d'herbiers protégés, a été optimisée pour buter le rechargement massif de la plage côté ouest (extension de l'épi Bonaparte) tout en protégeant au mieux cette zone des assauts de la houle, et pour limiter l'impact des vagues et la fuite de matériau vers le large côté est (extension de l'épi Diana).

Il reste que pour l'extension de l'épi Bonaparte, la récente étude hydrosédimentaire du projet final tendrait à mettre en évidence la nécessité d'affiner l'orientation du nouvel ouvrage pour mieux stabiliser la partie ouest du rechargement.

4.1 Dimensionnement des blocs de carapace constituant les extensions sous-marines des épis

Les hypothèses dimensionnantes sont tirées des caractéristiques d'une houle de projet de période de retour 50 ans estimées devant la plage du Veillat dans le rapport [3].

Devant la plage du Veillat, par -15 m, Les conditions de houle de PR 50 ans sont les suivantes :

- $H_s = 2.6$ m
- $T_p = 9.3$ s

Le prédimensionnement de la taille des blocs de carapace a été réalisée selon les approches de Vida et al. (1995) et de Kramer et Burcharth (2004) recommandées par le Guide Enrochement [19] dans le cas d'un ouvrage immergé.

Pour les calculs, le niveau d'eau moyen a été fixé à +0.5 m NGF afin de conserver une approche sécuritaire. En effet, un niveau d'eau plus important conduit à une taille de blocs inférieure pour des conditions de houle identiques.

Hypothèses de calcul :

ρ_{water}	1 025	kg/m ³	masse volumique eau de mer
ρ_{stone}	2 650	kg/m ³	masse volumique roche
Δ	1.59		densité relative déjàugée
	-0.5	m NGF	arase de crête
n.e.	0.5	m NGF	niveau d'eau au repos
R_c	-1.0	m	revanche de crête

A l'aide des formules de Vida et al. (appliquées avec différents coefficients selon que l'on s'intéresse au talus avant, à la crête, au talus arrière ou à une section moyenne globale de l'ouvrage) et de Kramer et Burcharth, la hauteur significative maximum admissible de la houle à partir de laquelle on devrait observer un début de dommage a été calculée pour plusieurs diamètres nominaux médians (D_{n50}) de blocs :

D _{n50}	H _s maximum admissible (début du dommage)				
	Vida <i>et al.</i> (1995)				Kramer et Burcharth (2004)
	Talus AV	Crête	Talus AR	Section tot.	
0.50	1.9	1.8	3.3	1.8	1.6
0.60	2.2	2.0	3.6	2.0	1.8
0.70	2.4	2.2	4.0	2.2	2.0
0.80	2.7	2.4	4.3	2.4	2.2
0.90	3.0	2.6	4.7	2.7	2.4
1.00	3.3	2.8	5.1	2.9	2.6
1.10	3.6	3.1	5.5	3.1	2.8
1.20	3.9	3.3	5.9	3.4	3.0
1.30	4.2	3.6	6.3	3.6	3.2
1.40	4.5	3.8	6.7	3.9	3.5
1.50	4.8	4.1	7.1	4.1	3.7
1.60	5.0	4.3	7.5	4.3	3.9
1.70	5.3	4.6	7.9	4.6	4.1
1.80	5.6	4.8	8.3	4.8	4.3
1.90	5.9	5.1	8.7	5.1	4.5
2.00	6.2	5.3	9.1	5.3	4.7

H_s > 2.6 m

Selon la formule et les coefficients appliqués, un H_s de 2.6 m (et plus) est obtenu pour des blocs de diamètre nominal médian compris à minima entre 0.8 m et 1.0 m.

La valeur de 1.0 m est retenue pour le D_{n50}.

Valeur théorique de la masse médiane (M₅₀), de la limite nominale basse (NLL) et de la limite nominale haute (NUL) pour des enrochements de D_{n50} = 1.0 m :

ρ _{stone}	2 650 kg/m ³	masse volumique roche
D _{n50}	1.0 m	diamètre nominal médian des blocs de carapace
M ₅₀	2 650 kg	masse médiane des blocs de carapace
NLL	1 459 kg	Nominal Lower Limit (passant à 15%)
NUL	3 555 kg	Nominal Upper Limit (passant à 70%)

La catégorie standard 2-4 tonnes, la plus proche des 1.5-3.6 tonnes obtenus par calcul, est donc adoptée pour constituer la carapace des ouvrages immergés. Elle est en outre du même ordre de grandeur que celle des blocs constituant les épis existants.

4.2 Validation de la stabilité : campagne d'essais sur modèle physique 2D en canal à houle

Une campagne d'essais en canal à houle a été menée dans le laboratoire du siège de DHI au Danemark afin de vérifier la stabilité du talus sous-marin en enrochements et de valider la capacité du modèle numérique M3WFM à correctement estimer les franchissements en haut de plage (modèle numérique mis en œuvre pour l'étude de submersion).

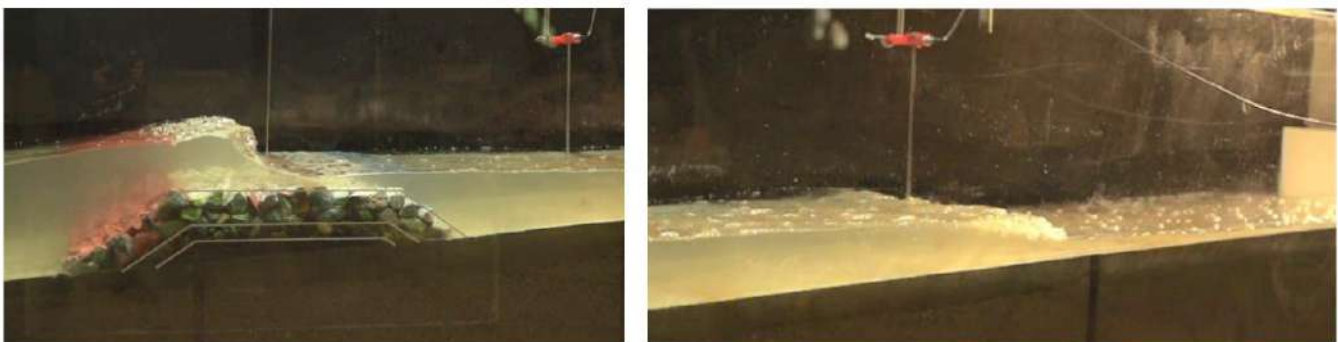


Figure 11 : Modèle physique : illustration du déferlement d'une vague au passage de la digue immergée (gauche) et au niveau du profil de plage (droite).

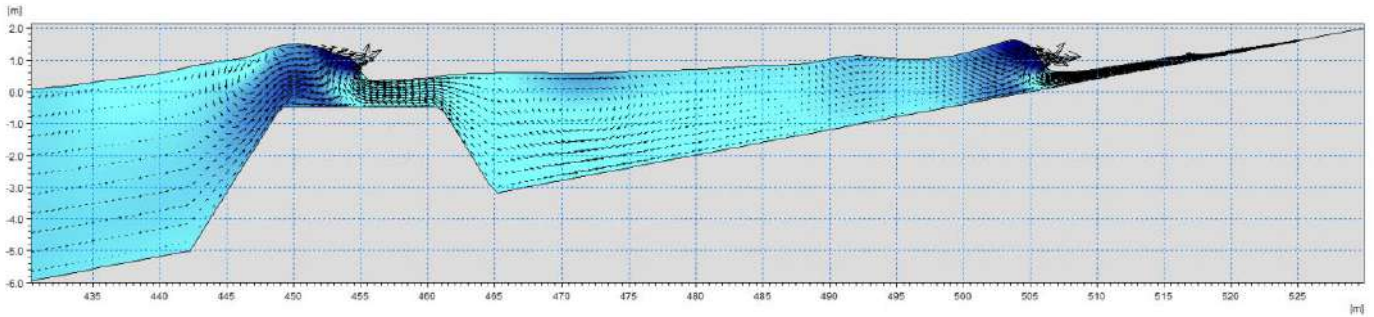


Figure 12 : Modèle numérique (M3WFM) : champ de vitesses instantanées lors du passage d'une vague au-dessus de la digue immergée.

Les détails de la campagne, des observations, des résultats, et de la comparaison avec le modèle numérique M3WFM sont présentés dans le rapport [11].

Le profil testé en canal comportait des blocs de 1-3 tonnes en carapace, catégorie correspondant à un diamètre nominal $D_{n50} = 0.9$ m initialement retenu en prédimensionnement vis-à-vis de la formule de Vida et al.

La stabilité ayant été validée avec une catégorie standard inférieure, la catégorie standard 2-4 tonnes est donc *a fortiori* validée pour constituer la carapace du talus sous-marin. Cette dernière a finalement été retenue d'un point de vue conservatif afin d'être conforme au résultat sécuritaire obtenu avec la formule de Kramer et Burcharth, et d'être au plus proche de la catégorie de blocs constituant les épis existants.

4.3 Plan et coupes des ouvrages

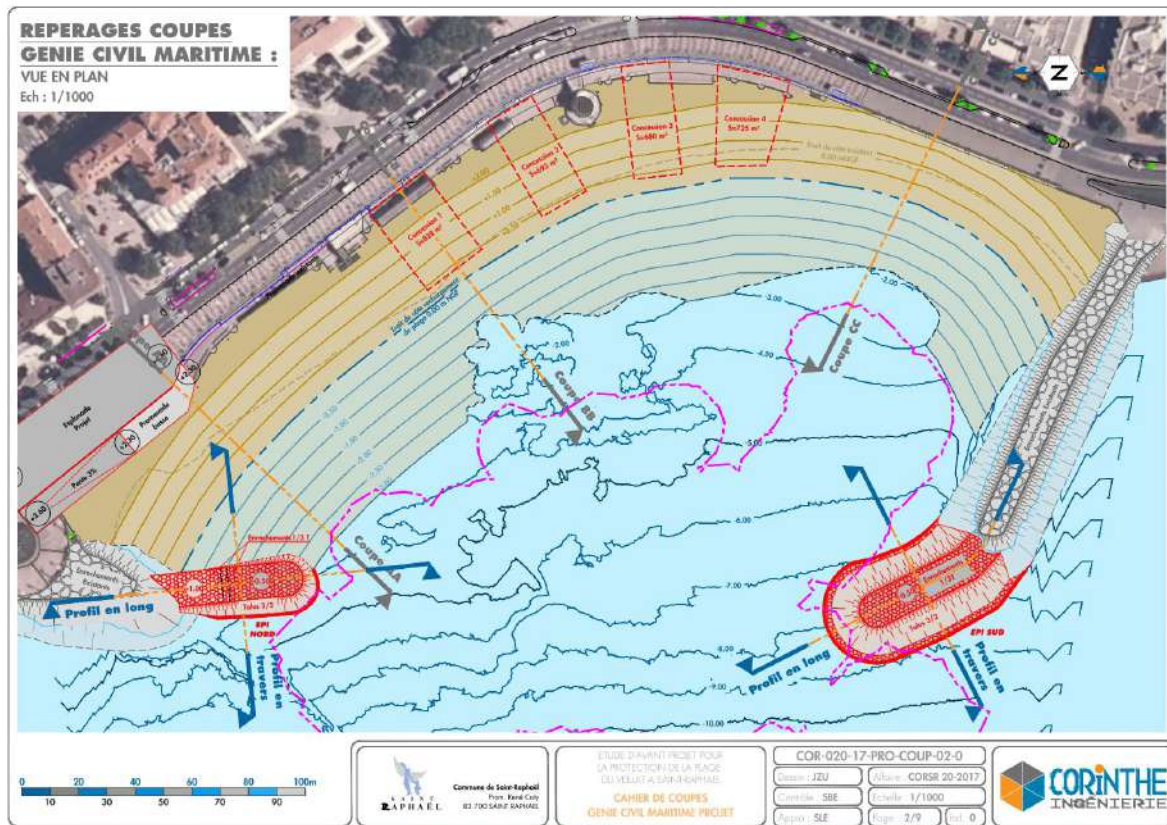


Figure 13 : Vue en plan des ouvrages immergés (extensions des épis) et repérage des coupes.

