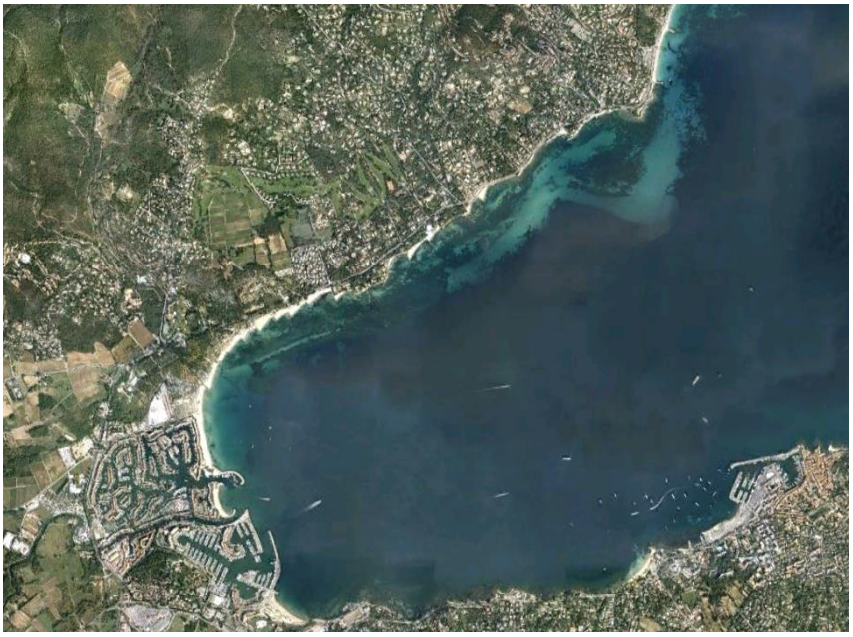
Etude de la dynamique sédimentaire de la plage du Vieux Moulin



Rapport d'études

Réf.: 1030-872 – R3

Date: 25/07/2018

Client: Commune de Grimaud

© 2018 ACRI-IN

Page blanche

© 2018 ACRI-IN

Signatures

	Nom	Société
Préparé par	LDE, NCH	ACRI-IN
Contrôlé par	ILE	ACRI-IN
Autorisé par	ILE	ACRI-IN

© 2018 ACRI-IN

Version

Version	Contenu	Auteur
R1	Rapport provisoire	LDE, NCH
R1.1	Rapport	ILE
R2	Prise en compte de la surélévation des mers	ILE
R3	Prise en compte du rechargement de la plage	NCH

Illustrations page de garde : Image satellite de la baie de Grimaud

© 2018 ACRI-IN

Table des matières

1 INTRODUCTION ---- 1

2 PRESENTATION DU SITE D'ETUDE ---- 3
2.1 RAPPELS SUR LA PROBLÉMATIQUE D'ÉROSION ---- 3
2.2 DONNÉES DE VENT ET DE HOULE ---- 5
2.2.1 Analyse de la houle et du vent au point GlobOcéan 3 AM ---- 7
2.2.2 Extrapolation des houles de projet ---- 9
2.2.3 Conditions au large ---- 10
2.3 VARIATION DES NIVEAUX D'EAU ---- 11
2.3.1 Marée astronomique ---- 11
2.3.2 Surcotes, décotes et storm surge ---- 11
2.3.3 Les niveaux d'eau ---- 12
2.4 ETUDE DE PROPAGATION DE LA HOULE DU LARGE VERS LA CÔTE ---- 13
2.4.1 Présentation du logiciel de propagation ---- 13
2.4.2 Paramétrage du Modèle Numérique ---- 13
2.4.3 Résultats des simulations numériques ---- 14
2.4.4 Incidence à la côte ---- 17

3 PRESENTATION DES SCENARIOS D'AMENAGEMENTS ---- 18

4 MODELISATION MORPHODYNAMIQUE ---- 19
4.1 GÉNÉRALITÉS ---- 19
4.2 HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION ---- 19
4.2.1 La chaine hydro informatique TELEMAC ---- 19
4.2.2 Courantologie ---- 20
4.2.2.1 Equations résolues ---- 20
4.2.2.2 Schéma de résolution ---- 20
4.2.2.3 Paramètres numériques et physiques ---- 21
4.2.3 Agitations marines ---- 21
4.2.3.1 Equations résolues ---- 21
4.2.3.2 Schéma de résolution ---- 22
4.2.3.3 Paramètres numériques et physiques ---- 22
4.2.4 Transport sédimentaire et évolutions bathymétriques ---- 23
4.2.4.1 Equations résolues ---- 23
4.2.4.2 Equation de transport ---- 23
4.2.4.3 Equation d'évolution du fond ---- 23
4.2.4.4 Paramètres physiques et numériques du modèle ---- 24
4.2.4.5 Couplage entre module ---- 24
4.3 EMPRISE DU MODÈLE ---- 25
4.4 MAILLAGE ---- 26
4.5 DONNÉES D'ENTRÉE ---- 28
4.5.1 Bathymétrie ---- 28
4.5.2 Roches affleurantes ---- 28
4.5.3 Agitations marines et niveau marin ---- 29
4.5.3.1 Le modèle 2012 ---- 29
4.5.3.2 Données de houle et niveau d'eau issus du modèle 2012 ---- 30
4.6 SCÉNARIOS D'AMÉNAGEMENT PROPOSÉES ---- 32
4.6.1 Présentation des modifications du maillage ---- 32
4.6.2 Etat initial ---- 33

© 2018 ACRI-IN

4.6.3 Scenario 1 : ouverture épi Est ---- 34
4.6.4 Scenario 2-V1 : ouvrage submergé ---- 34
4.6.5 Scenario 2-V2 : ouvrage submergé ---- 35
4.6.6 Scénario 2-V3 : ouvrage submergé et épi Est raccourci ---- 35
4.6.7 Scenario 3 : épi Ouest ---- 36

5 INCIDENCE SUR LA STABILITE DU TRAIT DE COTE ---- 37
5.1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ---- 37
5.2 ETAT INITIAL ---- 37
5.2.1 CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N ---- 37
5.2.1.1 Plan de vagues ---- 37
5.2.1.2 Courants induits par les vagues ---- 38
5.2.1.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 39
5.2.2 CAS 2 – Période de retour 1 an – Direction 95°N ---- 40
5.2.2.1 Plan de vagues ---- 40
5.2.2.2 Courants induits par les vagues ---- 41
5.2.2.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 42
5.2.3 CAS 3 – Période de retour 1 an – Direction 115°N ---- 43
5.2.3.1 Plan de vagues ---- 43
5.2.3.2 Courants induits par les vagues ---- 44
5.2.3.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 45
5.2.4 CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N ---- 46
5.2.4.1 Plan de vagues ---- 46
5.2.4.2 Courants induits par les vagues ---- 47
5.2.4.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 48
5.2.5 CAS 5 – Période de retour 10 ans – Direction 95°N ---- 49
5.2.5.1 Plan de vagues ---- 49
5.2.5.2 Courants induits par les vagues ---- 50
5.2.5.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 51
5.2.6 CAS 6 – Période de retour 10 ans – Direction 115°N ---- 52
5.2.6.1 Plan de vagues ---- 52
5.2.6.2 Courants induits par les vagues ---- 53
5.2.6.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 54
5.2.7 CAS 7 – Période de retour 50 ans – Direction 75°N ---- 55
5.2.7.1 Plan de vagues ---- 55
5.2.7.2 Courants induits par les vagues ---- 56
5.2.7.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 57
5.2.8 CAS 8 – Période de retour 50 ans – Direction 95°N ---- 58
5.2.8.1 Plan de vagues ---- 58
5.2.8.2 Courants induits par les vagues ---- 59
5.2.8.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 60
5.2.9 Synthèse sur l'état initial ---- 60
5.3 SCÉNARIO 1 : OUVERTURE ÉPI EST ---- 62
5.3.1 CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N ---- 62
5.3.1.1 Plan de vagues ---- 62
5.3.1.2 Courants induits par les vagues ---- 63
5.3.1.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 64
5.3.2 CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N ---- 65
5.3.2.1 Plan de vagues ---- 65
5.3.2.2 Courants induits par les vagues ---- 66
5.3.2.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 67

© 2018 ACRI-IN

5.4 SCÉNARIO 2 : OUVRAGE SUBMERGÉ ---- 68
5.4.1 CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N ---- 68
5.4.1.1 Plan de vagues ---- 68
5.4.1.2 Courants induits par les vagues ---- 70
5.4.1.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 72
5.4.2 CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N ---- 74
5.4.2.1 Plan de vagues ---- 74
5.4.2.2 Courants induits par les vagues ---- 76
5.4.2.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 77
5.4.3 CAS 7 – Période de retour 50 ans – Direction 75°N ---- 78
5.4.3.1 Plan de vagues ---- 78
5.4.3.2 Courants induits par les vagues ---- 79
5.4.3.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 80
5.5 SCÉNARIO 3 : ÉPI OUEST ---- 81
5.5.1 CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N ---- 81
5.5.1.1 Plan de vagues ---- 81
5.5.1.2 Courants induits par les vagues ---- 82
5.5.1.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 83
5.5.2 CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N ---- 84
5.5.2.1 Plan de vagues ---- 84
5.5.2.2 Courants induits par les vagues ---- 85
5.5.2.3 Incidence sur les dépôts et érosions ---- 86
5.6 SYNTHÈSE ---- 87
5.7 CHANGEMENT CLIMATIQUE ---- 91
5.7.1 CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N ---- 91
5.7.1.1 Plan de vagues ---- 91
5.7.1.2 Courants induits par les vagues ---- 92
5.7.1.3 Evolutions bathymétriques ---- 93
5.7.2 CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N ---- 94
5.7.2.1 Plan de vagues ---- 94
5.7.2.2 Courants induits par les vagues ---- 95
5.7.2.3 Evolutions bathymétriques ---- 96
5.7.3 Bilan sédimentaire ---- 96

6 CONCLUSION ---- 98

7 PROPOSITION D'AMENAGEMENT ---- 99
7.1 TUBES EN GÉOTEXTILE ---- 99
7.2 REEF BALL ---- 100
7.3 RECHARGEMENT DE LA PLAGE EN SABLE ---- 105
7.4 ACCÈS À LA ZONE DES TRAVAUX ---- 106
7.5 MESURES ENVIRONNEMENTALES DANS LE CADRE DES TRAVAUX ---- 107

8 ESTIMATION DU MONTANT DES TRAVAUX ---- 108

9 ESTIMATION DU SUIVI ET DE L'EVENTUEL RETRAIT DES OUVRAGES ---- 109

10 ENVIRONNEMENT NATUREL ---- 110
10.1 LA ZONE NATURA 2000 DE LA CORNICHE VAROISE ---- 110
10.1.1 Présentation du site ---- 110
10.1.2 Habitats et espèces remarquables sur le site Natura 2000 ---- 112

© 2018 ACRI-IN

10.2 L'INVENTAIRE DES ZONES NATURELLES D'INTÉRÊT ECOLOGIQUE, FAUNISTIQUE, FLORISTIQUE (ZNIEFF)---------- 112
10.2.1 Géologique ---------- 113
10.2.2 Marines ---------- 113

© 2018 ACRI-IN

Page blanche

© 2018 ACRI-IN

1 Introduction

La qualité des plages s'inscrit au cœur des enjeux de développement des communes littorales, d'une part en raison de la place qu'elle occupe dans les stratégies de promotion touristique, et d'autre part vis-à-vis de l'importance que prend le littoral dans les pratiques récréatives et touristiques émergentes des populations.

Le littoral de la commune de Grimaud est fortement impacté par l'érosion côtière. Les plages de Guerrevieille à Port Grimaud, y compris les plages de Beauvallon, du **Vieux Moulin**, Saint-Pons - Les Mûres, … ont fait l'objet d'aménagements visant à stabiliser le trait de côte tout en protégeant les infrastructures proches. La plage du Vieux Moulin fait aujourd'hui l'objet d'un projet de stabilisation.

Le but du présent document est de :

- Décrire la dynamique sédimentaire de la plage du Vieux Moulin ;
- D'analyser l'incidence d'aménagements sur la dynamique de la plage.

Localisation de la plage du vieux moulin

© 2018 ACRI-IN

Pour estimer la dynamique sédimentaire de cette plage, une approche par modélisation numérique a été appliquée. Elle se fonde sur des outils en état de l'art permettant d'appréhender la complexité inhérente à la dynamique sédimentaire et à la morphodynamique des plages en milieu micro tidal.

Le rapport comporte quatre parties :

- Rappel des conditions météo océaniques et sédimentaires de la plage du Vieux Moulin,
- Présentation des scénarios d'aménagement de la plage pour réduire les effets d'érosion,
- Présentation des outils de modélisation mis en œuvre et des hypothèses associées,
- Analyse de l'incidence des ouvrages projetés sur l'érosion de la plage.

© 2018 ACRI-IN

2 Présentation du site d'étude

2.1 Rappels sur la problématique d'érosion

La qualité des plages s'inscrit au cœur des enjeux de développement des communes littorales, d'une part en raison de la place qu'elle occupe dans les stratégies de promotion touristique, et d'autre part vis-à-vis de l'importance que prend le littoral dans les pratiques récréatives et touristiques émergentes des populations.

Le littoral de la commune de Grimaud est fortement impacté par l'érosion côtière. Les plages de Guerrevieille à Port Grimaud, y compris les plages de Beauvallon, du **Vieux Moulin**, Saint-Pons - Les Mûres, … ont fait l'objet d'aménagements visant à stabiliser le trait de côte tout en protégeant les infrastructures proches. La plage du Vieux Moulin fait aujourd'hui l'objet d'un projet de stabilisation.

La morphologie de cette plage est largement contrainte par la présence d'un épi perpendiculaire au rivage, situé dans l'axe du chemin de Vieux Moulin descendant à la plage depuis la D559 (Figure 2-1). Mis en place entre 1897 et 1924, il est rallongé en 1982 (SOGREAH, 2008) : les plages de Vieux Moulin et de Beauvallon formaient une unité sableuse continue avant la construction de cet ouvrage, dont l'utilité première n'est pas connue. A l'ouest, la plage est bordée par le mur de soutènement du chemin des Embruns, tandis qu'au nord elle est délimitée par le mur d'enceinte d'une propriété privée.

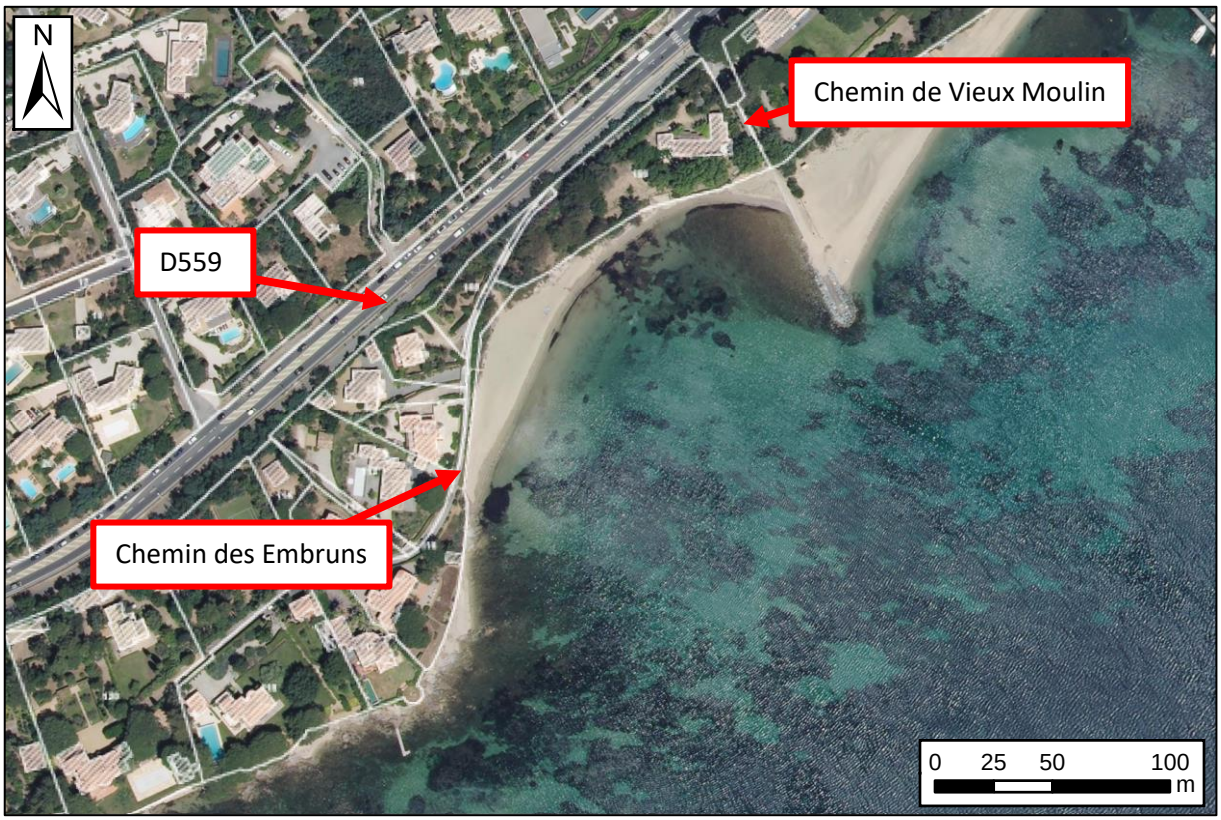


Figure 2-1 : Plan de la plage du Vieux Moulin (Sources : IGN BD PARCELLAIRE® et BD ORTHO® 2014)

ACRI-IN (2013) a réalisé une analyse comparative de la position du trait de côte entre 1950 et 2011. Cette analyse permet également de mettre en évidence la sensibilité de la partie est de l'anse aux effets d'érosion, mais également de pointer l'érosion de la partie ouest de la plage, zone pour laquelle le trait de côte est situé sur la ligne de rivage.

© 2018 ACRI-IN

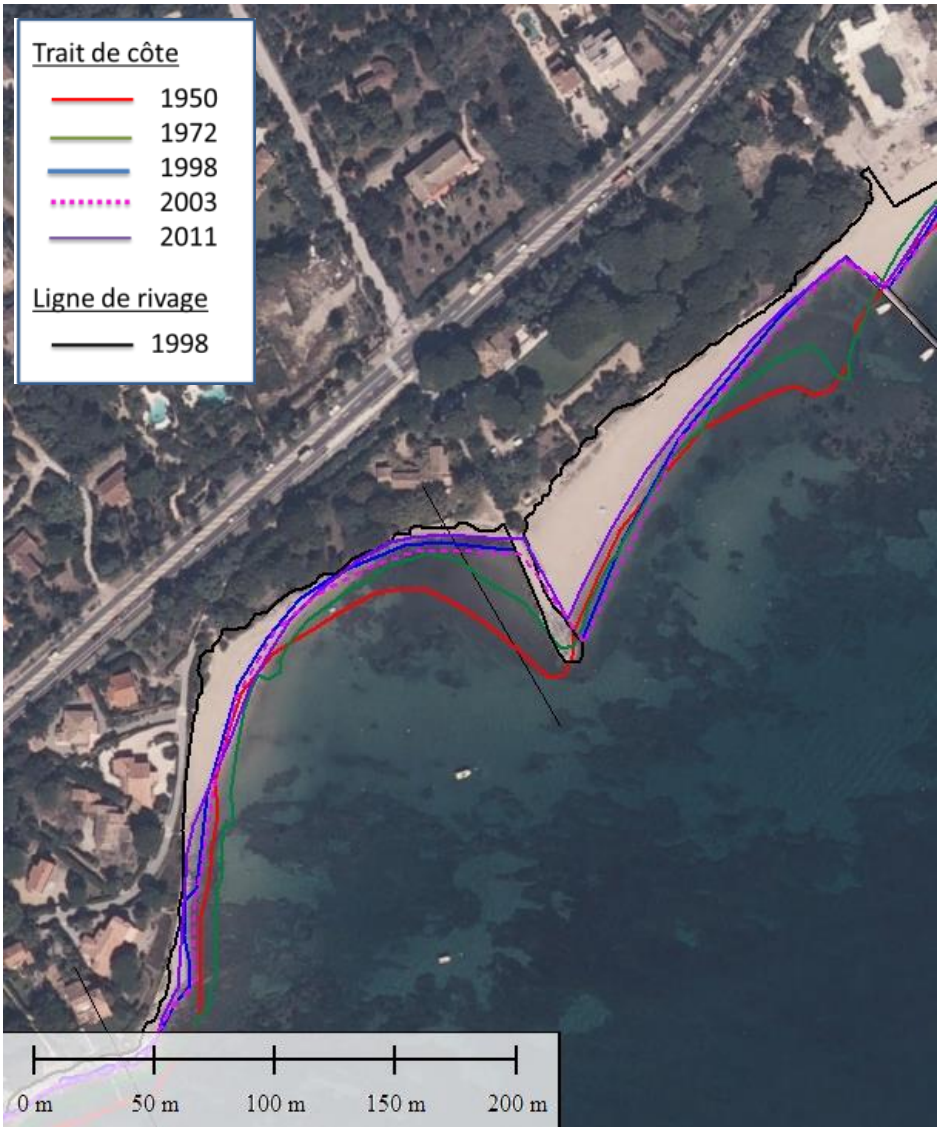


Figure 2-2 : Mobilité du trait de côte (ACRI-IN, 2013)

Dans le cadre du projet MAREGOT, le Département du Var (2017) a réalisé un *Atlas de l'évolution diachronique du littoral varois (1924-2014)*. Dans ce travail, les variations du rivage sont abordées à travers l'étude de photographies aériennes pour différentes dates. Les lignes de rivages pour chaque année ont été digitalisées et sont comparées entre elles par une analyse diachronique quantitative menée grâce au logiciel MobiTC du Cerema (Pons & Trmal, 2018). Le recul est considéré comme fort si les vitesses sont supérieures à 0,5 m/an, et modéré pour des vitesses comprises entre 0,1 et 0,5 m/an. La plage est considérée stable pour des vitesses d'avancée ou de recul de l'ordre de 0,1 m/an. L'avancée est modérée pour des vitesses comprises entre 0,1 et 0,5 m/an, et forte si les vitesses sont supérieures à 0,5 m/an. Cette analyse met en évidence une dynamique érosive modérée mais cependant constante à l'échelle séculaire (Figure 2-3).

© 2018 ACRI-IN

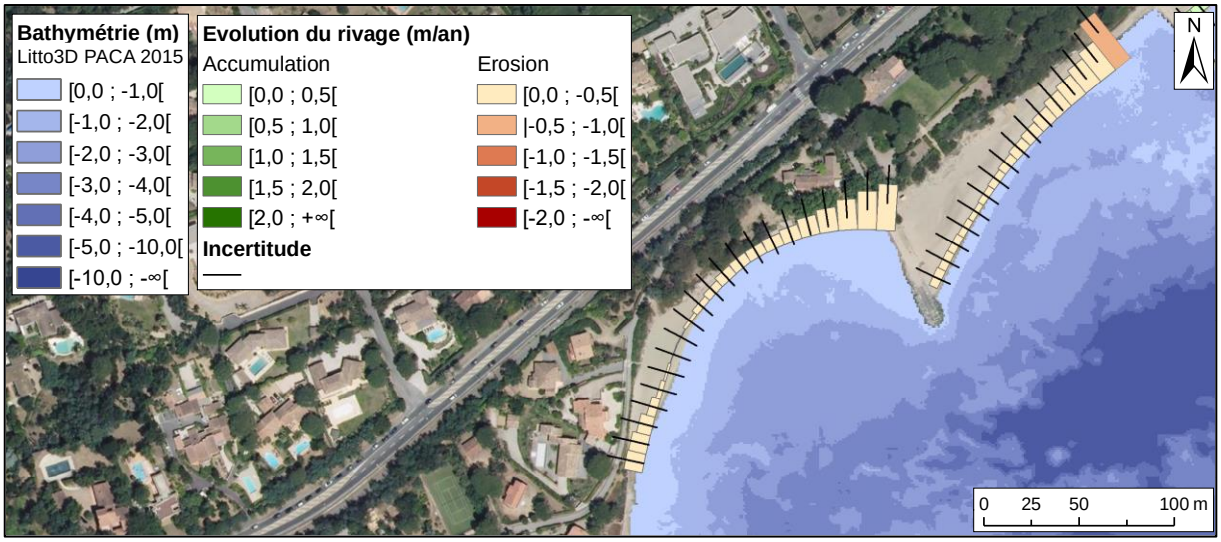
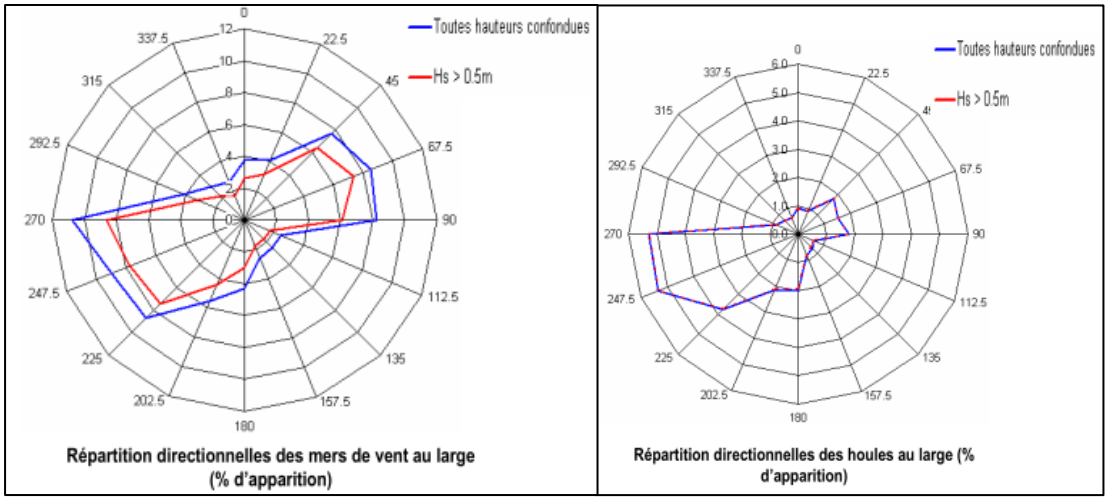


Figure 2-3 : Evolution du trait de côte entre 1924 et 2014 (Sources : Département du Var (2017), IGN BD ORTHO® 2014 et SHOM/IGN Litto3D® PACA 2015)

2.2 Données de vent et de houle

Les états de mer au large du littoral de l'étude ont été caractérisés en phase d'études de faisabilité à l'aide d'observations de navires sélectionnées par les Services Météorologiques. Ces observations ont été réalisées sur la zone 43°N/44°N – 6.5°E/10°E pour la période allant de 1961 à 2001. Cette très vaste zone de mer est présentée sur la figure ci-dessous. L'analyse de ces données permet donc d'obtenir une vision générale du climat de vent et de houle au large de Grimaud, avec la mise en évidence de deux régimes principaux : un d'Est et un d'Ouest (voir rose des houles ci-dessous, source SOGREAH, 2008).

© 2018 ACRI-IN



Etendue de la zone de provenance de données pour l'établissement de roses de houles au large de Grimaud (source SOGREAH, 2008)

Ces données ne permettent cependant pas une évaluation quantitative suffisante pour des études d'aménagement et de dimensionnement d'ouvrages côtiers.

De nos jours, les données fiables de houle et de vent sur de grandes périodes proviennent de modèles globaux vent-houle tournant sur de grandes étendues à l'échelle des mers et océans. Ces modèles sont alimentés en continu par les variations dans l'espace et le temps des dépressions atmosphériques. Ils assimilent des données satellites, et sont, par ailleurs, confrontés aux résultats des bouées de mesures, là où elles sont présentes.

Par exemple, les bouées de mesure présentes sur le département des Alpes-Maritimes sont les suivantes :

- La bouée dyfamed (station 61001) au point de coordonnées 43°24'N, 7°48^{E}, tenue par Météo France au large des côtes, par 2300m de profondeur, non directionnelle, dont les données en temps réel sont disponibles à l'adresse :(http://www.meteo.shom.fr/real-time/html/dyfamed.html)
- La bouée Candhis du CETMEF (00601), directionnelle, située au-devant de l'aéroport de Nice par 270m de fond, au point de coordonnées (43°38.3', 7°13.7'), et dont les données en temps réels sont disponibles à l'adresse suivante :(http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/campagne/?idcampagne=c4ca4238a0b923820dcc509a6f75849b).

Les modèles numériques constituent aujourd'hui le moyen le plus moderne et le plus complet pour connaître les conditions de houle à la fois fréquentes et exceptionnelles.

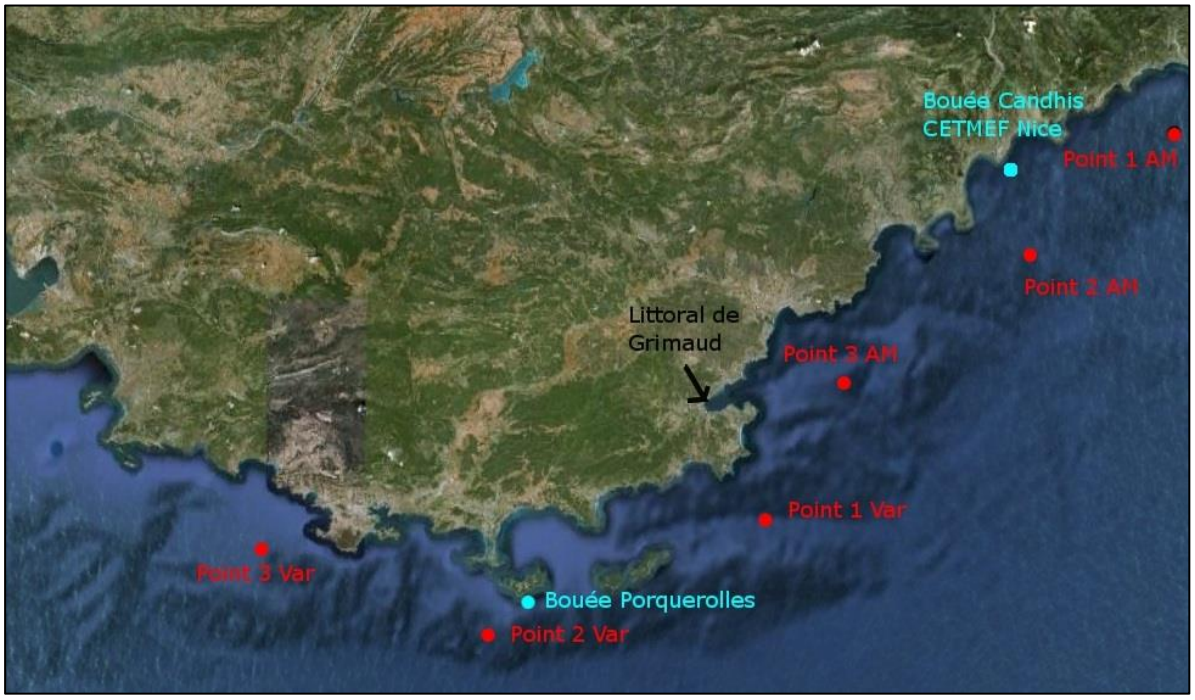
Certains laboratoires tels que GlobOcéan ou HR Wallingford ont développé des bases de données d'états de mer et de vents à l'échelle mondiale à l'aide de modèles océano-météorologiques globaux. Le pas de temps originel du modèle est souvent intrinsèquement fixé à 3 heures.

Pour GlobOcéan, à qui nous avons commandé des données récentes, les champs de vent ont été intégrés en entrée du modèle d'état de mer WaveWatch III, mis en œuvre à GlobOcéan. Ce modèle de 3ème génération résout intégralement les interactions non linéaires entre bandes de fréquences.

A partir des données de tempêtes fournies, classées par évènements indépendants et par secteur de provenance, la méthode du renouvellement a été appliquée afin de déterminer les caractéristiques des événements de projet. Cette méthode consiste à donner une répartition statistique aux données brutes, et à leur ajuster une loi d'extrapolation (exponentielle type Weibull ou Gumbel).

© 2018 ACRI-IN

Ainsi, afin de disposer de données précises, ACRI-IN a fait l'acquisition d'un historique de 19 ans de données de houle et de vent, de 1992 à 2010, pour extraire les mers de vent le long des côtes des Alpes Maritimes et du Var, sur les 6 points indiqués sur la carte ci-après.



Localisation des points de données de houle GlobOcéan et des bouées de mesure

Le point le plus représentatif pour l'étude des plages du littoral de Grimaud est le point GlobOcéan 3 des Alpes Maritimes (43°20'N ; 6°55'E), pour les houles de Nord-Est à Sud-Est. En effet, il se situe à l'est au large de la zone d'étude. Le point GlobOcéan 1 du Var (43°06'N ; 6°44'E) permet de valider les ordres de grandeur des houles de projet. Le point GlobOcéan 3 des Alpes Maritimes est situé à une distance de 25 km de la zone d'étude.

2.2.1 Analyse de la houle et du vent au point GlobOcéan 3 AM

La houle au point GlobOcéan 3 AM

Les statistiques de hauteurs de houle du large, en termes de pourcentage de temps, par secteur et par hauteur de houle, nous ont permis d'extraire la rose des directions de houle au large de Grimaud sur la période de 19 ans considérée, c'est-à-dire entre 1992 et 2010, au niveau du point GlobOcéan le plus représentatif.

Les graphiques ci-après présentent la rose de houle et les histogrammes Hs/Dir à ce point.

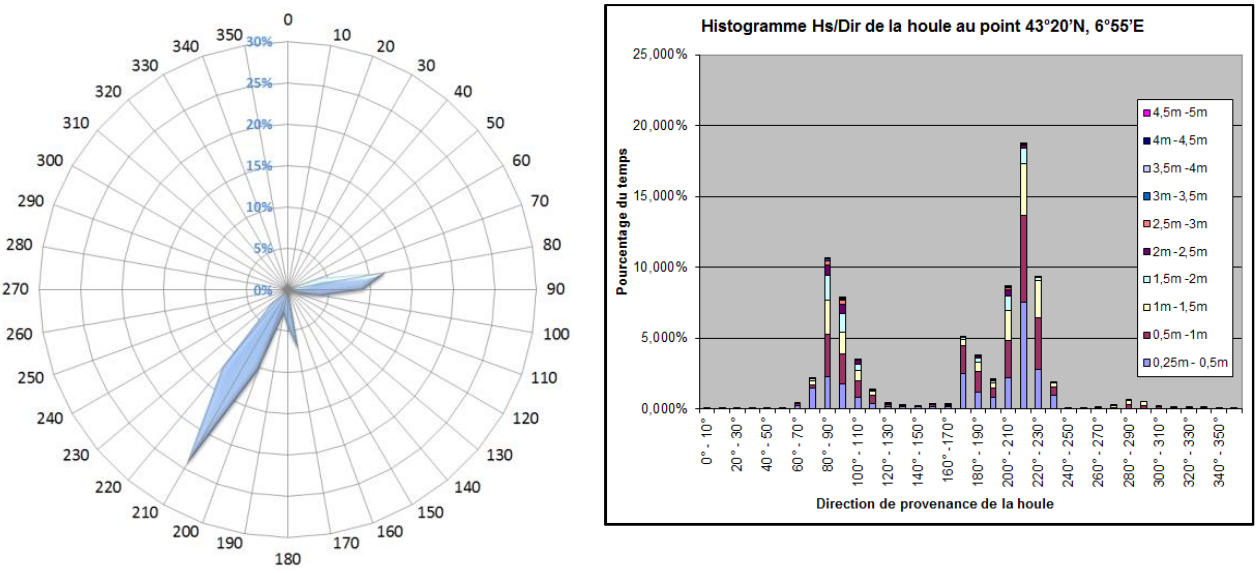
On observe sur ces graphiques 3 régimes de houle distincts :

- Les houles de Sud-Ouest, les plus fréquentes, de N200° à N230° ;
- Les houles d'Est, de N80° à N100° ;
- Les houles de Sud, les moins fréquentes, de N170° à N180° ;

A eux deux, les régimes des houles d'Est et de Sud-Ouest représentent quasiment 80% des directions de houles observées au large. Les houles de Sud environ 10 à 15%. Les houles de Sud-Est en revanche sont assez rares.