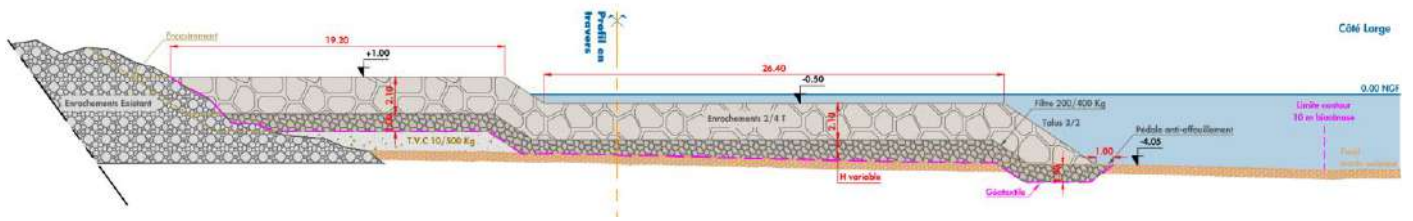


Figure 14 : profil en long de l'extension de l'épi Bonaparte

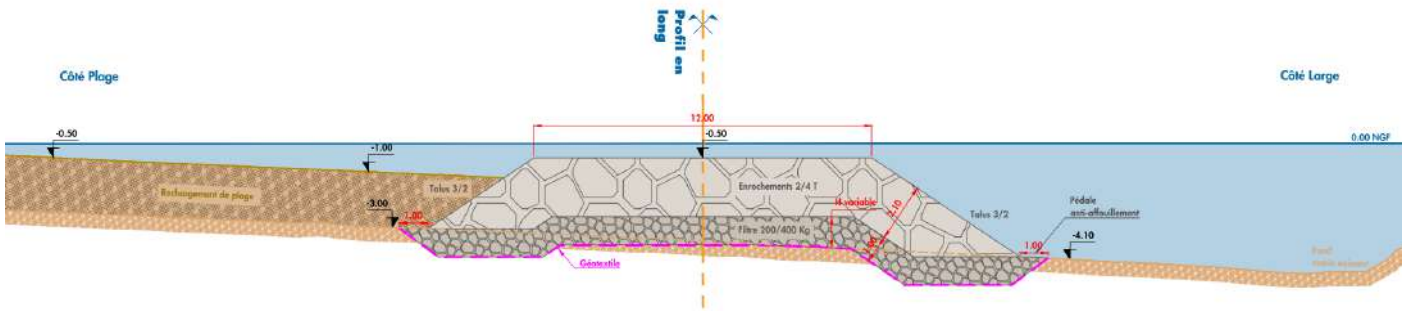


Figure 15 : coupe transversale de l'extension de l'épi Bonaparte

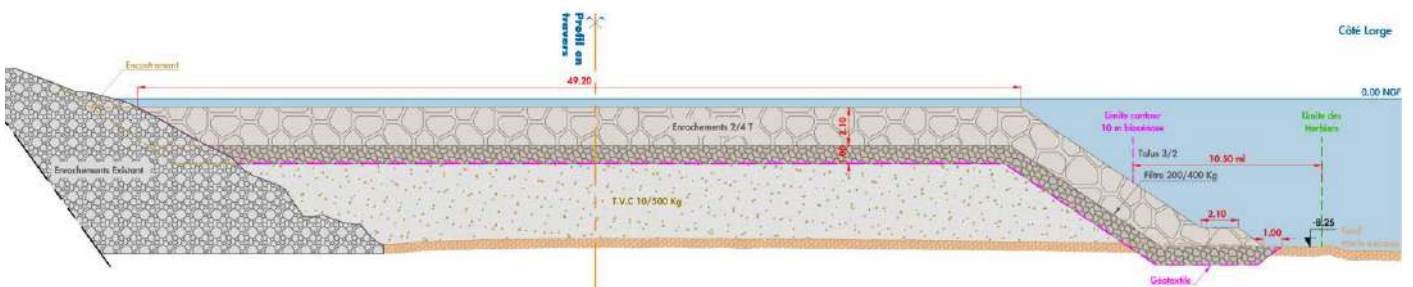


Figure 16 : profil en long de l'extension de l'épi Diana

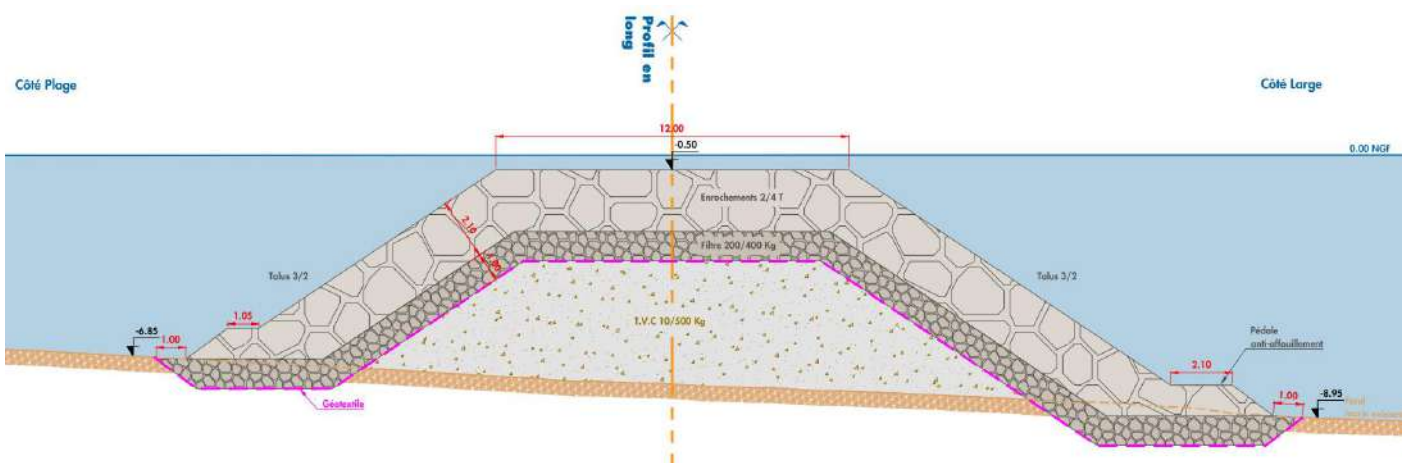


Figure 17 : coupe transversale de l'extension de l'épi Diana

4.4 Ecoconception : modules artificiels en butée de pied

L'écoconception accompagnant le projet fait l'objet des notes [6] et [7] détaillant les réflexions ayant conduit aux propositions résumées ci-dessous.

En raison de la nature des ouvrages envisagés, l'option choisie est d'équiper ces derniers de modules en béton en pied de talus. Ceux-ci peuvent être disposés en butée de pied fixant l'emprise de l'ouvrage et ainsi préserver l'herbier de posidonie proche d'éventuels dommages en contenant les blocs rocheux lors de la construction du brise-lame sous-marin.

Ces modules seront spécialement conçus pour former des habitats plus complexes et hétérogènes que ceux formés par l'agencement des blocs 2/4 T. Des cavités profondes ainsi que d'autres plus petites sont prévues en surface des parois du module.

Dans cette option, il est question de réaliser des structures en béton qui présentent à la fois une fonctionnalité structurelle pour l'ouvrage de protection et une fonctionnalité écologique par la présence d'une catégorie d'habitats à fort potentiel écologique, actuellement absents de la zone proche de l'ouvrage. L'accent sera donc mis sur l'aspect paysager et l'intégration des structures pour préserver un aspect le plus naturel et efficace possible.

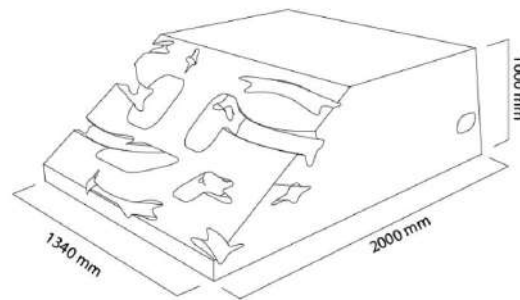
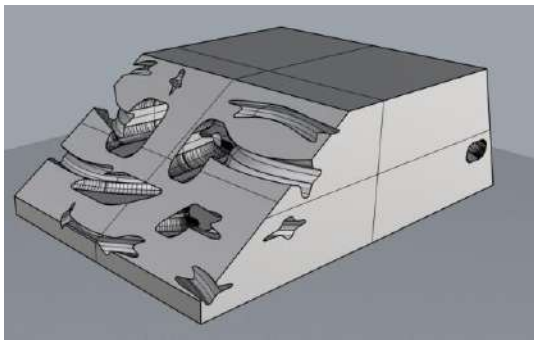


Figure 18 : dimensions et rendu 3D d'un module de pied de digue à disposer en section droite

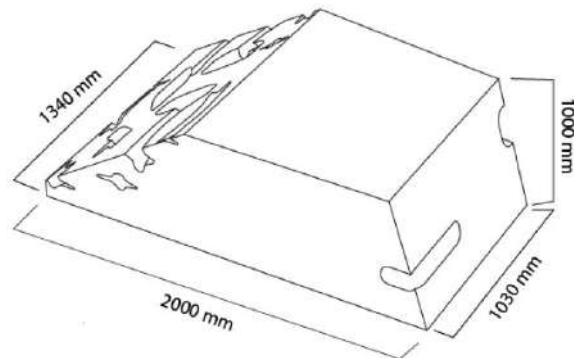
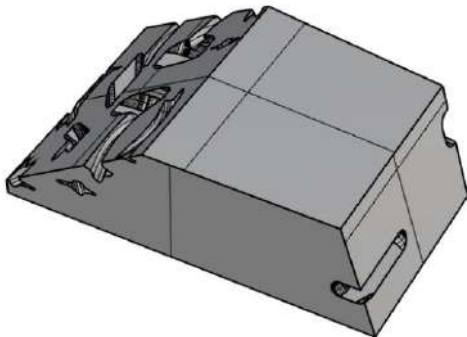


Figure 19 : dimensions et rendu 3D d'un module de pied de digue à disposer en musoir (agencement courbe)

Caractéristiques d'un module pour section droite :

- Masse : 2.8 T
- Volume de béton : 1.2 m³
- Volume hors-tout : 1.8 m³

L'inclusion de ces modules sur les ouvrages envisagés se fait en lieu et place des blocs d'encrochements situés en butée de pied.

2 options sont possibles :

- Option 1 : la quasi-totalité du pied des 2 extensions sous-marines est réalisé à l'aide de modules artificiels, cette option nécessite 127 modules au total ;

- Option 2 : les modules sont concentrés uniquement en pied de musoir des 2 ouvrages, à proximité des herbiers, cette option ne nécessiterait plus que 40 modules.



Figure 20 : rendu 3D des modules disposés en pied de talus de l'extension sous-marine de l'épi Bonaparte (option 1 à gauche, option 2 à droite)

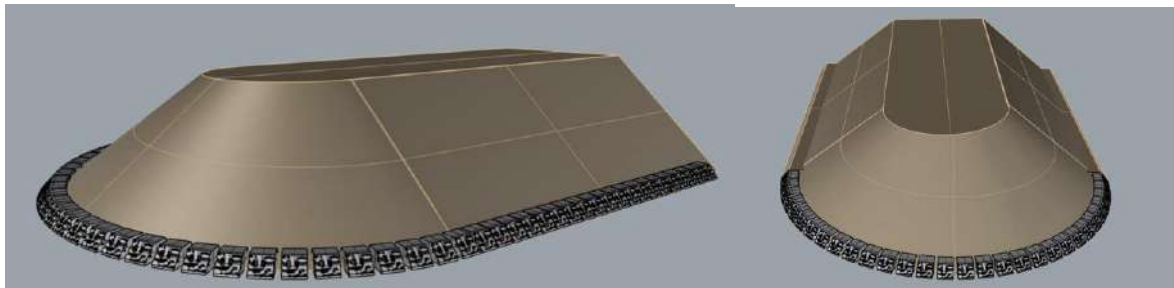


Figure 21 : rendu 3D des modules disposés en pied de talus de l'extension sous-marine de l'épi Diana (option 1 à gauche, option 2 à droite)

4.5 Ecoconception : dispositifs biomimétiques Sargass

La vocation première des Sargass est de réaliser des aménagements de nurseries artificielles pour les très jeunes stades de poissons. L'utilisation initiale de ces modules était donc destinée à fournir des refuges à des juvéniles de poissons lors de leur arrivée sur le littoral afin de limiter leur mortalité par prédation. Ils ont ainsi été utilisés en Camargue, dans la réserve marine de Beauduc, puis modifiés pour une meilleure résistance aux intempéries et implantés à Mandelieu-La-Napoule.

Il y a un an, un projet de recherche et développement réalisé sur un site du Conseil Départemental des Bouches-du-Rhône a été initié par P2A Développement. Dans ce projet, ce sont les propriétés d'atténuateur hydrodynamique qui sont l'objet de l'expérience. Depuis, les résultats sont très encourageants et montrent que les Sargass peuvent atténuer la houle et favoriser très localement l'atterrissement des sédiments dans un milieu de très faible bathymétrie.

Les dispositifs Sargass, inventés par P2A Développement, ont été utilisés dans plusieurs projets et sont maintenant opérationnels et durables, notamment en regard d'épisodes d'hydrodynamisme intense. Il est proposé ici d'utiliser ces ouvrages innovants dans une fonction nouvelle, la protection d'herbier et la lutte contre l'érosion.



Figure 22 : dispositif Sargass implanté sur substrat meuble (à gauche) et sur substrat dur (à droite)

Pour le projet, 3 options d'implantation sont proposées dans la zone située entre le musoir de l'extension de l'épi Bonaparte, à l'ouest de la plage, et le platier rocheux, au centre :

- L'option 1 consiste à équiper les espaces sableux inter-matte du périmètre défini ci-dessus avec une ligne de Sargass d'une hauteur maximale de 1 mètre sur une largeur de 5 mètres (93 modules). Ceci a pour principal avantage de ne pas altérer la matte morte de l'herbier de posidonie et donc de ne pas nécessiter de procédure réglementaire à l'égard du statut d'espèces protégées de magnoliophytes.

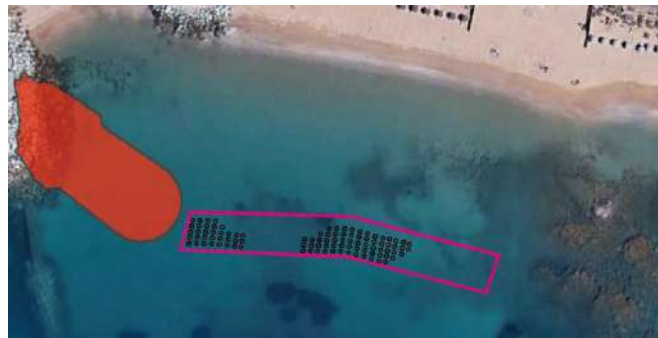


Figure 23 : Emprise de principe de l'option 1 avec l'installation d'un dispositif linéaire de 93 modules Sargass destinés à réduire les vitesses hydrodynamiques à proximité du fond avant la plage sans impacter les zones de matte morte de l'herbier de posidonie

- L'option 2 consiste à équiper l'intégralité du périmètre de la ligne de dissipation avec des dispositifs Sargass de 1 mètre de hauteur au maximum (205 modules). Les modules sont fixés par des ancrages spécifiques hélicoïdaux afin de ne pas altérer la matte morte.



Figure 24 : Emprise de principe de l'option 2 avec l'installation d'un dispositif linéaire de 205 modules Sargass destinés à réduire les vitesses hydrodynamiques à proximité du fond avant la plage

- L'option 3 consiste à restaurer un herbier autour du périmètre du dispositif de l'option 2 avec la fixation dans la matte morte de 400 boutures de posidonie.



Figure 25 : Emprise de principe de l'option 3 avec les surfaces envisagées pour l'implantation des 400 boutures

L'écoconception introduite dans le projet de la plage du Veillat en ferait un site pilote méritant un suivi scientifique à moyen ou long terme. Dans cette perspective, une proposition méthodologique est présentée dans la note [7].

5 ENVELOPPE ESTIMATIVE

5.1 Travaux maritimes

Plage du Veillat							
Mission d'assistance							
Détail estimatif - - Travaux maritimes - V01							
N°	Désignation			U	Qte	PU	Total HT
1 - TRAVAUX PRÉPARATOIRES							
1	1		Installation de chantier	ft	1.00	25 000.00	25 000.00
1	2		Amenée et repliement matériels	ft	1.00	8 000.00	8 000.00
1	3		Validation Topographie projet	ft	1.00	2 500.00	2 500.00
1	2		Piquetage	ft	1.00	2 500.00	2 500.00
1	7		Études et plans d'exécution	ft	1.00	5 000.00	5 000.00
1	8		Suivi qualité, sécurité, environnement	mois	3.00	1 000.00	3 000.00
1	9		Piste accès sur digues existantes	ft	1.00	28 000.00	28 000.00
1 - TRAVAUX PRÉPARATOIRES							74 000.00
2 - EXTENSIONS EPIS							
2.1 - EPI NORD							
2	1	1	Souilles	m ³	590.00	18.00	10 620.00
2	1	2	Noyau 10/ 500	m ³	135.00	32.00	4 320.00
2	1	3	Filtre 200/ 400 kg	t	2 133.00	38.00	81 054.00
2	1	4	Carapace 2/ 4 t	t	3 651.00	42.00	153 342.00
2	1	5	Pédale 2/ 4 t	t		48.00	-
2	1	6	Rependage matériaux des souilles	m ³	590.00	10.00	5 900.00
2,1 - EPI NORD							255 236.00
2.2 - EPI SUD							
2	2	1	Souilles	m ³	1 056.00	18.00	19 008.00
2	2	2	Noyau 10/ 500	m ³	2 943.00	32.00	94 176.00
2	2	3	Filtre 200/ 400 kg	t	4 352.00	38.00	165 376.00
2	2	4	Carapace 2/ 4 t	t	7 308.00	42.00	306 936.00
2	2	5	Pédale 2/ 4 t	t	292.00	48.00	14 016.00
2	2	6	Rependage matériaux des souilles	m ³	1 056.00	10.00	10 560.00
2,2 - EPI SUD							610 072.00
2 - EXTENSIONS EPIS							865 308.00
3 - RECHARGEMENT PLAGE							
3	1		Rechargement	m ³	22 000.00	10.00	220 000.00
3	2		Achat sable	m ³	22 000.00	36.00	792 000.00
3 - RECHARGEMENT PLAGE							1 012 000.00
Total HT							1 951 308.00
Aléas 5 %							97 565.40
Total HT							2 048 873.40
TVA 20 %							409 774.68
Total TTC							2 458 648.08

L'enveloppe nécessaire à la réalisation des travaux maritimes est donc estimée à **2.05 M€ HT**.

Cette enveloppe pourrait cependant varier significativement en fonction des sources d'approvisionnement qui seront à même de fournir les matériaux destinés au rechargement de la plage.

A ce montant, il faut également ajouter les potentielles plus-values nécessaires au financement des dispositifs relevant de l'écoconception (détail dans la note [7]) :

- Fourniture des modules de pieds de talus : de **74 k€ HT (option 1)** à **124 k€ HT (option 2)**. La moins-value due aux blocs d'enrochements naturels remplacés sera marginale.
- Fourniture et installation des dispositifs biomimétiques Sargass : de **14 k€ HT** à **50 k€ HT** selon l'option retenue.
- Suivi scientifique pendant 5 ans (2 campagnes/an) : **entre 40 k€ HT et 60 k€ HT** selon les options retenues.

Le montant estimatif de l'enveloppe majorante pour financer l'ensemble des dispositifs d'écoconception et leur suivi est donc de l'ordre de 240 k€ HT au total.



Interreg



UNION
EUROPÉENNE



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional



Protezione della spiaggia del Veillat

SINTESI DEL PROGETTO



RIEPILOGO

Questa nota riunisce le varie conclusioni e raccomandazioni tratte dai vari studi realizzati sulla spiaggia del Veillat (studi preliminari del progetto di protezione e studio di ricomposizione spaziale).

Il progetto finale visto nella fase preliminare è presentato come risposta alle aspettative espresse dal Committente tramite le evoluzioni del capitolato degli oneri iniziale e secondo le conclusioni dell'ultima fase di studio complementare che integrano la parte della ricomposizione spaziale.

INDICE

1.	RIFERIMENTI	5
1.1	Riepilogo dei principali rapporti e rendering.....	5
1.2	Riepilogo delle riunioni.....	6
1.3	Opera di riferimento tecnico.....	6
2.	OGGETTO DELLO STUDIO ED EVOLUZIONI DELLE RIFLESSIONI E DEL CAPITOLATO DEGLI ONERI	7
2.1	Contesto di studio iniziale tratto dal capitolato delle clausole tecniche particolari	7
2.2	Obiettivi iniziali del progetto.....	7
2.3	Riorientamento degli obiettivi del programma e dello svolgimento dello studio	7
3.	RISCHIO DI SOMMERSIONE	9
3.1	Riferimenti inerenti alle sommersioni e ai flussi di superamento.....	9
3.2	Prima fase dello studio del rischio di sommersione: stato attuale di riferimento	10
3.3	Seconda fase dello studio del rischio di sommersione: progetto finale	12
3.4	Analisi idrosedimentaria del progetto finale.....	16
4.	NATURA E PROGETTAZIONE DELLE OPERE.....	18
4.1	Dimensionamento dei blocchi di carapace che costituiscono le estensioni sottomarine dei pennelli.....	18
4.2	Convalida della stabilità: campagna di prove sul modello fisico in 2D in canale a moto ondoso	19
4.3	Pianta e spaccati delle opere.....	20
4.4	Ecoprogettazione: moduli artificiali in arresto di piede.....	22
4.5	Ecoprogettazione: dispositivi biomimetici Sargass	23
5.	DOTAZIONE STIMATA.....	26
5.1	Lavori marittimi	26

TABELLA DELLE ILLUSTRAZIONI

FIGURE

Figura 1: soglie di altezza d'acqua e di velocità di scorrimento che favoriscono lo spostamento delle persone (guida PPR allagamenti, nota complementare sullo scorrimento periurbano).....	9
Figura 2: illustrazioni tratte dal video della tempesta del 04 maggio 2010.....	10
Figura 3: zone sommerse e altezza massima raggiunta dal livello d'acqua	10
Figura 4: segmenti di controllo in cui sono stati calcolati e rilevati i superamenti delle altezze d'acqua	11
Figura 5: vista in pianta degli sviluppi previsti nell'ambito della ricomposizione spaziale e di lotta contro il rischio di sommersione	12
Figura 6: segmenti di controllo in cui sono stati calcolati e rilevati i superamenti delle altezze d'acqua	13
Figura 7: livello di rischio nell'attuale caso	14
Figura 8: livello di rischio nel caso del progetto	14
Figura 9: stima digitale del trasporto sull'attuale situazione (condizioni del 04 maggio 2010)	17
Figura 10: stima digitale del trasporto sulla situazione del progetto (condizioni del 04 maggio 2010).....	17
Figura 11: Modello fisico: illustrazione del frangersi di un'onda al passaggio della diga sommersa (sinistra) e all'altezza del profilo di spiaggia (destra).....	19
Figura 12: Modello digitale (M3WFM): campo di velocità istantanee durante il passaggio di un'onda sopra la diga sommersa....	20
Figura 13: Vista in pianta delle opere sommerse (estensioni dei pennelli) e rilevamento degli spaccati.....	20
Figura 14: profilo di lunghezza dell'estensione del pennello Bonaparte	21
Figura 15: spaccato trasversale dell'estensione del pennello Bonaparte.....	21
Figura 16: profilo di lunghezza dell'estensione del pennello Diana	21
Figura 17: spaccato trasversale dell'estensione del pennello Diana	21
Figura 18: dimensioni e rendering in 3D di un modulo di piede di diga da disporre in sezione retta.....	22
Figura 19: dimensioni e rendering in 3D di un modulo di piede di diga da disporre in testa (sviluppo curvo)	22
Figura 20: rendering in 3D dei moduli disposti in piede di scarpata dell'estensione sottomarina del pennello Bonaparte (opzione 1 a sinistra, opzione 2 a destra).....	23
Figura 21: rendering in 3D dei moduli disposti in piede di scarpata dell'estensione sottomarina del pennello Diana (opzione 1 a sinistra, opzione 2 a destra).....	23
Figura 22: dispositivo Sargass impiantato in un substrato mobile (a sinistra) e in un substrato duro (a destra)	24
Figura 23: Occupazione di principio dell'opzione 1 con l'installazione di un dispositivo lineare di 93 moduli Sargass volti a ridurre le velocità idrodinamiche vicino al fondale prima della spiaggia senza impattare le zone di matta morta della prateria di posidonie.	24
Figura 24: Occupazione di principio dell'opzione 2 con l'installazione di un dispositivo lineare di 205 moduli Sargass volti a ridurre le velocità idrodinamiche vicino al fondale prima della spiaggia	24
Figura 25: Occupazione di principio dell'opzione 3 con le superfici considerate per l'impianto delle 400 talee.....	25

1. RIFERIMENTI

1.1 Riepilogo dei principali rapporti e rendering

- Inventario degli studi esistenti

[1] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2018, "Etat des lieux des études et données existantes" rif. CORSR-20-2017-EDL-01-0

- Inventario della batimetria, della biocenosi e dei materiali sedimentari

[2] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2018, "Levé topo/bathy et cartographie des biocénoses" rif. CORSR-20-2017-EDL-02-0

- Studio del funzionamento idrosedimentario della spiaggia

[3] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2018, "Modélisation hydrosédimentaire" rif. 21802818

- Studio delle soluzioni e delle prospettive di sviluppo

[4] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2018, "Analyse des solutions et perspectives d'aménagements" rif. CORSR-20-2017-AVP-01-0

- Studio complementare ecologico

[5] DHI-CORINTHE Ingénierie, P2A Dév., 2019, "Diagnostic écologique" rif. CORSR-20-2017-AVP-03-0

[6] DHI-CORINTHE Ingénierie, P2A Dév., 2019, "Notice d'écoconception" rif. CORSR-20-2017-AVP-02-0

[7] DHI-CORINTHE Ingénierie, P2A Dév., 2019, "Stratégie d'écoconception" rif. CORSR-20-2017-AVP-06-0

- Studio complementare del rischio sommersione

[8] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2019, "Etude du risque submersion" rif. CORSR-20-2017-AVP-04-1

- Studio complementare di ricomposizione spaziale

[9] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2020, "ANNEXE Etude du risque submersion" rif. CORSR-20-2017-AVP-05-1

[10] Agence GUILLERMIN-A&TU-CORINTHE Ingénierie, 2019, "Plan de masse" (e relativi spaccati) rif. 2019-10-07 PM

- Campagna di prove in canale a moto ondoso su modello fisico in 2 D

[11] DHI-CORINTHE Ingénierie, 2020, "Rapport de campagne d'essais" rif. CORSR-20-2017-AVP-07-1

1.2 Riepilogo delle riunioni

- [12] Riunione di avvio in data 31/08/2017 (rif. del resoconto: CORSR 20 - 2017_CR _20170831_V00)
- [13] Riunione di presentazione dei risultati di studio del funzionamento idrosedimentario in data 29/03/2018
- [14] Riunione di ridefinizione degli studi, in data 15/06/2018 (rif. del resoconto: CORSR 20 - 2017_CR _20180615_V02)
- [15] Riunione di primo contatto preliminare con la DDTM in data 19/07/2018 (rif. del resoconto: CORSR 20 - 2017_CR _20180719_V00)
- [16] Riunione di presentazione della diagnosi ecologica e di riorientamento degli studi e del progetto in data 21/01/2019 (rif. del resoconto: CORSR 20 - 2017_CR _20190121_V01)
- [17] Riunione di presentazione dello studio del rischio sommersione in data 25/07/2019 (rif. del resoconto: CORSR 20 - 2017_CR _20190725_V00)
- [18] Riunione di presentazione dello scenario di ricomposizione spaziale in Comune, in data 05/11/2019

1.3 Opera di riferimento tecnico

- [19] CIRIA; CUR; CETMEF 2009, "Guide enrochement"

2. OGGETTO DELLO STUDIO ED EVOLUZIONI DELLE RIFLESSIONI E DEL CAPITOLATO DEGLI ONERI

2.1 Contesto di studio iniziale tratto dal capitolato delle clausole tecniche particolari

Il comune di Saint-Raphaël, come tutto il litorale mediterraneo, nel corso degli ultimi anni ha visto un aggravarsi dell'intensità e della frequenza delle tempeste marittime.

Queste tempeste hanno effetti a breve e a lungo termine.

A breve termine, la sommersione dovuta all'intensità del moto ondoso rappresenta un pericolo per gli abitanti e per le infrastrutture delle vicinanze.

A lungo termine, queste tempeste ripetute hanno un effetto nefasto che favorisce l'erosione dei settori esposti. Questa erosione, spesso accentuata dagli sviluppi di origine antropica (muri del lungomare, opere portuali e costiere, ecc.), riduce il ruolo cuscinetto delle spiagge naturali e porta a un aumento dei danni alle opere durante gli episodi di tempesta.

È quindi sembrato necessario esaminare le soluzioni tecniche e ambientali per tutelare il litorale.

In base a questa constatazione, il comune di Saint Raphaël si è impegnato a partecipare alla definizione della strategia transfrontaliera di lotta all'erosione della linea di costa nell'ambito di una partnership globale in scala europea (programma di collaborazione Marittimo).

Il comune, che ha preso l'iniziativa, ha già commissionato diversi studi per queste spiagge del centro storico, tra cui la spiaggia del Veillat. Da allora, il comune aveva messo in stand by il proseguimento dei progetti per via degli importanti investimenti da prendere a carico.

Lo sviluppo e la protezione di queste spiagge riveste quindi un notevole interesse per il futuro e per rendere sostenibile l'attrattività del comune.

Le sfide sono estremamente importanti e richiederanno l'esame di sviluppi a medio e lungo termine secondo la loro natura:

- Sfide economiche: diminuzione delle spese correnti di manutenzione, sostenibilità dello status balneare del comune e delle sue attività nautiche ed estive.
- Sfida sociale: rendere possibile un uso più comodo delle spiagge e degli spazi pubblici della zona e ciò tutto l'anno.
- Sfida ambientale: ridurre gli effetti di dispersione delle ricariche annue, nonché la loro necessità, agire per la tutela degli ambienti naturali connessi agli spazi balneari, tutelare gli ecosistemi marini oltre alle considerazioni etiche per mantenerne e rafforzarne la funzionalità, nella fattispecie in materia di difesa dall'erosione, di mantenimento della qualità delle acque di balneazione e di produzione alieutica.

2.2 Obiettivi iniziali del progetto

Essi sono indicati come segue nel Capitolato delle Clausole Tecniche Particolari:

1. Tutelare dall'erosione la spiaggia del Veillat, caratterizzando le zone di erosione e di ripascimento della spiaggia e conoscere le soluzioni che possono essere attuate per la stabilizzazione della linea di costa, promuovendo processi ecotecnologici (scogliere artificiali).
2. Creare o ripristinare un ecosistema ricco e diversificato attraverso l'impianto di queste scogliere artificiali.

2.3 Riorientamento degli obiettivi del programma e dello svolgimento dello studio

Il riorientamento dello studio e degli obiettivi del progetto è stato avviato con il Committente e con i rappresentanti MAREGOT del Dipartimento del Var durante la riunione tenutasi alla fine di gennaio 2019 (rif. [16]), in particolare a seguito di:

- assenza di erosione constatata durante le prime fasi dello studio sull'evoluzione storica del sito e sui suoi successivi sviluppi, confermata dall'analisi del funzionamento idrosedimentario della spiaggia nella sua attuale configurazione (cfr. rif. [3]),
- ricevimento della lettera sulle grandi linee a seguito dell'incontro con la DDTM di luglio 2018 (cfr. rif. [15]),
- incarico complementare di inventario ecologico (cfr. rif. [5]) emesso ai primi del 2019.

Stabilito che il "rischio erosione" non è significativo sulla spiaggia del Veillat, è stato convenuto che l'obiettivo fosse ricentrato sul rischio di sommersione marina.

La messa a punto inizialmente auspicata di un dispositivo per combattere il ritiro della linea di costa è quindi cambiata verso la messa a punto di un dispositivo di protezione dalle sommersioni marine, in particolar modo per la metà Ovest della spiaggia, che è fortemente impattata dalle mareggiate per via della sua esposizione alle onde e ai getti intensi di riva.

L'inventario ecologico e le raccomandazioni emesse nell'ambito della componente "ecoprogettazione" (relazioni [5] e [6]) hanno portato a limitare le scelte tecniche sulla natura delle opere realizzabili: dato che le scogliere artificiali delle opere tradizionali (dighe, pignoni, ecc.) costituiscono un habitat piuttosto idoneo alle specie locali, l'innovazione in termini di ecoprogettazione si basa su blocchi artificiali che sostituiscono le scogliere artificiali di arresto di piede e aventi in superficie piccoli meandri che offrono un habitat adatto alle specie più piccole e ai giovani (relazione [7]).