© 2018 ACRI-IN

Les histogrammes présentent la répartition des hauteurs de houle par direction en fonction du pourcentage d'occurrence. On retrouve bien les trois régimes de houle.



Rose de houle au point GlobOcéan 3 (43°20N, 6°55'E) et histogramme Hs / Dir

Le vent au point GlobOcéan 3 AM

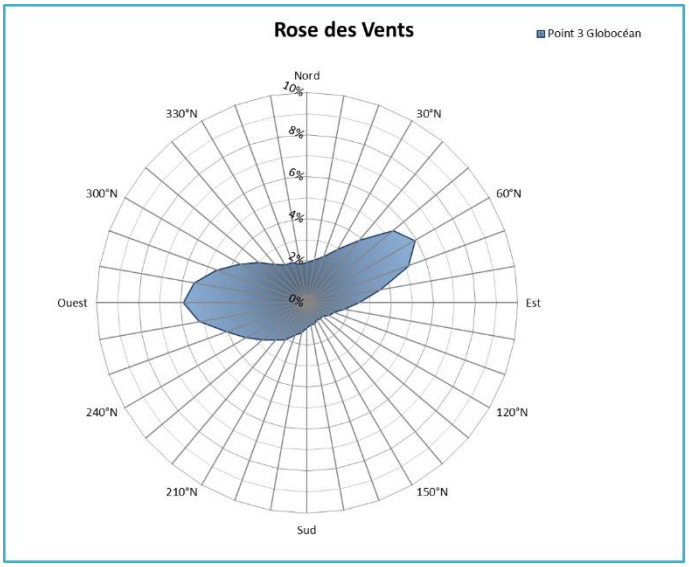
A partir du traitement des données statistiques de vitesse du vent, en termes de secteurs de provenance et de vitesses enregistrées sur la période de 19 ans entre 1992 et 2010, nous avons établi les roses de directions des vents en fréquence annuelle d'observation au large de Saint Tropez pour le point GlobOcéan 3 AM.

Comme pour les houles, on observe deux régimes de vent distincts :

- Les vents d'Ouest-Sud-Ouest et les vents de Nord-Est.

Les vents accompagnent généralement la houle pour ces deux régimes, c'est-à-dire que lorsqu'il y a de la houle de Sud-Ouest, celle-ci est généralement accompagné de vent, de même pour les houles d'Est / Nord-Est, car ces houles sont générées localement. Ce qui n'est pas le cas des houles de Sud, qui naissent dans le détroit de Gibraltar et remontent tout le bassin Méditerranéen avant d'atteindre les côtes françaises, peuvent ainsi arriver sans vent, ou accompagnées de vent d'Est ou de Sud.

© 2018 ACRI-IN



Rose des vents issue des données de vents GlobOcéan au point 43°20'N, 6°55'E

2.2.2 Extrapolation des houles de projet

Pour déterminer les houles de projet, nous avons appliqué la méthode de recherche du pic de hauteur significative de chaque tempête, sélectionné dès lors qu'il vérifie une valeur supérieure à un seuil fixé (POT=Peak Over Threshold). Cette méthode est inspirée de la méthode du renouvellement permettant d'extrapoler des caractéristiques de houles et mers de vent d'occurrence extrême à partir d'échantillons de données de tempêtes indépendantes au large. Les caractéristiques des houles de tempête sont réparties par secteur de direction, sur la base de hauteurs significatives supérieures à un certain seuil suivant les secteurs de provenance, en prenant soin de s'assurer que les différents évènements soient indépendants entre eux. Le choix du seuil est également nécessaire pour différencier les houles du large des mers de vent.

On applique une distribution de probabilités à la série de tempêtes, puis on extrapole les données par une loi classique inhérente aux valeurs extrêmes. Le logiciel HYFRAN, utilisé par GlobOcéan, a permis d'extrapoler les houles de projet avec un nombre important de lois statistiques classiques en hydraulique maritime telles que les lois de la famille Gamma, les lois extrêmes classiques, exponentielle…

Exemple de courbe d'extrapolation

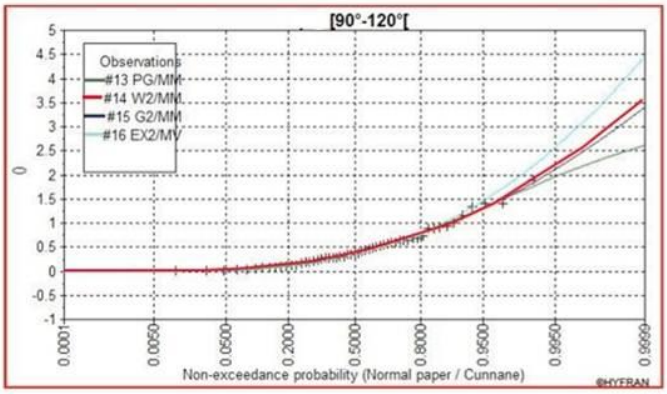
Le calcul des valeurs de houles extrêmes d'après l'ensemble des extrapolations proposées a été effectué en sélectionnant la loi pour laquelle les écarts entre l'échantillon de hauteurs significatives brutes sélectionnées (pics au-dessus du seuil) et la courbe d'extrapolation sont minimaux. On écarte, par exemple, les courbes d'extrapolation qui sous estiment l'occurrence des plus fortes tempêtes observées.

La figure ci-dessous expose un exemple de comparaison d'ajustement effectuée avec les lois Pareto (Méthode des Moments notée PG/MM sur la figure), Weibull (Méthode des Moments notée W2/MM sur la figure), Gamma (Méthode des Moments notée G2/MM sur la figure) et Exponentielle (Méthode du Maximum de Vraisemblance, ou EX2/MM sur la figure).

Cette comparaison a été effectuée pour établir les houles de projet au point GlobOcéan 2 AM pour une incidence de houle de 90° à 120°.

Note : La période de retour d'une valeur H est telle que cette valeur y soit dépassée une fois en moyenne sur une durée de n ans. La loi de probabilité associée est la suivante : $P(Hs) = 1 - \frac{1}{n \times 8 \times 365}$

© 2018 ACRI-IN



Courbe d'extrapolation des houles extrêmes associées au point 2 AM pour le secteur de provenance [90° - 120°[

On remarque sur cette figure que la loi de Weibull (W2/MM) est celle autour de laquelle se répartissent le mieux les données brutes (+). Ainsi, pour le point GlobOcéan 3 AM et le secteur de direction de provenance N65°-N85°, la loi de Weibull a été retenue. Les houles de projets sont reportées dans le tableau ci-dessous.

2.2.3 Conditions au large

Le tableau 1 fournit les hypothèses de niveaux d'eau et de houle aux larges associés à des événements ayant une période de retour de 1 an, 10 ans et 50 ans.

Conditions de mer au large de Grimaud pour trois directions de vagues et trois périodes de retour

Direction de provenance des houles	Période de retour								
	1 an			10 ans			100 ans		
	Hs (m)	Tp (s)	Niveau d'eau (m)	Hs (m)	Tp (s)	Niveau d'eau (m)	Hs (m)	Tp (m)	Niveau d'eau (m)
N65° -N85°	2.8	7.5	1.3	3.7	9.5	1.5	4.7	9.5	1.8
N85° -N105	2.7	8.5		3.7	9.5		4.5	9.5	
N105° -N125°	1.4	5.5		2	6.5		2.5	7.5	

Les périodes pics associées aux hauteurs significatives de projet sont présentées dans le tableau ci-dessous.

© 2018 ACRI-IN

Tableau des périodes pics associées aux hauteurs significatives de projet

Secteur d'intérêt	Période de retour					
	1 an	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	250 ans
N65° -N85°	7 à 8	9 à 10	9 à 10	9 à 10	9 à 10	9 à 10
N85° -N105	7 à 8	9 à 10	9 à 10	9 à 10	9 à 10	9 à 10
N105° -N125°	5 à 6	7 à 8	7 à 8	7 à 8	7 à 8	7 à 8

2.3 Variation des niveaux d'eau

Les variations du niveau de la mer ont une importance fondamentale sur la position du trait de côte et donc sur les phénomènes d'érosion et/ou d'accrétion réels et/ou relatifs.

En Méditerranée, le niveau de la mer varie selon l'interaction de phénomènes tels la marée astronomique (faible), la marée barométrique (pouvant engendrer des variations de quelques dizaines de centimètres), les surcotes de tempête (appelés « storm surge », entrainant des variations pouvant aller jusqu'au mètre).

La prise en compte de ces variations est cruciale pour ce genre d'étude. En effet, en situation de fort anticyclone, en été par exemple, le niveau de la mer est beaucoup plus bas que lors du passage d'une dépression hivernale. Et même si aucune érosion mécanique n'a véritablement eu lieu et que le profil de la plage n'a pas changé, une comparaison de photos prises pendant ces deux périodes peut laisser croire à une perte importante de sédiments au niveau de la plage en hiver, ce qui n'est en fait pas le cas.

Les cotes altimétriques évoquées dans cette étude se rapport au zéro du nivellement général de la France 0 NGF (ou 0 IGN69). Le zéro des cartes marines (ou 0 CM) étant situé à 0,4 m sous le zéro NGF à Grimaud.

2.3.1 Marée astronomique

La marée en Méditerranée est de type semi-diurne, avec une très faible amplitude. Malgré la présence de ce phénomène le long des côtes françaises de la Méditerranée, le marnage qui lui est associé est relativement faible (de l'ordre de 40 cm).

Il y a plusieurs explications à ce faible marnage :

- d'une part, la Méditerranée est une mer fermée, et les longueurs d'onde de marée sont quasiment égales à la largeur du bassin méditerranéen ;
- d'autre part, le plateau continental étant très étroit en Méditerranée, l'amplitude de la marée ne s'y trouve pas accentuée ;

D'après le rapport de SOGREAH (2008), le marnage dans la zone d'étude ne dépasse pas 0,3 m.

2.3.2 Surcotes, décotes et storm surge

Le niveau de la mer subit des variations en raison des phénomènes atmosphériques tels que la pression barométrique (passage d'une dépression ou d'un anticyclone), le vent qui souffle depuis le large vers la cote (storm surge, surcote) ou l'inverse (décote), et les conditions océanographiques comme le courant

© 2018 ACRI-IN

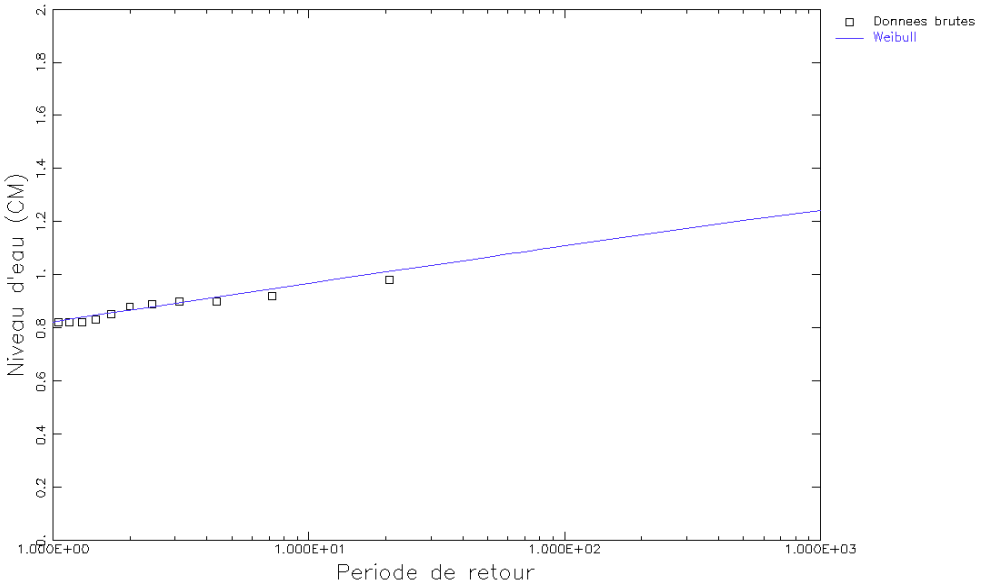
(upwelling, downwelling) ou les vagues (wave set-up), dont les influences peuvent être bien supérieures à la marée astronomique.

2.3.3 Les niveaux d'eau

ACRI-IN dispose des mesures du niveau d'eau, sur un peu plus de 8 ans, issues des marégraphes de Nice et de Toulon. Elles ont été exploitées pour évaluer les niveaux d'eau d'occurrences extrêmes. La méthode suivante, dite du renouvellement, a été employée :

- Sélection des pics du niveau d'eau associés à des évènements climatiques indépendants entre 2000 et 2008, avec un seuil minimal de valeur pris égal à 0,65m CM, ce qui représente 3 à 5 valeurs pics par trimestre ;
- Recherche d'une courbe de régression de type Weibull avec le paramètre d'ajustement « k » le plus approprié pour réduire les écarts avec les données brutes ;
- Extrapolation des valeurs extrêmes.

La courbe d'extrapolation est tracée sur le graphe suivant. L'alignement des valeurs autour de la courbe est satisfaisant. Chaque valeur correspond à une interpolation entre les niveaux d'eau extrêmes obtenus à Toulon et à Nice.



Extrapolation des valeurs extrêmes de niveau d'eau (Valeurs rapportées au 0 CM, paramètre de Weibull k=1.1)

D'après cette analyse, on obtient les valeurs de niveau d'eau suivantes, rapportées au 0 NGF :

Période de retour	Niveau d'eau
1 an	0.5 m NGF
10 ans	0.7 m NGF
50 ans	0.8 m NGF
100 ans	1.0 m NGF

Niveaux d'eau extrêmes

© 2018 ACRI-IN

2.4 Etude de propagation de la houle du large vers la côte

La modélisation de l'état actuel a nécessité deux approches distinctes : l'une pour étudier les évolutions à long terme, et l'autre pour étudier l'impact d'une tempête en particulier. Pour cela, nous avons mis en œuvre le logiciel TELEMAC qui permet, à travers l'ensemble de ses modules, de modéliser la propagation de la houle du large à la côte, la courantologie induite par les vagues et le vent, et le transport sédimentaire, ainsi que les changements bathymétriques associés. Tous les modules sont couplés les uns aux autres et fonctionnent en interaction, un changement bathymétrique impliquant, par exemple, des changements au niveau de la propagation de la houle, des courants…

Ce logiciel simule en 2D (aussi bien dans le plan horizontal que sur la verticale), et en 3D, la courantologie, les vagues, la qualité des eaux, l'écologie, le transport sédimentaire, la morpho-dynamique, et il est capable de traiter les interactions entre ces différents processus.

Dans un premier temps, et du fait des modifications que subit la houle lors de son transfert du large vers la côte, il est nécessaire de mettre en place un modèle de propagation depuis les points de données de houles du large, jusqu'au site d'étude.

2.4.1 Présentation du logiciel de propagation

Le module de vagues utilisé pour cette étude se nomme SWAN.

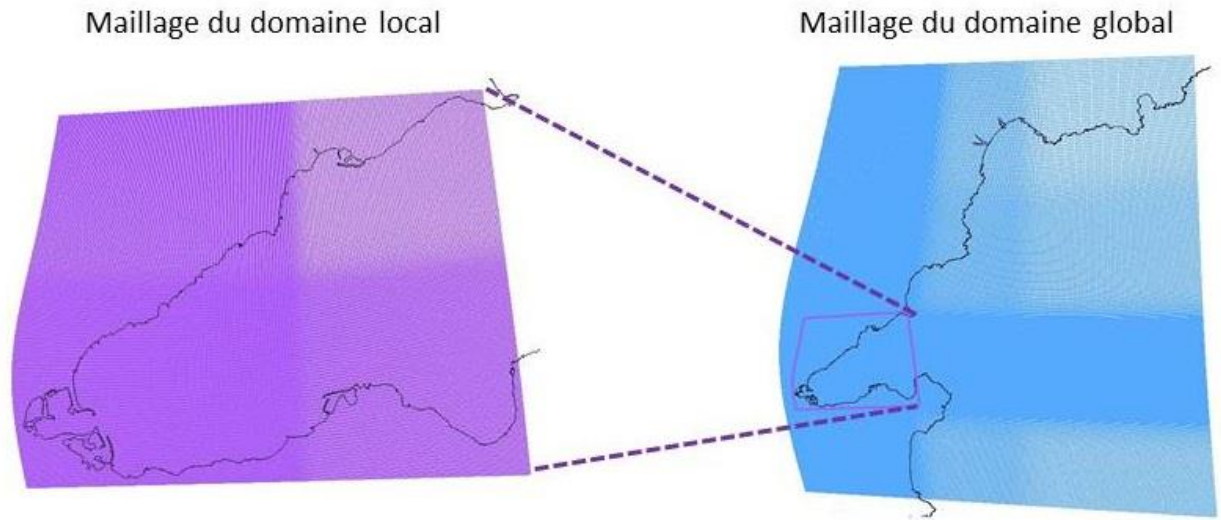
SWAN (Simulating WAves Nearshore) est un modèle de troisième génération permettant d'obtenir une estimation réaliste des paramètres des vagues en zone côtière, dans les lacs et les estuaires, pour un vent, une bathymétrie, et des conditions de courants donnés. Ce module, basé sur l'équation de conservation de la densité spectro-angulaire d'action des vagues, de façon complètement spectrale, modélise la propagation non-stationnaire des vagues courtes sur un fond irrégulier en considérant l'action du vent, la dissipation d'énergie par friction sur le fond, le déferlement, la réfraction (due à la bathymétrie, au niveau d'eau et aux courants), le shoaling, ainsi que l'étalement directionnel de la houle.

Le modèle SWAN calcule l'évolution de vagues aléatoires et irrégulières sous l'effet de courants ambiants. Il rend compte de la propagation (réfraction et diffraction) due au courant dans les régions côtières par eau profonde, intermédiaire, et en eau peu profonde, et représente les processus de génération des vagues par le vent, la dissipation due au moutonnement, au frottement sur le fond, au déferlement bathymétrique, et aux interactions non-linéaires entre les vagues (triplets et quadruplets de fréquences) de façon explicite par des formulations de l'état de l'art.

2.4.2 Paramétrage du Modèle Numérique

Aux vues des périodes de houle à considérer pour la répartition fréquentielle, la profondeur pour laquelle la houle n'est plus perturbée par la bathymétrie est supérieure à 100m, ce qui implique un domaine de calcul très vaste. Nous avons donc eu recours à un emboîtage de plusieurs modèles avec un raffinement de la grille de calcul sur les zones d'étude (cf. figure ci-après). Le modèle le plus vaste (domaine global) s'étend sur près de 30 km du Nord au Sud et 25 km d'Ouest en Est. Le domaine local s'étend sur 6 km du Nord au Sud et 7 km d'Ouest en Est.

© 2018 ACRI-IN



Emprise des modèles emboités

Les houles de projet sont rappelées ci-dessous, avec leurs niveaux d'eau associées.

Scénarii de simulation pour les tempêtes									
Direction de provenance des houles	Période de retour								
	1 an			10 ans			100 ans		
	Hs (m)	Tp (s)	Niveau d'eau (m)	Hs (m)	Tp (s)	Niveau d'eau (m)	Hs (m)	Tp (m)	Niveau d'eau (m)
N75°	2.8	7.5	1.3	3.7	9.5	1.5	4.7	9.5	1.8
N95°	2.7	8.5		3.7	9.5		4.5	9.5	
N115°	1.4	5.5		2	6.5		2.5	7.5	

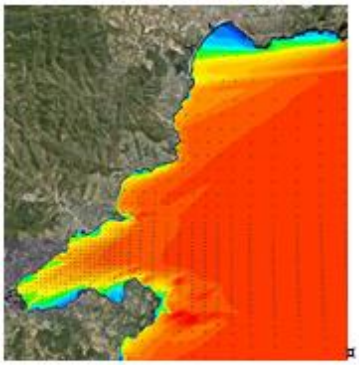
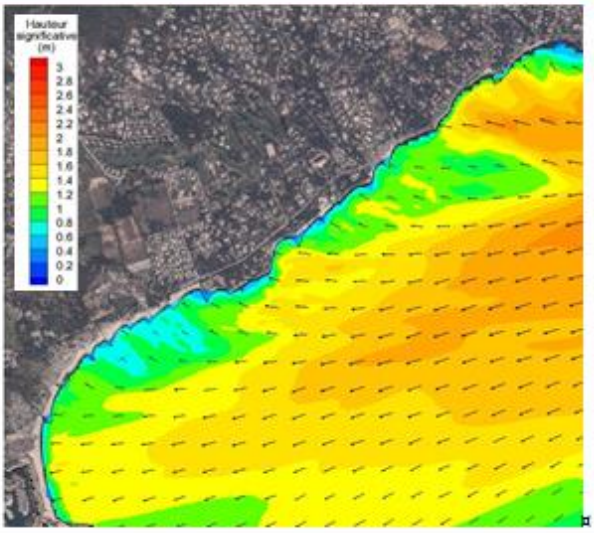
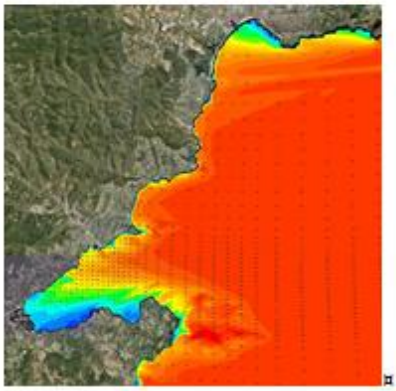
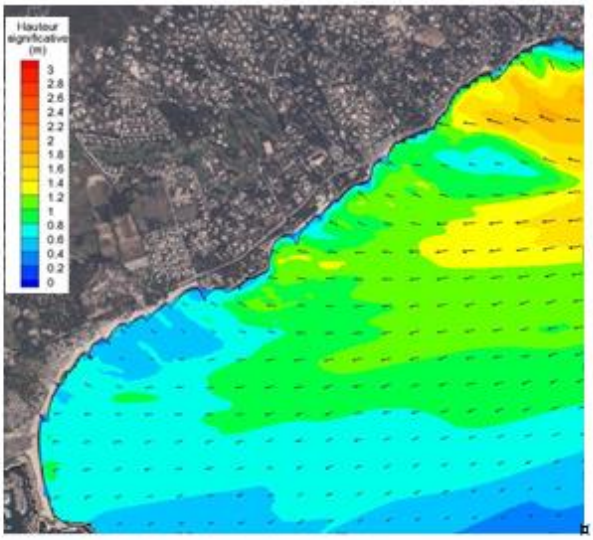
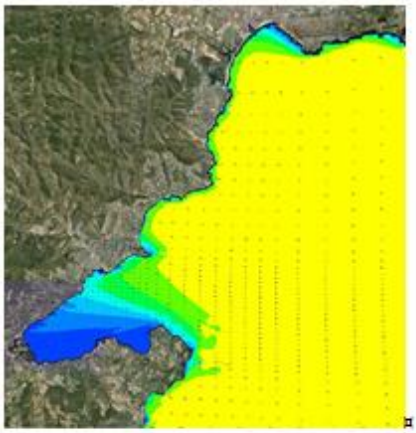
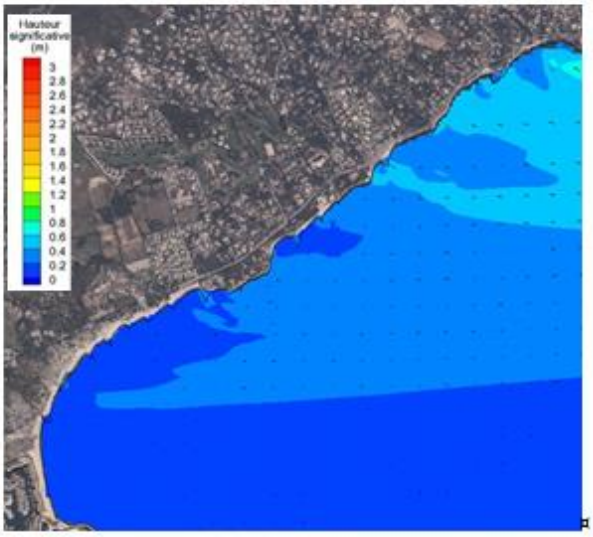
2.4.3 Résultats des simulations numériques

Les résultats pour une houle d'occurrence annuelle pour les trois directions N75°, N95° et N115° sont présentés page suivante. Pour ces trois directions, la houle atteint l'entrée du golfe de Saint Tropez. La hauteur significative de la houle est la plus élevée pour la direction de provenance N75°. Deux facteurs peuvent l'expliquer :

- Les hauteurs significatives des houles de projet au large sont plus élevées pour cette direction de provenance ;
- La houle atteint le golfe de Saint Tropez sans rencontrer d'obstacle pour cette direction de provenance. Pour les autres directions, le littoral de Grimaud est protégé de la houle par l'avancée de terre comprenant le cap de Saint Tropez, la pointe de l'Ay, et la pointe de la Rabiou. La direction de houle N75° est parallèle à l'axe du golfe de Saint Tropez.

Les résultats pour une houle de direction de provenance N75°, la plus pénalisante, sont présentés dans le paragraphe suivant.

© 2018 ACRI-IN

Provenance	Domaine global	Domaine local
N75°		
N95°		
N115°		

© 2018 ACRI-IN

Houles-de-projet-de-provenance-N75°

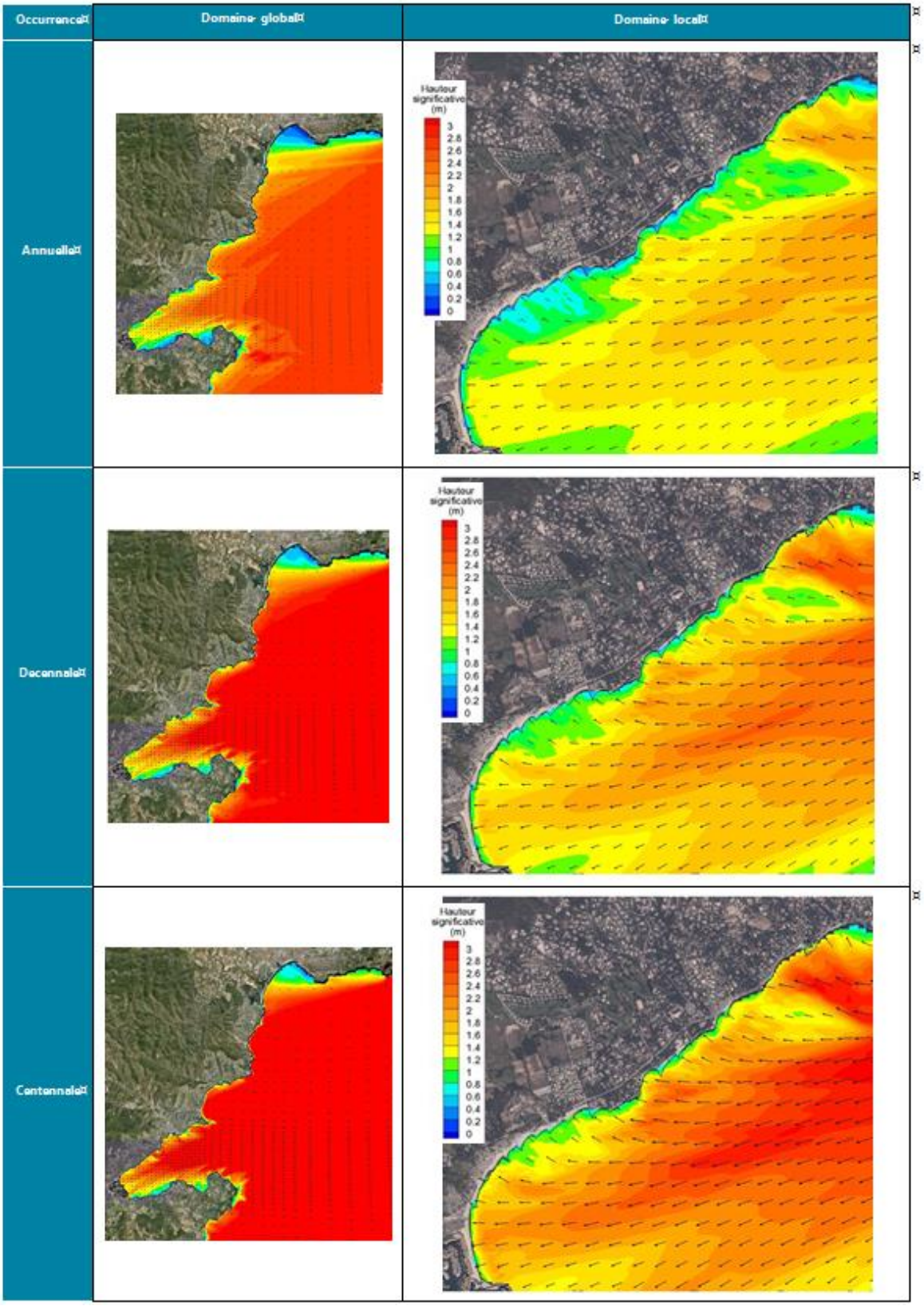


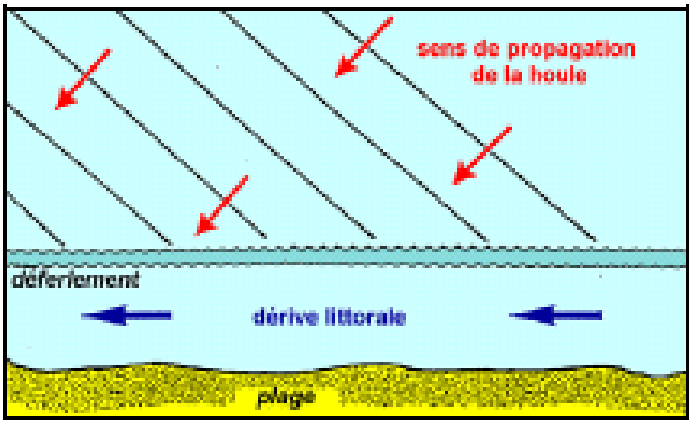
Planche de propagation pour les houles de projet annuelles, décennales et centennales de direction N75°

© 2018 ACRI-IN

La houle qui entre dans le golfe de Saint Tropez commence à déferler avant d'avoir atteint l'extrémité du golfe. Lorsque la houle atteint le littoral de Grimaud, elle est plus faible qu'à l'entrée du golfe. La hauteur significative de la houle au large du littoral de Grimaud est de l'ordre de 1,5 m pour une occurrence annuelle, 2 m pour une occurrence décennale et comprise entre 2,5 m et 3 m pour une occurrence centennale.

2.4.4 Incidence à la côte

Lorsque la houle se présente avec une certaine obliquité par rapport au rivage, elle engendre des courants de dérive parallèles à la côte. L'action de ces courants se concentre entre la zone de déferlement et le rivage, où ils peuvent entraîner un transport longitudinal de sédiments (transit littoral).



Principe de la dérive littorale

© 2018 ACRI-IN

3 Présentation des scénarios d'aménagements

Afin de réduire l'érosion de la plage du Vieux Moulin, les aménagements suivants sont envisagés :

- Scénario 1 : reprise de l'épi Est pour le rendre poreux et rétablir une partie du transit sédimentaire, qui est interrompu par la présence de cet épi.
- Scénario 2 : installation d'une structure submergée dans le prolongement de l'épi Est afin de réduire l'énergie érosive des vagues incidentes. Trois variantes sont proposées :
  - V1 : Ouvrage submergée avec une cote globale à -1,5 m NGF ;
  - V2 : Ouvrage submergé avec une cote globale -0,3 m NGF ;
  - V3 : Ouvrage submergé avec une cote globale -0,3 m NGF et une réduction de l'épi Est.
- Scénario 3 : installation d'un nouvel épi à l'ouest de l'anse pour intercepter une partie du transit littoral et permettre un engraissement de la plage du Vieux Moulin.

© 2018 ACRI-IN

4 Modélisation morphodynamique

4.1 Généralités

Cette partie est dédiée à la présentation de la construction du modèle. Après une présentation succincte des hypothèses de modélisation, les étapes relatives à la construction du modèle sont détaillées. Puis chacun des modules mis en œuvre pour l'estimation de la dynamique sédimentaire est décrit. Sans rentrer dans les détails numériques de résolutions des équations, la description des modules propose un bref rappel théorique, fournit les paramètres numériques et physiques imposés pour les calculs, ainsi qu'une validation des outils par comparaison avec les mesures disponibles ou bien collectées lors de cette étude.

4.2 Hypothèses de modélisation

4.2.1 La chaine hydro informatique TELEMAC

Afin de simuler numériquement les écoulements, les vagues, le transport sédimentaire et les évolutions bathymétriques au niveau de la plage de Grimaud, la chaîne de calcul TELEMAC a été choisie. Cette chaine de calcul contient :

- TELEMAC2D, un module résolvant les équations de Saint-Venant pouvant être mis en œuvre pour la modélisation des courants générées par les vagues ;
- TOMAWAC, un module résolvant l'équation de conservation de la densité d'action des vagues et tenant compte des processus physiques induits par les variations de fonds, les interactions entre vagues, la présence de courant et les variations des niveaux marins ;
- SISYPHE, un module permettant d'estimer le transport sédimentaire par charriage et suspension et de résoudre l'équation de conservation de la masse de sédiment près du fond, afin de modéliser les évolutions bathymétriques ;

La chaine de calcul est développée par EDF R&D et disponible librement pour la communauté scientifique. Ces deux points assurent d'une part de bénéficier des compétences en hydraulique du groupe EDF, internationalement reconnues, et d'avoir accès aux sources du code afin de mieux répondre aux spécificités de la zone d'étude.

L'ensemble des modules de calculs se fonde sur une même bibliothèque aux éléments finis permettant une résolution des équations sur un maillage non structuré. Cette approche permet d'adapter la résolution du maillage en fonction des caractéristiques géométriques de l'étude, tout en respectant le principe de conservation de la masse.

Par ailleurs, ces modules partagent la même grille de calcul et peuvent être couplés entre eux afin d'échanger des variables.

TELEMAC2D, en résolvant les équations de Saint Venant, permet de modéliser les composantes horizontales des courants intégrés sur la verticale et les hauteurs de la colonne d'eau. Cette modélisation tient compte des processus de propagation, de convection, de dispersion, de frottement sur le fond et d'apports d'énergie par le vent. De plus, le module permet de prendre en compte un certain nombre de sources ponctuelles. Le paramétrage du frottement peut être uniforme ou variable spatialement et

© 2018 ACRI-IN

temporellement. Des forces volumiques peuvent également être imposées dans les équations du mouvement. Plusieurs options existent enfin pour la fermeture turbulente des équations.

TOMAWAC permet de modéliser les phénomènes physiques suivants :

- propagation des spectres de vagues,
- convection des spectres de vagues,
- réfraction bathymétrique,
- réfraction par les courants,
- interactions vagues-vagues,
- dissipation d'énergie par frottement sur le fond,
- dissipation d'énergie par moutonnement,
- apport d'énergie par le vent,
- déferlement bathymétrique.