Lo studio sul rischio di sommersione avviato a metà del 2019 (cfr. relazione [8]) è stato seguito da uno studio di ricostruzione spaziale che comprendeva nella fattispecie una riflessione sulle infrastrutture esistenti nella spiaggia intertidale, nonché sull'insediamento, sull'occupazione e sul numero di concessioni private.

Lo scenario globale finale che ne risulta comprende una massiccia ricarica della spiaggia, sola soluzione per diminuire le sommersioni e l'impatto dei getti di riva nella spiaggia intertidale (vedi [9] e [10]).

Questa sintesi riassume gli elementi di studio che giustificano la composizione di questo scenario finale.

3. RISCHIO DI SOMMERSIONE

3.1 Riferimenti inerenti alle sommersioni e ai flussi di superamento

La seguente tabella riporta le soglie di superamento considerate per lo studio. Il flusso di superamento medio "q" (sulla durata dell'episodio) e il volume che supera il massimo « V_{max} » (per una sola onda) sono considerati per valutare il livello di rischio a cui sono esposti i pedoni che circolano nella spiaggia intertidale o nei locali situati sul lungomare Lattre de Tassigny:

Débit moyen (l/s/ml)	Volume maximum (m ³ /ml)	
q < 0.03	V _{max} < 0.002	Danger faible
0.03 < q < 0.1	0.002 < V _{max} < 0.02	Danger modéré
0.1 < q < 1.0	0.02 < V _{max} < 0.5	Danger fort
1.0 < q	0.5 < V _{max}	Danger extrême

Oltre a questi valori di riferimento connessi al superamento in termini di flusso medio e di volume massimo, si trovano anche dei riferimenti sul livello di rischio di trascinarsi di una persona a seconda della sommersione (altezza dell'acqua e velocità di scorrimento), illustrati dal seguente grafico:

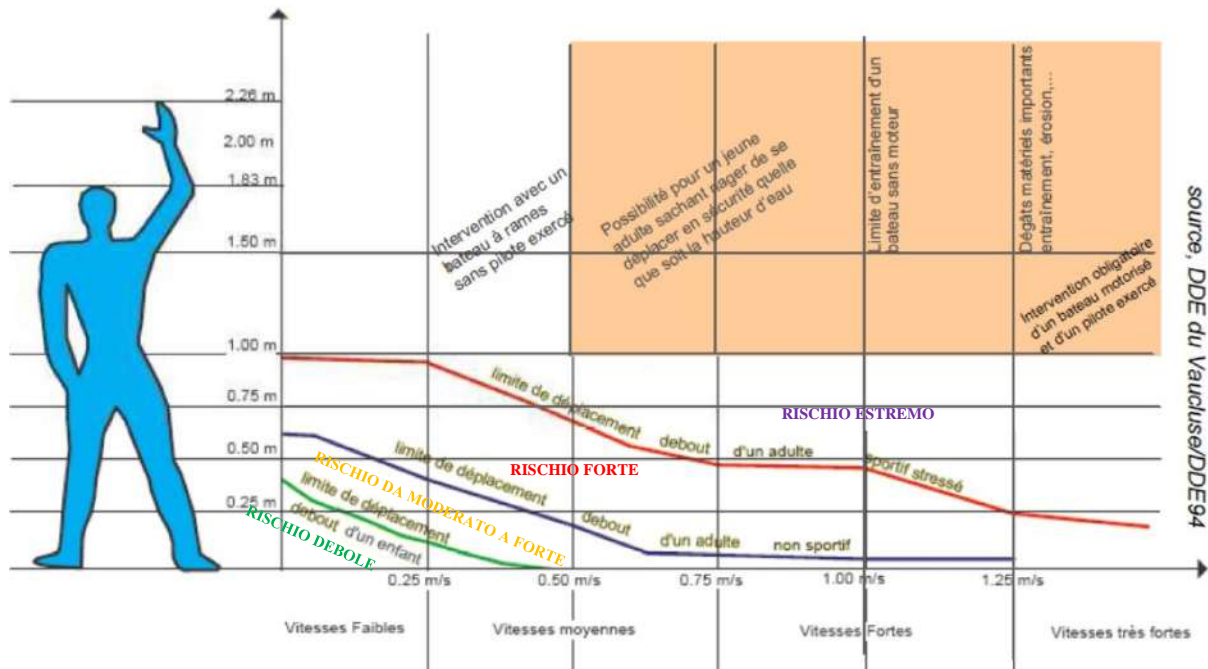


Figura 1: soglie di altezza d'acqua e di velocità di scorrimento che favoriscono lo spostamento delle persone (guida PPR allagamenti, nota complementare sullo scorrimento periurbano)

Questo grafico, tratto dalla nota complementare alla guida PPR allagamenti sullo scorrimento periurbano, consente di identificare le caratteristiche del getto di riva (spessore dell'altezza d'acqua e velocità di scorrimento) che favorisce il trascinarsi di un pedone fermo o circolante su una zona sommersibile secondo le sue capacità fisiche (bambino, adulto non sportivo, adulto sportivo).

3.2 Prima fase dello studio del rischio di sommersione: stato attuale di riferimento

Questa prima fase ha consentito di stabilire una constatazione quantitativa di riferimento del rischio di sommersione della spiaggia intertidale nella sua attuale configurazione sulla base di un evento tipo (tempesta del 04 maggio 2010).

Le zone sommerse constatate durante la simulazione sul modello digitale e gli ordini di grandezza dei superamenti sono coerenti con la constatazione visiva di allora.



Figura 2: illustrazioni tratte dal video della tempesta del 04 maggio 2010

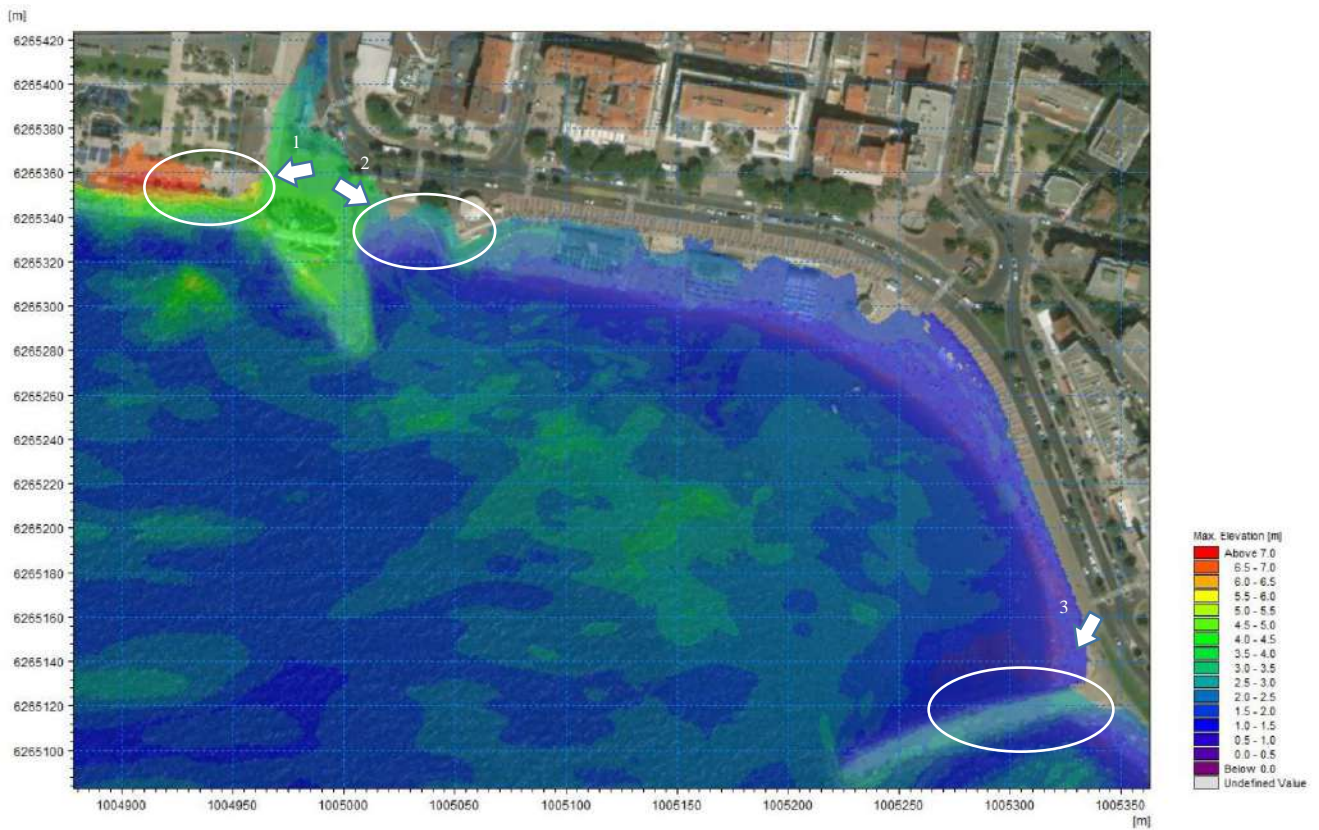


Figura 3: zone sommerse e altezza massima raggiunta dal livello d'acqua

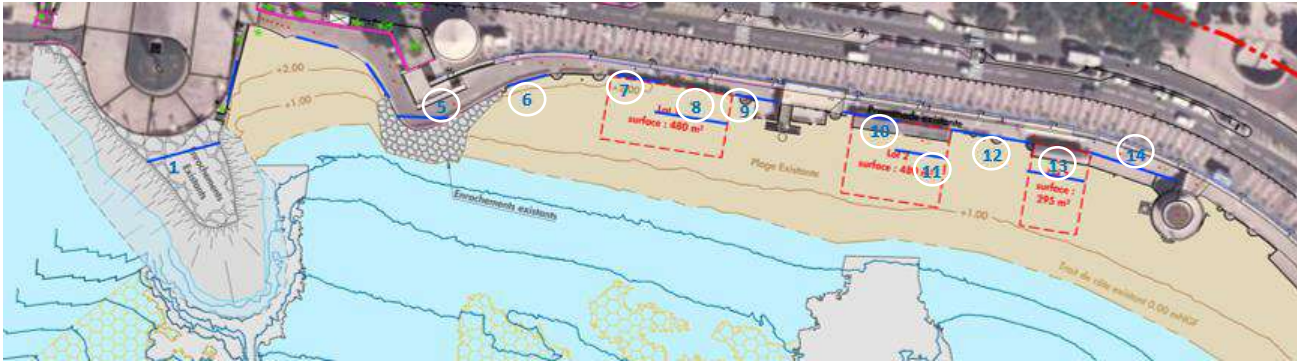


Figura 4: segmenti di controllo in cui sono stati calcolati e rilevati i superamenti e le altezze d'acqua

Segment #		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Franchissement (débit moyen et volume maximum)											
Actuel	q (l/s/ml)	11.17	0.62	2.33	2.49	0.06	0.33	0.76	0.23	1.70	0.09
	V _{max} (m ³ /ml)	2.75	0.17	0.61	0.73	0.03	0.08	0.42	0.13	0.60	0.03
Epaisseur et vitesse max de lame d'eau											
Actuel	h _{lame d'eau} (m)	0.6	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.1
	U _{max} (m/s)	2.0	0.5	0.6	0.5	0.1	0.2	0.5	0.7	0.6	0.2

Franchissement

Débit moyen (l/s/ml) Volume maximum (m³/ml)

q < 0.03	V _{max} < 0.002
0.03 < q < 0.1	0.002 < V _{max} < 0.02
0.1 < q < 1.0	0.02 < V _{max} < 0.5
1.0 < q	0.5 < V _{max}

Lame d'eau (épaisseur et vitesse)

Niveau de risque de déplacement

Danger faible	FAIBLE
Danger modéré	MODERE (adulte) à FORT (enfant)
Danger fort	FORT (adulte)
Danger extrême	EXTREME

In seguito allo studio delle varie soluzioni miranti a diminuire il rischio di sommersione nella spiaggia del Veillat (vedi relazione [8]), è stato constatato che l'unica estensione delle opere esistenti (pignone Bonaparte e pignone Diana) fino ai limiti di occupazione delle praterie protette non bastano a dare una risposta soddisfacente.

Riuscire a diminuire le sommersioni della spiaggia intertidale necessiterebbe il ricorso a opere emerse massicce il cui impatto si scontrerebbe con alcuni obiettivi perseguiti, nella fattispecie ambientali. Tali opere non possono quindi essere prese in considerazione.

Una ricarica massiccia della spiaggia rappresenta l'unica alternativa in grado di costituire una zona cuscinetto sufficientemente ampia per attutire e limitare i getti di riva che sommergono la spiaggia intertidale.

Si è quindi proposto, congiuntamente a un'ottimizzazione degli sviluppi della spiaggia intertidale (edifici urbani del lungomare, occupazione delle concessioni private, ecc.), di sperimentare una soluzione che integri una massiccia ricarica della spiaggia nel suo complesso, nonché un'importante modifica della spiaggia intertidale nella parte ovest e un'estensione sottomarina dei pignoni esistenti fino al limite dell'area delle praterie protette per stabilizzare al meglio la ricarica.