SISYPHE résout l'équation de continuité pour les sédiments. Cette équation permet de lier les gradients de débits solides avec les variations temporelles d'élévation du fond. Les débits solides sont estimés à l'aide de formulation semi empiriques. SISYPHE peut également résoudre une équation de convection-diffusion pour la partie du transport solide se faisant par suspension. Auquel cas, les flux verticaux de concentration en matières en suspension sont considérés comme des termes sources dans l'équation d'évolution du fond. SISYPHE tient également compte de la distribution verticale des sédiments dans la colonne d'eau. SISYPHE traite des sédiments cohésifs et non cohésifs.

4.2.2 Courantologie

4.2.2.1 Equations résolues

Le code de calcul Telemac-2D résout par éléments finis les équations de Saint-Venant bidimensionnelles écrites sous forme non-conservative, obtenues par intégration sur la verticale des équations de Navier Stokes hydrostatiques (Hervouet, 2007).

4.2.2.2 Schéma de résolution

La résolution du problème est effectuée en considérant une discrétisation de l'espace par un maillage dont les éléments sont triangulaires.

Il existe dans Telemac-2D tout un ensemble d'options adaptées à divers problèmes. Les deux principales sont d'une part la résolution des équations dites primitives, où continuité et quantité de mouvement sont traitées simultanément, et d'autre part, la méthode dite de l'équation d'onde, où les vitesses sont éliminées (grâce à l'équation de quantité de mouvement) de l'équation de continuité pour donner une équation d'onde dont la seule inconnue est la hauteur d'eau.

Dans le cas présent, c'est la méthode de l'équation d'onde qui a été employée car elle est la plus rapide. Le système linéaire obtenu après discrétisation est résolu avec une méthode itérative de type gradient conjugué. Bien que dans Telemac-2D, la formulation des équations soit non-conservative (la variable

© 2018 ACRI-IN

principale est la vitesse et non le débit), la discrétisation assure une conservation exacte de la masse d'eau.

Dans les équations de quantité de mouvement, la partie hyperbolique (termes de convection) est traitée avec diverses options, telles que la méthode des caractéristiques, la méthode SUPG ou des schémas distributifs (schéma PSI ou schéma N). On a choisi ici la méthode des caractéristiques.

4.2.2.3 Paramètres numériques et physiques

Le pas de temps

Le pas de temps des simulations est de 1s, compte tenu de la taille des mailles. Le nombre de Courant maximum est de 0,8.

Choix du coefficient de frottement

La contrainte de frottement est modélisée par l'intermédiaire d'une loi quadratique faisant intervenir un coefficient de frottement de type Strickler, avec un paramètre de 35 $m^{1/3}.s^{-1}$.

Choix de la modélisation de la turbulence

La viscosité turbulente du modèle est estimée à l'aide du modèle de Elder, qui permet d'estimer la viscosité à partir des gradients longitudinaux et transversaux des vitesses horizontales.

Forçages aux limites maritimes

Le modèle est forcé, à la frontière maritime, en imposant une vitesse nulle et une élévation nulle.

4.2.3 Agitations marines

4.2.3.1 Equations résolues

Les agitations marines sont estimées à l'aide du module TOMAWAC qui résout l'équation de conservation de la densité d'action. L'équation comporte un terme de propagation, des termes de transports, permettant de tenir compte des effets de réfraction, et des termes sources et puits permettant de simuler les processus physiques suivants :

- la génération des vagues par le vent,
- la dissipation de l'énergie des vagues par moutonnement,
- les interactions non linéaires entre vagues,
- la dissipation de l'énergie des vagues par frottement sur le fond,
- la dissipation de l'énergie des vagues par déferlement bathymétrique.

© 2018 ACRI-IN

4.2.3.2 Schéma de résolution

L'espace est discrétisé sur un maillage non structuré avec des éléments triangulaires. Les directions sont discrétisées suivant une grille régulière et les fréquences sont quant à elle échantillonnées à l'aide d'une suite géométrique.

L'équation de conservation de la densité d'action est résolue par pas de temps fractionné. Durant un pas de temps, la partie convective de l'équation est résolue par la méthode des caractéristiques qui permet ensuite de fournir une estimation de la densité d'action pour le calcul des termes sources et puits.

4.2.3.3 Paramètres numériques et physiques

Le pas de temps

Le pas de temps des simulations est de 10s.

Le nombre de direction

Un nombre de 24 directions est considérée permettant ainsi une résolution angulaire de 15 degrés.

Le nombre de fréquence

Le nombre de fréquence est fixé à 25 afin de couvrir une gamme de fréquence entre 0,042Hz et 0,4Hz, et donc de pouvoir traiter des vagues dont la période varie entre 2,4s et 25s.

Les autres paramètres

Les autres paramètres numériques et physiques de TOMAWAC sont conservés à leur valeur par défaut.

La présence des herbiers

Le site d'études est marqué par la présence d'herbiers dont l'action sur la propagation et la dissipation des vagues attirent de nombreux travaux de recherches associant mesures in situ et modélisation numérique (Suzuki et al, 2011 ; Lerrede et al., 2016). Ces travaux de recherches tendent à montrer que l'énergie des vagues peut être réduite de quelques dizaines de pourcents. Les formulations empiriques développées sur certains sites sont difficiles transposables si les conditions environnementales ne sont pas équivalentes (position des herbiers, géométrie des herbiers, variation spatiale du trait de côte, de la bathymétrie). Dans le cas de la plage du Vieux Moulin, les herbiers ne sont pas inclus dans la modélisation numérique. Les simulations peuvent être considérées comme pénalisantes pour la stabilité du trait de côte.

© 2018 ACRI-IN

4.2.4 Transport sédimentaire et évolutions bathymétriques

4.2.4.1 Equations résolues

Le fond est supposé être uniquement composé de sédiments non-cohésifs, c'est-à-dire de particules sableuses indépendantes pouvant interagir entre eux uniquement par contacts.

4.2.4.2 Equation de transport

Le mode de transport des sédiments non-cohésifs s'opère soit par charriage soit par charriage et suspension.

Le charriage est défini comme le transport de sédiment dans une couche mince près du fond, sous l'effet de la contrainte exercée par l'écoulement sur le fond. Le charriage est donc fonction de la contrainte de fond et de la taille des sédiments, par le biais du paramètre de Shields :

$$\theta = \frac{{u_*}^2}{g(s-1)d_{50}}$$

où u* est la vitesse de frottement, exprimé en m.s-1, s est le rapport entre la masse volumique du sédiment et la masse volumique du fluide (s = 2,65 pour du quartz), g est l'accélération de la gravité (m.s-2), et d50 la taille des grains (m).

Le taux de transport par charriage est donné par une équation explicite semi empirique du paramètre de Shields. Il en existe une très grande variété dans la littérature.

Pour les sédiments non-cohésifs, le transport en suspension peut être couplé au transport par charriage. La suspension apparaît lorsque le diamètre des particules est suffisamment petit et que l'écoulement est suffisamment turbulent pour entraîner les grains dans la colonne d'eau, i.e. pour des particules dont la vitesse de chute Ws est inférieure à la vitesse de frottement de l'écoulement (Ws<u*).

L'estimation du taux de transport par suspension peut être réalisée par la résolution d'une équation de convection/diffusion supplémentaire. La résolution de cette équation peut être contournée par la considération d'une formule de transport totale. Dans ce cas, on suppose que le transport solide est en équilibre avec le courant. C'est cette dernière hypothèse qui est ici retenue.

Lorsque le fond présente une pente, les effets gravitationnels rentrent également en compte et doivent également être pris en compte car, ils peuvent induire une modification de la contrainte de fond et donc altérer le critère de Shields et/ou modifier la direction du transport induit par le courant seul.

4.2.4.3 Equation d'évolution du fond

Dans le cas du charriage ou d'une formulation du transport en équilibre, la conservation de la masse de sédiment dans une couche d'épaisseur mince près du fond de cote zf s'écrit sous la forme :

$$(1-n)\partial_t z_f + \nabla \cdot Q_b = 0$$

© 2018 ACRI-IN

L'équation (2.4) traduit le fait que les évolutions du fond dépendent de la porosité du fond (1-n), et de la divergence du taux de transport par charriage, exprimé par unité de largeur, Qb.

4.2.4.4 Paramètres physiques et numériques du modèle

Formule de transport

Les formules de transport solide de Souslby van Rijn (1997) et de Bijker (1968) sont appliquées respectivement pour les simulations de courants de marée et pour les simulations de vagues et de courants.

Durée de modélisation

Les modélisations représentent des cas de tempêtes annuelles, décennales ou cinquantennale d'une durée de 12 h. La durée est estimée sur l'historique des tempêtes depuis 2000 réalisées par ACRI-IN sur le littoral de côte d'azur. La durée des tempêtes est en moyenne une journée.

Taille des grains

Une classe moyenne de sédiment est considérée représentative des conditions observées (Océanide, 2011). Ainsi une classe granulométrique uniforme 0,3 mm est imposée. L'utilisation du diamètre médian permet de représenter la dynamique sédimentaire pour un échantillon bien classé. La plage est constituée de sédiments non cohésifs. La densité des sédiments a un effet limité sur les évolutions bathymétriques.

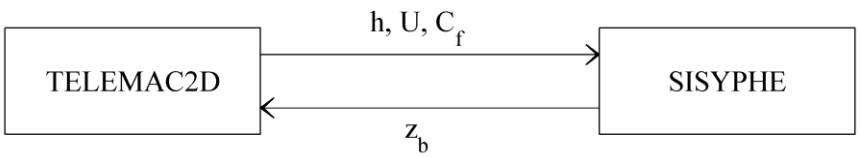
Effet de pente

Ici la formulation de Apsley et Stansby (2008) est choisie, avec un angle de repos de 15°.

4.2.4.5 Couplage entre module

Un couplage entre modules est réalisé afin de tenir compte des interactions entre les écoulements, les agitations marines et les évolutions bathymétriques.

Le couplage entre les modules de courantologie et de transport sédimentaire est réalisé par couplage interne, c'est à dire sans échange de fichier entre les deux modules et les évolutions du fond calculées par le module sédimentaire sont directement fournies à chaque pas de temps au module hydrodynamique.



Couplage entre courantologie et évolution bathymétrique

© 2018 ACRI-IN

Un couplage par échange de fichier est considéré. Dans un premier temps, le champ de houle pour un niveau marin donnée est estimé. Puis le couplage courantologie / sédiment est effectué en interne tout en tenant compte des champs de vagues comme suit :

- les contraintes radiatives des vagues (Fx, Fy) qui sont alors prises en compte dans le module de courantologie comme sources de mouvement ;

- la hauteur significative, Hs, la période des vagues, Tp, et la direction des vagues, θw, qui sont transmises au module sédimentaire pour le calcul de la formule de transport totale.

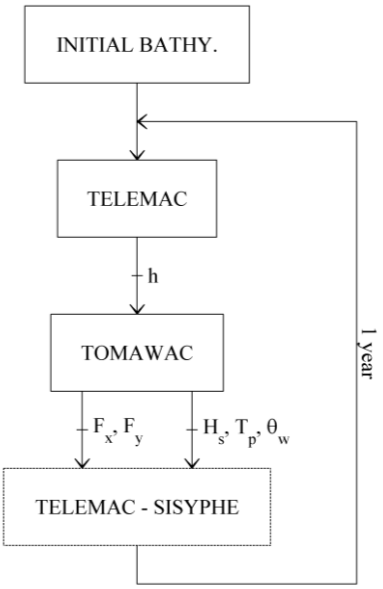


Schéma de couplage entre vagues, courant et évolution bathymétrique

4.3 Emprise du modèle

Le domaine de calcul couvre une partie du Golfe de Saint-Tropez : de port Grimaud à la frontière maritime tracée en liant la Grande Pointe au nord à la Tour du Portalet au sud.

L'emprise du modèle de propagation (ci-après) consiste en un domaine de calcul d'environ 4 x 3 km.

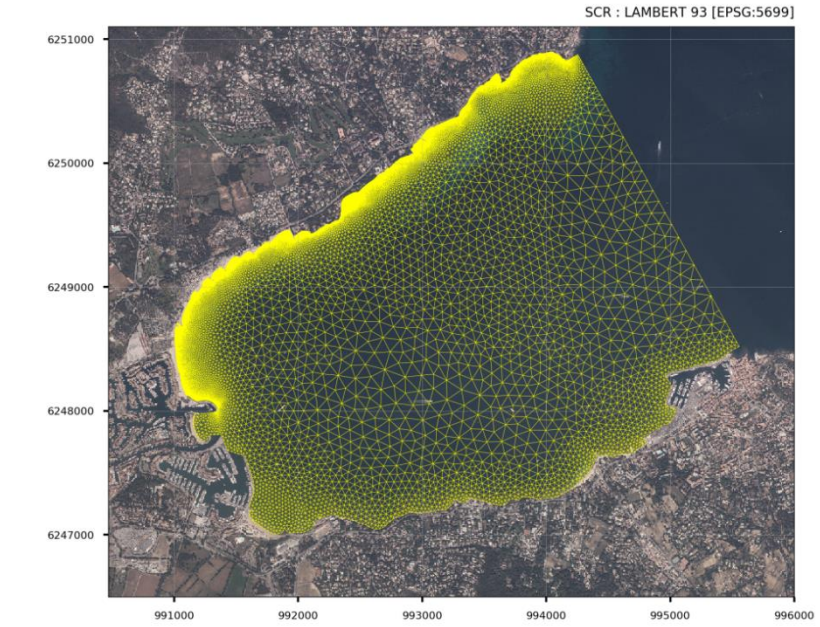
© 2018 ACRI-IN

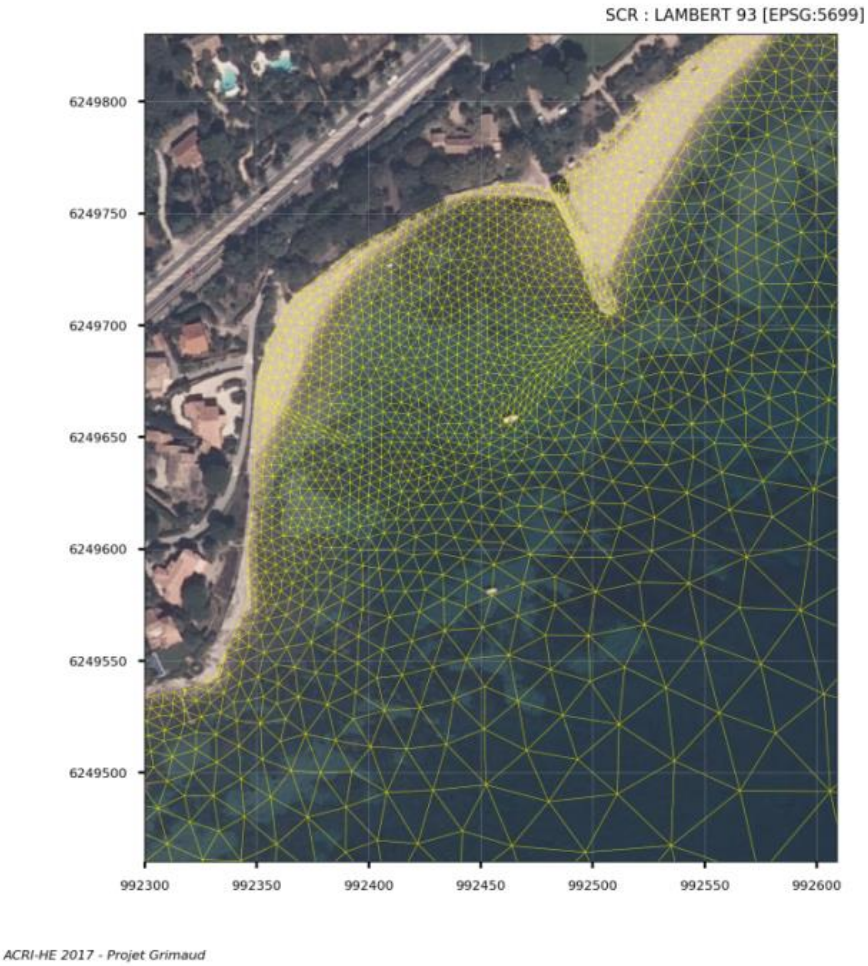
Frontières du modèle d'approche

4.4 Maillage

Le domaine de calcul est discrétisé spatialement à l'aide d'un maillage non structuré constitué de 31920 mailles triangulaires et 16723 nœuds. Le maillage est généré grâce à l'outil Matisse, puis son intégrité est vérifiée à l'aide de l'outil STBTEL. Les dimensions géométriques des mailles au centre du domaine sont de l'ordre de 150 m. La résolution spatiale est affinée progressivement vers la côte, pour atteindre 30 m sur la frontière sud et 5 m sur le littoral nord (ci-après).

© 2018 ACRI-IN





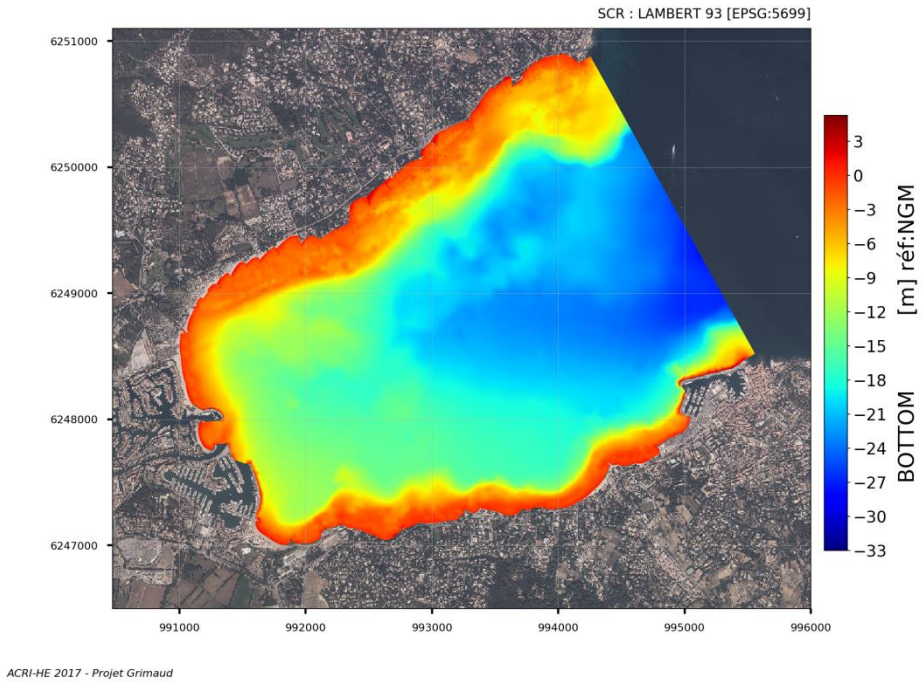
Maillage du modèle (haut : domaine total, bas : Anse du Vieux Moulin)

© 2018 ACRI-IN

4.5 Données d'entrée

4.5.1 Bathymétrie

La bathymétrie associée au maillage (ci-après) est la bathymétrie créée par l'interpolation des semis de points des levés Litto3D® PACA2015[1]. La précision est donc très élevée à la côte et moindre au large mais suffisante pour cette étude.



Bathymétrie Litto3D® PACA2015 interpolée sur le maillage

Nota : Selon les configurations d'aménagement étudiées, la bathymétrie sera localement modifiée.

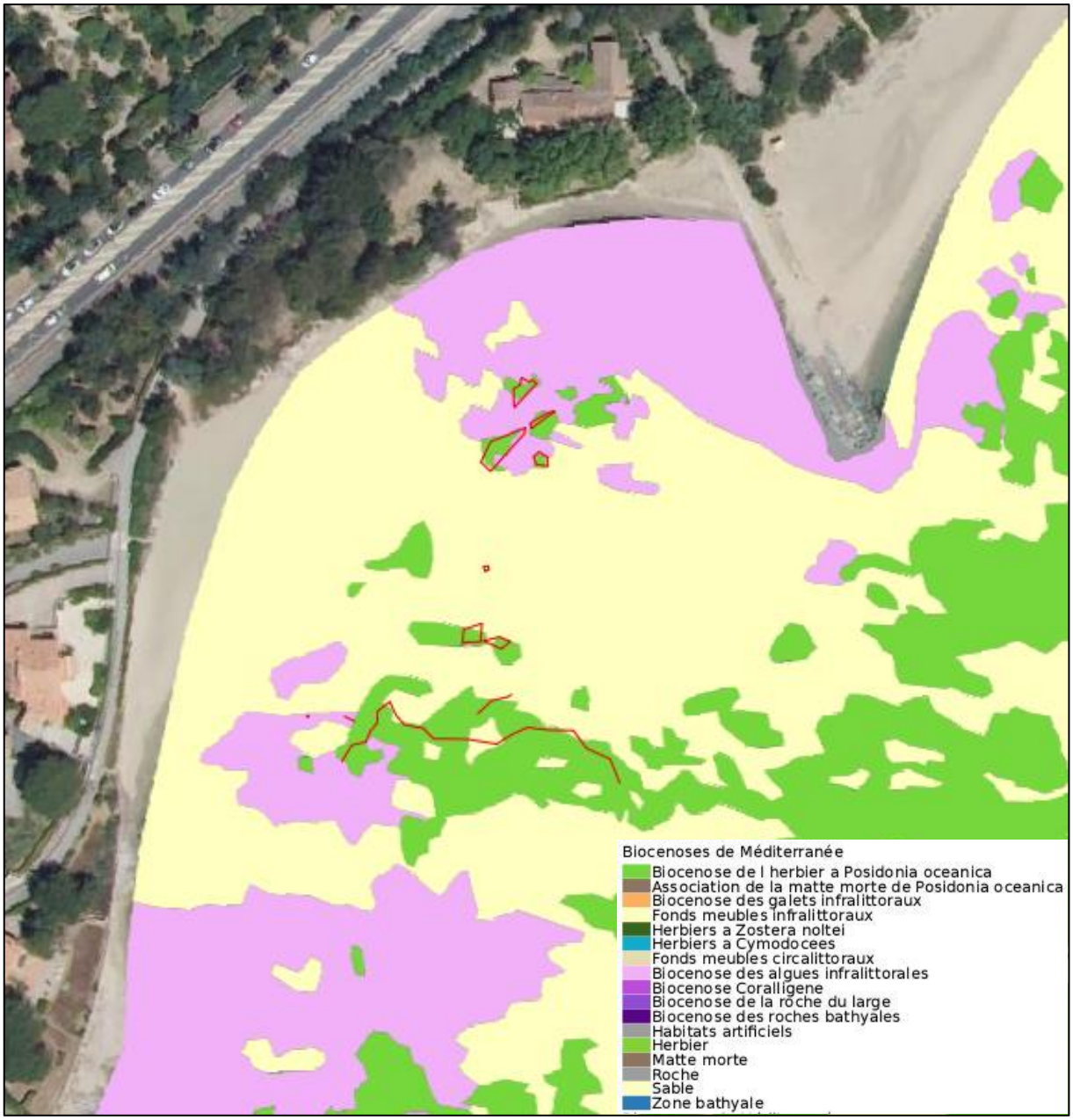
4.5.2 Roches affleurantes

La partie Sud-Ouest de l'anse du Moulin présente un fond rocheux. Ce type de type de fond est intégré dans la modélisation. Les zones situées au large ne sont pas incluses dans le modèle, ces dernières ne participant pas à la dynamique sédimentaire de la zone littorale.

Dans la partie Est de la plage, une zone de roches affleurantes est également observable. Dans un premier temps cette zone est considérée comme érodable ceci en vue de disposer d'une source de sédiment locale. Dans un second temps, ces fonds non érodables sont inclus dans la modélisation, sans pour autant modifier significativement les volumes érodés en haut de plage.

[1] Source : http://data.shom.fr/

© 2018 ACRI-IN



Cartographie des biocénoses et limites des herbiers mesurées par l'Observatoire Marin en mai 2015 (traits rouges).

4.5.3 Agitations marines et niveau marin

Les conditions d'agitation utilisées comme forçage du modèle morphodynamique sont issues des résultats du modèle construit et mis en œuvre par ACRI-IN en 2012[2].

4.5.3.1 Le modèle 2012

Ce modèle, mis en œuvre grâce au code SWAN, considère deux grilles (grande grille et petite grille) pour propager les houles du large vers le Golfe de St Tropez. Il est basé sur les conditions suivantes :

[2] Marché de maîtrise d'œuvre pour la réalisation de l'opération d'aménagement et de mise en valeur du littoral de Grimaud, Phase Avant-Projet – Etude des conditions hydrodynamiques et sédimentaires, ACRI-IN, V0 du 08/01/2013

© 2018 ACRI-IN

- La bathymétrie est issue d'une compilation de deux cartes marines SHOM,
- Les conditions de houle sont issues d'une analyse statistique des données fournies par GlobOcéan en un point au large,
- Les hausses du niveau marin sont estimées en tenant en compte de la marée, des surcotes dues aux conditions atmosphériques et océanographiques, le réchauffement climatique.

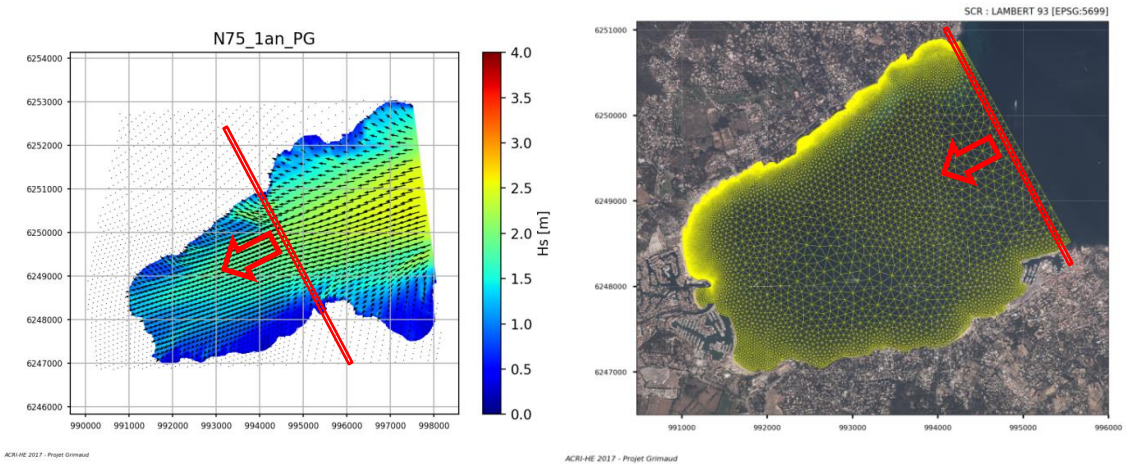


Illustration : conditions d'agitation héritées du modèle 2012 appliquées à la frontière maritime du modèle

4.5.3.2 Données de houle et niveau d'eau issus du modèle 2012

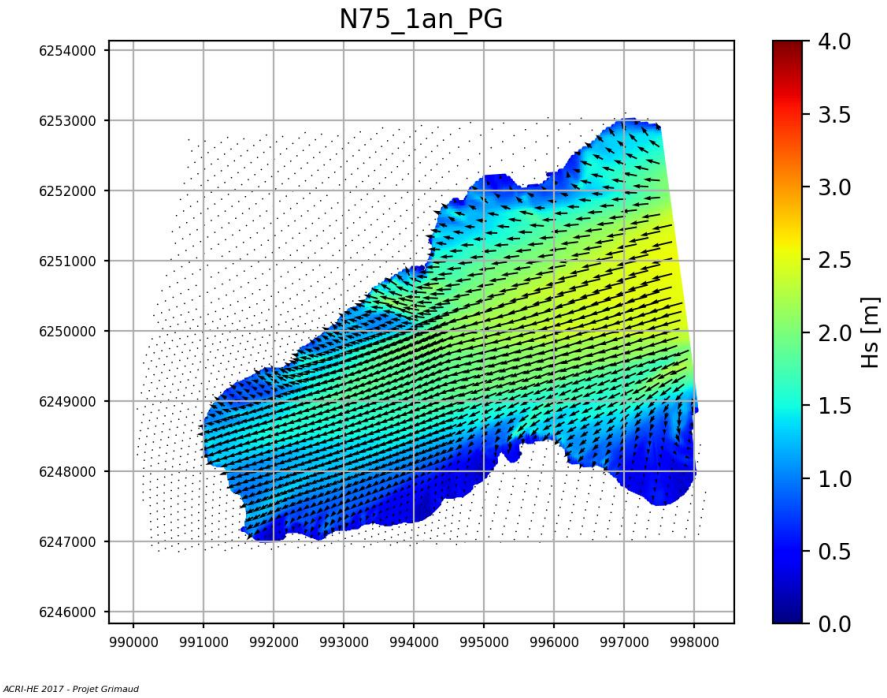
Les cas considérés sont les cas de houle des tempêtes de périodes de retour de 1 an, 10 ans et 50 ans, avec prise en compte de la hausse du niveau de la mer et selon 3 directions, soit **au large** :

	Période de retour	Hs	Tp	Direction de provenance	Niveau d'eau
CAS 1	1 an	2.8 m	7.5 s	75 °N	1.3 m
CAS 4	10 ans	3.7 m	9.5 s	75 °N	1.5 m
CAS 7	50 ans	4.4 m	9.5 s	75 °N	1.6 m
CAS 2	1 an	2.7 m	8.5 s	95 °N	1.3 m
CAS 5	10 ans	3.7 m	9.5 s	95 °N	1.5 m
CAS 8	50 ans	4.3 m	9.5 s	95 °N	1.6 m
CAS 3	1 an	1.4 m	5.5 s	115 °N	1.3 m
CAS 6	10 ans	2.0 m	6.5 s	115 °N	1.5 m
CAS 9	50 ans	2.4 m	7.5 s	115 °N	1.6 m

Conditions simulées du modèle 2012

Les résultats de ces simulations permettent de connaitre les conditions d'agitation à la frontière maritime du modèle. Une illustration de ces résultats est présentée ci-après.

© 2018 ACRI-IN



Résultat ACRI-IN, Houle 1 an - 75°N petite grille

© 2018 ACRI-IN

4.6 Scénarios d'aménagement proposées

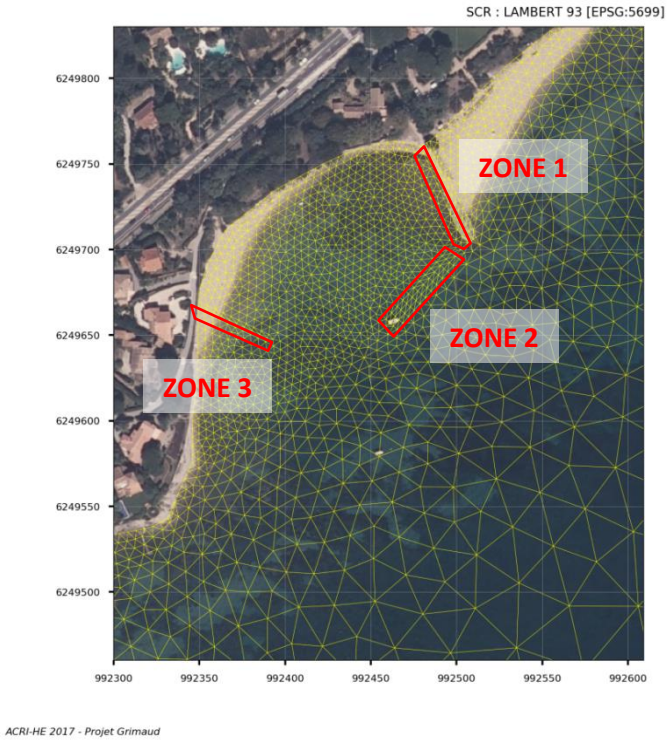
4.6.1 Présentation des modifications du maillage

L'étude portant particulièrement sur l'Anse du Vieux Moulin, lors de la création du maillage, trois zones ont été maillées différemment afin de pouvoir le moduler aisément. La figure page suivante repère ces trois zones. Le tableau ci-après dresse un bilan des configurations proposées.

	Scénarios d'aménagement	**Description**
0	Etat initial : Epi complet zone 1	Les éléments du maillage initial inclus dans la zone 1 sont supprimés pour former un épi. La bathymétrie est celle du Litto3D® PACA2015.
1	Epi partiellement ouvert zone 1	Les éléments situés dans deux sous zones de la zone 1 sont supprimés pour représenter une ouverture dans l'épi. La bathymétrie est celle du Litto3D® PACA2015. La bathymétrie de la plage en amont de l'épi est reprise pour permettre un échange avec l'anse du vieux moulin
2-V1	Ouvrage immergé zone 2 -V1	La bathymétrie de la zone 2 est fixée à -1,5 m. Les fonds dans cette zone sont considérés comme non érodables.
2-V2	Ouvrage immergé zone 2 -V2	La bathymétrie de la zone 2 est fixée à -0,3 m. Les fonds dans cette zone sont considérés comme non érodables.
2-V3	Ouvrage immergé zone 2 -V2 et épi raccourcis zone 1	La bathymétrie de la zone 2 est fixée à -0,3 m. Les fonds dans cette zone sont considérés comme non érodables. Les éléments du maillage initial inclus dans la zone 1 sont partiellement supprimés pour former un épi raccourci.
3	Création d'un épi dans la zone 3	Les éléments du maillage initial inclus dans la zone 3 sont supprimés pour former un épi. La bathymétrie est celle du Litto3D® PACA2015.

Description des scénarios d'aménagement étudiés

© 2018 ACRI-IN

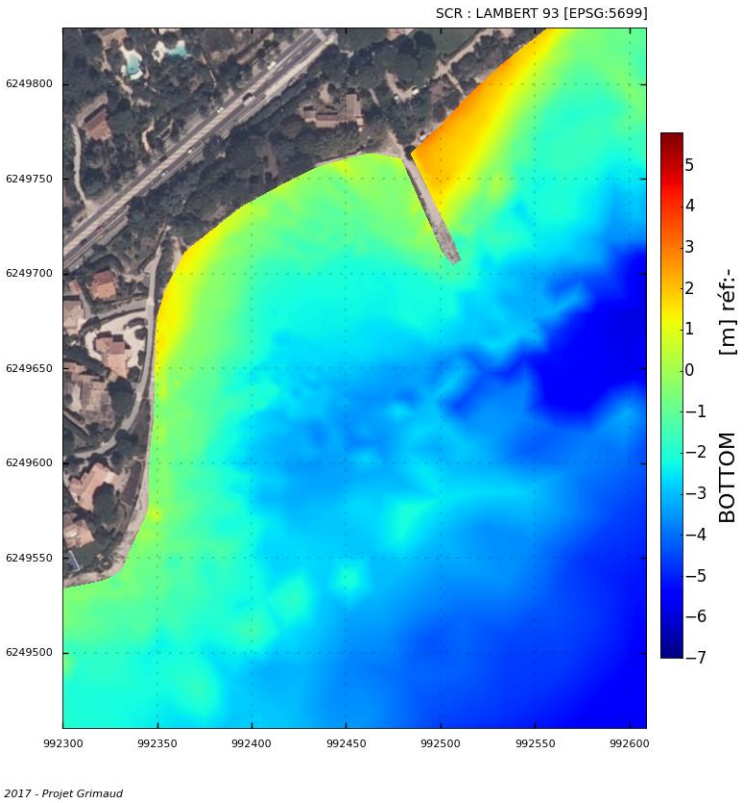


Maillage de l'anse du Vieux Moulin - zones d'aménagement

Les modifications apportées au maillage sont réalisées à l'aide de l'outil STBTEL.

4.6.2 Etat initial

Cette configuration correspond à l'état initial.



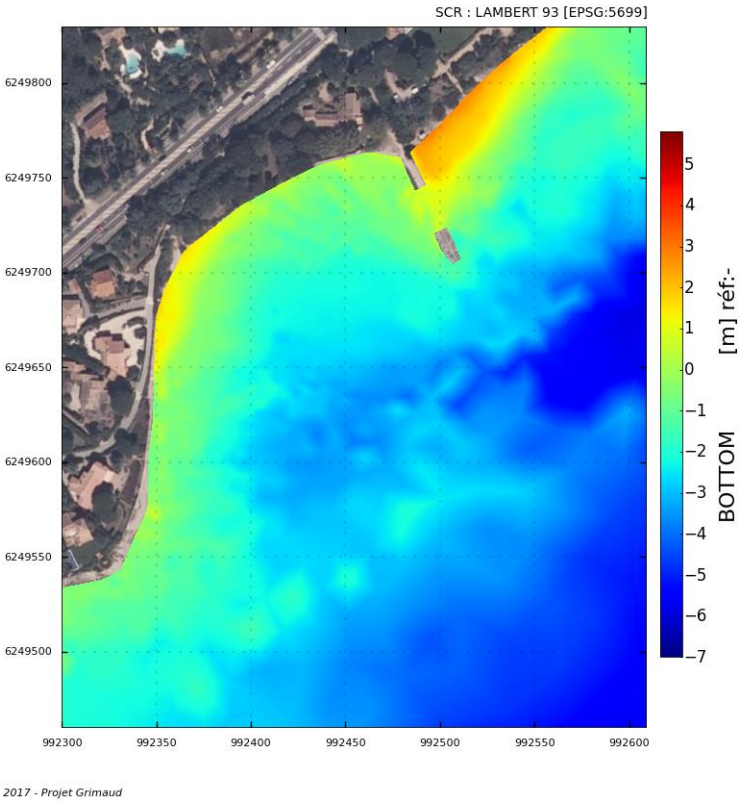
Configuration bathymétrique de l'état initial

© 2018 ACRI-IN

4.6.3 Scenario 1 : ouverture épi Est

Dans cette configuration l'épi Est est ouvert pour permettre un échange entre les deux compartiments sédimentaires qu'il délimite.

Une ouverture de 20 m est réalisée. Afin de faciliter la communication entre les deux compartiments un abaissement de l'ordre de 0,5 m de la topographie de la plage à l'est de l'épi est réalisé. Cet abaissement tient compte de la phase transitoire d'adaptation de la plage amont à la modification de la géométrie de l'épi.

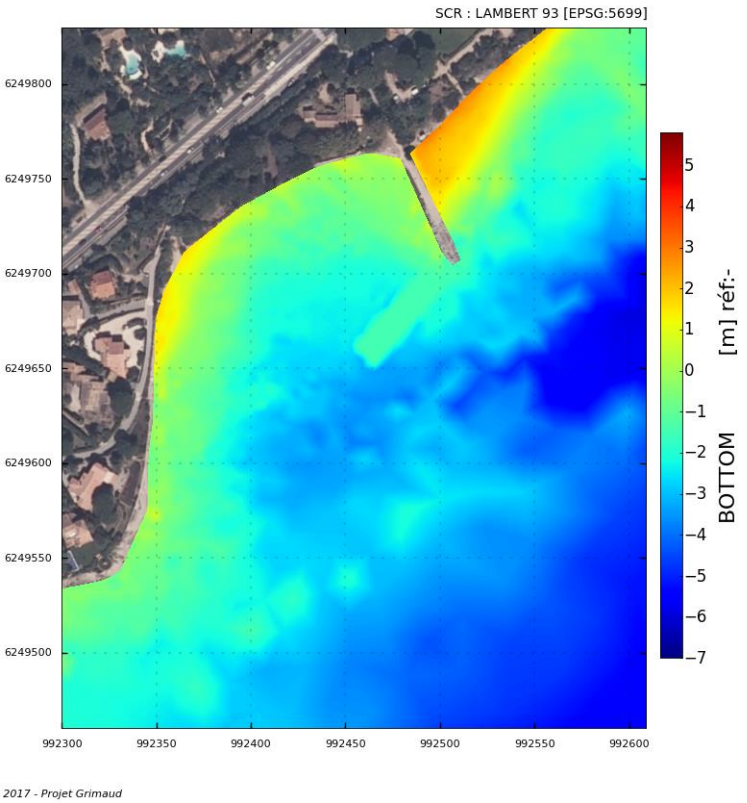


Configuration bathymétrique scénario 1 (ouverture de l'épi Est)

4.6.4 Scenario 2-V1 : ouvrage submergé

L'ouvrage submergé est modélisé en modifiant la bathymétrie dans une zone située à l'extrémité de l'épi Est.

La bathymétrie y est fixée à 1,5 m sous le niveau de la mer. Cette cote est choisie pour tenir compte du compromis en sécurité des activités et réduction de l'énergie incidente transportée par les vagues.



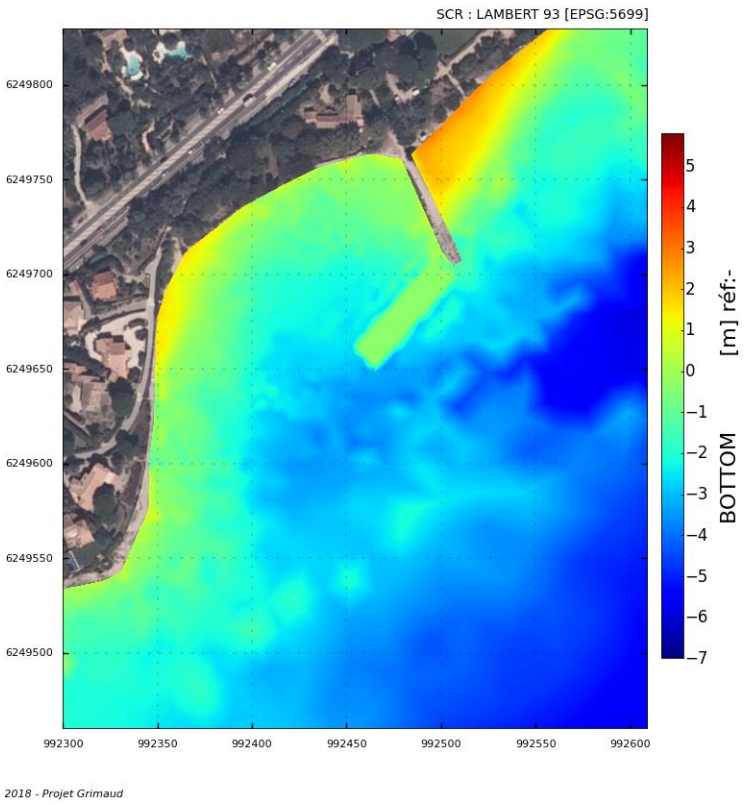
Configuration bathymétrique pour l'aménagement d'un ouvrage submergé (scénario 2-V1)

© 2018 ACRI-IN

4.6.5 Scenario 2-V2 : ouvrage submergé

L'ouvrage submergé est modélisé en modifiant la bathymétrie dans une zone située à l'extrémité de l'épi est.

En variante V2, la cote de la crête de l'ouvrage est fixée à 0,3 m sous le niveau de la mer. Cette cote considérée pour évaluer la sensibilité du trait de côte de l'anse à la réduction de l'énergie des traits de vagues incidentes, par déferlement au niveau de l'ouvrage.

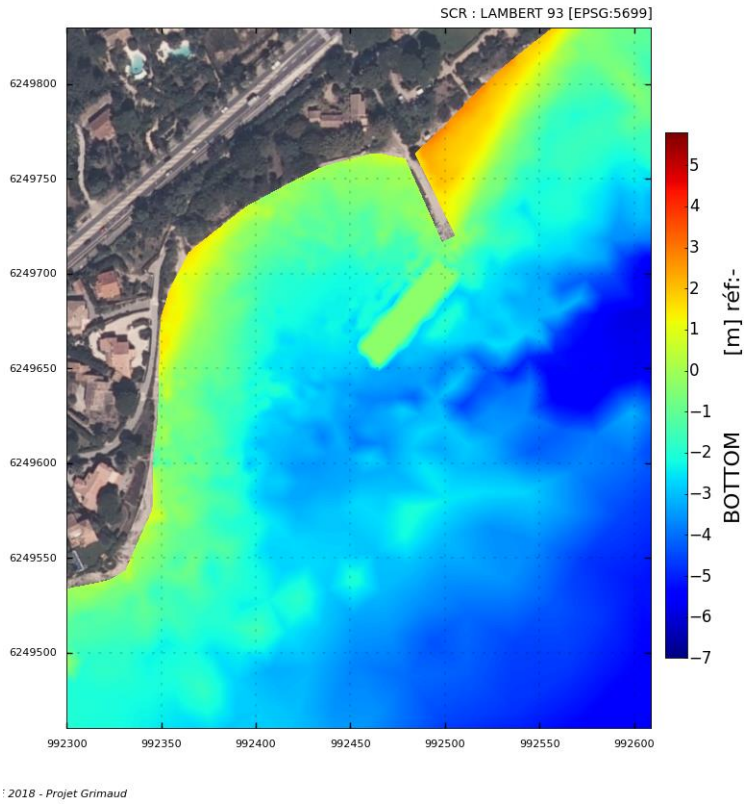


Configuration bathymétrique pour l'aménagement d'un ouvrage submergé (scénario 2-V2)

4.6.6 Scénario 2-V3 : ouvrage submergé et épi Est raccourci

L'ouvrage submergé est modélisé en modifiant la bathymétrie dans une zone située à l'extrémité de l'épi est.

En variante V3, la cote de la crête de l'ouvrage submergé est fixée à 0,3 m sous le niveau de la mer, tandis que l'pi Est se voit raccourci jusqu'au niveau du trait de côte existant.



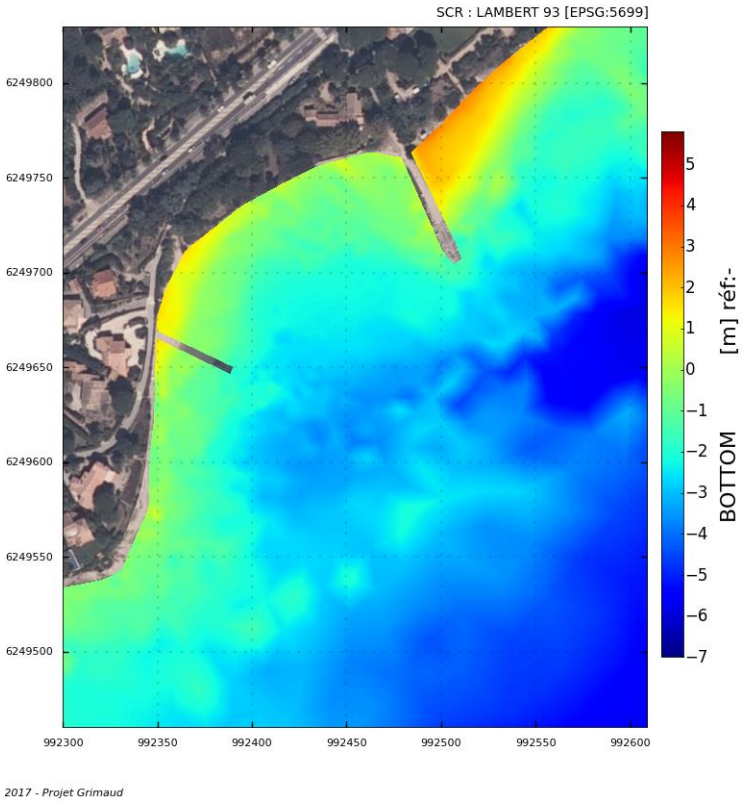
Configuration bathymétrique pour l'aménagement d'un ouvrage submergé et la réduction de l'épi Est (scénario 2-V3)

© 2018 ACRI-IN

4.6.7 Scenario 3 : épi Ouest

L'épi Ouest est inclus dans le modèle en retirant du domaine de calcul les éléments présents dans la zone 3.

Aucune modification de bathymétrie n'est opérée dans ce cas.



Configuration bathymétrique pour la configuration incluant un nouvel épi (scénario 3)

© 2018 ACRI-IN

5 Incidence sur la stabilité du trait de côte

5.1 Présentation des résultats

Pour chaque configuration modélisée, les cartes suivantes sont présentées :

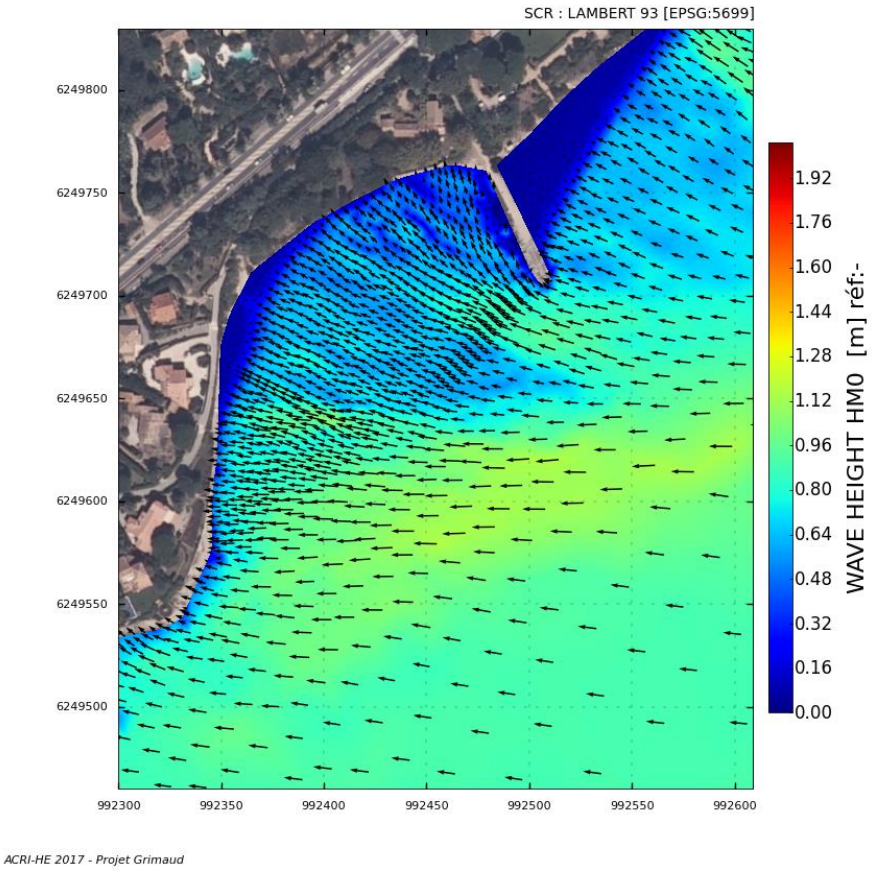
- carte des champs de vagues,
- cartes des champs de courants,
- cartes des zones de dépôts et d'érosion.

Pour rappel, les modélisations représentent des cas de tempêtes annuelles, décennales ou cinquantennale d'une durée de 12 h. La durée est estimée sur l'historique des tempêtes depuis 2000 réalisées par ACRI-IN sur le littoral de côte d'azur. La durée des tempêtes est en moyenne une journée.

5.2 Etat initial

5.2.1 CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N

5.2.1.1 Plan de vagues

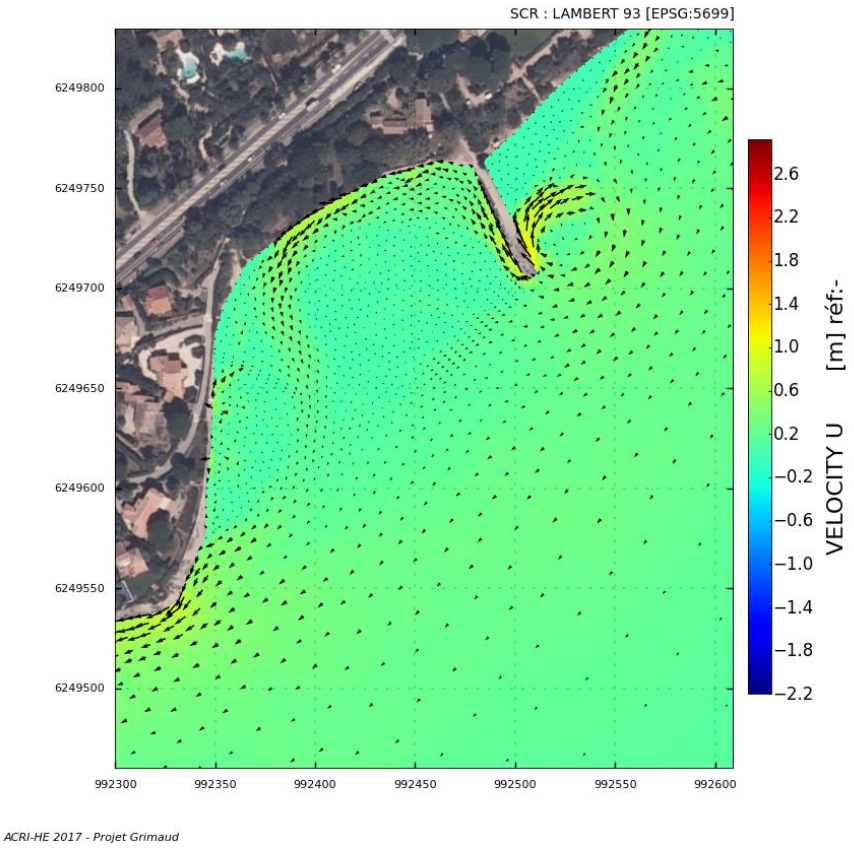


Plan de vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°N)

© 2018 ACRI-IN

Les vagues incidentes annuelles de direction 75°N au large sont généralement de l'ordre du mètre au droit de l'anse du Vieux Moulin.

5.2.1.2 Courants induits par les vagues



Courants induits par les vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°N)

La circulation induite par les courants suit la direction privilégiée de la dérive littorale, mise en évidence par l'étude de faisabilité SOGREAH (2008). La circulation est orientée d'est en ouest.

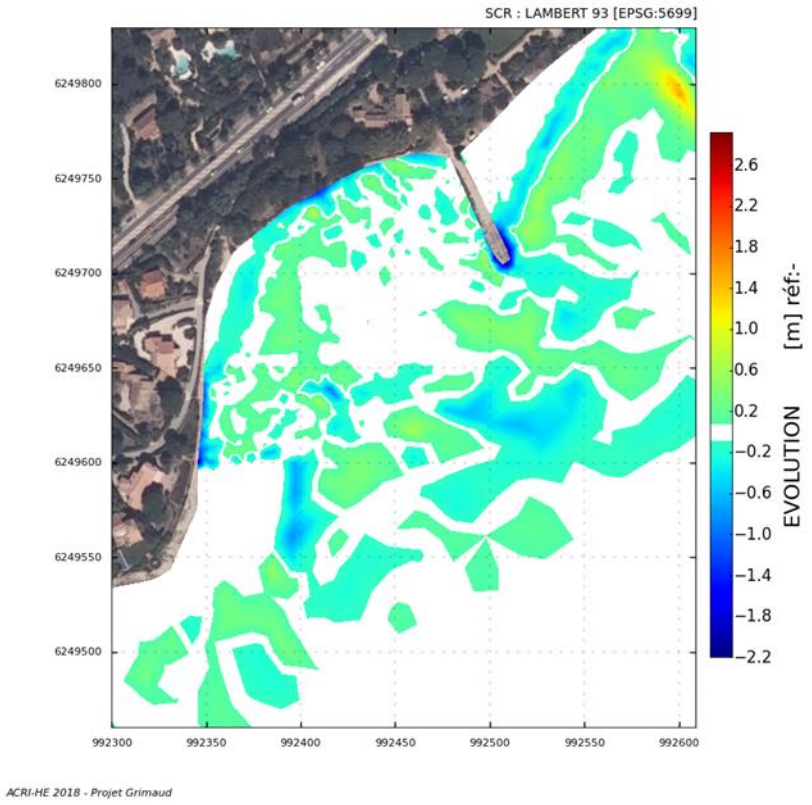
La géométrie de l'anse et les ouvrages locaux présentent des singularités qui modifient la circulation générale.

Sur la plage du Vieux Moulin, une veine intense de courant se développe le long de la berme de la plage. Elle prend naissance au niveau de l'épi est, puis reste plaquée à la plage sur 100 m. La morphologie de la plage contraint cette veine à se réfracter vers le large pour rejoindre la circulation générale.

Au niveau de l'épi Est, on note la modélisation numérique permet de mettre en évidence une dynamique complexe de l'écoulement. A l'est de cet épi, la circulation est marquée par un vortex intense orienté dans le sens anti trigonométrique, induisant une déflexion vers le large de la dérive littoral 50 m en amont de l'épi Est.

© 2018 ACRI-IN

5.2.1.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=2.8m, direction=75°N)

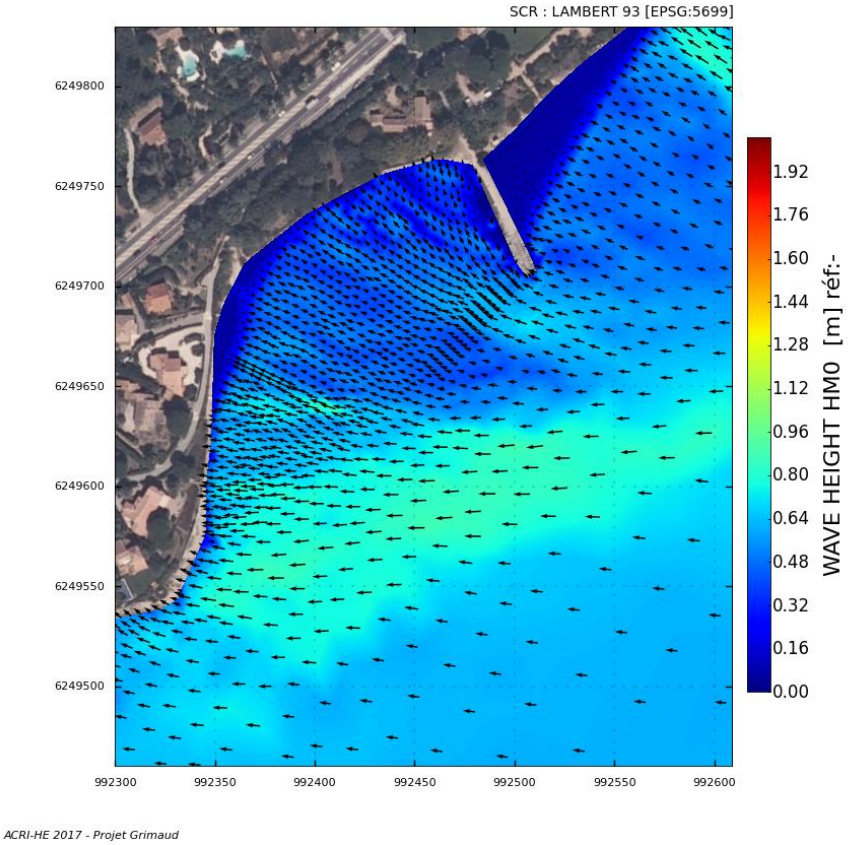
Sous l'effet des conditions météo-océaniques considérées, la modélisation numérique met en évidence une érosion généralisée de la plage du Vieux Moulin supérieure à 0,2 m.

Les évolutions les plus marquées se produisent au niveau du musoir de l'épi Est.

© 2018 ACRI-IN

5.2.2 CAS 2 – Période de retour 1 an – Direction 95°N

5.2.2.1 Plan de vagues

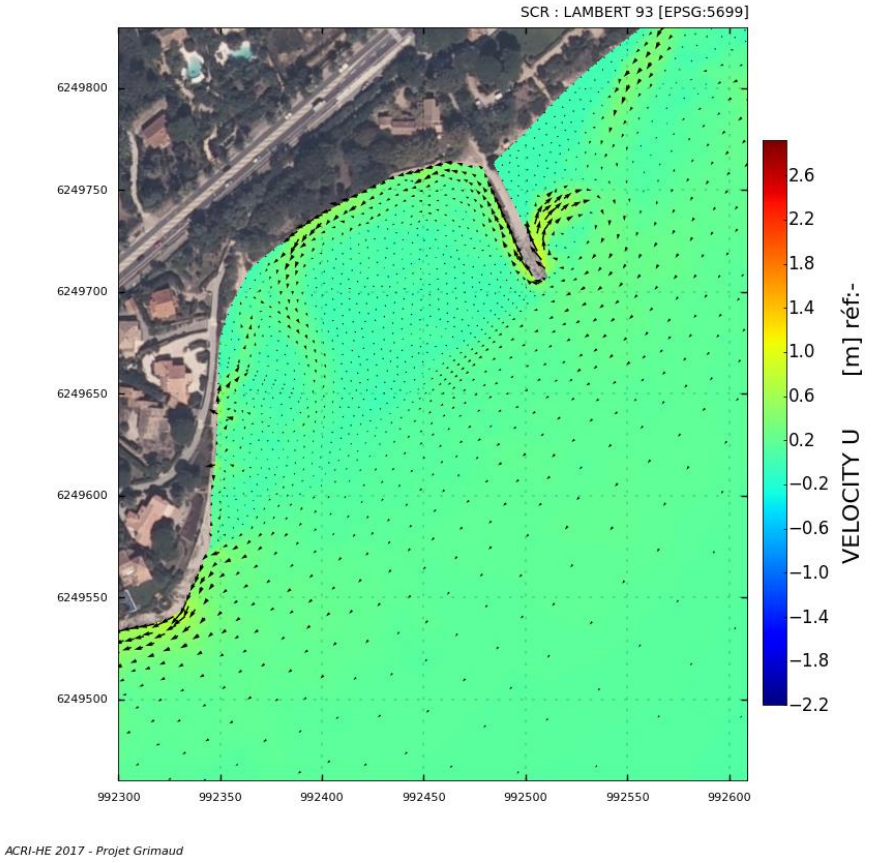


Plan de vagues (Au large : Hs=2.7m, direction=95°N)

Les vagues incidentes annuelles de direction 95°N au large sont généralement inférieures au mètre au droit de l'anse du Vieux Moulin.

© 2018 ACRI-IN

5.2.2.2 Courants induits par les vagues



Courants induits par les vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=95°N)

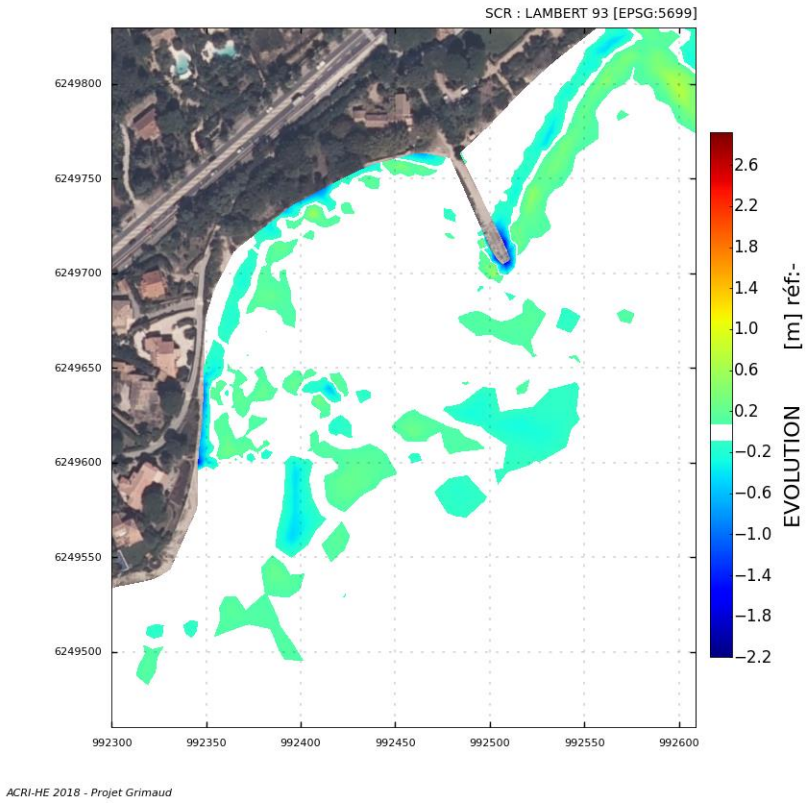
La circulation induite par les courants suit la direction privilégiée de la dérive littorale mis en évidence par l'étude de faisabilité SOGREAH (2008). La circulation est orientée d'est en ouest.

La géométrie de l'anse et les ouvrages locaux présentent des singularités qui modifient la circulation générale.

Les résultats sont similaires à ceux présentées dans le cas 1, pour des vagues de secteur N75.

© 2018 ACRI-IN

5.2.2.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=2.8m, direction=95°N)

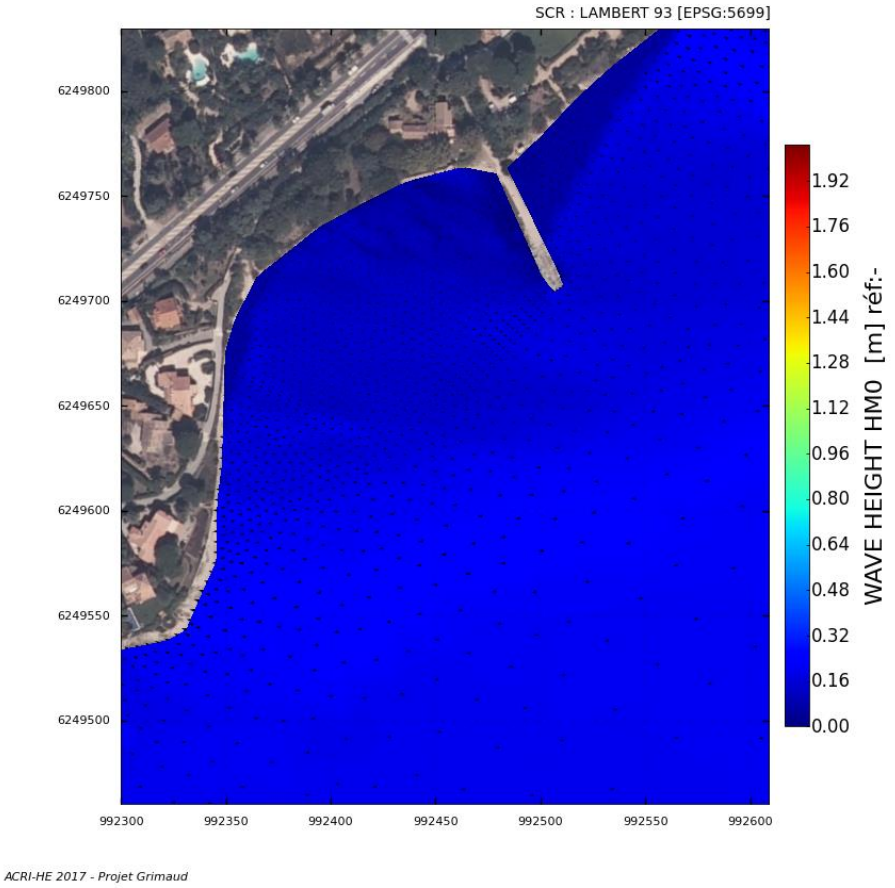
Sous l'effet des conditions météo-océaniques considérées, la modélisation numérique met en évidence une érosion moins intense que dans le cas 1 d'incidence 75°N.

Les évolutions les plus marquées se produisent au niveau du musoir de l'épi est.

© 2018 ACRI-IN

5.2.3 CAS 3 – Période de retour 1 an – Direction 115°N

5.2.3.1 Plan de vagues

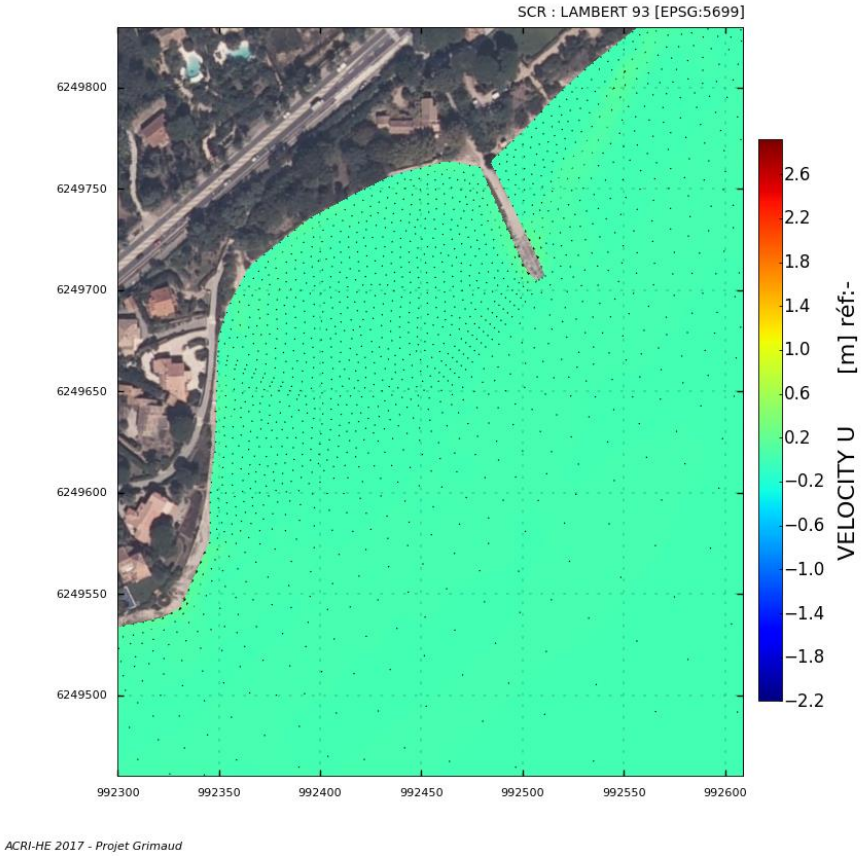


Plan de vagues (Au large : Hs=1.4m, direction=115°N)

Les vagues incidentes annuelles de direction 115°N au large sont généralement inférieures à 50 cm au droit de l'anse du Vieux Moulin.

© 2018 ACRI-IN

5.2.3.2 Courants induits par les vagues

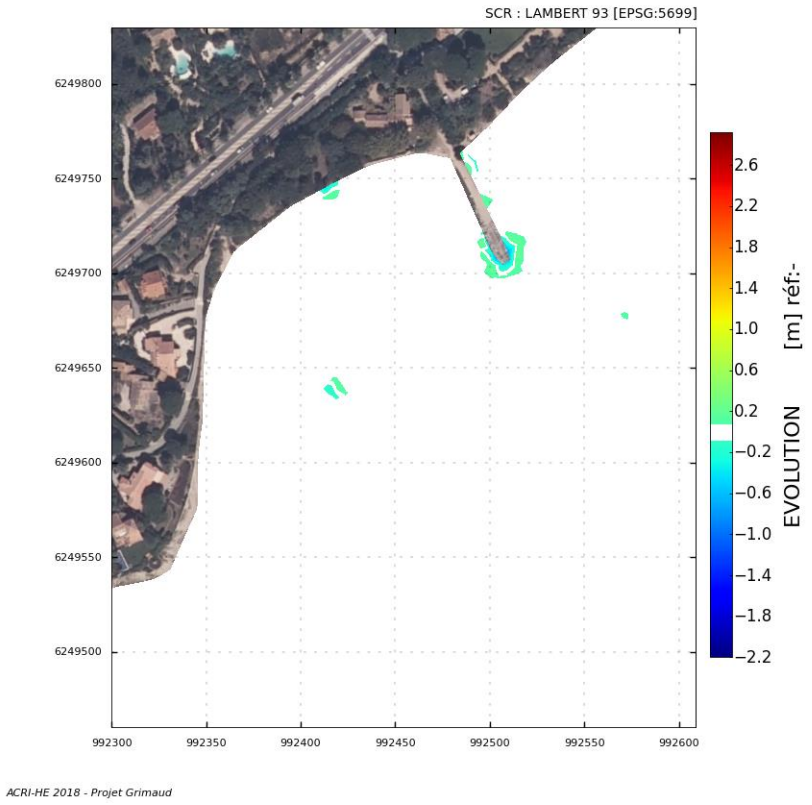


Courants induits par les vagues (Au large : Hs=1.4m, direction=115°N)

La circulation induite par les courants pour le cas considéré de vagues annuelles provenant de secteur N115 est faible. Les courants sont généralement inférieurs à 0,2 m/s.