3.3 Seconda fase dello studio del rischio di sommersione: progetto finale

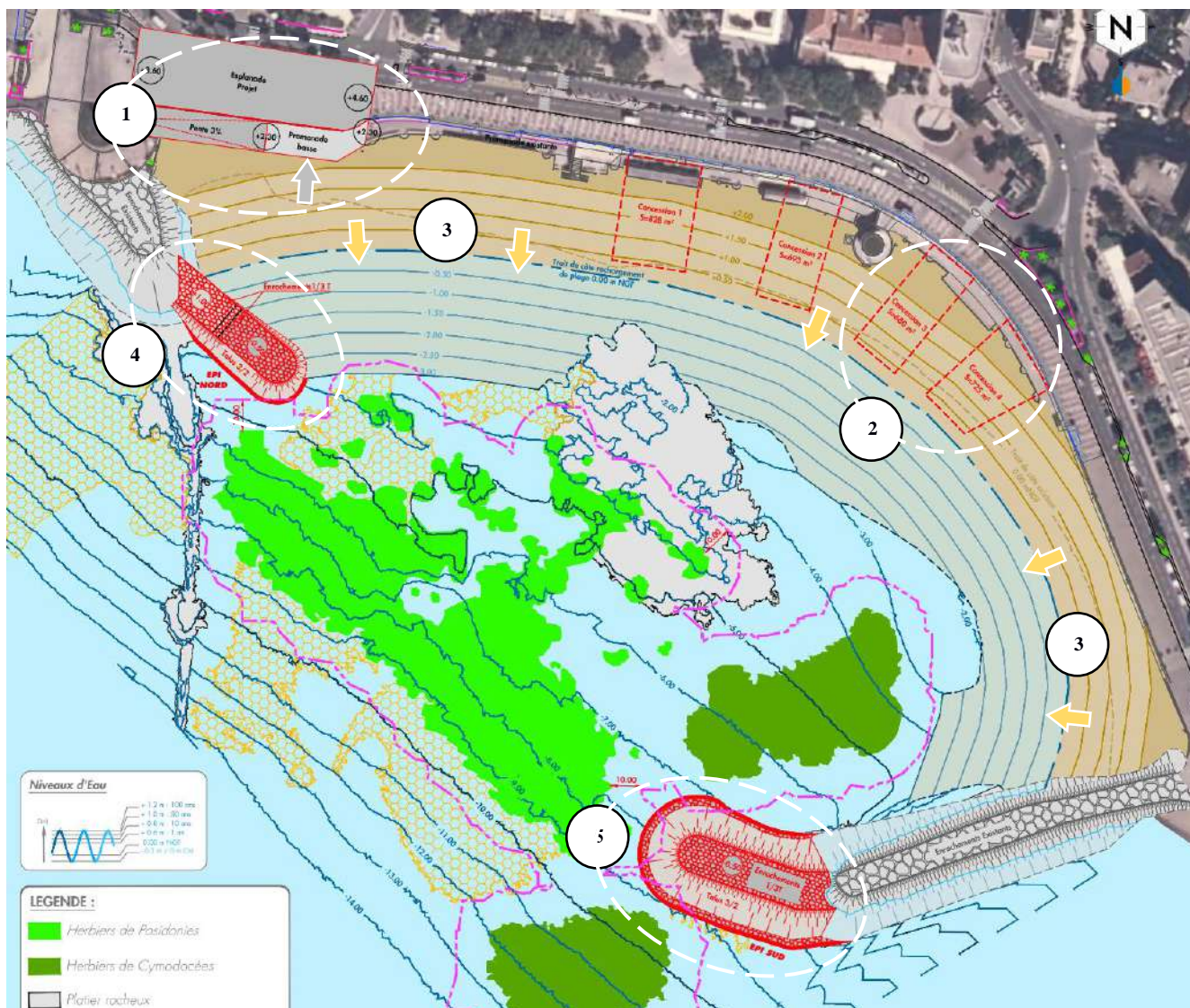


Figura 5: vista in pianta degli sviluppi previsti nell'ambito della ricomposizione spaziale e di lotta contro il rischio di sommersione

Punti scaturiti dalle riflessioni condotte nell'ambito dello studio di ricomposizione spaziale:

1. Arretramento del punto duro formato dallo zig-zag del lungomare basso attorno alla scala della giostra; rimozione della scogliera artificiale di protezione dello zig-zag; ampliamento del lungomare alto; riallineamento del lungomare basso con ricongiungimento all'esistente ad est dell'attuale scala.
2. Trasferimento del lotto di concessione n. 1 ad est della torre ed eventuale aggiunta di un quarto lotto di concessione; i 4 lotti di concessione sono così raggruppati da ambo i lati della torre nella parte centrale della spiaggia del Veillat; due ampie aree di spiaggia pubblica sono mantenute su entrambi i lati; l'intero lineare rappresenta quindi 1/3 di spiaggia pubblica, 1/3 di concessione privata e 1/3 di spiaggia pubblica.

Punti scaturiti dalle riflessioni condotte nell'ambito dello studio del rischio di sommersione:

3. Ricarica massiccia della spiaggia (22.000 m³) che consente un significativo ampliamento su tutto il lineare per costituire una zona cuscinetto e attutire al meglio i getti di riva. Questo ampliamento consente di aumentare notevolmente la superficie potenzialmente sfruttabile delle concessioni nonché la superficie di spiaggia pubblica.
4. Ampliamento del pignone Bonaparte (opera sottomarina affiorante, leggermente emersa all'altezza del raccordo con l'esistente), che forma un arresto di mantenimento della ricarica dal lato ovest della spiaggia.

- Ampliamento del pignone Diana (opera sottomarina affiorante) che costituisce un frangiflutti sommerso destinato a limitare l'impatto del moto ondoso sulla parte centrale e orientale della spiaggia; quest'opera è inoltre destinata a ostacolare la corrente di cacciata che risale lungo il pignone esistente per limitare la fuoriuscita di materiali di ricarica verso il largo.

Per via della massiccia ricarica, le simulazioni mostrano che la parte centrale della spiaggia del Veillat non è più sommersa fino alle infrastrutture della spiaggia intertidale. Tuttavia, le estremità ad ovest e a sud-est sono ancora parzialmente o totalmente sommerse, in particolar modo la zona della spiaggia ovest e la spianata Delayen per via del superamento verso ovest del pignone (assenza di una spiaggia di attutimento, stretta scarpata rocciosa).

I superamenti e le altezze d'acqua sono stati rilevati all'altezza di 9 segmenti di controllo identici a quelli dell'attuale configurazione (in blu). Sono stati aggiunti 9 nuovi segmenti di controllo (in rosso) per affinare l'analisi del rischio di sommersione nella spiaggia intertidale a +2,00 m NGF e sulla parte sud-est.

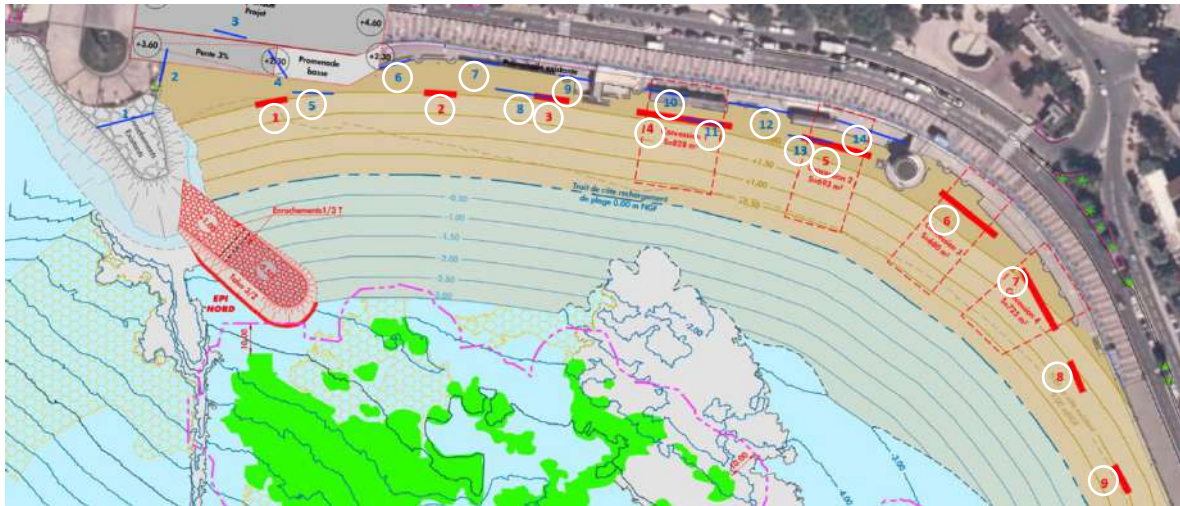


Figura 6: segmenti di controllo in cui sono stati calcolati e rilevati i superamenti e le altezze d'acqua

I risultati sono riuniti nella seguente tabella:

Segment #		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Franchissement (débit moyen et volume maximum)																					
Actuel	q (l/s/ml)	11.17	0.62	2.33	2.49	0.06	0.33	0.76	0.23	1.70	0.09										
	V _{max} (m ³ /ml)	2.75	0.17	0.61	0.73	0.03	0.08	0.42	0.13	0.60	0.03										
PROJET FINAL	q (l/s/ml)	13.05	0.68	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.18	0.14	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	2.94	
	V _{max} (m ³ /ml)	3.41	0.34	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.28	0.06	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.61	
Epaisseur et vitesse max de lame d'eau																					
Actuel	h _{lame d'eau} (m)	0.6	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.1										
	U _{max} (m/s)	2.0	0.5	0.6	0.5	0.1	0.2	0.5	0.7	0.6	0.2										
PROJET FINAL	h _{lame d'eau} (m)	0.4	0.1	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	
	U _{max} (m/s)	2.9	1.6	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.6	

Franchissement

Débit moyen (l/s/ml)	Volume maximum (m ³ /ml)
q < 0.03	V _{max} < 0.002
0.03 < q < 0.1	0.002 < V _{max} < 0.02
0.1 < q < 1.0	0.02 < V _{max} < 0.5
1.0 < q	0.5 < V _{max}

Danger faible
Danger modéré
Danger fort
Danger extrême

Lame d'eau (épaisseur et vitesse)

Niveau de risque de déplacement

FAIBLE
MODERE (adulte) à FORT (enfant)
FORT (adulte)
EXTREME

Rispetto ai valori di riferimento, il rischio oscilla essenzialmente sull'attuale caso di riferimento tra livello elevato e livello estremo per tutti i segmenti di controllo in blu.

In situazione di progetto, il rischio evolve in un livello di pericolo da moderato a debole, su un'ampia parte centrale della spiaggia. Le estremità ovest e sud-est restano a un livello di pericolo da forte a estremo. Il rischio di sommersione nella spiaggia intertidale è quindi molto attenuato nella parte centrale della spiaggia, come riassunto nei seguenti schemi:

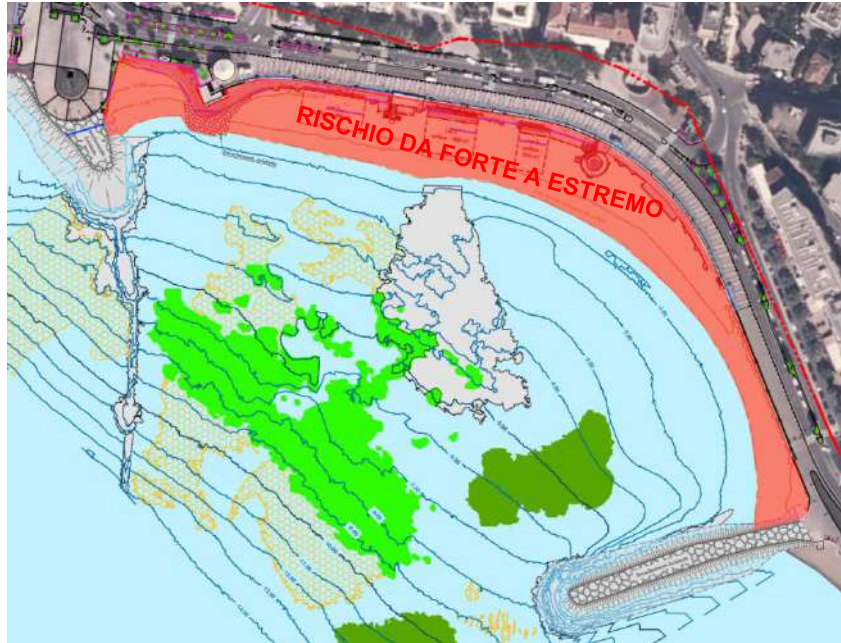


Figura 7: livello di rischio nell'attuale caso

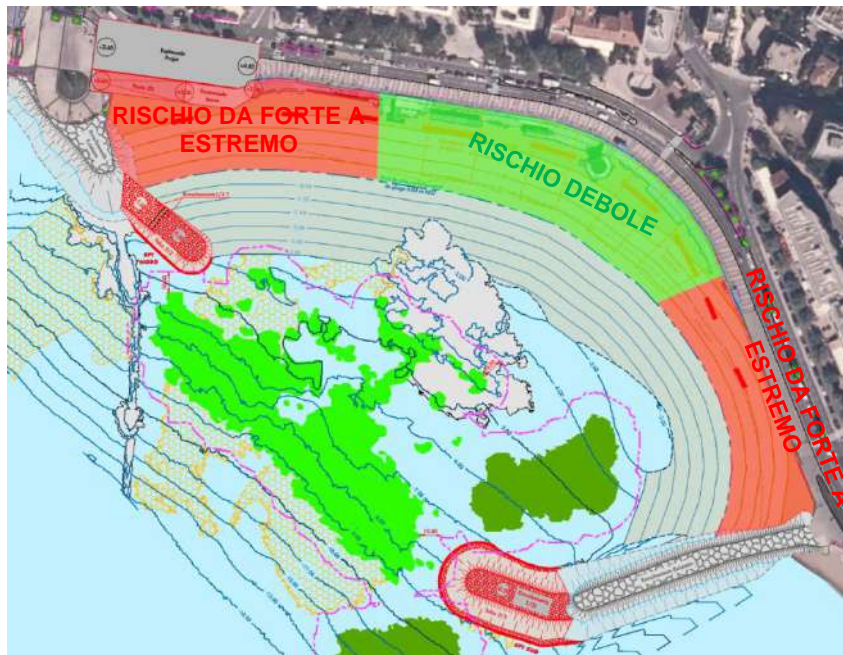
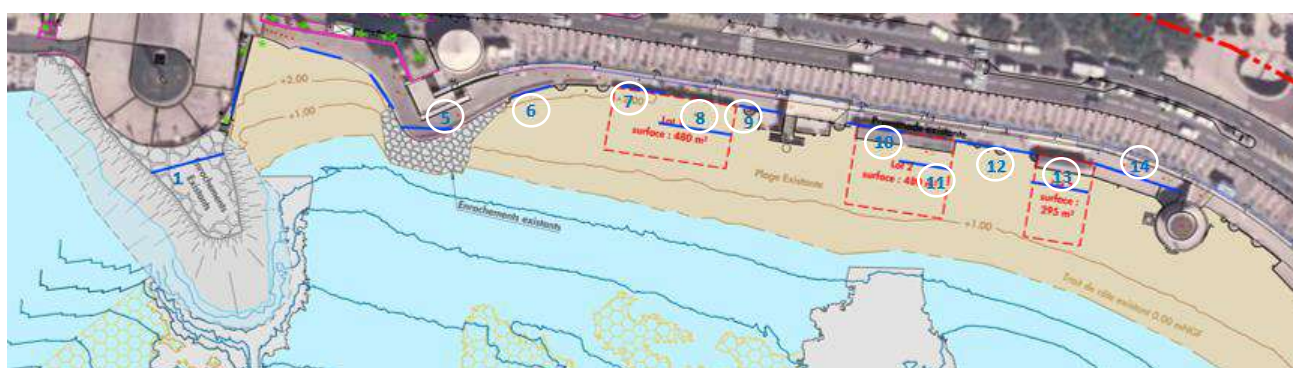


Figura 8: livello di rischio nel caso del progetto

Differenziale rispetto ai risultati di riferimento (in percentuale):

Segment #		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Franchissement (débit moyen et volume maximum)											
Actuel	q (l/s/ml)	11.17	0.62	2.33	2.49	0.06	0.33	0.76	0.23	1.70	0.09
	V _{max} (m ³ /ml)	2.75	0.17	0.61	0.73	0.03	0.08	0.42	0.13	0.60	0.03
PROJET FINAL	q (l/s/ml)	17%	10%	-100%	-84%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	V _{max} (m ³ /ml)	24%	98%	-100%	-72%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Epaisseur et vitesse max de lame d'eau											
Actuel	h _{lame d'eau} (m)	0.6	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.1
	U _{max} (m/s)	2.0	0.5	0.6	0.5	0.1	0.2	0.5	0.7	0.6	0.2
PROJET FINAL	h _{lame d'eau} (m)	-33%	-50%	-100%	-20%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	U _{max} (m/s)	43%	209%	-100%	-32%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%

Echelle -100% 0% 100% (et plus)



In termini di superamento, il progetto finale consente una significativa diminuzione dei flussi e dei volumi tra i segmenti 7 e 14. All'estremità ovest, i superamenti non diminuiscono e sarebbero persino in leggero aumento.