© 2018 ACRI-IN

5.2.3.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=1.4m, direction=115°N)

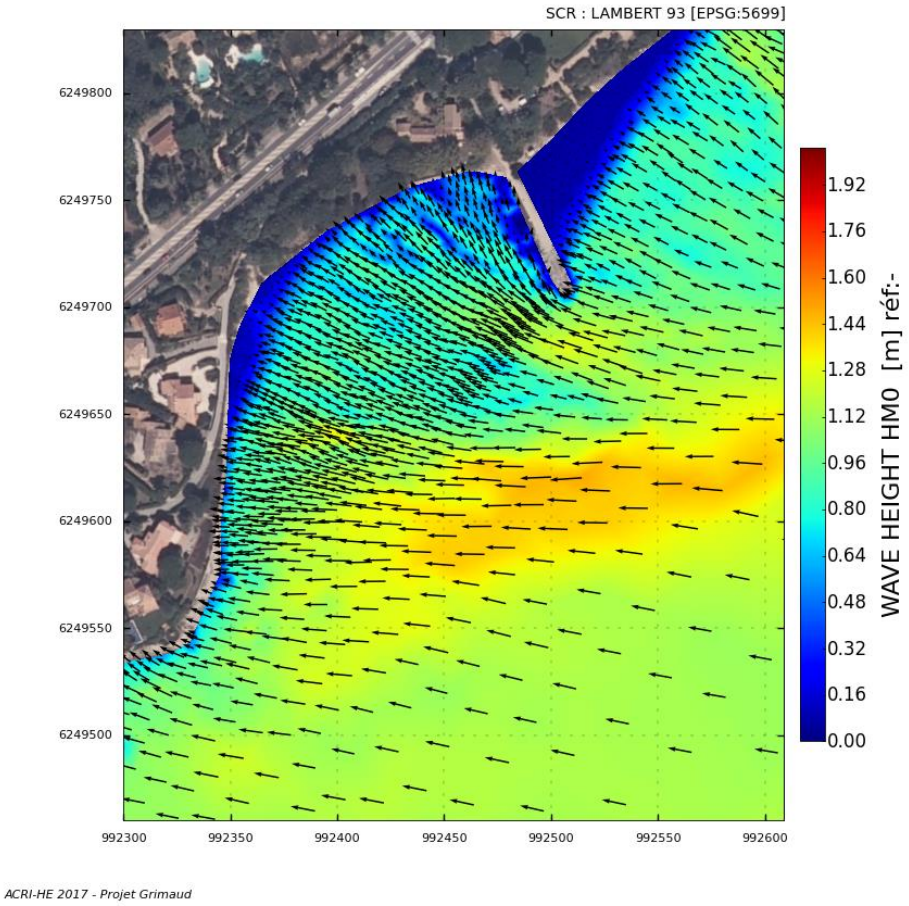
Sous l'effet des conditions météo-océaniques considérées, les courants et les agitations ne sont pas suffisantes pour induire des modifications bathymétriques significatives.

Les évolutions les plus marquées se produisent au niveau du musoir de l'épi Est.

© 2018 ACRI-IN

5.2.4 CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N

5.2.4.1 Plan de vagues

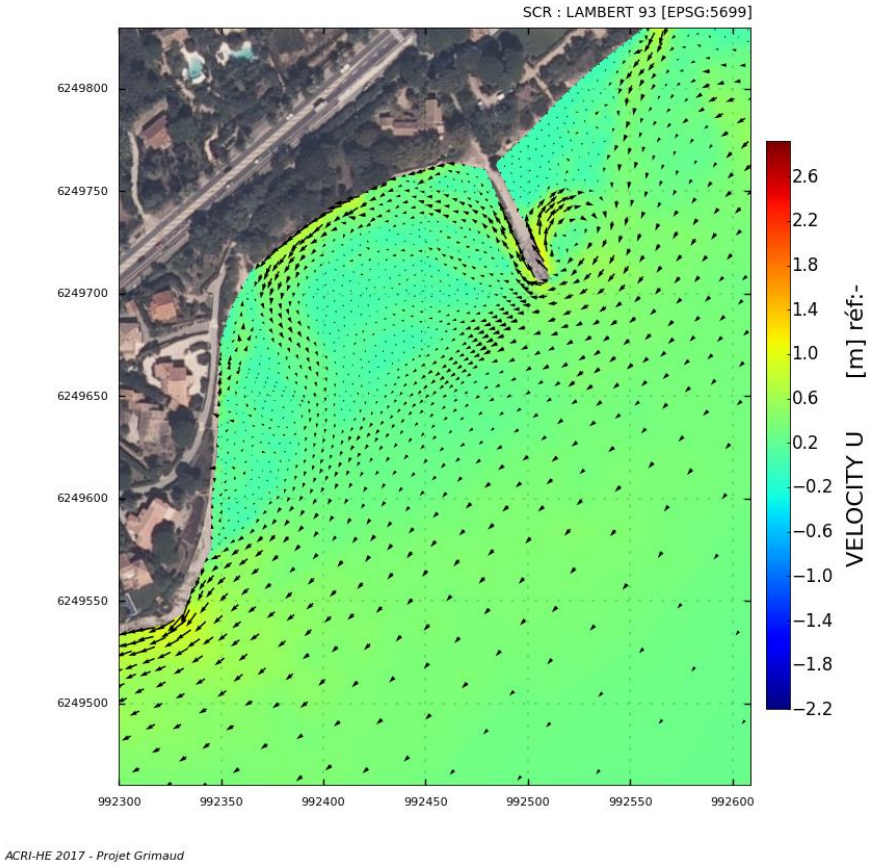


Plan de vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=75°N)

Les vagues incidentes décennales de direction 75°N au large sont généralement de l'ordre de 1,4 m.

© 2018 ACRI-IN

5.2.4.2 Courants induits par les vagues



Courants induits par les vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=75°N)

La circulation induite par les courants de vague suit la direction générale présentée par l'étude de faisabilité SOGREAHE (2008).

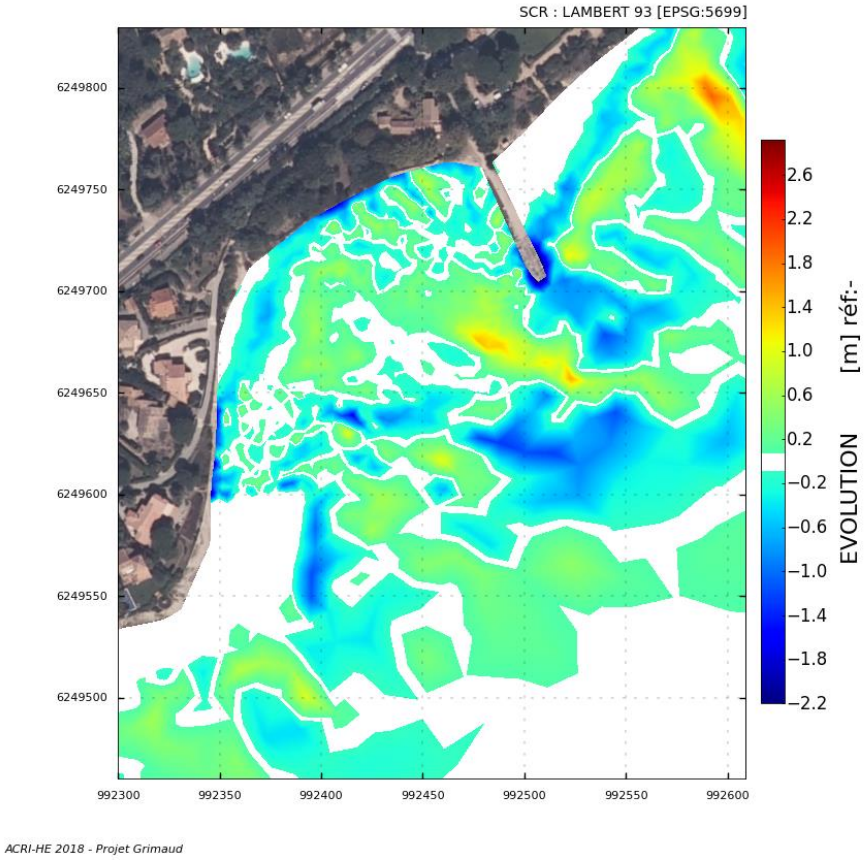
Les éléments géométriques de la plage ont pour effet de générer des recirculations locales complexes prises en compte par le modèle.

Comme dans le cas annuel, on retrouve la mise en place d'une intense dérive littorale plaquée contre l'épi puis qui suit la berme de la plage. Cette veine est par la suite défléchie vers le large en présence de variations dans le profil de plage.

De même, on retrouve la structure tourbillonnaire qui se développe à l'est de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

5.2.4.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=3.7m, direction=75°)

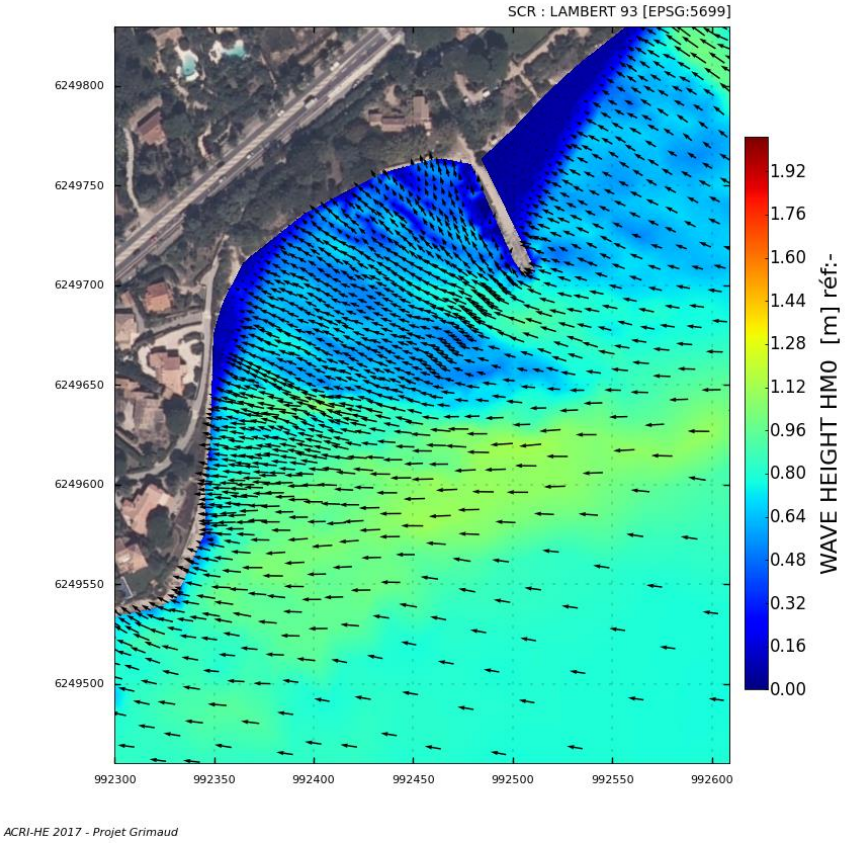
Sous l'effet des conditions météo-océaniques considérées, on note une érosion généralisée du haut de plage. Le modèle numérique met en évidence des dépôts importants en pied de profil de plage.

Les évolutions les plus marquées se produisent au niveau du musoir de l'épi est.

© 2018 ACRI-IN

5.2.5 CAS 5 – Période de retour 10 ans – Direction 95°N

5.2.5.1 Plan de vagues

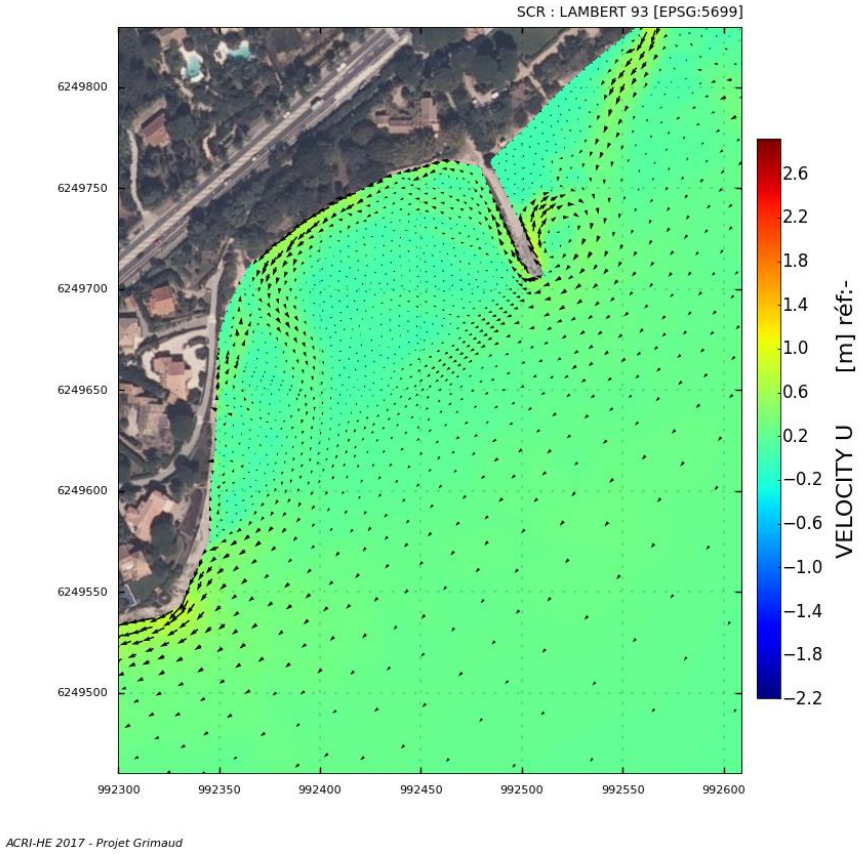


Plan de vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=95°)

Les vagues incidentes décennales de direction 95°N au large sont généralement de l'ordre de 1,4 m.

© 2018 ACRI-IN

5.2.5.2 Courants induits par les vagues



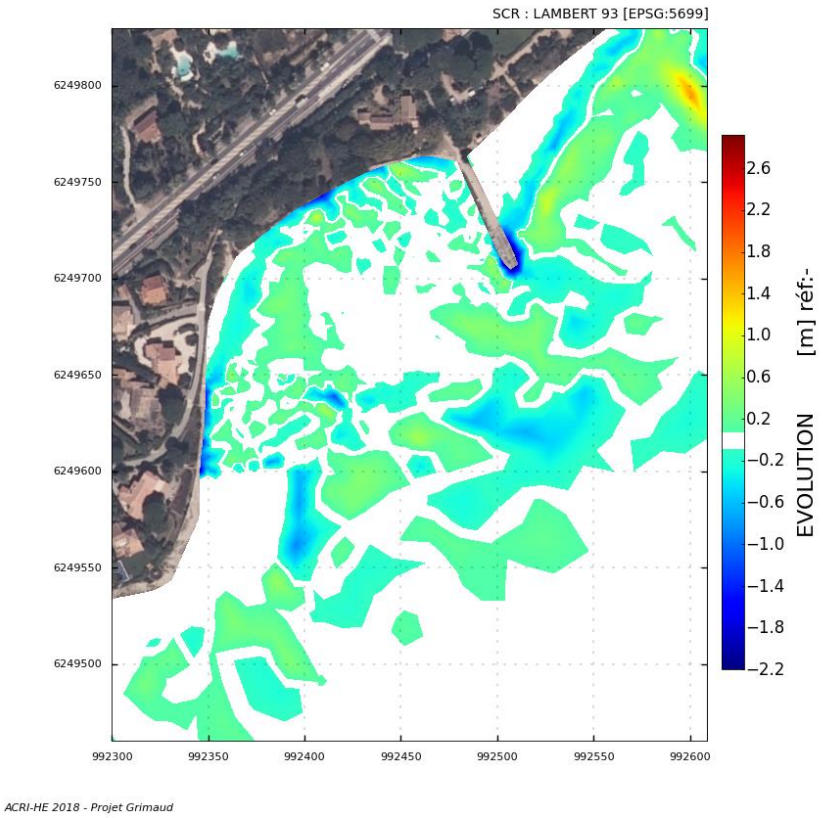
Courants induits par les vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=95°N)

La circulation induite par les courants de vague suit la direction générale présentée par l'étude de faisabilité SOGREAH (2008).

Les éléments géométriques de la plage ont pour effet de générer des recirculations locales complexes prises en compte par le modèle. Comme dans le cas annuel, on retrouve la mise en place d'une intense dérive littorale plaquée contre l'épi puis qui suit la berme de la plage. Cette veine est par la suite défléchie vers le large en présence de variations dans le profil de plage.

© 2018 ACRI-IN

5.2.5.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=3.7m, direction=95°N)

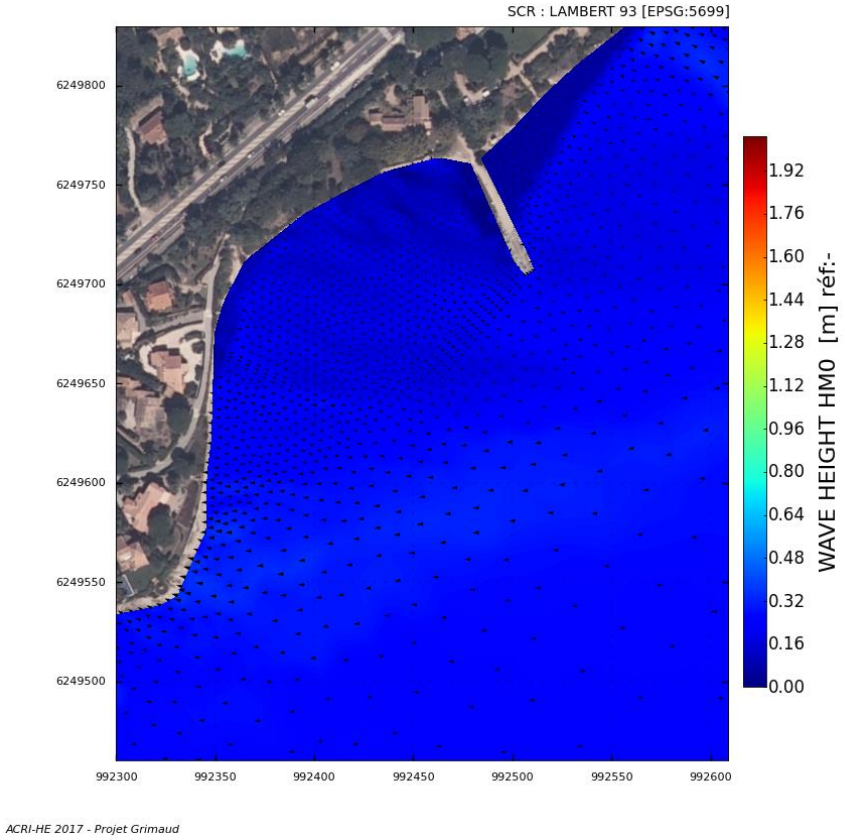
Sous l'effet des conditions météo-océaniques considérées, on note une érosion généralisée du haut de plage. Le modèle numérique met en évidence des dépôts importants en pied de profil de plage.

Les évolutions les plus marquées se produisent au niveau du musoir de l'épi Est.

© 2018 ACRI-IN

5.2.6 CAS 6 – Période de retour 10 ans – Direction 115°N

5.2.6.1 Plan de vagues

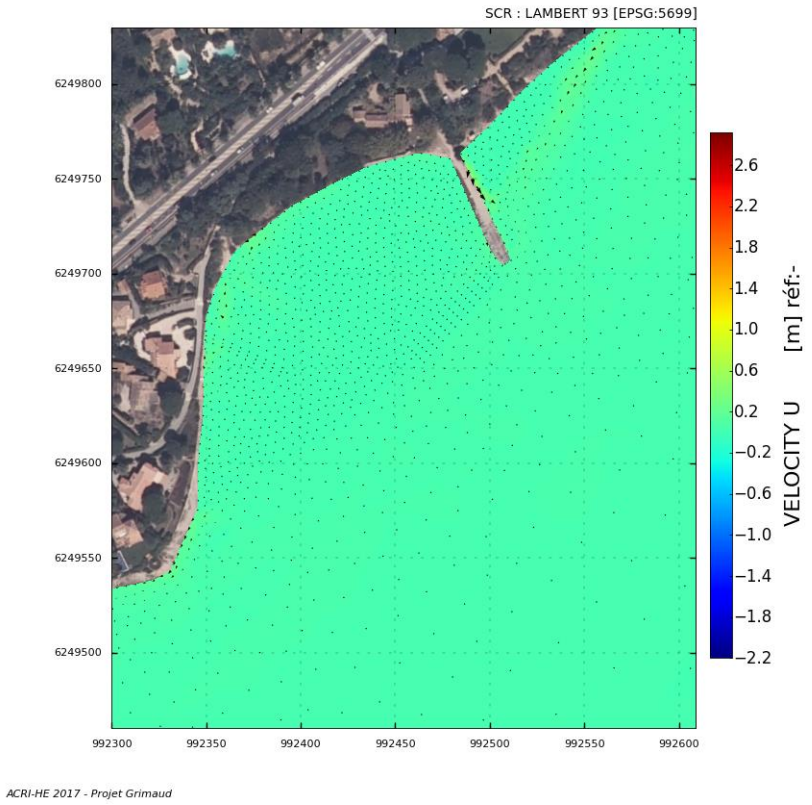


Plan de vagues (Au large : Hs=2.0m, direction=115°N)

Les vagues incidentes décennales de direction 115°N au large sont généralement de l'ordre de 50 cm.

© 2018 ACRI-IN

5.2.6.2 Courants induits par les vagues

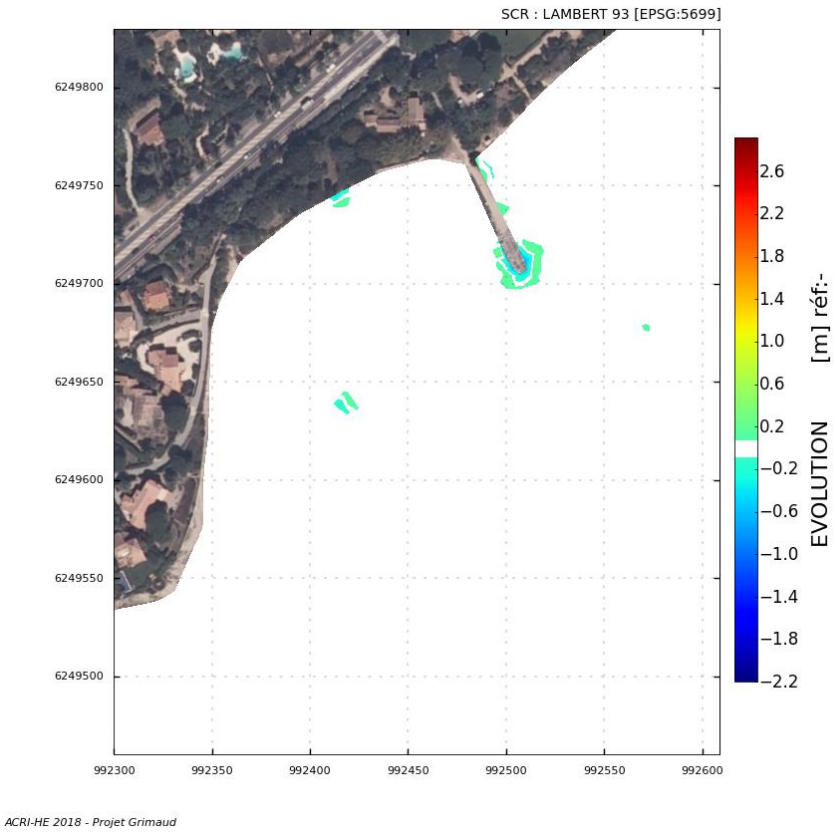


Courants induits par les vagues (Au large : Hs=2.0m, direction=115°)

La circulation induite par les courants pour le cas considéré de vagues annuelles provenant de secteur N115 est faible. Les courants sont généralement inférieurs à 0,25 m/s.

© 2018 ACRI-IN

5.2.6.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=2.0m, direction=115°N)

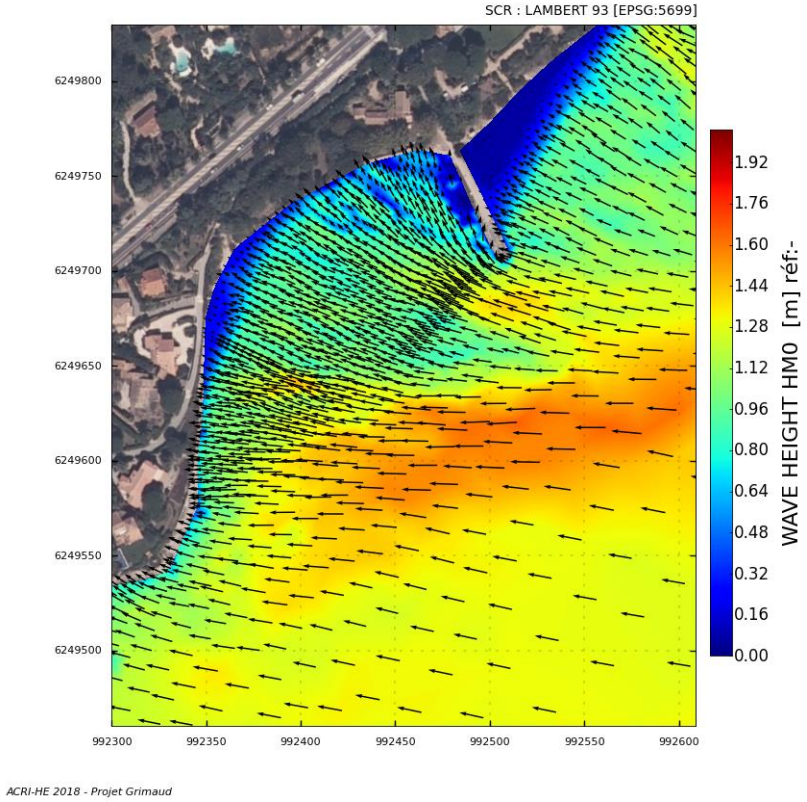
Sous l'effet des conditions météo-océaniques considérées, les courants et les agitations ne sont pas suffisantes pour induire des modifications bathymétriques significatives.

Les évolutions les plus marquées se produisent au niveau du musoir de l'épi Est.

© 2018 ACRI-IN

5.2.7 CAS 7 – Période de retour 50 ans – Direction 75°N

5.2.7.1 Plan de vagues

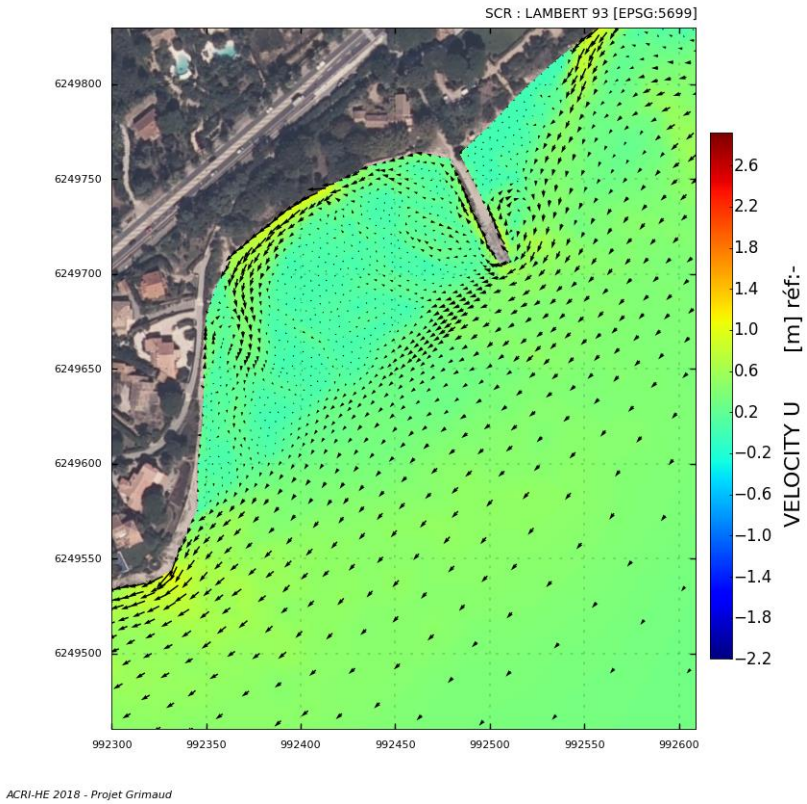


Plan de vagues (Au large : Hs=4.4m, direction=75°)

Les vagues incidentes cinquantennales de direction 75°N au large sont généralement de l'ordre de 1,5 m.

© 2018 ACRI-IN

5.2.7.2 Courants induits par les vagues



Courants induits par les vagues (Au large : Hs=4.4m, direction=75°)

La circulation induite par les courants de vague suit la direction générale présentée par l'étude de faisabilité SOGREAH (2008).

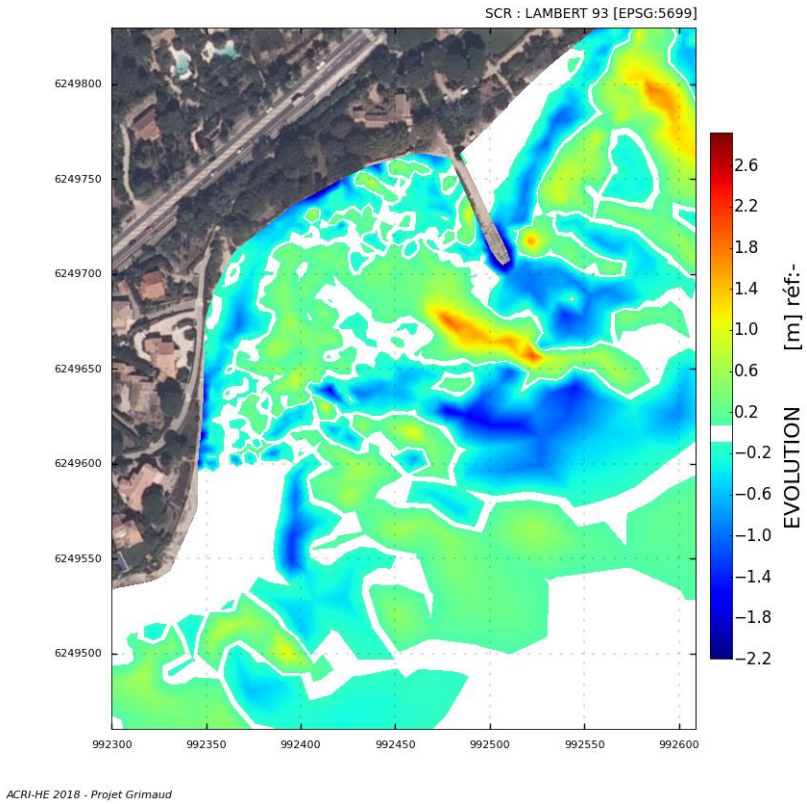
Les éléments géométriques de la plage ont pour effet de générer des recirculations locales complexes prises en compte par le modèle.

Comme dans le cas décennal, on retrouve la mise en place d'une intense dérive littorale plaquée contre l'épi puis qui suit la berme de la plage. Cette veine est par la suite défléchie vers le large en présence de variations dans le profil de plage.

De même, on retrouve la structure tourbillonnaire qui se développe à l'est de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

5.2.7.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=4.4m, direction=75°)

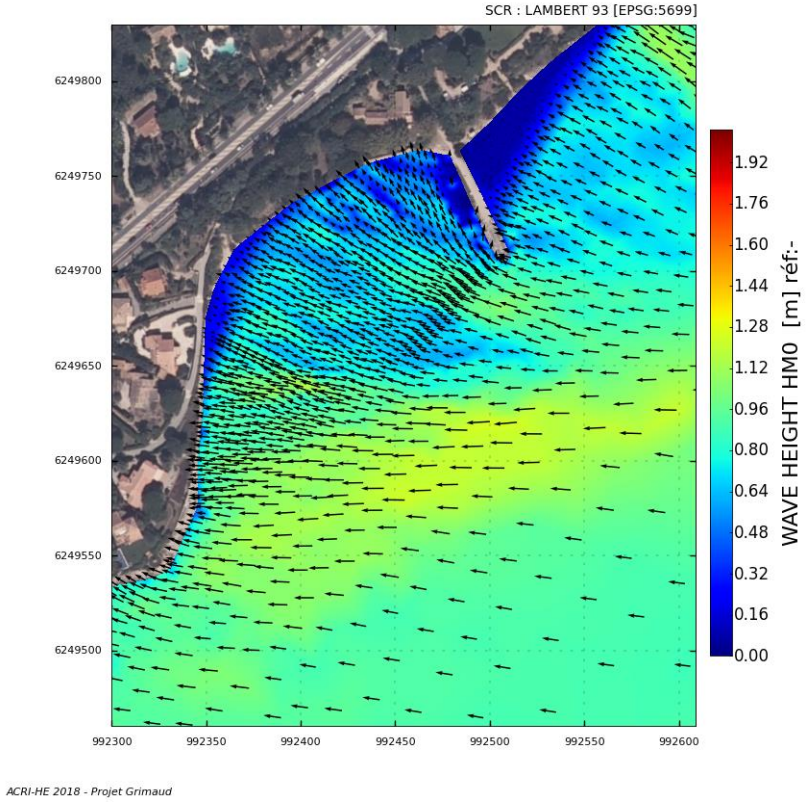
Sous l'effet des conditions météo-océaniques considérées, on note une érosion généralisée du haut de plage. Le modèle numérique met en évidence des dépôts importants en pied de profil de plage.

Les évolutions les plus marquées se produisent au niveau du musoir de l'épi Est.