Per quanto riguarda i getti di riva (altezza d'acqua e velocità di scorrimento), si è registrata una significativa diminuzione dal segmento 7 al segmento 14 correlata all'osservazione relativa ai superamenti.

Questa configurazione sviluppata sembrerebbe apportare la risposta più soddisfacente rispetto al rischio di sommersione, essenzialmente nella parte centrale della spiaggia del Veillat in cui potrebbero essere raggruppati 4 lotti di concessione. La protezione di questa zona centrale sarà così teoricamente garantita fino a un livello di tempesta di riferimento simile a quello del 04 maggio 2010.

3.4 Analisi idrosedimentaria del progetto finale

Lo scenario finale è stato studiato tramite simulazioni digitali nelle condizioni della tempesta del 4 maggio 2010. Queste modellizzazioni non prendono in considerazione i moduli habitat opzionali citati nella nota complementare di strategia di ecoprogettazione [7] (opzioni 1, 2 e 3) che potrebbero essere attuati nei piccoli fondali tra il pignone Bonaparte e la lastra rocciosa (scogliera) centrale.

L'analisi dei risultati mostra che per questo caso di progetto, rispetto all'attuale situazione:

- L'altezza delle onde che si avvicinano alla spiaggia del Veillat è significativamente ridotta;
- Le correnti invece sono accelerate con una circolazione in senso orario all'interno dell'insieme della cellula sedimentaria della spiaggia (per il caso attuale, si osservano due circolazioni opposte da ambo i lati della scogliera centrale);
- Il trasporto di sedimenti segue la stessa tendenza: un'inversione del trasporto di sedimenti per la parte occidentale della spiaggia, dovuta principalmente a:
 - Riprofilatura della spiaggia, che modifica l'orientamento della riva rispetto all'incidenza delle onde;
 - Prolungamento verso sud-est del pignone Bonaparte, che induce localmente una forte accelerazione delle correnti;

Inoltre, nella parte est della spiaggia, il prolungamento del pignone Diana rafforza il trasporto di sabbia dal centro verso l'estremità est.

L'orientamento e l'intensità del trasporto sedimentario saranno quindi modificati, nella fattispecie nella parte ovest della spiaggia:

- ⇒ Ciò dovrà comportare un cumulo dello stock sedimentario più importante ad est e quindi una traslazione/rotazione della posizione di equilibrio verso est;
- ⇒ Lo sviluppo delle opere **non può essere progettato senza una notevole ricarica di sabbia**, quale prevista nel caso di progetto finale.

L'estremità nord-ovest della spiaggia, anche se protetta meglio dalle onde dal prolungamento del pignone Bonaparte, sarà soggetta a una corrente e a un trasporto maggiore in caso di tempesta. Questa zona resterà quindi soggetta a termine a un maggiore rischio di erosione:

- ⇒ Per questa parte esposta, se l'impianto attualmente previsto del progetto non viene modificato, **si raccomanda allora di aumentare notevolmente la granulometria dei materiali destinati alla ricarica**.

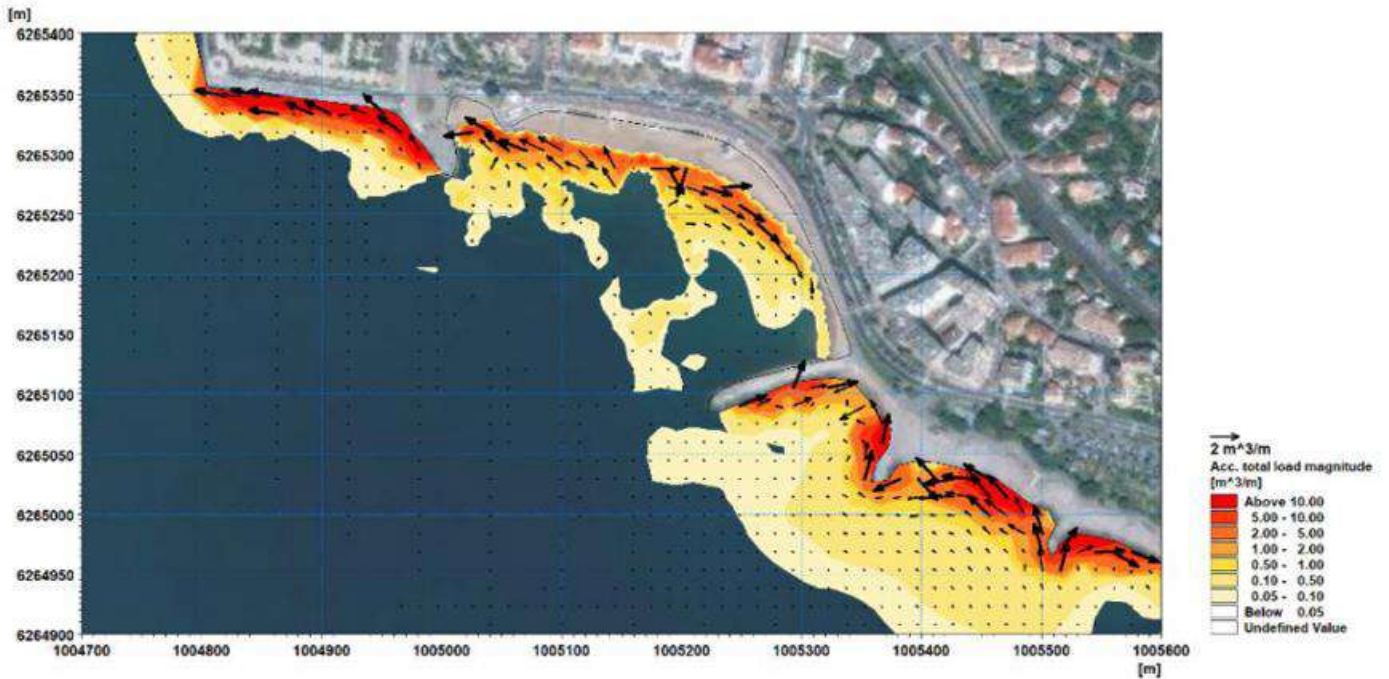


Figura 9: stima digitale del trasporto sull'attuale situazione (condizioni del 04 maggio 2010)

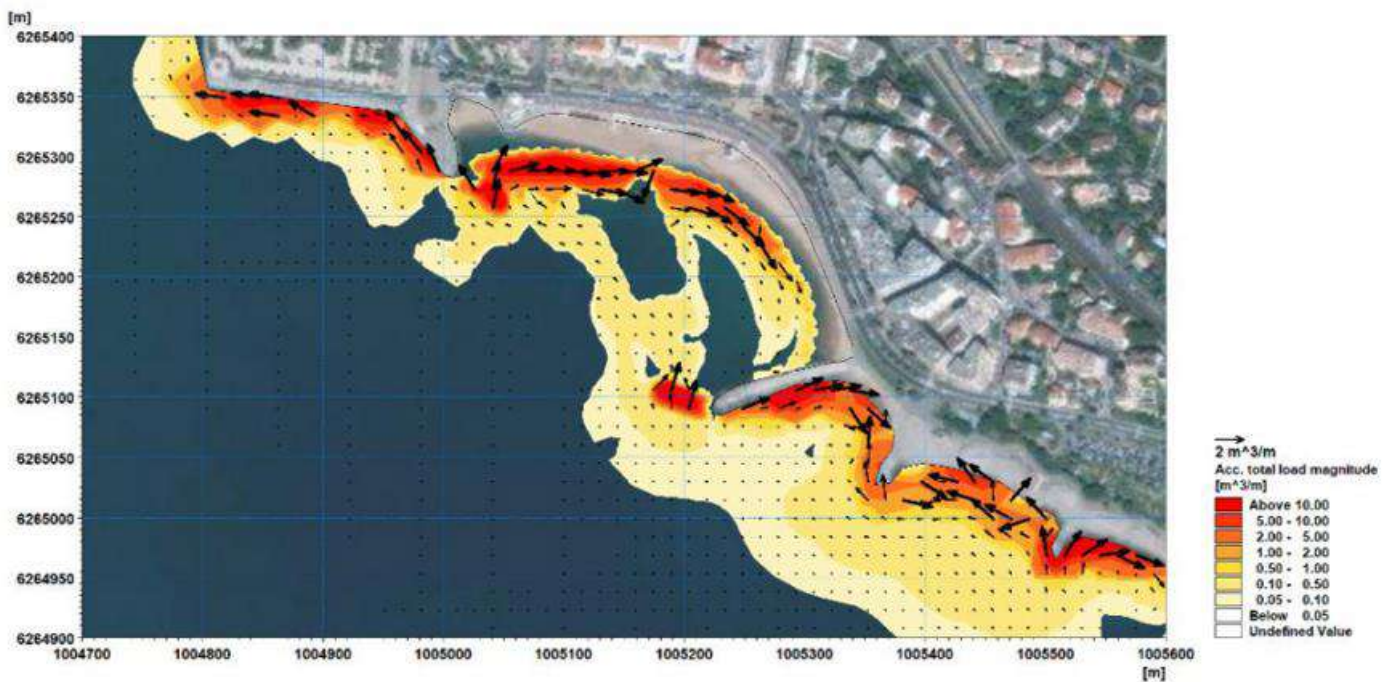


Figura 10: stima digitale del trasporto sulla situazione del progetto (condizioni del 04 maggio 2010)

4. NATURA E PROGETTAZIONE DELLE OPERE

Secondo la constatazione ecologica realizzata da P2A Développement (nota [5]) e le raccomandazioni emesse in termini di ecoprogettazione (nota [6]) per un mantenimento e un miglioramento della qualità dell'ecosistema della zona, si è rilevato che una scarpata di scogliere naturali offre un habitat del tutto propizio alle specie presenti.

In un primo tempo, si è quindi giudicato opportuno orientare le riflessioni su soluzioni tecniche che conservano la natura dei pignoni esistenti (scarpata di scogliere artificiali) adottando al contempo un profilo di altezza d'acqua sommerso per limitare i volumi di materiali e l'impatto ambientale e visivo dei nuovi allestimenti.

L'occupazione, vincolata in un primo tempo dall'estesa presenza di praterie protette, è stata ottimizzata per puntellare la ricarica massiccia della spiaggia lato ovest (estensione del pignone Bonaparte) proteggendo allo stesso tempo al meglio questa zona dagli assalti del moto ondoso e per limitare l'impatto delle onde e la fuoriuscita di materiali verso il largo dal lato est (estensione del pignone Diana).

Resta il fatto che per l'ampliamento del pignone Bonaparte, il recente studio idrosedimentario del progetto finale tenderebbe a mettere in evidenza la necessità di affinare l'orientamento della nuova opera per stabilizzare meglio la parte ovest della ricarica.

4.1 Dimensionamento dei blocchi di carapace che costituiscono le estensioni sottomarine dei pignoni

Le ipotesi di dimensionamento sono tratte dalle caratteristiche di un moto ondoso di progetto con un periodo di ritorno stimato di 50 anni davanti alla spiaggia del Veillat nella relazione [3].

Davanti alla spiaggia del Veillat, per -15 m, le condizioni del moto ondoso di PR in 50 anni sono le seguenti:

- $H_s = 2,6$ m
- $T_p = 9,3$ s

Il predimensionamento della dimensione dei blocchi di carapace è stato realizzato secondo gli approcci di Vida et al. (1995) e di Kramer e Burcharth (2004) raccomandati dalla Guida delle scogliere artificiali [19] nel caso di un'opera sommersa.

Per i calcoli, il livello medio d'acqua è stato fissato a +0,5 m NGF per conservare un approccio sicuro. Infatti, un livello dell'acqua maggiore porta a una dimensione di blocchi inferiore per identiche condizioni di moto ondoso.

Ipotesi di calcolo:

ρ_{water}	1 025	kg/m ³	masse volumique eau de mer
ρ_{stone}	2 650	kg/m ³	masse volumique roche
Δ	1.59		densité relative déjaugée
	-0.5	m NGF	arase de crête
n.e.	0.5	m NGF	niveau d'eau au repos
R_c	-1.0	m	revanche de crête

Con l'ausilio delle formule di Vida et al. (applicate con coefficienti diversi a seconda che si sia interessati alla scarpata anteriore, alla cresta, alla scarpata posteriore o a una sezione media globale dell'opera) e di Kramer e Burcharth, la massima altezza significativa ammissibile del moto ondoso a partire dalla quale si deve osservare l'insorgere del danno è stata calcolata per diversi diametri mediani nominali di blocchi (D_{n50}):

D _{n50}	H _s maximum admissible (début du dommage)				
	Vida <i>et al.</i> (1995)				Kramer et Burcharth (2004)
	Talus AV	Crête	Talus AR	Section tot.	
0.50	1.9	1.8	3.3	1.8	1.6
0.60	2.2	2.0	3.6	2.0	1.8
0.70	2.4	2.2	4.0	2.2	2.0
0.80	2.7	2.4	4.3	2.4	2.2
0.90	3.0	2.6	4.7	2.7	2.4
1.00	3.3	2.8	5.1	2.9	2.6
1.10	3.6	3.1	5.5	3.1	2.8
1.20	3.9	3.3	5.9	3.4	3.0
1.30	4.2	3.6	6.3	3.6	3.2
1.40	4.5	3.8	6.7	3.9	3.5
1.50	4.8	4.1	7.1	4.1	3.7
1.60	5.0	4.3	7.5	4.3	3.9
1.70	5.3	4.6	7.9	4.6	4.1
1.80	5.6	4.8	8.3	4.8	4.3
1.90	5.9	5.1	8.7	5.1	4.5
2.00	6.2	5.3	9.1	5.3	4.7

H_s > 2.6 m

In base alla formula e ai coefficienti applicati, si ottiene un H_s di 2,6 m (e oltre) per blocchi con un diametro nominale mediano compreso almeno tra 0,8 m e 1,0 m.

Il valore di 1,0 m è considerato per il D_{n50}.

Valore teorico della massa mediana (M₅₀), del limite nominale basso (NLL) e del limite nominale alto (NUL) per scegliere artificiali di D_{n50} = 1,0 m:

ρ _{stone}	2 650 kg/m ³	masse volumique roche
D _{n50}	1.0 m	diamètre nominal médian des blocs de carapace
M ₅₀	2 650 kg	masse médiane des blocs de carapace
NLL	1 459 kg	Nominal Lower Limit (passant à 15%)
NUL	3 555 kg	Nominal Upper Limit (passant à 70%)

La categoria standard 2-4 tonnellate, più vicina alle 1,5-3,6 tonnellate ottenute per il calcolo è quindi adottata per costituire il carapace delle opere sommerse. È inoltre dello stesso ordine di grandezza di quelle dei blocchi che costituiscono i pignoni esistenti.