© 2018 ACRI-IN

5.2.8 CAS 8 – Période de retour 50 ans – Direction 95°N

5.2.8.1 Plan de vagues

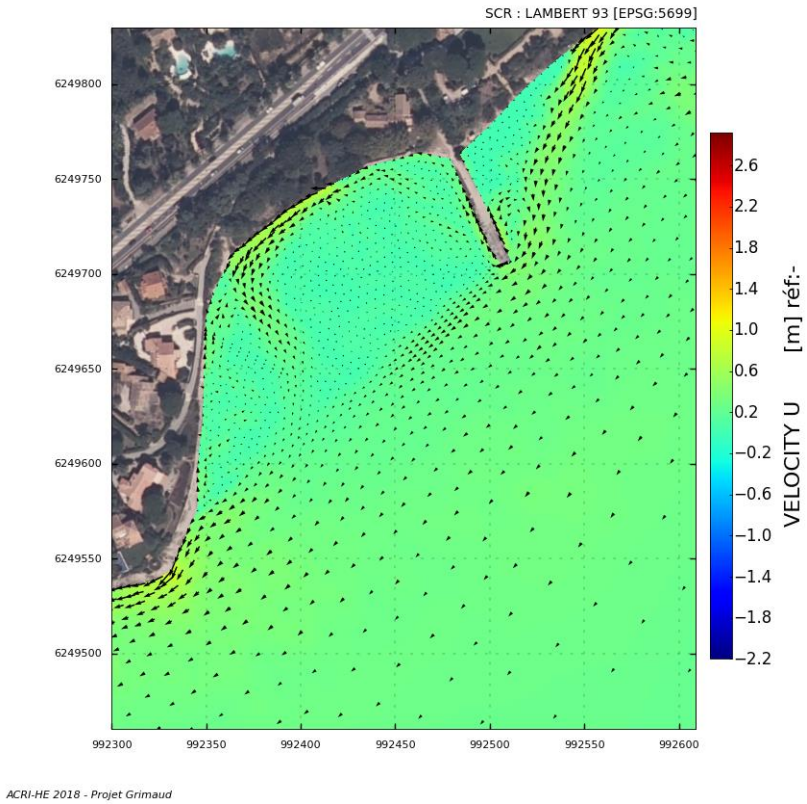


Plan de vagues (Au large : Hs=4.3m, direction=95°)

Les vagues incidentes cinquantennales de direction 95°N au large sont généralement de l'ordre de 1,45 m.

© 2018 ACRI-IN

5.2.8.2 Courants induits par les vagues



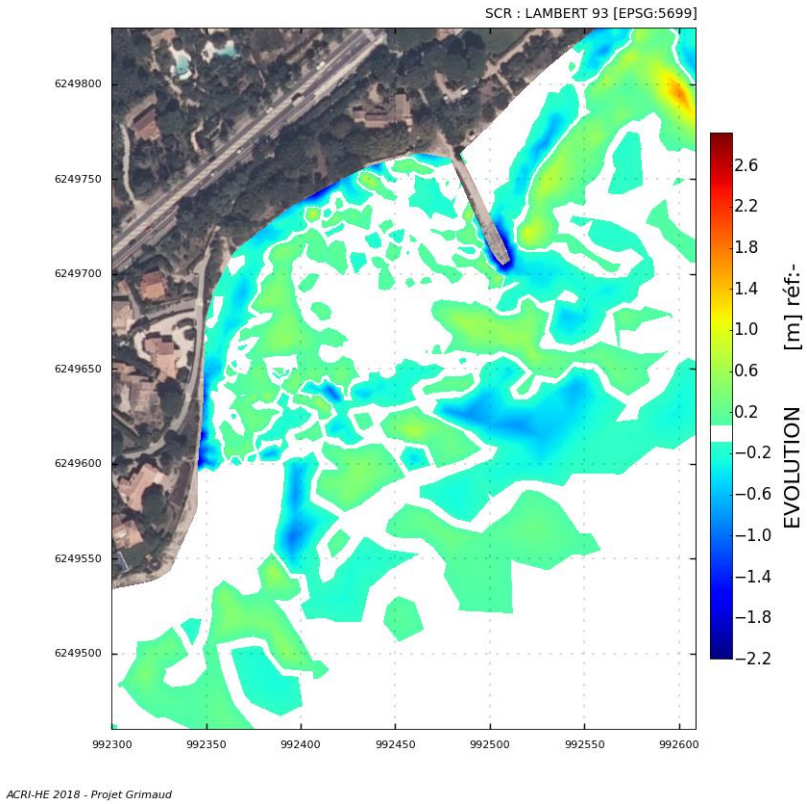
Courants induits par les vagues (Au large : Hs=4.3m, direction=95°)

La circulation induite par les courants de vague suit la direction générale présentée par l'étude de faisabilité SOGREAH (2008).

Les éléments géométriques de la plage ont pour effet de générer des recirculations locales complexes prises en compte par le modèle. Comme dans le cas annuel, on retrouve la mise en place d'une intense dérive littorale plaquée contre l'épi puis qui suit la berme de la plage. Cette veine est par la suite défléchie vers le large en présence de variations dans le profil de plage.

© 2018 ACRI-IN

5.2.8.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=4.3m, direction=95°)

Sous l'effet des conditions météo océaniques considérées, on note une érosion généralisée du haut de plage. Le modèle numérique met en évidence des dépôts importants en pied de profil de plage.

Les évolutions les plus marquées se produisent au niveau du musoir de l'épi Est.

5.2.9 Synthèse sur l'état initial

Les simulations réalisées ont permis de mettre en évidence les éléments suivants :

A. La zone d'intérêt en cas de tempêtes annuelles est soumise à une érosion généralisée ; cette érosion est accentuée dans le cas d'une tempête décennale sans pour autant modifier les zones d'érosion et de dépôts ;

B. La dérive littorale mise en évidence par l'étude de faisabilité est bien reproduite par le modèle numérique, avec une composante orientée de l'est vers l'ouest ;

C. L'épi a pour effet de dévier la dérive littorale vers le large ; ceci est un phénomène généralement induit par ce type d'ouvrages perpendiculaires à la côte ; toutefois on note que dans le cas du Vieux Moulin, la présence de l'épi et la morphologie des fonds induisent une circulation complexe qui induit un déplacement vers l'est de la zone d'infléchissement de la dérive littorale ;

D. Les effets les plus marquées en termes d'érosion sont observables dans le cas des tempêtes de secteur N75 et N95 ; le cas N115 n'induit que des vagues et des courants de faible intensité dans la zone

© 2018 ACRI-IN

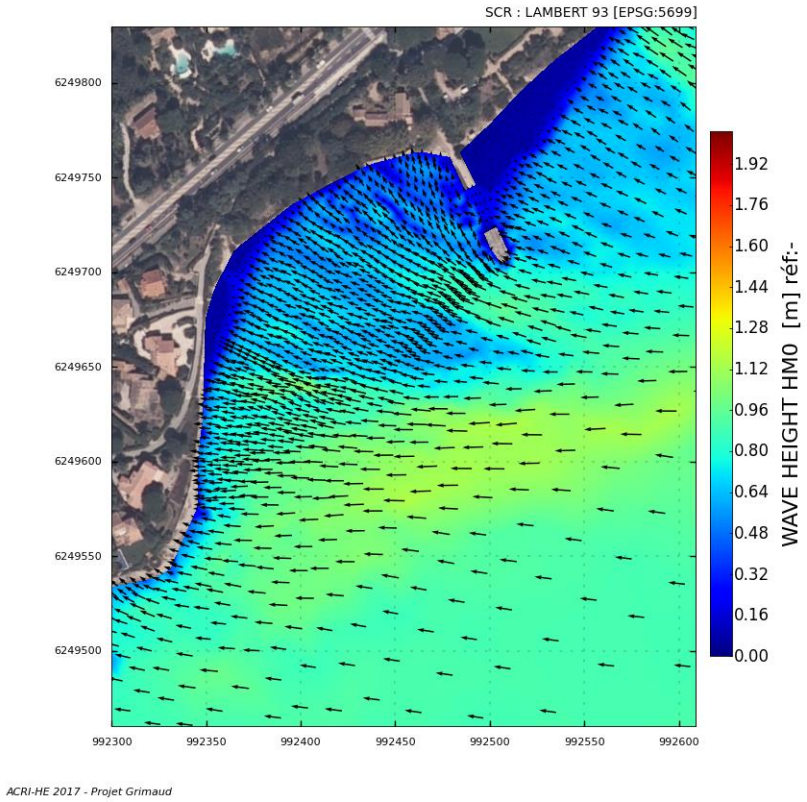
du Vieux Moulin ; ces forçages sont trop faibles pour induire des évolutions significatives des fonds marins.

© 2018 ACRI-IN

5.3 Scénario 1 : ouverture épi Est

5.3.1 CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N

5.3.1.1 Plan de vagues

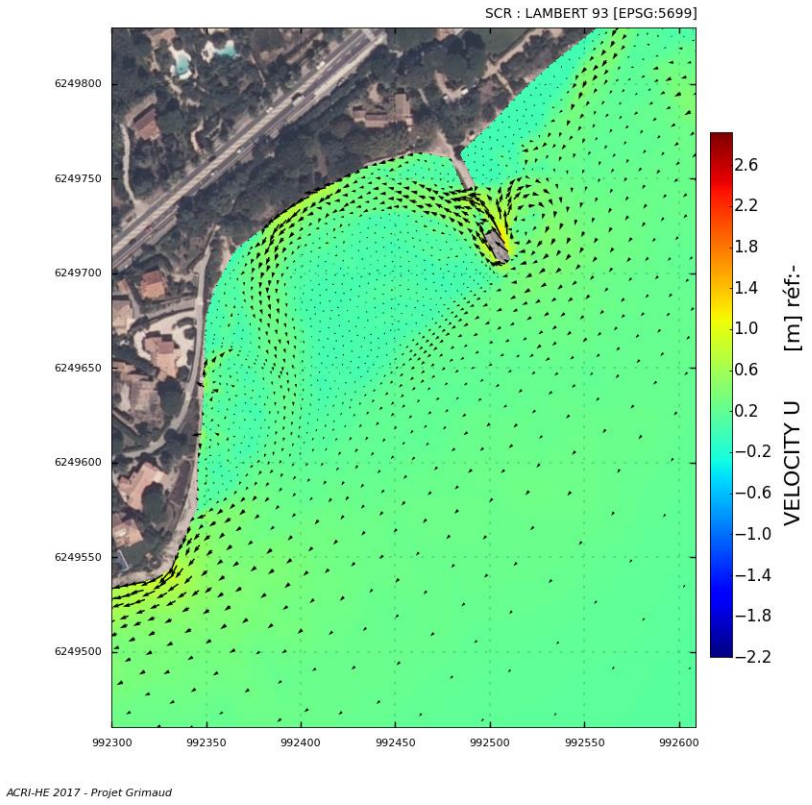


Plan de vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°)

L'ouverture d'une brèche dans l'épi n'a pas d'effet sur la propagation des vagues.

© 2018 ACRI-IN

5.3.1.2 Courants induits par les vagues



Courants induits par les vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°)

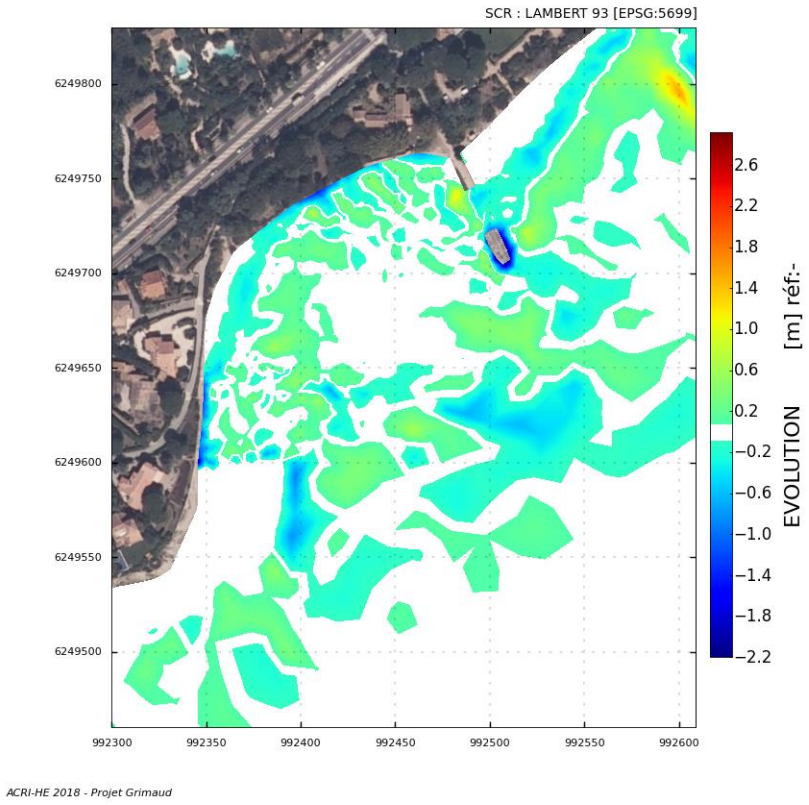
L'ouverture de la brèche dans l'épi Est a pour effet de :

- réduire l'intensité du vortex qui se développe à l'est de l'épi,
- déplacer vers l'ouest la veine de la dérive littorale qui longe l'épi, induisant une zone de calme au niveau du pied de l'épi.

Cet aménagement n'a pas d'effet en cas de tempête annuelle de secteur N75 sur la circulation générale.

© 2018 ACRI-IN

5.3.1.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=2.8m, direction=75°)

L'ouverture de la brèche permet un échange sédimentaire entre les deux compartiments délimités par l'épi.

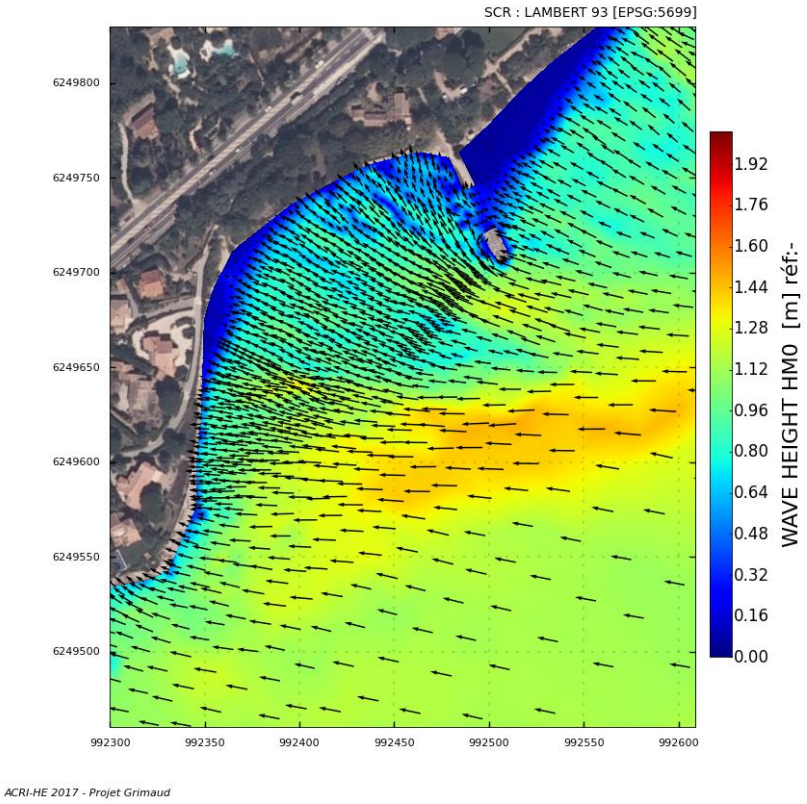
L'incidence de l'aménagement est locale.

On note un dépôt à l'ouest de l'épi, ainsi qu'une réduction de l'érosion au niveau du pied de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

5.3.2 CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N

5.3.2.1 Plan de vagues

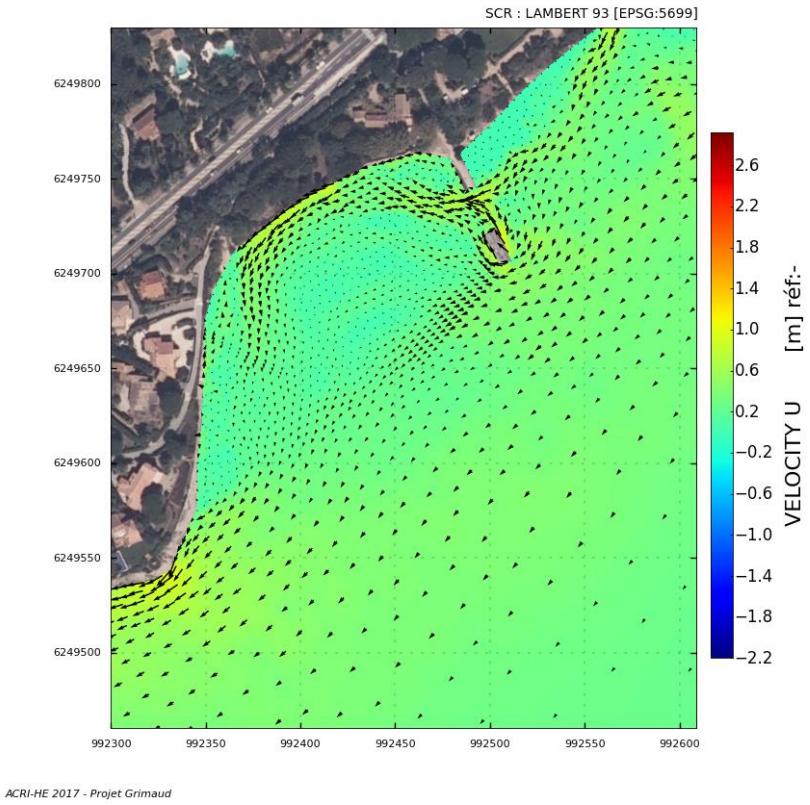


Plan de vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=75°)

L'ouverture d'une brèche dans l'épi n'a pas d'effet sur la propagation des vagues.

© 2018 ACRI-IN

5.3.2.2 Courants induits par les vagues



Courants induits par les vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=75°)

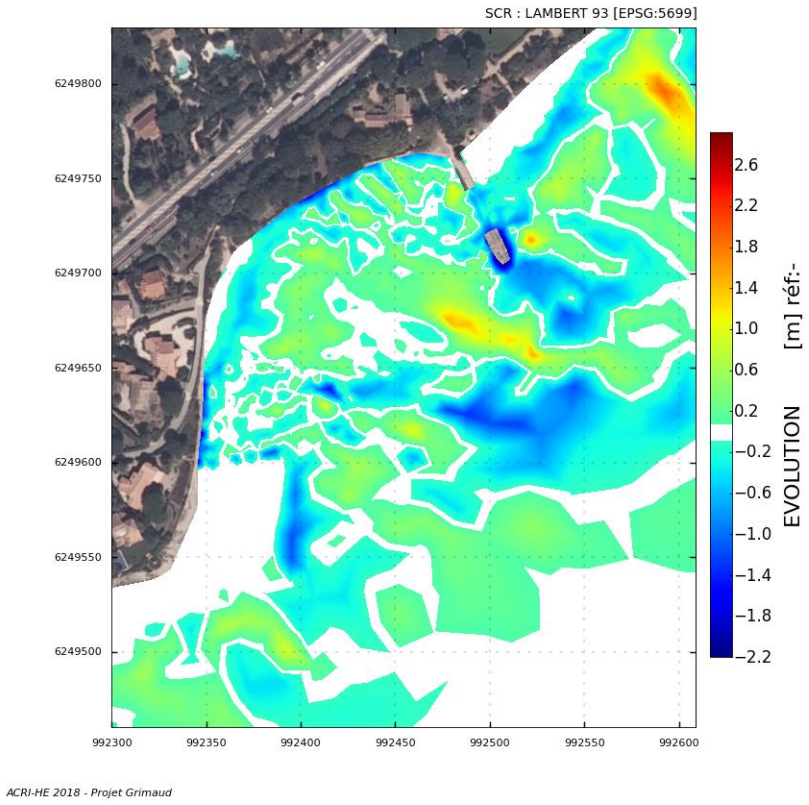
L'ouverture de la brèche dans l'épi a pour effet de :

- réduire l'intensité du vortex qui se développe à l'est de l'épi,
- déplacer vers l'ouest la veine de la dérive littorale qui longe l'épi, induisant une zone de calme au niveau du pied de l'épi.

Cet aménagement n'a pas d'effet en cas de tempête annuelle de secteur N75 sur la circulation générale.

© 2018 ACRI-IN

5.3.2.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=3.7m, direction=75°)

L'ouverture de la brèche permet un échange sédimentaire entre les deux compartiments délimités par l'épi.

L'incidence de l'aménagement est locale.

On note un dépôt à l'ouest de l'épi, ainsi qu'une réduction de l'érosion au niveau du pied de l'épi.

Dans l'ensemble pour ces conditions de mer, l'effet de l'ouverture de la brèche est faible par rapport aux érosions induites et la brèche ne permet pas de maintenir le haut de plage.

© 2018 ACRI-IN

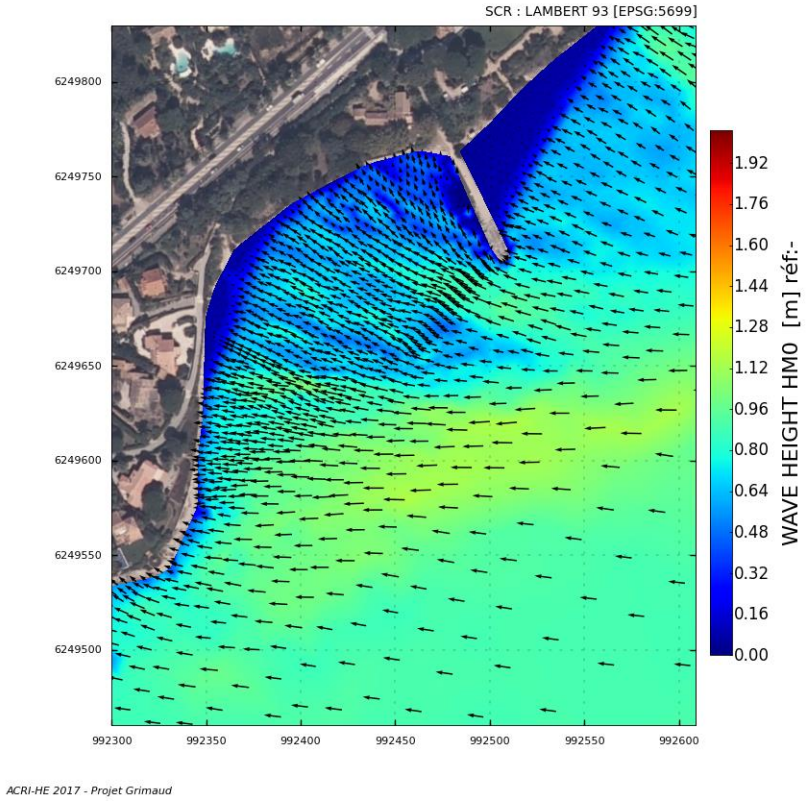
5.4 Scénario 2 : ouvrage submergé

Pour rappel, 2 configurations ont été modélisées pour l'étude d'un ouvrage immergé :

- En variante V1, la cote de la crête de l'ouvrage est fixée à 1,5 m sous le niveau de la mer.
- En variante V2, la cote de la crête de l'ouvrage est fixée à 0,3 m sous le niveau de la mer.

5.4.1 CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N

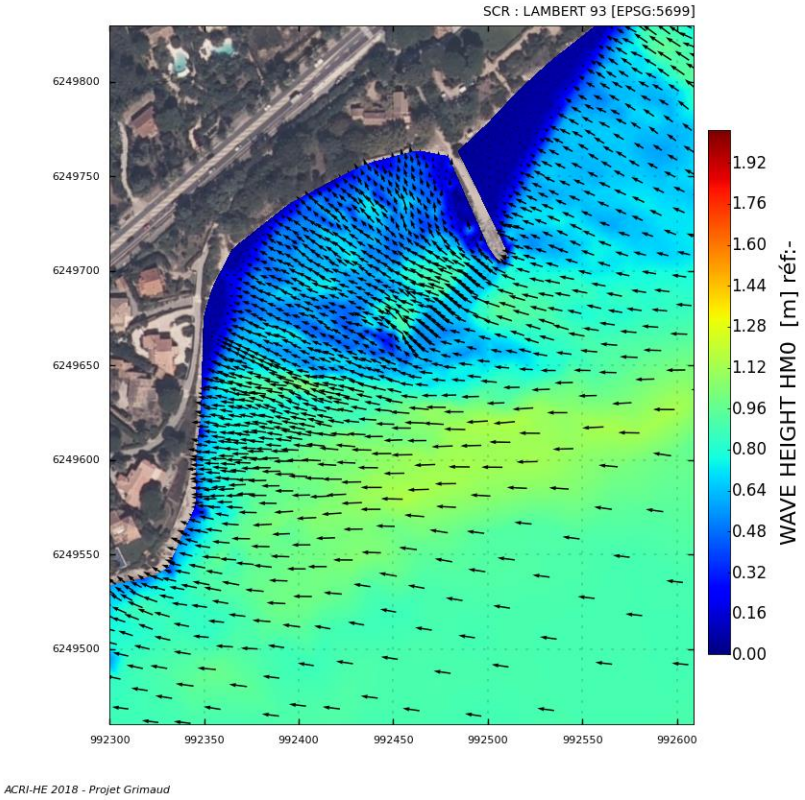
5.4.1.1 Plan de vagues



Plan de vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – V1

Le plan de vagues dans le cas d'un aménagement submergé dans le prolongement de l'épi existant, n'induit qu'une modification localisée des hauteurs de vagues. L'efficacité d'un tel ouvrage n'est perceptible que lorsque les vagues peuvent ressentir la présence de l'ouvrage. En l'occurrence, les conditions annuelles sont trop faibles pour qu'une augmentation des fonds de l'ordre de 2 m réduise les niveaux de vagues.

© 2018 ACRI-IN

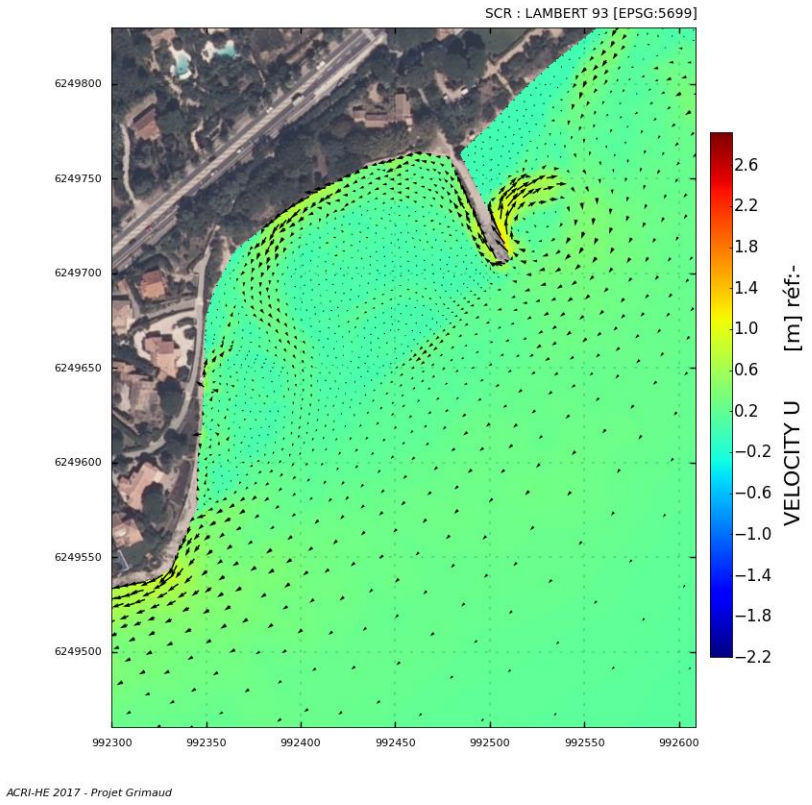


Plan de vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – V2

La présence d'une structure immergée à une cote de 0,3 m permet de réduire significativement les hauteurs de vagues, de l'ordre de 0,5 m dans le cas des conditions annuelles.

© 2018 ACRI-IN

5.4.1.2 Courants induits par les vagues

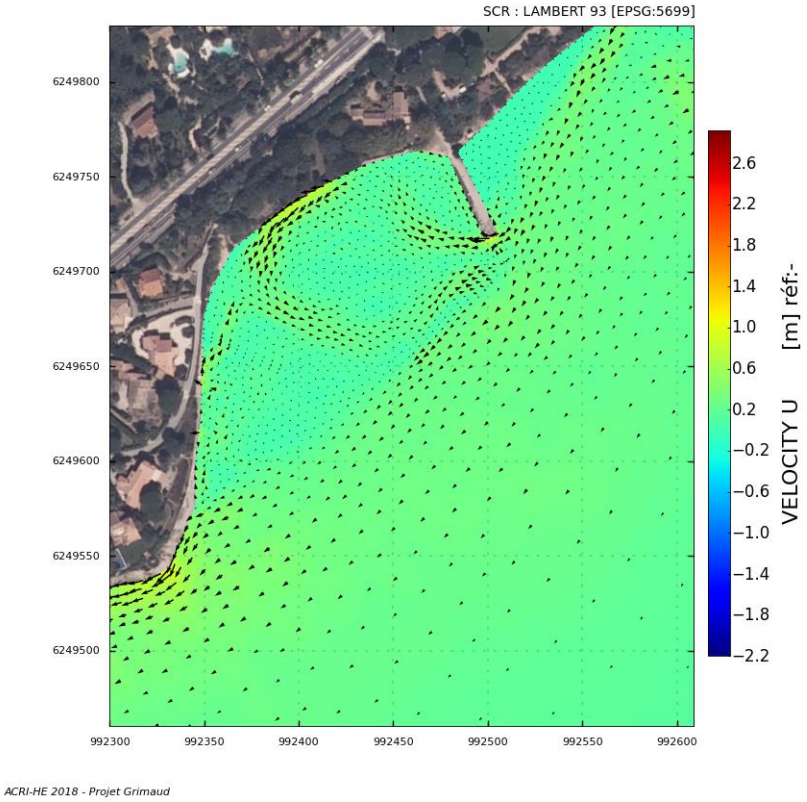


Courants induits par les vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°)

La présence de l'ouvrage induit une légère augmentation des courants au niveau de la face côté large de l'ouvrage. Ces courants induits par les vagues sont orientés dans le sens général de la dérive littorale.

La présence de l'ouvrage immergé permet également de réduire légèrement les courants au niveau du pied de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

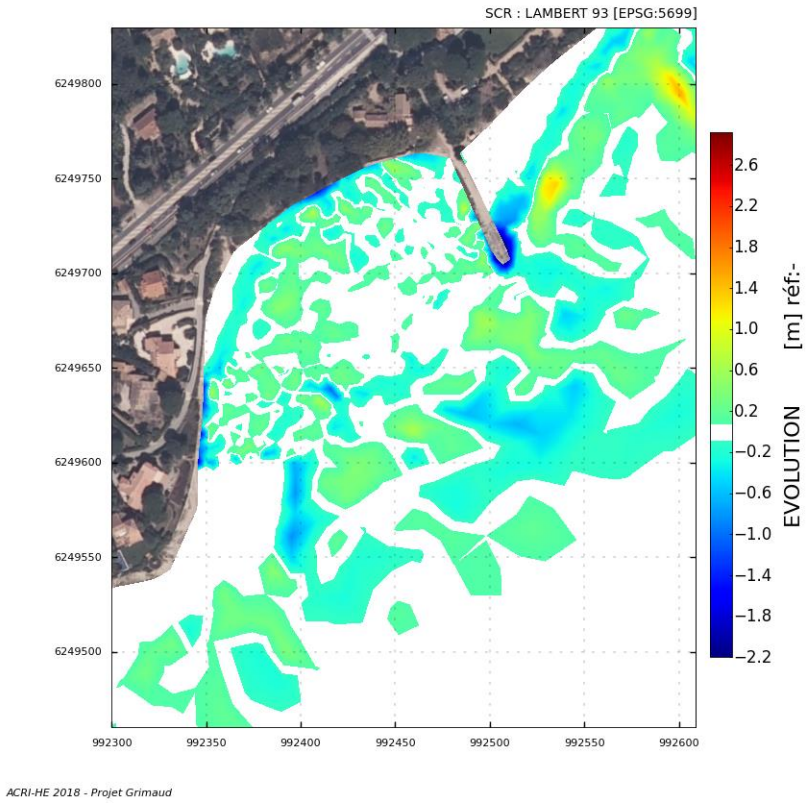


Courants induits par les vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – V3

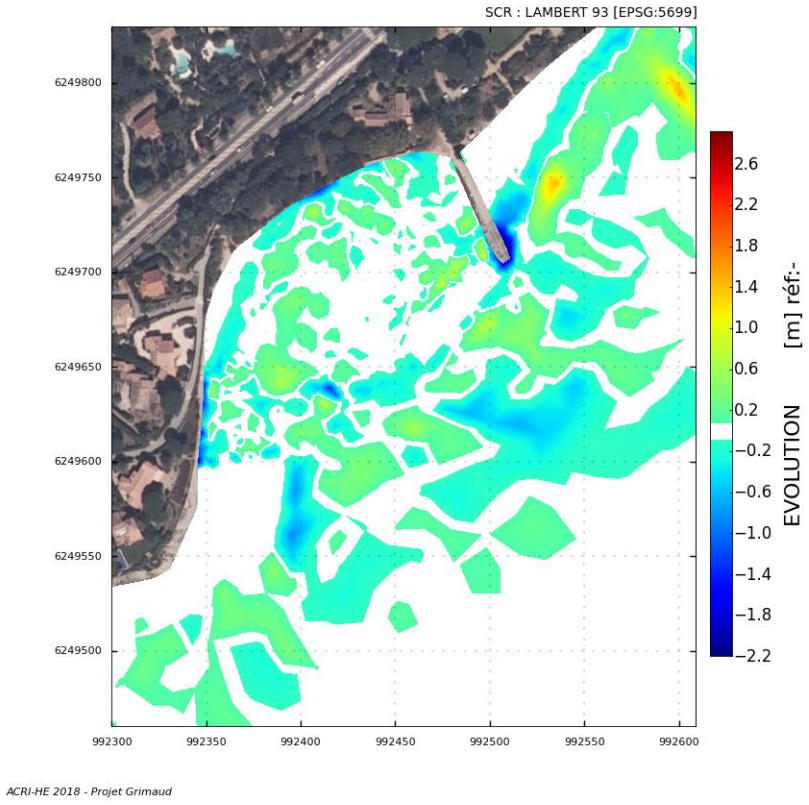
Les courants obtenus pour une vague annuelle de secteur N75 sont estimées ci-dessus. On observe la création d'une veine de courant entre l'épi et la structure immergée. Pour comparaison, cette veine de courant n'était pas observée dans le cas de l'épi à l'état initial. Elle est générée par effet venturi, favorisé par le rétrécissement entre la structure submergée et l'épi réduit.

© 2018 ACRI-IN

5.4.1.3 Incidence sur les dépôts et érosions

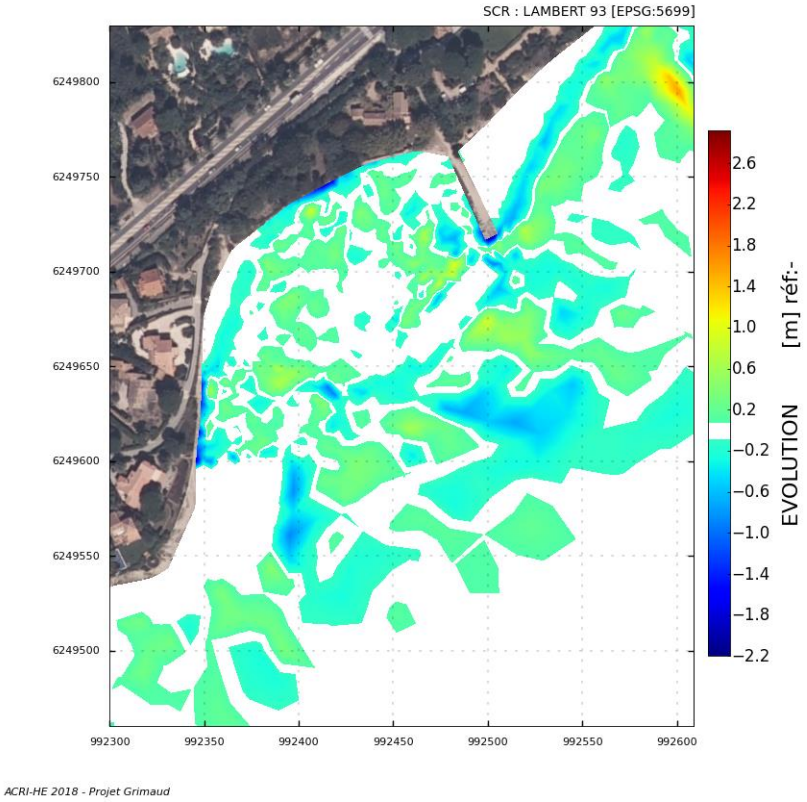


Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – V1



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – V2

© 2018 ACRI-IN



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – V3

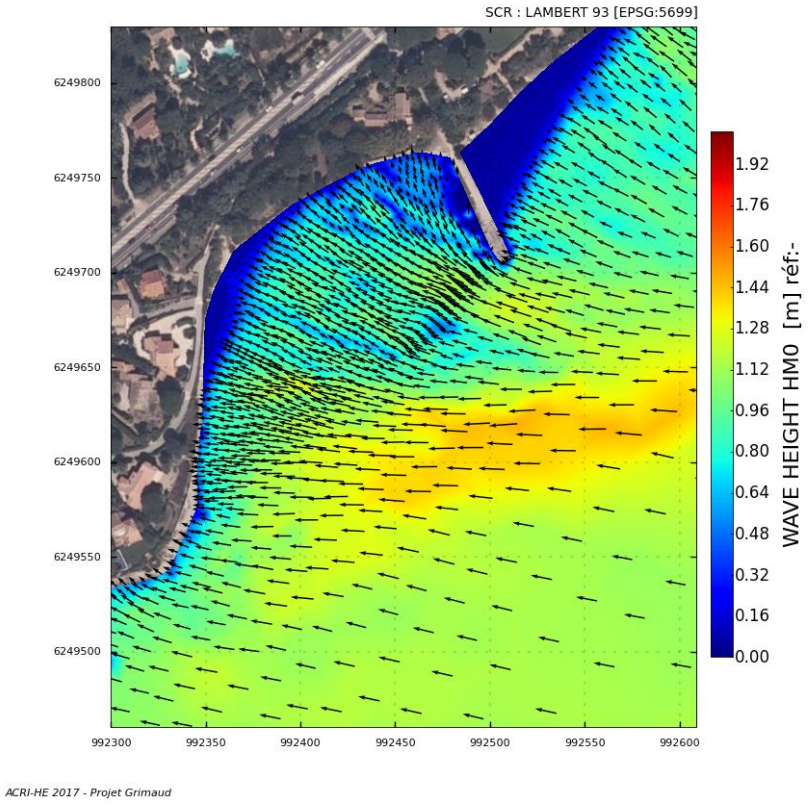
La présence de l'ouvrage submergé modifie peu la dynamique sédimentaire générale. On note uniquement des dépôts plus importants côté large de l'ouvrage et une très légère diminution de l'érosion au niveau du pied de l'épi.

En revanche, raccourcir l'épi Est a pour effet d'induire localement une érosion entre les deux ouvrages.

© 2018 ACRI-IN

5.4.2 CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N

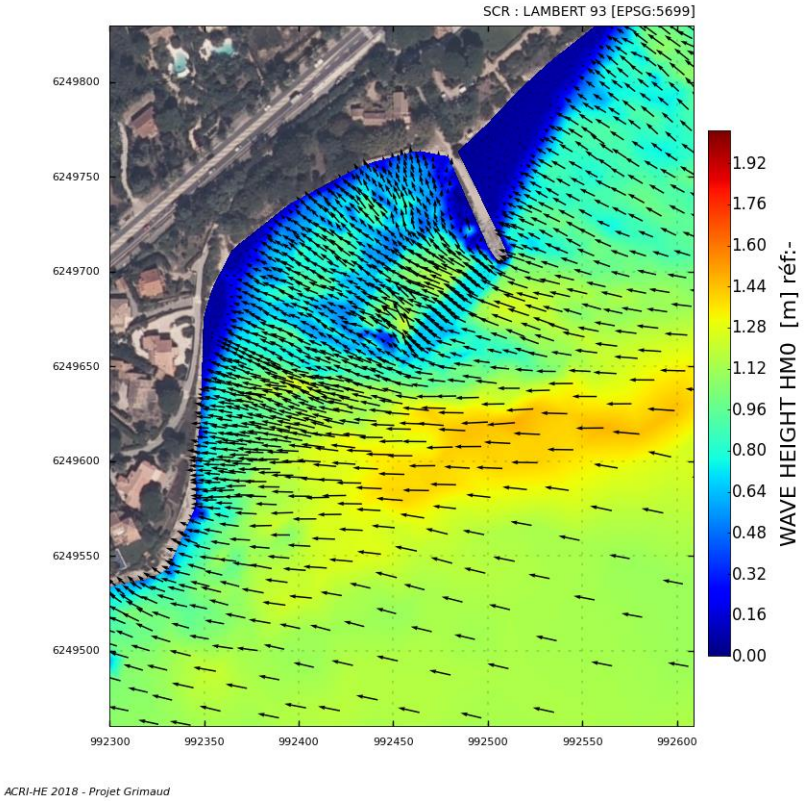
5.4.2.1 Plan de vagues



Plan de vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=75°) – V1

Le plan de vagues dans le cas d'un aménagement submergé dans le prolongement de l'épi existant, n'induit qu'une modification localisée des hauteurs de vagues. L'efficacité d'un tel ouvrage n'est perceptible que lorsque les vagues peuvent ressentir la présence de l'ouvrage. Une augmentation des fonds de l'ordre de 2 m est trop faible pour réduire le niveau de vagues décennales.

© 2018 ACRI-IN

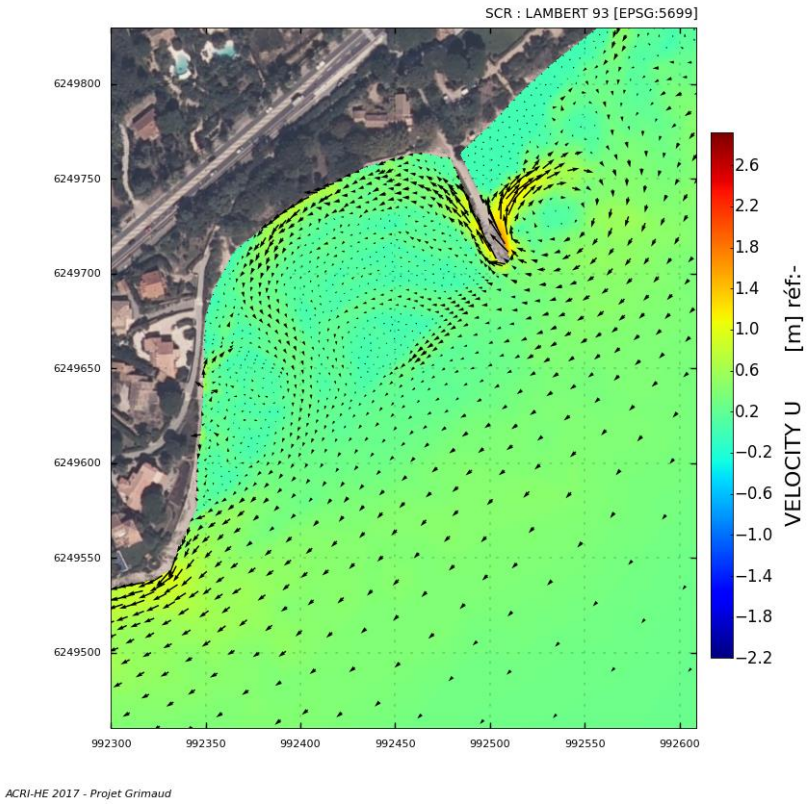


Plan de vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=75°) - V2

La présence d'une structure immergée à une cote de 0,3 m permet de réduire significativement les hauteurs de vagues, de l'ordre de 0,7 m dans le cas des conditions décennales.

© 2018 ACRI-IN

5.4.2.2 Courants induits par les vagues



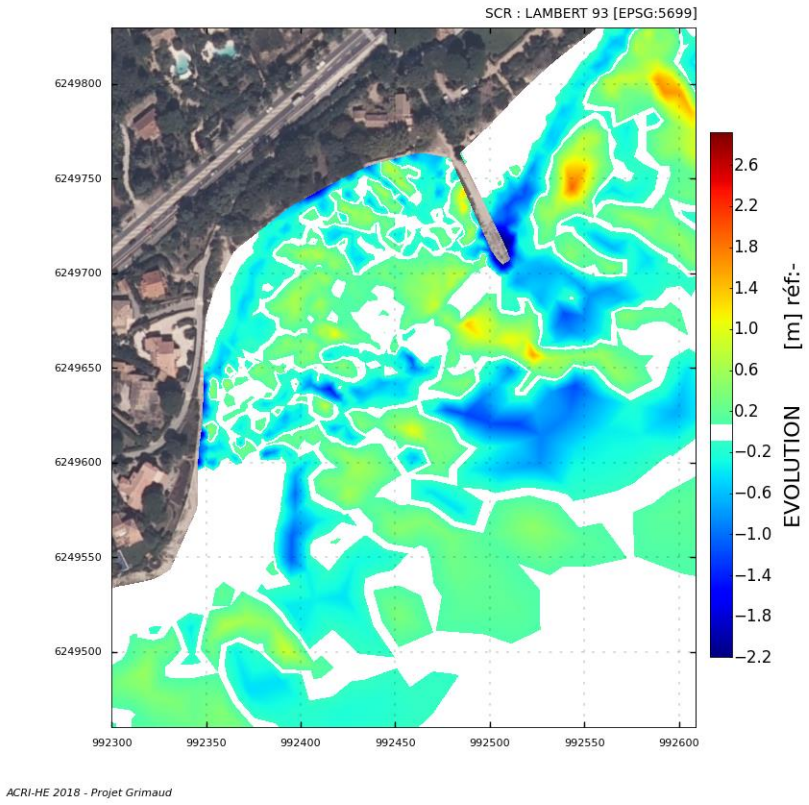
Courants induits par les vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=75°)

La présence de l'ouvrage induit une augmentation des courants au niveau de la face côté large de l'ouvrage. Ces courants induits par les vagues sont orientés dans le sens général de la dérive littorale.

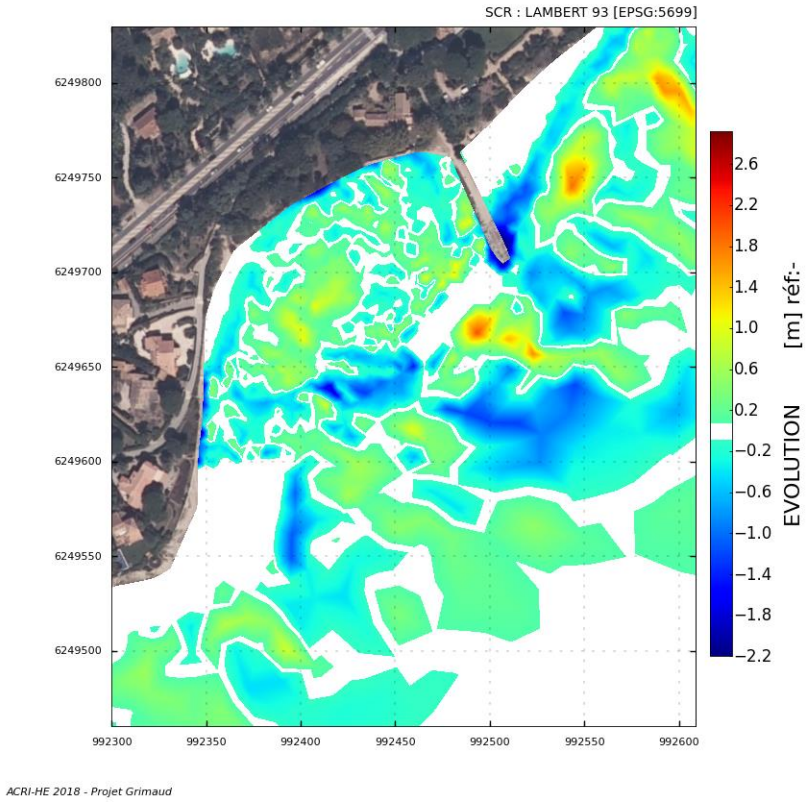
La présence de l'ouvrage immergé permet également de réduire légèrement les courants au niveau du pied de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

5.4.2.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=3.7m, direction=75°) –V1



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=3.7m, direction=75°) – V2

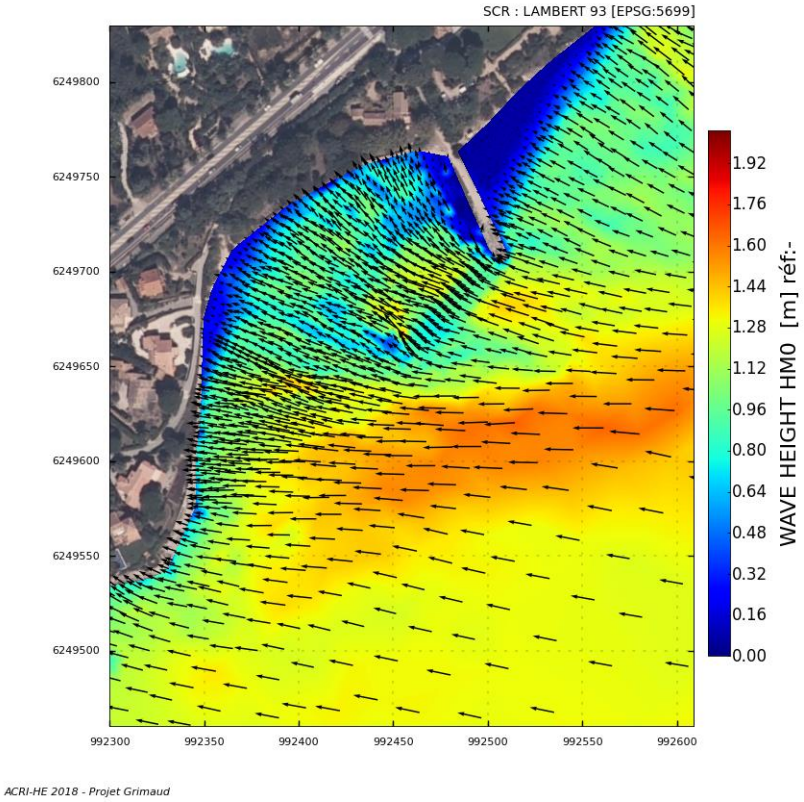
© 2018 ACRI-IN

La présence de l'ouvrage submergé modifie peu la dynamique sédimentaire générale. On note des dépôts plus importants côté large de l'ouvrage et une très légère diminution de l'érosion au niveau du pied de l'épi.

Une augmentation du niveau de la crête permet un dépôt plus important entre l'ouvrage et la plage.

5.4.3 CAS 7 – Période de retour 50 ans – Direction 75°N

5.4.3.1 Plan de vagues

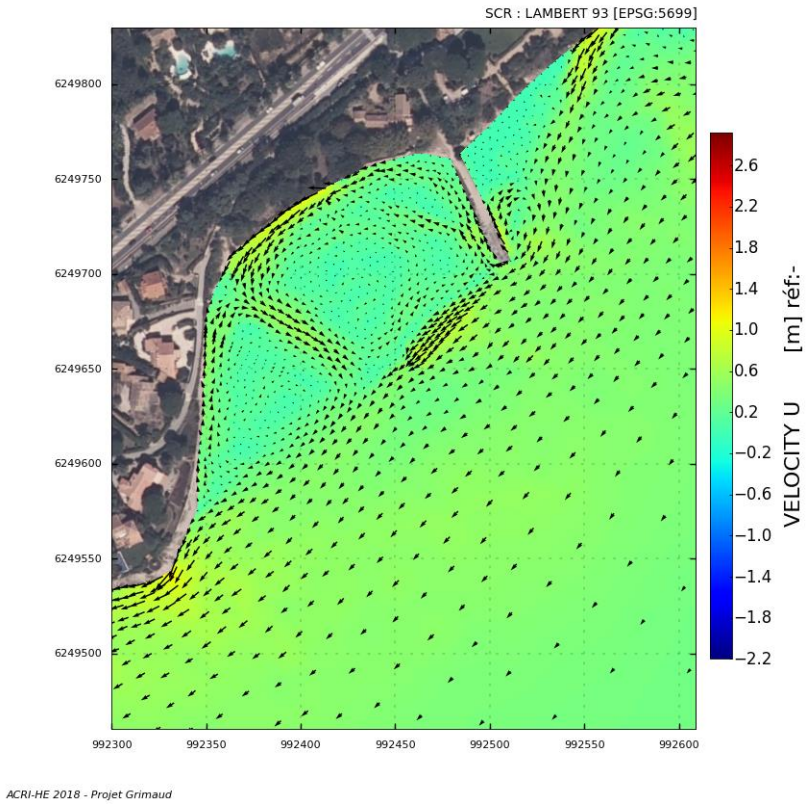


Plan de vagues (Au large : Hs=4.4m, direction=75°) - V2

La présence d'une structure immergée à une cote de 0,3 m permet de réduire significativement les hauteurs de vagues, de l'ordre de 0,4 m dans le cas des conditions cinquantennales.

© 2018 ACRI-IN

5.4.3.2 Courants induits par les vagues



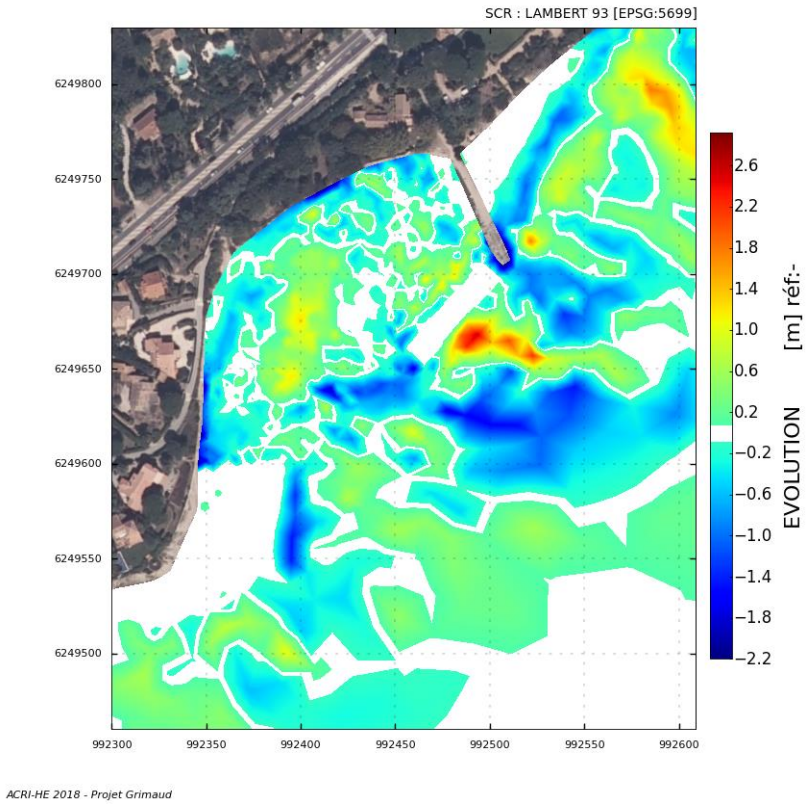
Courants induits par les vagues (Au large : Hs=4.4m, direction=75°) – V2

La présence de l'ouvrage induit une augmentation des courants au niveau de la face côté large de l'ouvrage. Ces courants induits par les vagues sont orientés dans le sens général de la dérive littorale.

La présence de l'ouvrage immergé permet également de réduire légèrement les courants au niveau du pied de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

5.4.3.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=4.4m, direction=75°) –V2

La présence de l'ouvrage submergé modifie peu la dynamique sédimentaire générale.

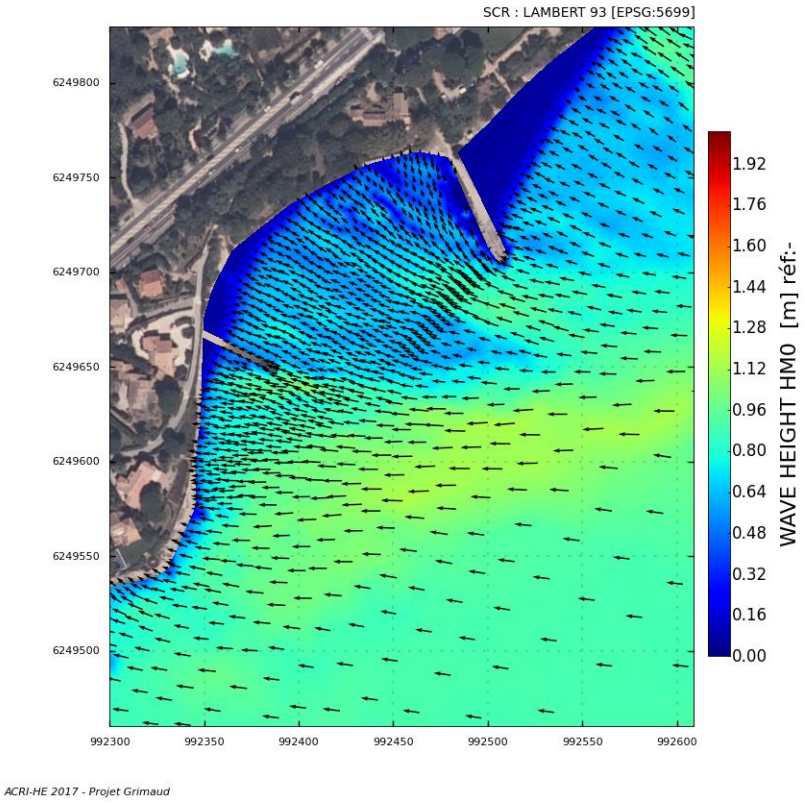
On note des dépôts plus importants côté large de l'ouvrage et une très légère diminution de l'érosion au niveau du pied de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

5.5 Scénario 3 : épi Ouest

5.5.1 CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N

5.5.1.1 Plan de vagues

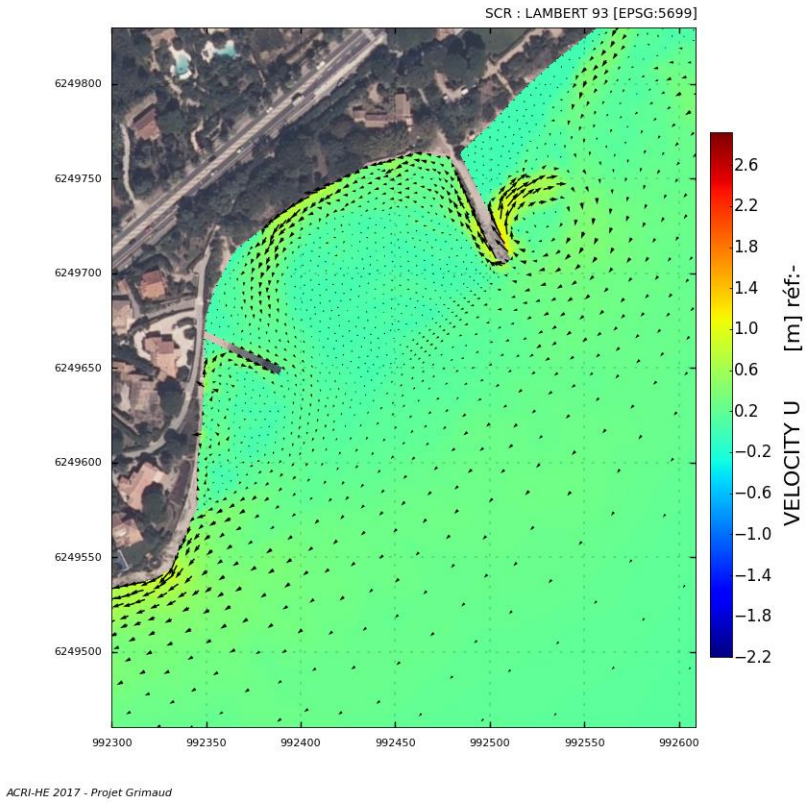


Plan de vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°)

La construction d'un épi à l'ouest de la plage ne modifie pas la dynamique des vagues par rapport à l'état initial.

© 2018 ACRI-IN

5.5.1.2 Courants induits par les vagues

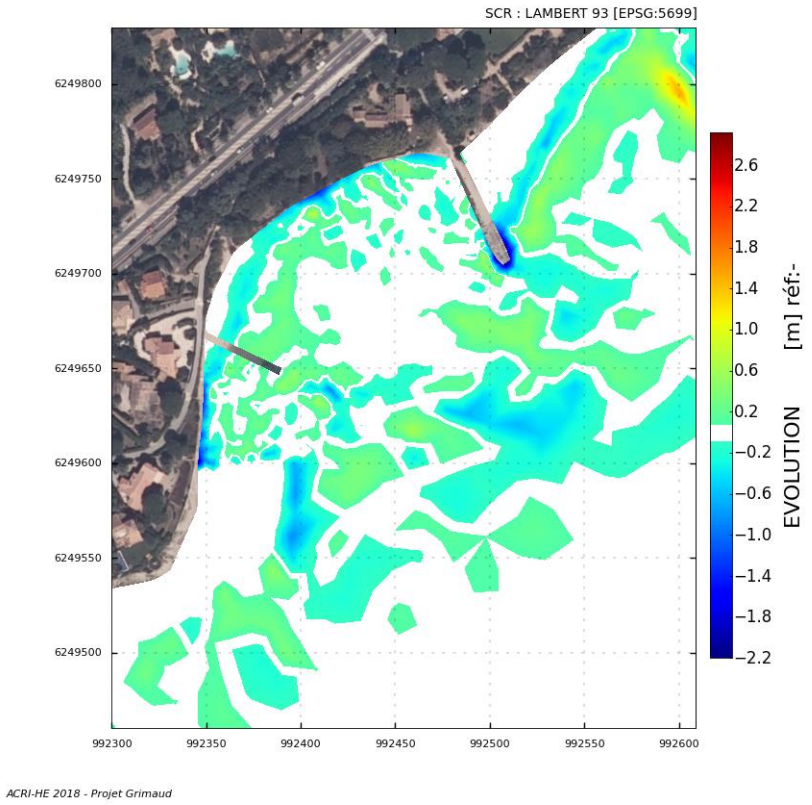


Courants induits par les vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°)

Ce nouvel épi n'a qu'un effet local sur la dynamique. On note une inversion de direction de la dérive littorale au sud du nouvel épi et une intensification de la dérive au nord de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

5.5.1.3 Incidence sur les dépôts et érosions



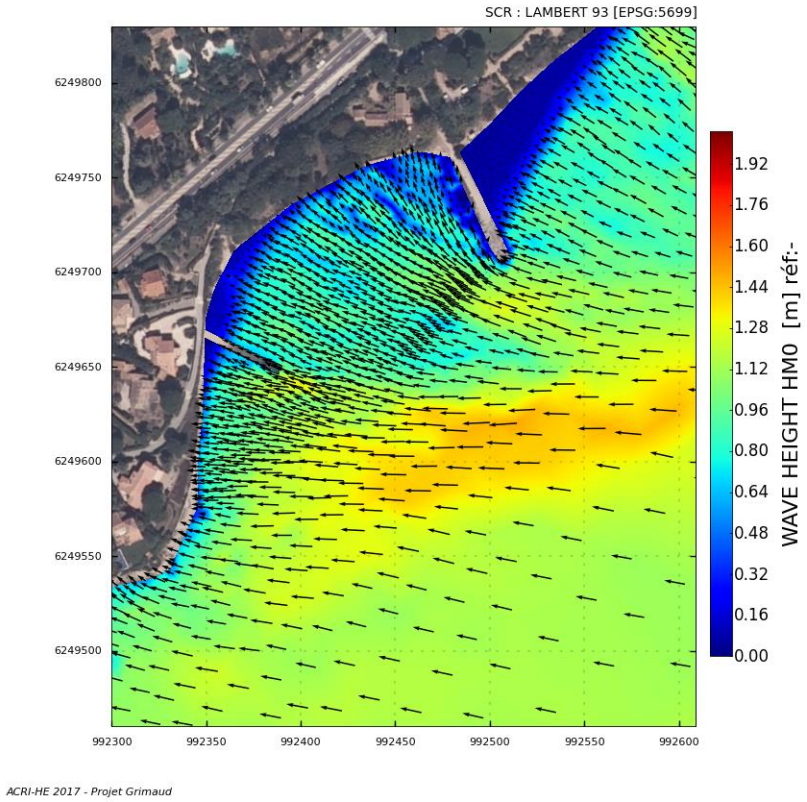
Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=2.8m, direction=75°)

Suivant les résultats de modélisation, la présence de l'épi n'a qu'un faible effet sur la dynamique sédimentaire. Les évolutions bathymétriques ne sont pas affectées par la présence de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

5.5.2 CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N

5.5.2.1 Plan de vagues

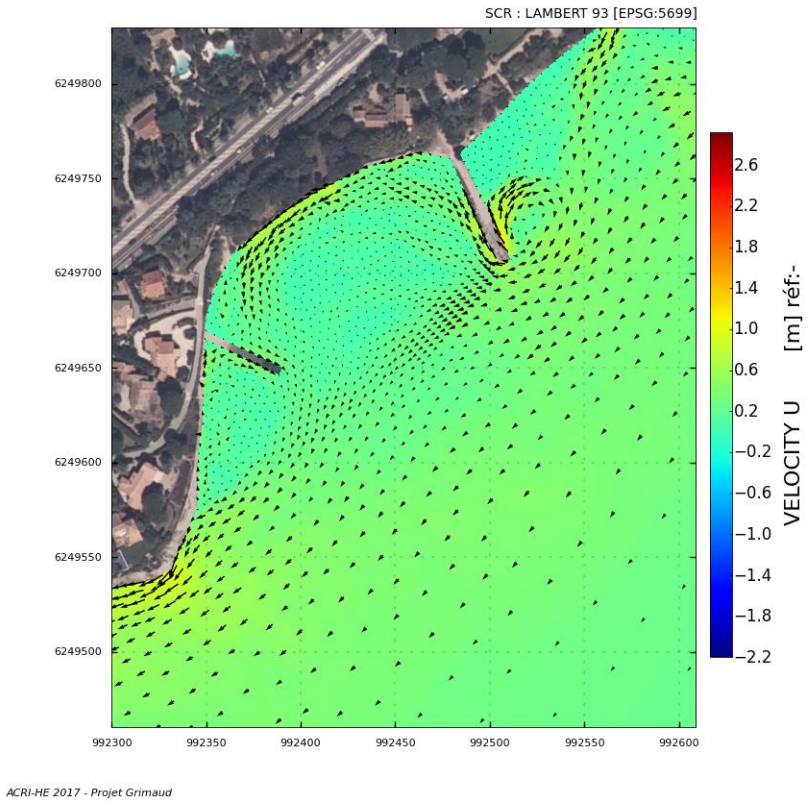


Plan de vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=75°)

La construction d'un épi à l'ouest de la plage ne modifie pas la dynamique des vagues par rapport à l'état initial.

© 2018 ACRI-IN

5.5.2.2 Courants induits par les vagues

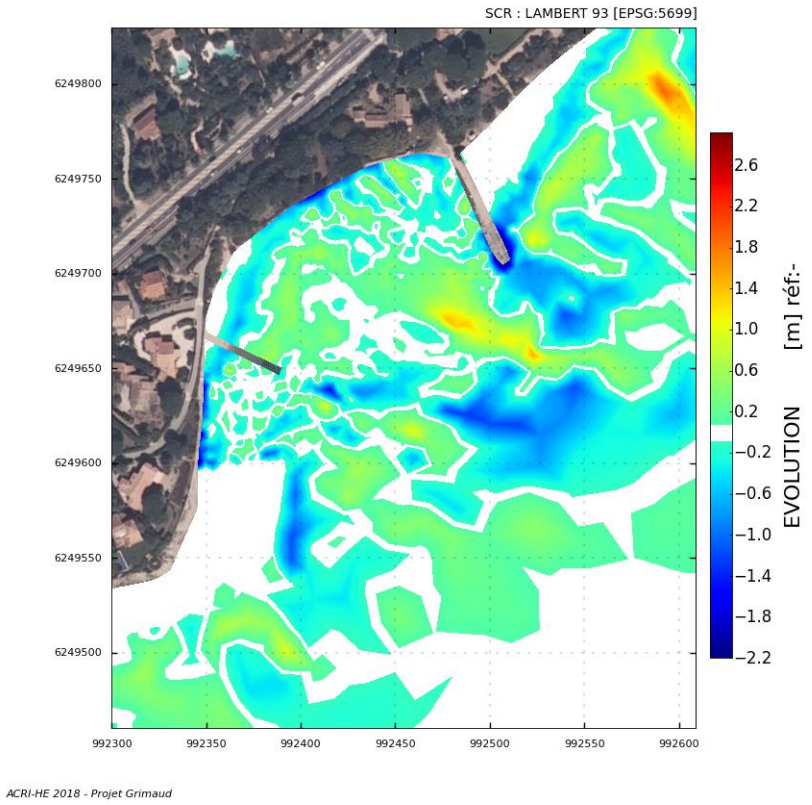


Courants induits par les vagues (Au large : Hs=3.7m, direction=75°)

Ce nouvel épi n'a qu'un effet local sur la dynamique. On note une inversion de direction de la dérive littorale au sud du nouvel épi et une intensification de la dérive au nord de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

5.5.2.3 Incidence sur les dépôts et érosions



Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=3.7m, direction=75°)

Suivant les résultats de modélisation, la présence de l'épi n'a qu'un faible effet sur la dynamique sédimentaire. Les évolutions bathymétriques ne sont pas affectées par la présence de l'épi.

© 2018 ACRI-IN

5.6 Synthèse

Trois solutions d'aménagements ont été testées sur modèle numérique hydro sédimentaire tenant compte des évolutions bathymétriques afin d'évaluer leur incidence sur la stabilité de la partie marine de la plage du Vieux Moulin sur la commune de Grimaud :

- L'ouverture d'une brèche dans l'épi Est,
- La mise en place d'un ouvrage submergé pour lequel deux profondeurs de cote de crête sont testées,
- La construction d'un nouvel épi à l'ouest de l'anse.

Les simulations ont été testées pour des conditions de vagues annuelles et des conditions de tempêtes décennales.

En conditions annuelles, on note que l'ouverture de brèche dans l'épi et la mise en place d'un ouvrage submergé permettent de réduire l'érosion dans la partie est de la plage du Vieux Moulin à proximité du pied de l'épi existant. Cette zone est, suivant les analyses de la position du trait de côte historique, celle qui est soumise à l'érosion la plus forte.

En conditions de tempêtes décennales, les ouvrages ne parviennent pas à endiguer le phénomène d'érosion du haut de plage. On note toutefois que les effets de l'ouvrage submergé sont plus significatifs que ceux induits par les autres solutions. En particulier, cet ouvrage permet de maintenir un plus grand stock de sédiments dans la partie est de la plage du Vieux Moulin.