4.2 Convalida della stabilità: campagna di prove sul modello fisico in 2D in canale a moto ondoso

Nel laboratorio della sede centrale di DHI in Danimarca, è stata effettuata una campagna di test in canale a moto ondoso per verificare la stabilità della scarpata rocciosa sottomarina e per convalidare la capacità del modello digitale M3WFM di stimare correttamente i superamenti in spiaggia intertidale (modello digitale utilizzato per lo studio di sommersione).

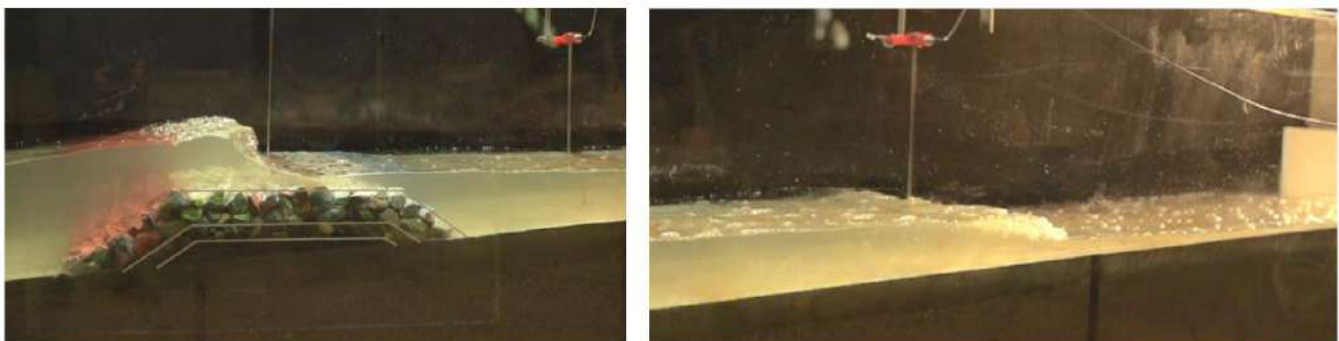


Figura 11: Modello fisico: illustrazione del frangersi di un'onda al passaggio della diga sommersa (sinistra) e all'altezza del profilo di spiaggia (destra).

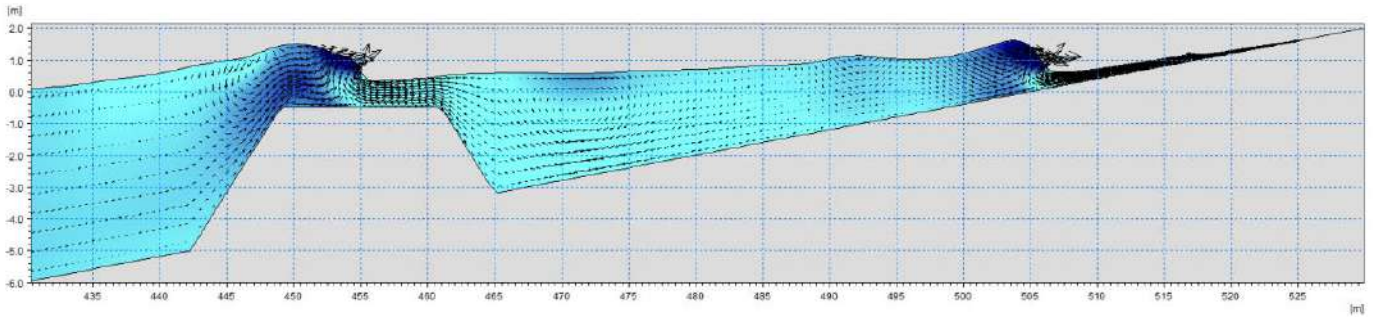


Figura 12: Modello digitale (M3WFM): campo di velocità istantanee durante il passaggio di un'onda sopra la diga sommersa.

I dettagli della campagna, delle osservazioni, dei risultati e del confronto con il modello digitale M3WFM sono presentati nella relazione [11].

Il profilo testato a canale comportava dei blocchi da 1-3 tonnellate in carapace, categoria corrispondente a un diametro nominale $D_{n50} = 0,9$ m inizialmente scelto in predimensionamento rispetto alla formula di Vida et al.

La stabilità è stata convalidata con una categoria standard inferiore, la categoria standard 2-4 tonnellate è quindi a maggior ragione convalidata per costituire il carapace della scarpata sottomarina. Quest'ultimo è stato infine scelto da un punto di vista conservativo per essere conforme con il risultato di sicurezza ottenuto con la formula di Kramer e Burcharth e per essere il più vicino possibile alla categoria dei blocchi che costituiscono gli esistenti pignoni.

4.3 Pianta e spaccati delle opere

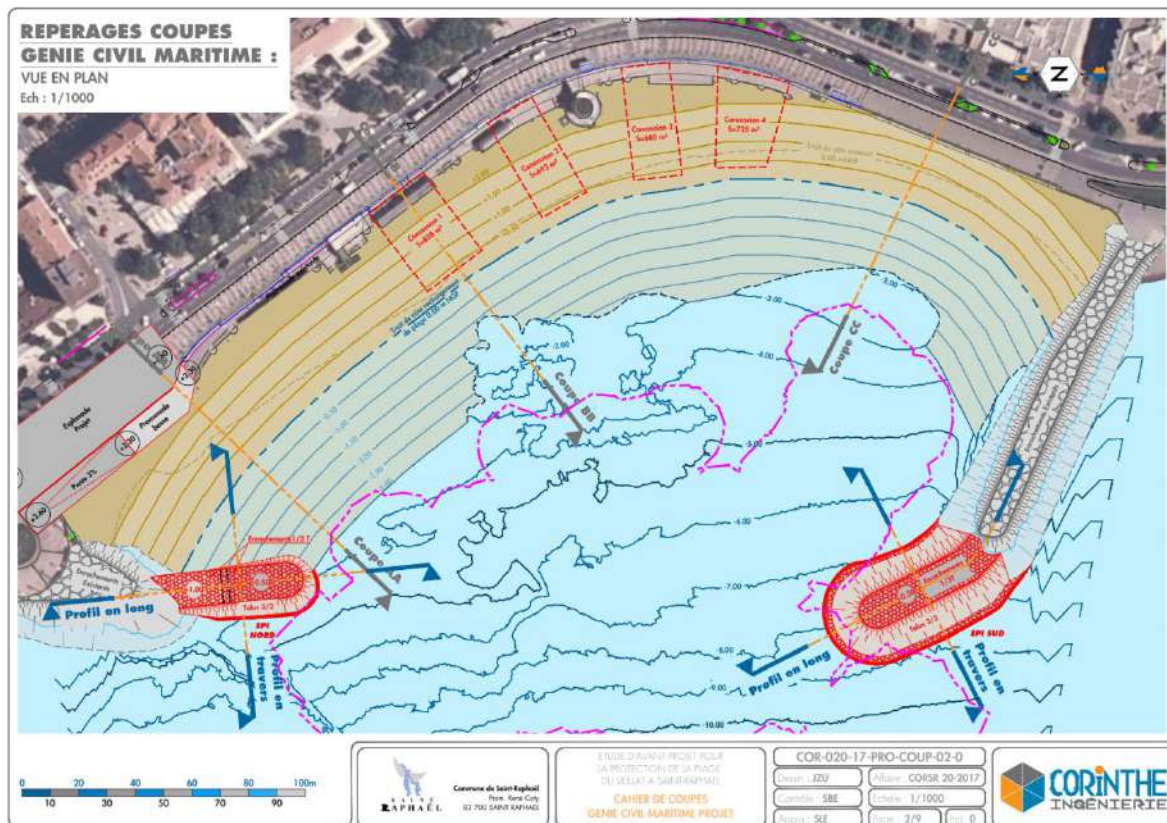


Figura 13: Vista in pianta delle opere sommerse (estensioni dei pignoni) e rilevamento degli spaccati.

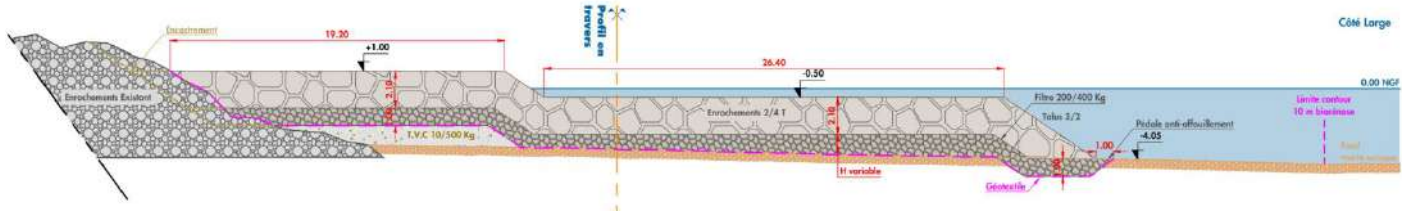


Figura 14: profilo di lunghezza dell'estensione del pignone Bonaparte

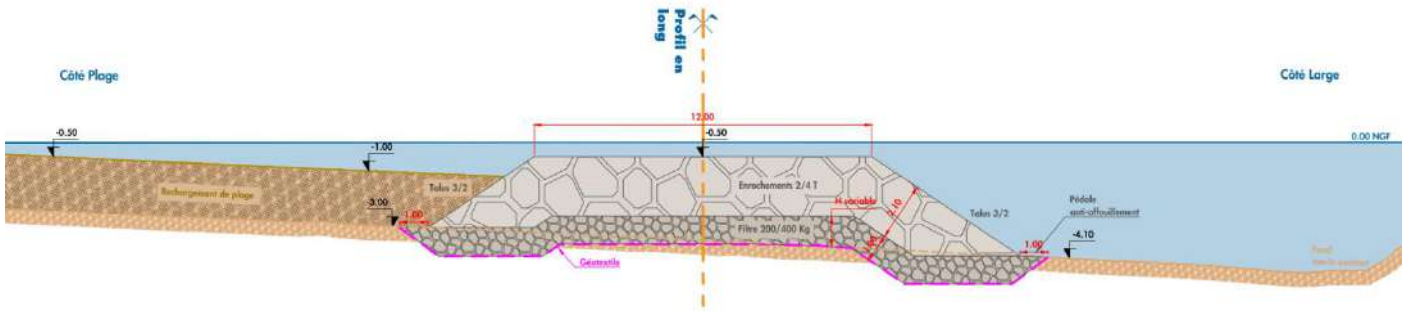


Figura 15: spaccato trasversale dell'estensione del pignone Bonaparte

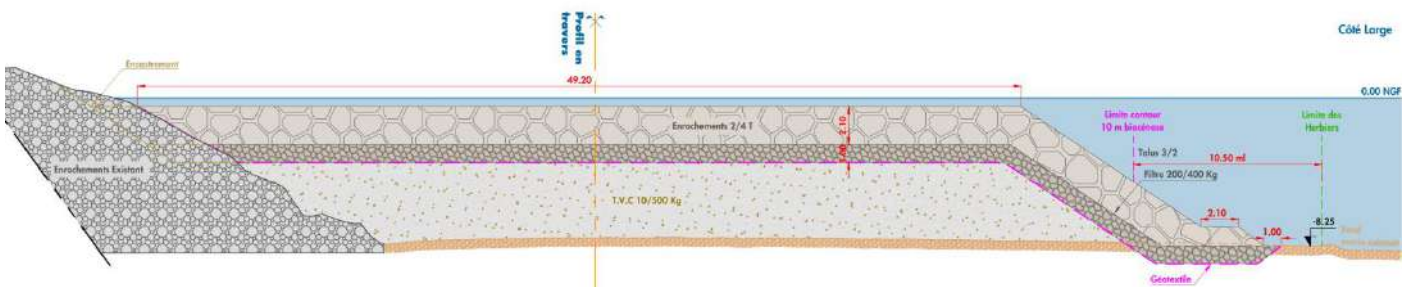


Figura 16: profilo di lunghezza dell'estensione del pignone Diana

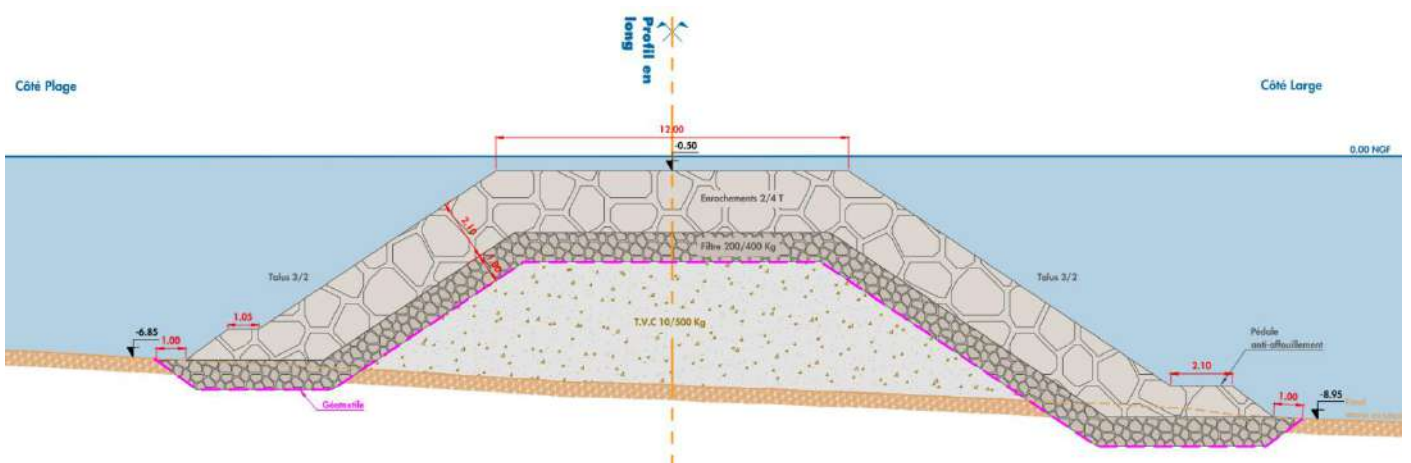


Figura 17: spaccato trasversale dell'estensione del pignone Diana

4.4 Ecoprogettazione: moduli artificiali in arresto di piede

L'ecoprogettazione che accompagna il progetto riporta le note [6] e [7] in cui si dettagliano le riflessioni che hanno condotto alle proposte riassunte qui di seguito.

Per via della natura delle opere considerate, l'opzione scelta è quella di munirle di moduli di cemento ai piedi della scarpata. Essi possono essere disposti in arresto di piede per fissare l'area di occupazione dell'opera e tutelare così la vicina prateria di posidonie da eventuali danni, contenendo i blocchi rocciosi durante la costruzione del frangiflutti sottomarino.

Questi moduli saranno appositamente progettati per formare habitat più complessi ed eterogenei di quelli formati dall'allestimento dei blocchi 2/4 T. Sono previste cavità profonde e altre più piccole in superficie alle pareti del modulo.

Con questa opzione, si tratta di realizzare strutture di cemento che presentano al contempo una funzionalità strutturale per l'opera di protezione e una funzionalità ecologica tramite la presenza di una categoria di habitat con forte potenziale ecologico, attualmente assente dalla zona vicina all'opera. Si porrà quindi l'attenzione sulla parte paesaggistica e sull'integrazione delle strutture per tutelare un aspetto quanto più naturale ed efficace possibile.

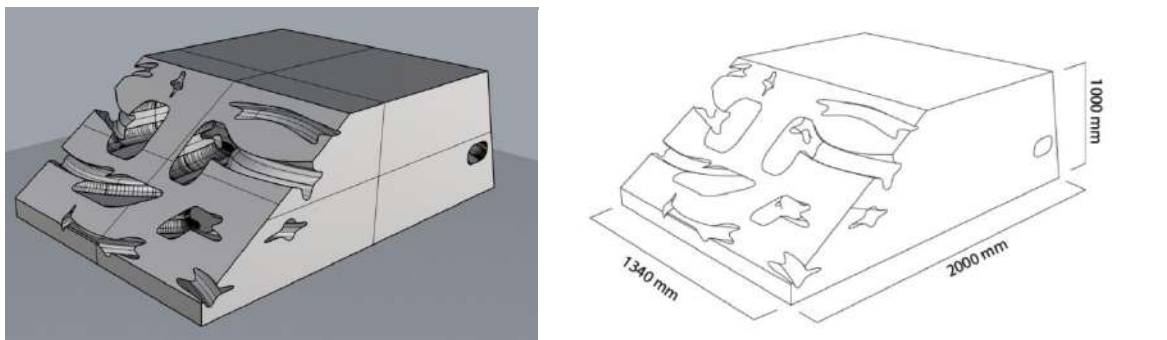


Figura 18: dimensioni e rendering in 3D di un modulo di piede di diga da disporre in sezione retta

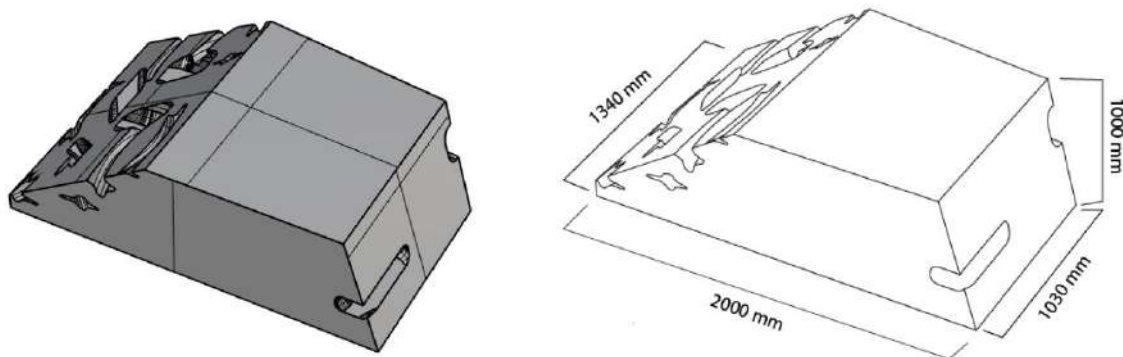


Figura 19: dimensioni e rendering in 3D di un modulo di piede di diga da disporre in testa (sviluppo curvo)

Caratteristiche di un modulo per sezione dritta:

- Massa: 2,8 T
- Volume di cemento: 1,2 m³
- Volume fuori tutto: 1,8 m³

L'inclusione di questi moduli sulle opere considerate avviene al posto dei blocchi di scogliere artificiali situati in arresto di piede.

Sono possibili 2 opzioni:

- Opzione 1: quasi tutto il piede delle 2 estensioni sottomarine è realizzato tramite moduli artificiali, questa opzione richiede 127 moduli in tutto;
- Opzione 2: i moduli sono concentrati soltanto sul piede di testa delle 2 opere, vicino alle praterie, questa opzione richiederebbe 40 moduli al massimo.



Figura 20: rendering in 3D dei moduli disposti in piede di scarpata dell'estensione sottomarina del pignone Bonaparte (opzione 1 a sinistra, opzione 2 a destra)

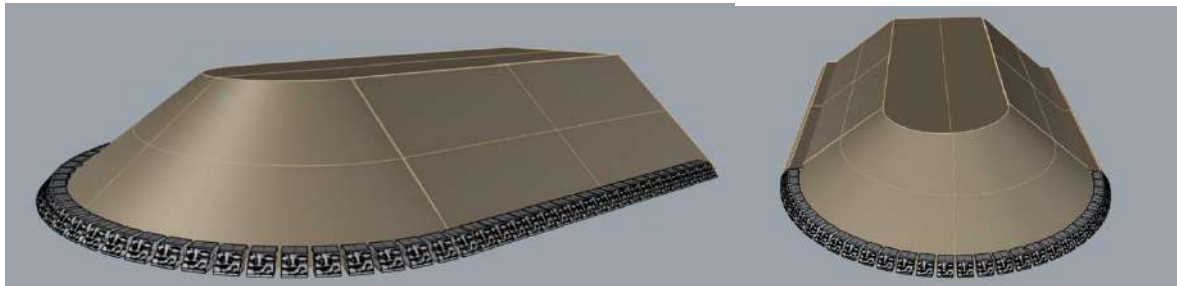


Figura 21: rendering in 3D dei moduli disposti in piede di scarpata dell'estensione sottomarina del pignone Diana (opzione 1 a sinistra, opzione 2 a destra)

4.5 Ecoprogettazione: dispositivi biomimetici Sargass

Il primo scopo dei Sargass consiste nel creare allestimenti per nursery artificiali per pesci molto giovani. L'uso iniziale di questi moduli è quindi destinato a fornire un rifugio a pesci giovani non appena arrivano sul litorale in modo tale da limitarne la mortalità per predazione. Sono stati utilizzati così in Camargue, nella riserva marina di Beauduc, quindi modificati per una migliore resistenza alle intemperie e impiantati a Mandelieu-La-Napoule.

Un anno fa, P2A Développement ha avviato un progetto di ricerca e sviluppo realizzato in un sito del Consiglio Dipartimentale delle Bouches-du-Rhône. In questo progetto, l'oggetto dell'esperimento sono le proprietà di attenuatore idrodinamico. Da allora, i risultati sono molto incoraggianti e dimostrano che i Sargass possono attenuare il moto ondoso e favorire molto localmente l'interramento dei sedimenti in un ambiente a bassissima batimetria.

I dispositivi Sargass, ideati da P2A Développement, sono stati utilizzati in vari progetti e ora sono operativi e sostenibili, nella fattispecie rispetto a episodi di idrodinamica intensa. Qui si propone di utilizzare queste opere innovanti con una nuova funzione, la protezione di praterie e la lotta contro l'erosione.



Figura 22: dispositivo Sargass impiantato in un substrato mobile (a sinistra) e in un substrato duro (a destra)

Per il progetto, sono proposte 3 opzioni di impianto nella zona situata tra la testa dell'estensione del pignone Bonaparte, ad ovest della spiaggia e la piattaforma litorale, al centro:

- L'opzione 1 consiste nel dotare gli spazi sabbiosi di intermatte del perimetro definito qui sopra con una linea di Sargass di un'altezza massima di 1 metro su una larghezza di 5 metri (93 moduli). Il principale vantaggio di ciò è il fatto di non alterare la matta morta della prateria di posidonie e quindi non occorre una procedura normativa rispetto allo status di specie protette di magnoliofiti.

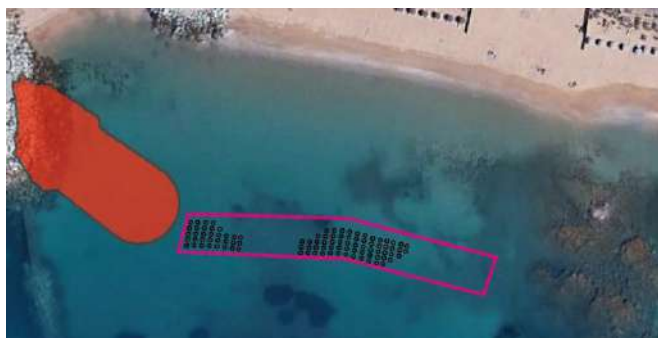


Figura 23: Occupazione di principio dell'opzione 1 con l'installazione di un dispositivo lineare di 93 moduli Sargass volti a ridurre le velocità idrodinamiche vicino al fondale prima della spiaggia senza impattare le zone di matta morta della prateria di posidonie.

- L'opzione 2 consiste nel dotare tutto il perimetro della linea di dissipazione di dispositivi Sargass di 1 metro di altezza massimo (205 moduli). I moduli sono fissati con ancoraggi specifici elicoidali per non alterare la matta morta.

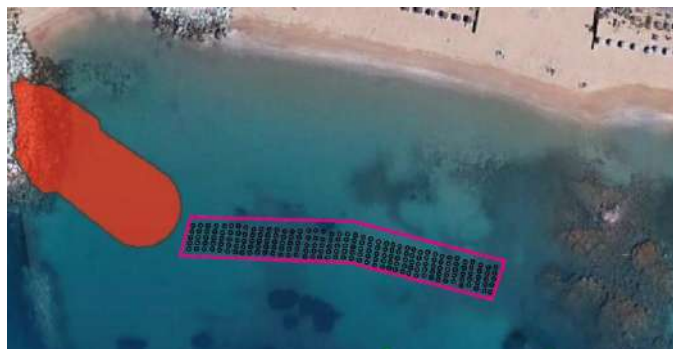


Figura 24: Occupazione di principio dell'opzione 2 con l'installazione di un dispositivo lineare di 205 moduli Sargass volti a ridurre le velocità idrodinamiche vicino al fondale prima della spiaggia

- L'opzione 3 consiste nel ripristinare una prateria attorno al perimetro del dispositivo dell'opzione 2 con il fissaggio nella matta morta di 400 talee di posidonie.

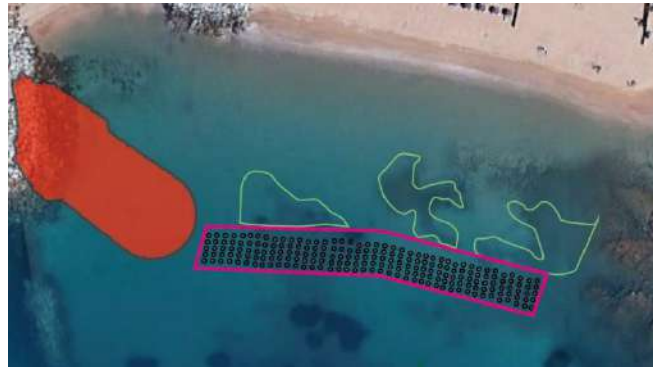


Figura 25: Occupazione di principio dell'opzione 3 con le superfici considerate per l'impianto delle 400 talee

L'ecoprogettazione introdotta nel progetto della spiaggia del Veillat ne farà un sito pilota che merita un monitoraggio scientifico a medio o a lungo termine. In questa prospettiva, nella nota [7] è presentata una proposta metodologica.

5. DOTAZIONE STIMATA

5.1 Lavori marittimi

Plage du Veillat							
Mission d'assistance							
Détail estimatif - - Travaux maritimes - V01							
N°	Désignation			U	Qte	PU	Total HT
1 - TRAVAUX PRÉPARATOIRES							
1	1		Installation de chantier	ft	1.00	25 000.00	25 000.00
1	2		Amenée et repliement matériels	ft	1.00	8 000.00	8 000.00
1	3		Validation Topographie projet	ft	1.00	2 500.00	2 500.00
1	2		Piquetage	ft	1.00	2 500.00	2 500.00
1	7		Études et plans d'exécution	ft	1.00	5 000.00	5 000.00
1	8		Suivi qualité, sécurité, environnement	mois	3.00	1 000.00	3 000.00
1	9		Piste accès sur digues existantes	ft	1.00	28 000.00	28 000.00
1 - TRAVAUX PRÉPARATOIRES							74 000.00
2 - EXTENSIONS EPIS							
2.1 - EPI NORD							
2	1	1	Souilles	m ³	590.00	18.00	10 620.00
2	1	2	Noyau 10/ 500	m ³	135.00	32.00	4 320.00
2	1	3	Filtre 200/ 400 kg	t	2 133.00	38.00	81 054.00
2	1	4	Carapace 2/ 4 t	t	3 651.00	42.00	153 342.00
2	1	5	Pédale 2/ 4 t	t		48.00	-
2	1	6	Rependage matériaux des souilles	m ³	590.00	10.00	5 900.00
2,1 - EPI NORD							255 236.00
2.2 - EPI SUD							
2	2	1	Souilles	m ³	1 056.00	18.00	19 008.00
2	2	2	Noyau 10/ 500	m ³	2 943.00	32.00	94 176.00
2	2	3	Filtre 200/ 400 kg	t	4 352.00	38.00	165 376.00
2	2	4	Carapace 2/ 4 t	t	7 308.00	42.00	306 936.00
2	2	5	Pédale 2/ 4 t	t	292.00	48.00	14 016.00
2	2	6	Rependage matériaux des souilles	m ³	1 056.00	10.00	10 560.00
2,2 - EPI SUD							610 072.00
2 - EXTENSIONS EPIS							865 308.00
3 - RECHARGEMENT PLAGE							
3	1		Rechargement	m ³	22 000.00	10.00	220 000.00
3	2		Achat sable	m ³	22 000.00	36.00	792 000.00
3 - RECHARGEMENT PLAGE							1 012 000.00
Total HT							1 951 308.00
Aléas 5 %							97 565.40
Total HT							2 048 873.40
TVA 20 %							409 774.68
Total TTC							2 458 648.08

La necessaria dotazione per realizzare i lavori marittimi è quindi stimata a 2,05 M€ IVA esclusa.

Tale dotazione potrebbe tuttavia variare notevolmente a seconda delle fonti di approvvigionamento che saranno in grado di fornire i materiali destinati alla ricarica delle spiagge.

A questo importo, occorre inoltre aggiungere le plusvalenze potenziali necessarie al finanziamento dei dispositivi inerenti all'ecoprogettazione (dettaglio nella nota [7]):

- Fornitura dei moduli di piede di scarpata: da **74 k€ IVA esclusa (opzione 1)** a **124 k€ IVA esclusa (opzione 2)**. La minusvalenza dovuta ai blocchi di scogliere naturali sostituiti sarà marginale.
- Fornitura e installazione dei dispositivi biomimetici Sargass: da **14 k€ IVA esclusa** a **50 k€ IVA esclusa** a seconda dell'opzione scelta.
- Monitoraggio scientifico per 5 anni (2 campagne all'anno): **tra 40 k€ IVA esclusa e 60 k€ IVA esclusa** secondo le opzioni scelte.

L'importo stimato della dotazione **maggiorante** per finanziare tutti i dispositivi di ecoprogettazione e il relativo monitoraggio è di circa **240 k€ IVA esclusa in totale**.