Une synthèse quantitative des bilans sédimentaires estimés dans la zone littorale représentée sur la figure ci-après. Cette zone représente environ 0,5 ha. Elle est représentative des évolutions de la plage.

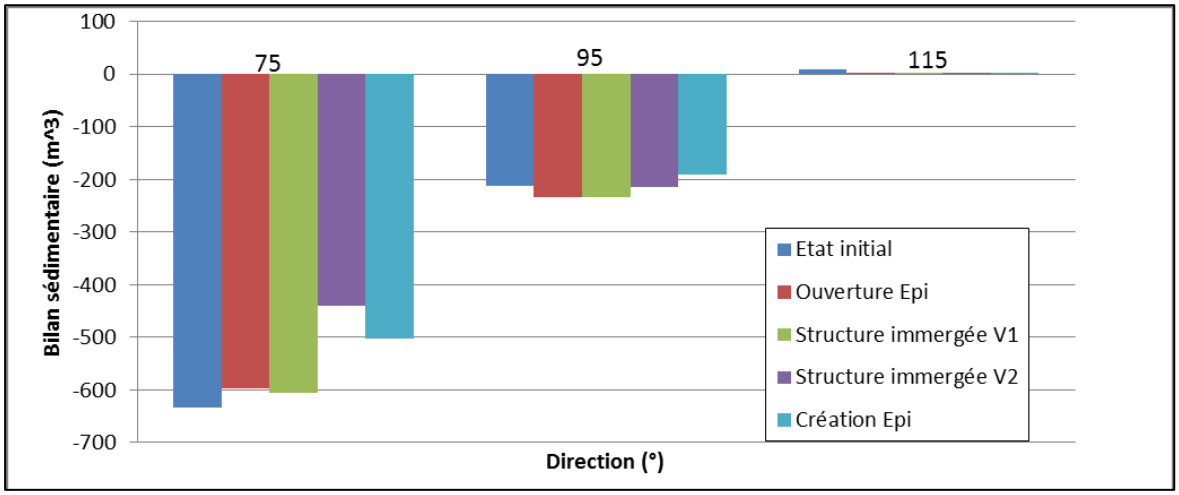
Zone de calcul des bilans sédimentaires

© 2018 ACRI-IN

La figure ci-après présente les bilans sédimentaires calculés pour les différents scénarios et pour des conditions de vagues annuelles. Cette comparaison permet de mettre en évidence :

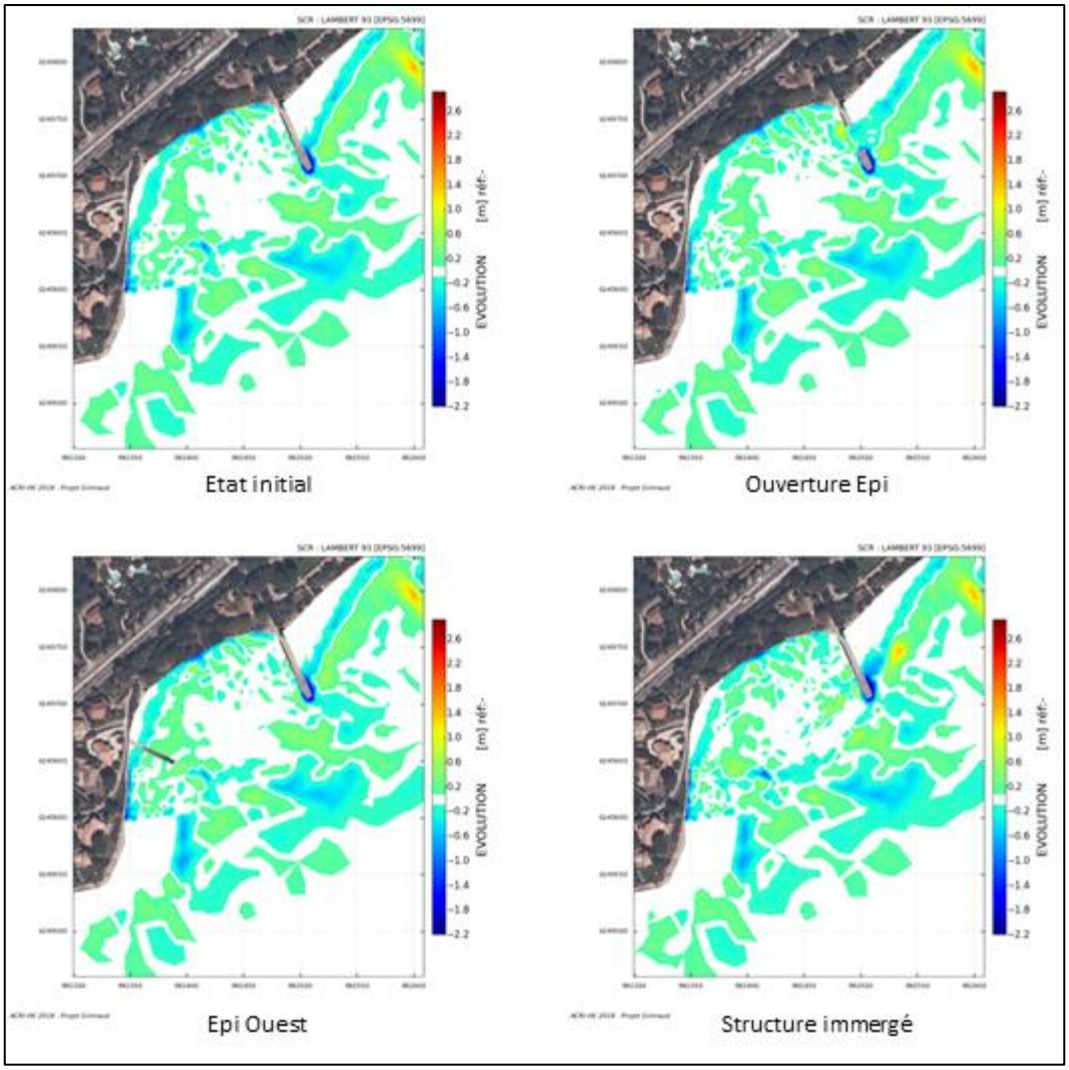
- Les évolutions les plus marquées sont observées pour des conditions de vagues provenant du secteur 75°N ;
- La zone littorale est soumise à une érosion pour des conditions annuelles avec des vagues provenant du secteur 75°N et 95°N. Pour des vagues provenant du secteur 115°N, la zone est en stable, les érosions étant compensées par les apports extérieurs ;
- L'ouverture de l'épi n'a pas d'effet sur l'équilibre de la plage en cas de tempête annuelle ;
- La création d'un épi à l'ouest de l'anse engendre un déséquilibre qui a pour conséquence une augmentation significative du processus érosif en cas de tempête annuelle ;
- La mise en plage d'un ouvrage submergé n'a pas d'effet sur l'équilibre de la plage en cas de tempête annuelle.

En cas de tempête décennale, la quantité de sédiments exportée hors de la zone littorale accroît par rapport aux conditions annuelles. Le scénario permettant de réduire ces processus érosifs de l'anse du Vieux Moulin serait la mise en œuvre d'un ouvrage submergé à la côte. L'effet de l'ouvrage submergé est particulièrement significatif dans le cas d'une tempête décennale de secteur 75°N (figure ci-après).



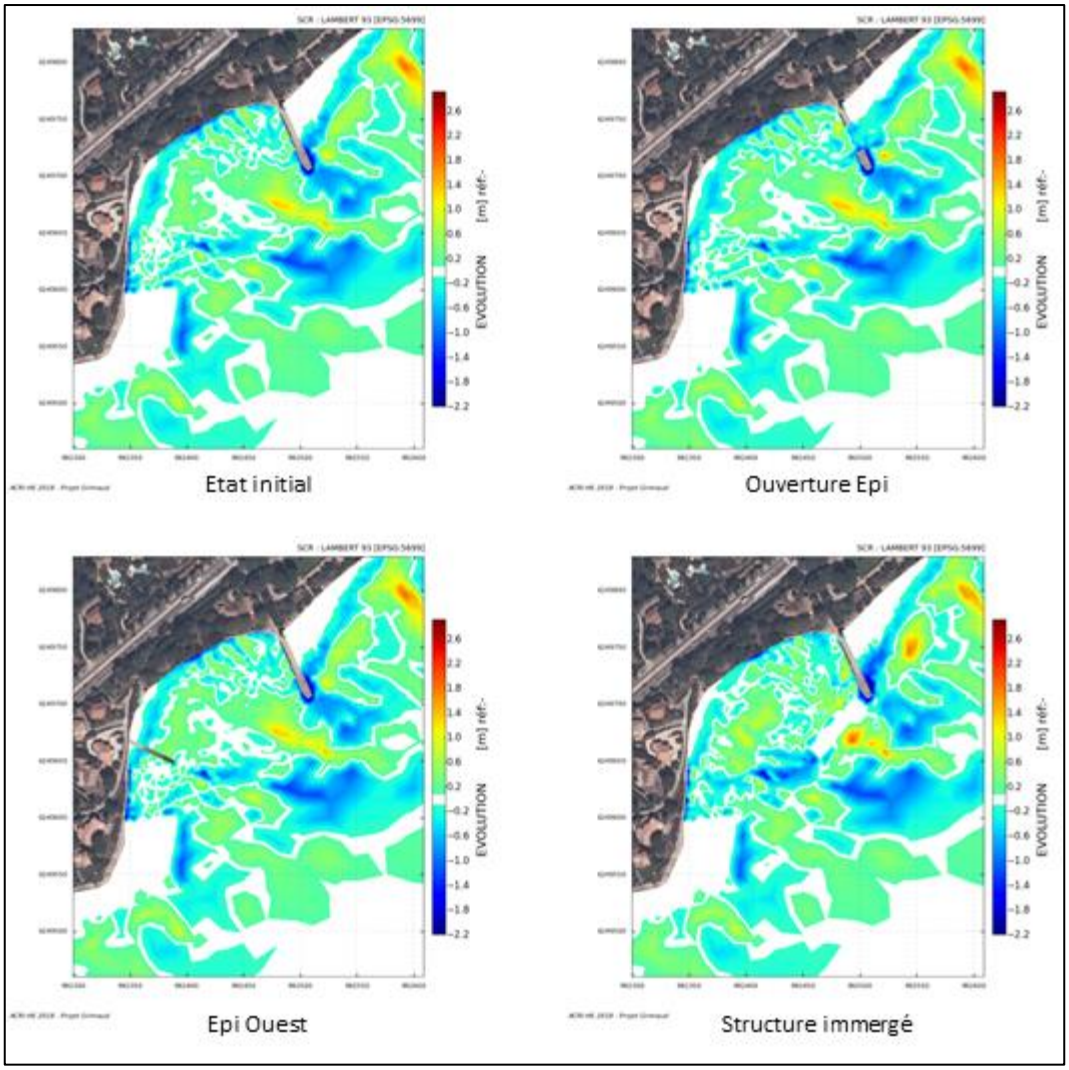
Bilan sédimentaire calculés pour des conditions de vagues décennales

© 2018 ACRI-IN



Comparatif entre solutions d'aménagements et état initial (conditions annuelles)

© 2018 ACRI-IN



Comparatif entre solutions d'aménagements et état initial (conditions décennales)

© 2018 ACRI-IN

5.7 Changement climatique

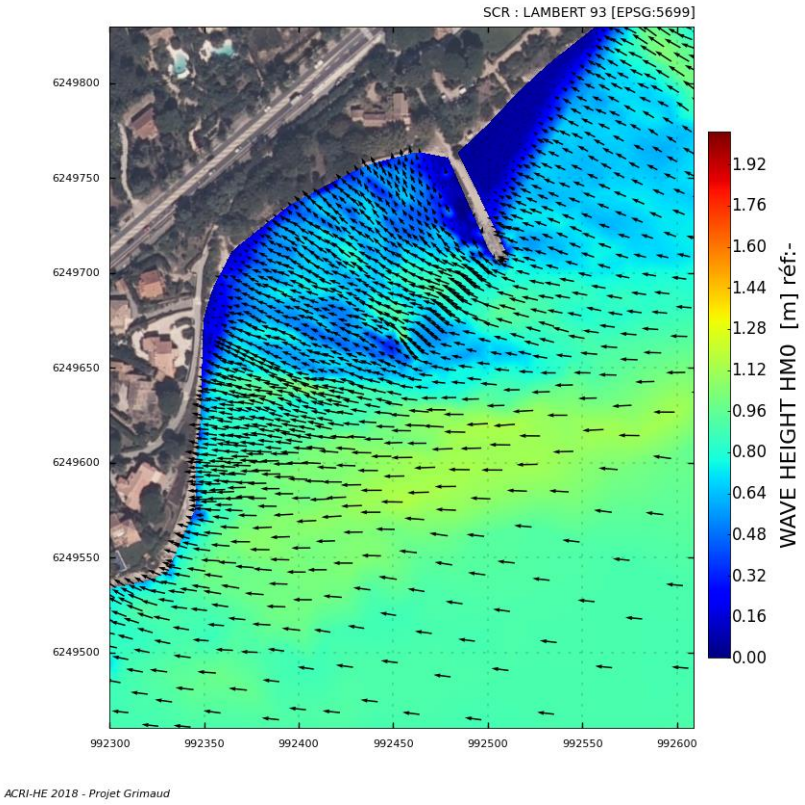
Le niveau général des mers devrait évoluer significativement dans les prochaines décennies selon les conclusions des travaux du GIEC : Des modifications du niveau de la mer sont attendues en raison du réchauffement climatique (avec de nombreuses variations régionales).

Aux valeurs de surcotes définies précédemment, il faut rajouter la hausse probable du niveau de la mer due au réchauffement climatique, même si les valeurs moyennes de la hausse comme ses variations régionales restent soumises à une grande incertitude. En faisant référence aux études du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (G.I.E.C.) pour un scénario défavorable d'évolution, la surélévation du niveau de la mer pourrait être de 40 cm dans les 100 prochaines années.

Les modélisations ont été réalisées pour le scénario 2-V2 avec une prise en compte d'une surélévation du niveau des mers de 0,4 m.

5.7.1 CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N

5.7.1.1 Plan de vagues

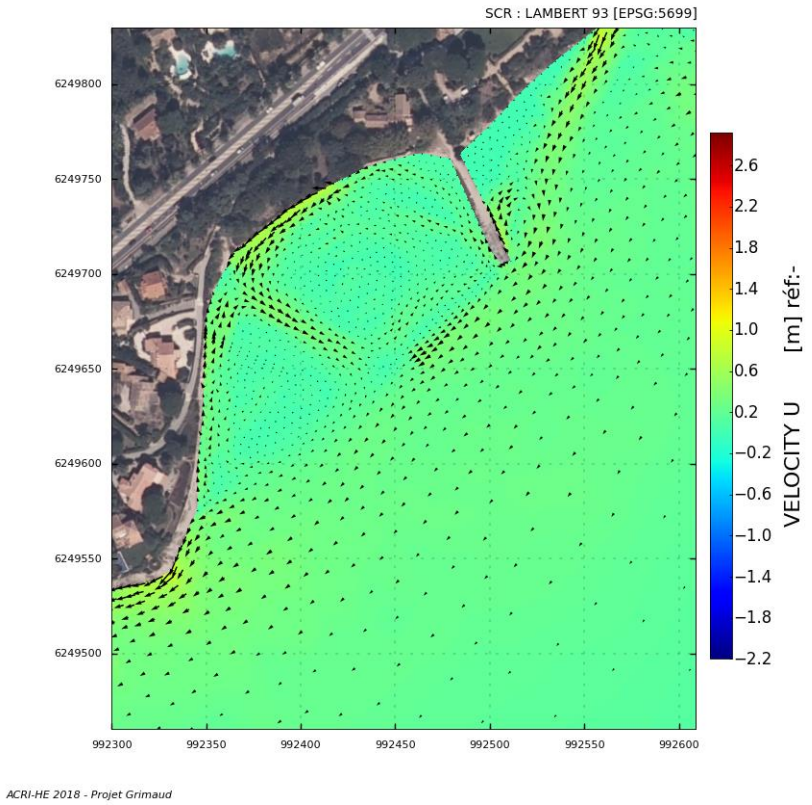


Plan de vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – Scénario 2-V2 avec changement climatique

Malgré la surcote de +0,4 m retenue et liée à une augmentation du niveau des eaux, la présence de l'ouvrage entraine une diminution des hauteurs de vagues d'environ 0,2 m par rapport à l'état actuel (sans surcote). L'aménagement proposé, en tenant compte d'une surélévation du niveau des mers, permettra aussi de protéger la plage du Vieux Moulin.

© 2018 ACRI-IN

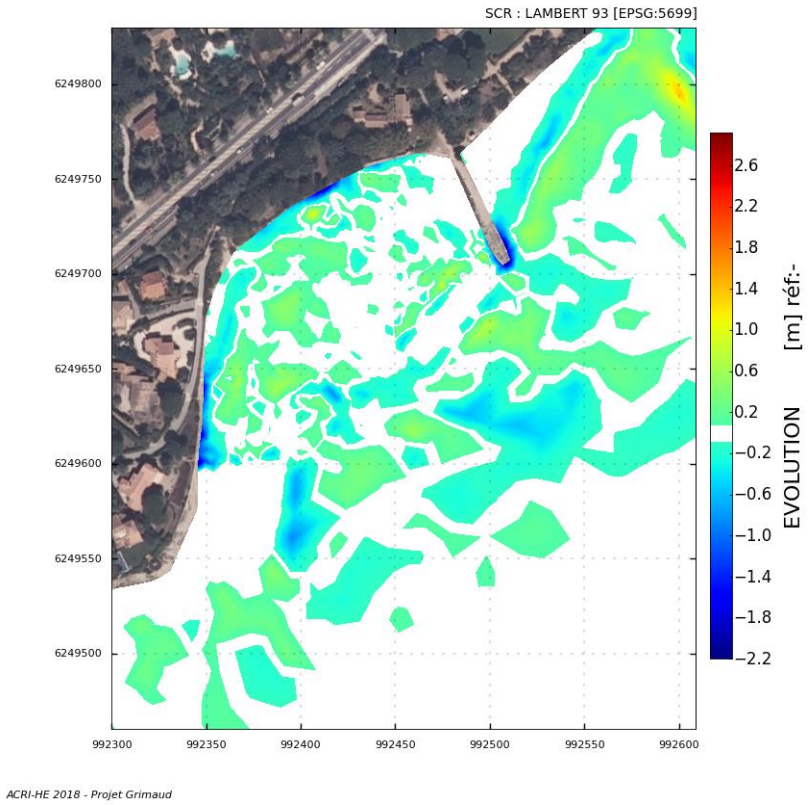
5.7.1.2 Courants induits par les vagues



Courants induits par les vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – Scénario 2-V2 avec changement climatique

© 2018 ACRI-IN

5.7.1.3 Evolutions bathymétriques

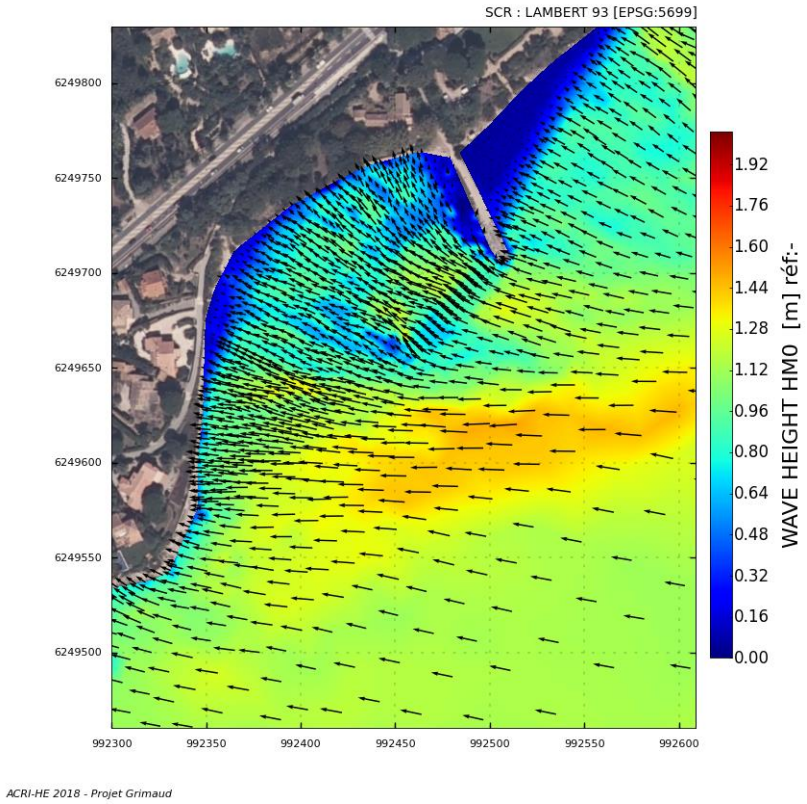


Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – Scénario 2-V2 avec changement climatique

© 2018 ACRI-IN

5.7.2 CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N

5.7.2.1 Plan de vagues

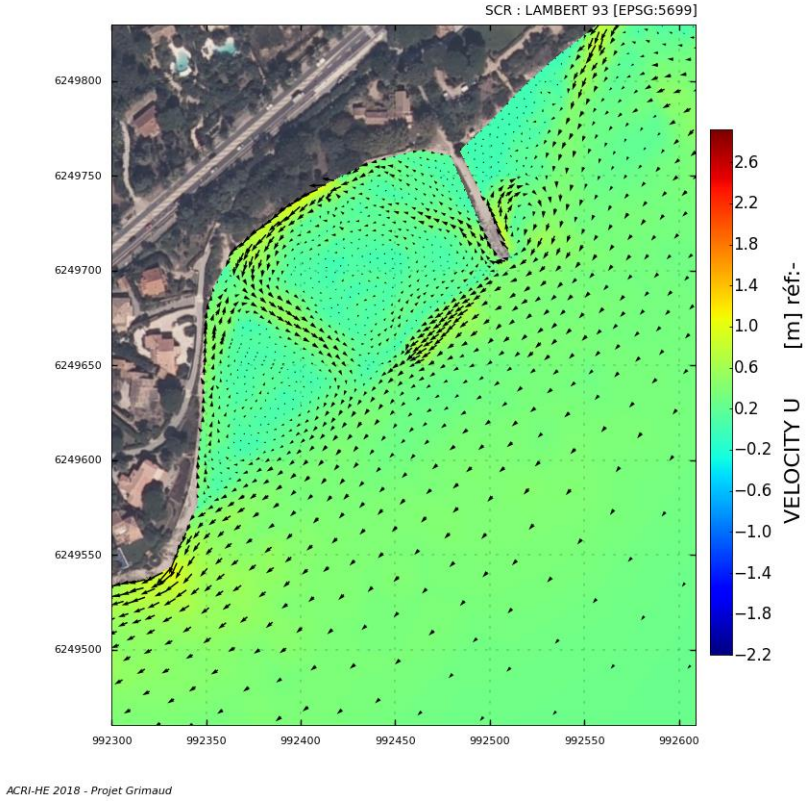


Plan de vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – V2 avec changement climatique

Malgré la surcote de +0,4 m retenue et liée à une augmentation du niveau des eaux, la présence de l'ouvrage entraine une diminution des hauteurs de vagues d'environ 0,2 m par rapport à l'état actuel (sans surcote). L'aménagement proposé, en tenant compte d'une surélévation du niveau des mers, permettra aussi de protéger la plage du Vieux Moulin.

© 2018 ACRI-IN

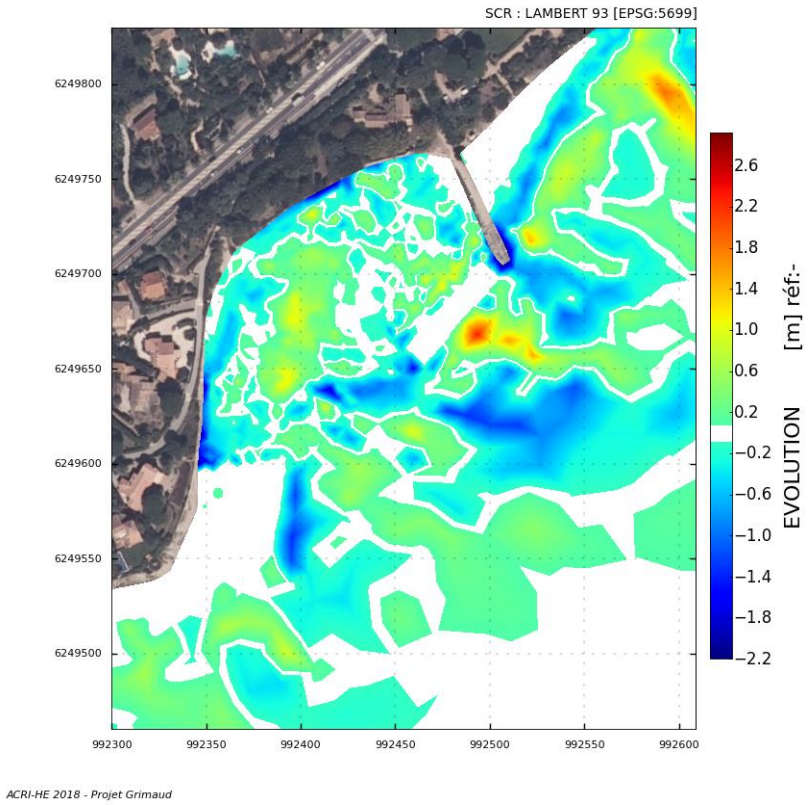
5.7.2.2 Courants induits par les vagues



Courants induits par les vagues (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – Scénario 2-V2 avec changement climatique

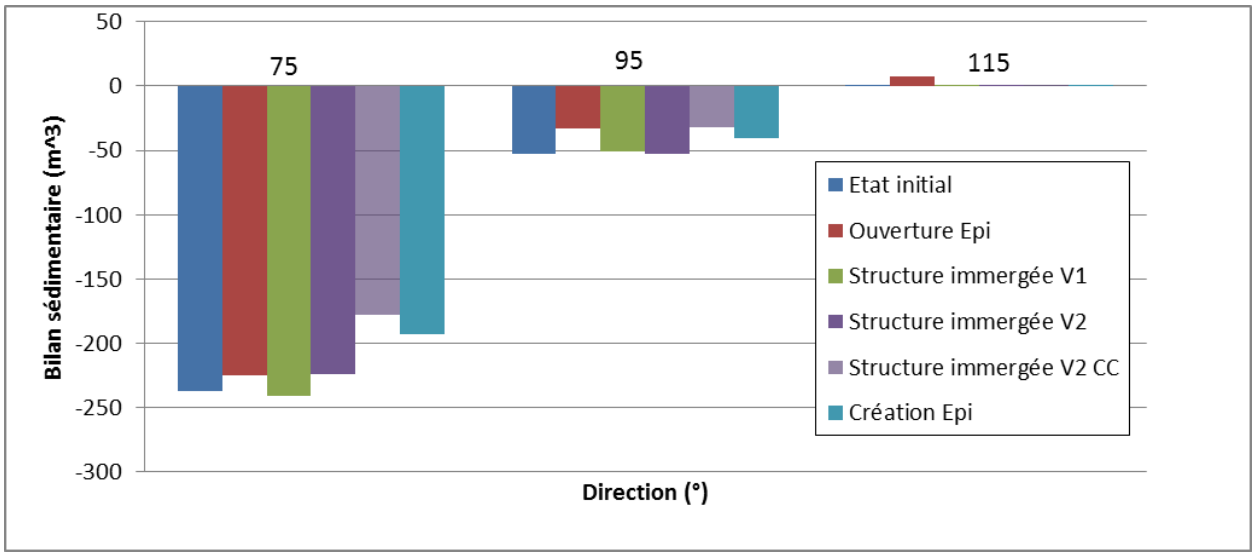
© 2018 ACRI-IN

5.7.2.3 Evolutions bathymétriques



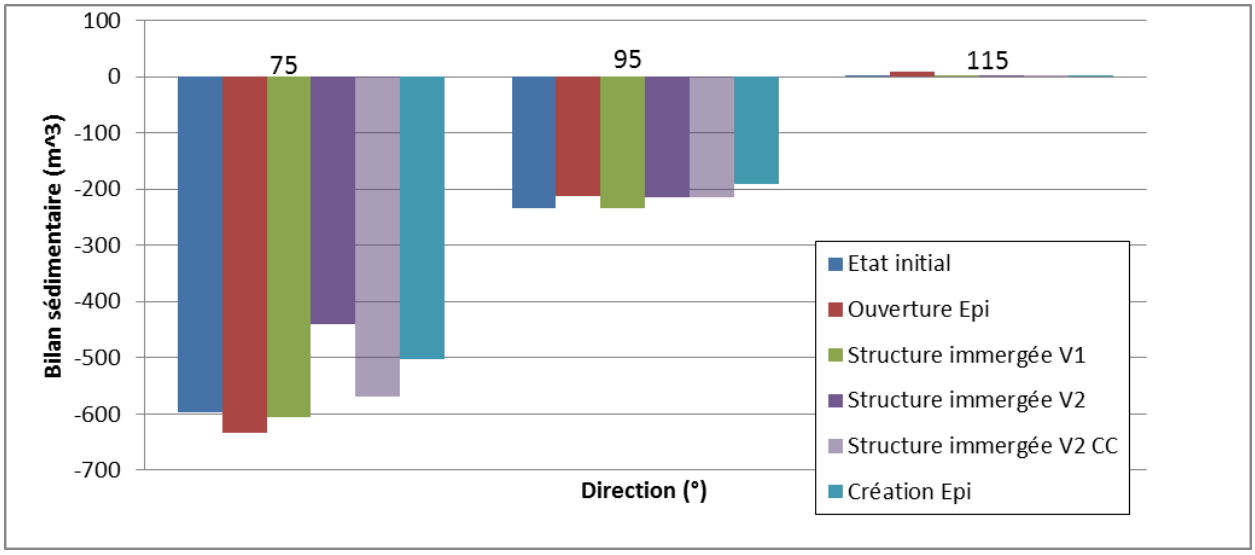
Evolutions bathymétriques (Au large : Hs=2.8m, direction=75°) – Scénario 2-V2 avec changement climatique

5.7.3 Bilan sédimentaire



Bilan sédimentaire calculés pour des conditions de vagues annuelles

© 2018 ACRI-IN



Bilan sédimentaire calculés pour des conditions de vagues décennales

La mise en œuvre d'un ouvrage submergé à -0,3 m par rapport au 0 m CM permet de réduire le processus érosif de la plage du Vieux Moulin quel que soit le niveau d'eau étudié.

© 2018 ACRI-IN

6 Conclusion

L'ouvrage permet de réduire, suivant les différentes conditions de tempêtes investiguées, les pertes de sédiments de la plage ainsi que des petits fonds. En d'autres termes, **l'état aménagé a un effet positif sur le maintien des sédiments dans l'anse, en cas de tempête.**

Les régimes de vagues pouvant induire une accrétion naturelle de la plage ainsi que les conditions de vent d'ouest pouvant lever une faible mer de vent, du fait de la longueur du fetch, ne sont pas ici considérées. On est donc en droit de se demander si l'ouvrage peut avoir un effet négatif sur l'accrétion naturelle de la plage lors de conditions vagues moins intenses que celles modélisées. Les mouvements dans le profil se font en pratique entre le haut de plage et la profondeur de fermeture. Cette dernière peut être considérée comme étant de l'ordre de 2 m, aux vues des conditions de mer au droit de l'anse. L'ouvrage est situé au-delà de cette limite, si bien que les mouvements dans le profil ne sont pas altérés par la présence de l'ouvrage, pour les vagues longues et de Hs faibles. Pour les vagues courtes d'ouest, la position de la structure, en aval du transit littoral, n'a pas d'incidence sur les apports sédimentaires.

© 2018 ACRI-IN

7 Proposition d'aménagement

7.1 Tubes en géotextile

Principe du tube en géotextile

Les structures artificielles immergées de type tube en géotextile sont des solutions dites « douces ». La houle est dissipée par déferlement au-dessus de l'ouvrage, ce qui permet une réduction de l'énergie des vagues atteignant le rivage.

Pour des considérations environnementales et esthétiques, ces solutions douces sont généralement à privilégier par rapport aux solutions dures. Les ouvrages sont constitués de tubes en géotextile remplis de sable. Ce type de structure est bien plus économique que des structures en enrochements. Il présente l'avantage d'être souple de mise en œuvre puisque les tubes en géotextile peuvent être remplis avec des matériaux issus du site et posés sur le fond à l'aide d'une barge à clapet ou rempli sur site à partir de matériaux de dragage ou issus d'un gisement de sable.

L'architecture peut facilement être adaptée à la zone subissant les assauts de la mer, permettant un déferlement efficace des vagues.

Durée de Vie

Les géotextiles et géo membranes sont fabriqués spécialement pour des applications en génie civil et en génie environnemental. Les performances sur le long terme des géotextiles ont été considérablement améliorées. Grâce à l'utilisation d'additifs dans leur composition, les éléments résistent à la détérioration due aux radiations UV. Des revêtements spéciaux permettent de lutter contre les dommages liés à l'abrasion. D'après les études concernant la durabilité des géotextiles, dans la majorité des cas montrant des problèmes de résistance au temps, l'origine du problème est liée au dimensionnement ou à la pose, et non au matériau en lui-même. (Oumeraci et Recio, 2009).

Les premières applications de géotextiles datent des années 60 en Hollande. Récemment, des géotextiles installés il y a trente ans ont fait l'objet d'analyses montrant leur bon état général. Des tests en laboratoire, reproduisant les situations réelles d'utilisation, indiquent des durées de vie pour les géotextiles d'au moins 100 ans, lorsqu'ils ne sont pas exposés aux radiations UV. (Pilarczyk, 2008).

Impact sur la Faune et la Flore

La spécificité des fibres impliquées dans la fabrication des structures en géotextile apporte une composante environnementale au projet en favorisant la fixation et le développement de la faune et de la flore sous-marine sur le récif lui-même.

Ce dernier peut alors devenir aussi une attraction touristique pour les activités de plongée et de pêche, tout en jouant un rôle de défense contre les tempêtes.

Ce type de démarche doit être de plus en plus proposé, afin de faire évoluer les techniques vers une meilleure intégration environnementale.

Illustration du développement de la flore et de la faune sur un ouvrage en géotextile

© 2018 ACRI-IN

Dans le cadre de la protection de la plage du Vieux Moulin à Grimaud, nous proposons la mise en œuvre de digues immergées en géotextile espacées et de Reef Ball™. En effet, les études sédimentologiques démontrent qu'il est nécessaire de mettre un ouvrage parallèle à la plage pour diminuer l'érosion de cette dernière surtout lors des tempêtes décennales ou la perte de sédiments serait réduite de 1/3.

L'implantation proposée des ouvrages (2 lignes de digues immergées en géotextile espacées) permet de créer une zone de dissipation et limite la reformation de la houle avant d'atteindre la plage.

7.2 Reef Ball

L'implantation prévue des tubes en géotextile permet la mise en place en place de Reef Ball™. Ces récifs artificiels permettent de réhabiliter les écosystèmes pour former un habitat aquatique durable et de le réaliser de manière sûre, à long terme et respectueuse de l'environnement.

Les balles de récif sont aisément réalisées à partir d'un système de moule en fibre de verre ingénieux, facile à utiliser et portatif.

Exemple de Reef Ball™ et de mise en place

Concernant le dimensionnement et l'espacement des ouvrages, le critère dimensionnant est la prise en compte des longueurs d'onde.

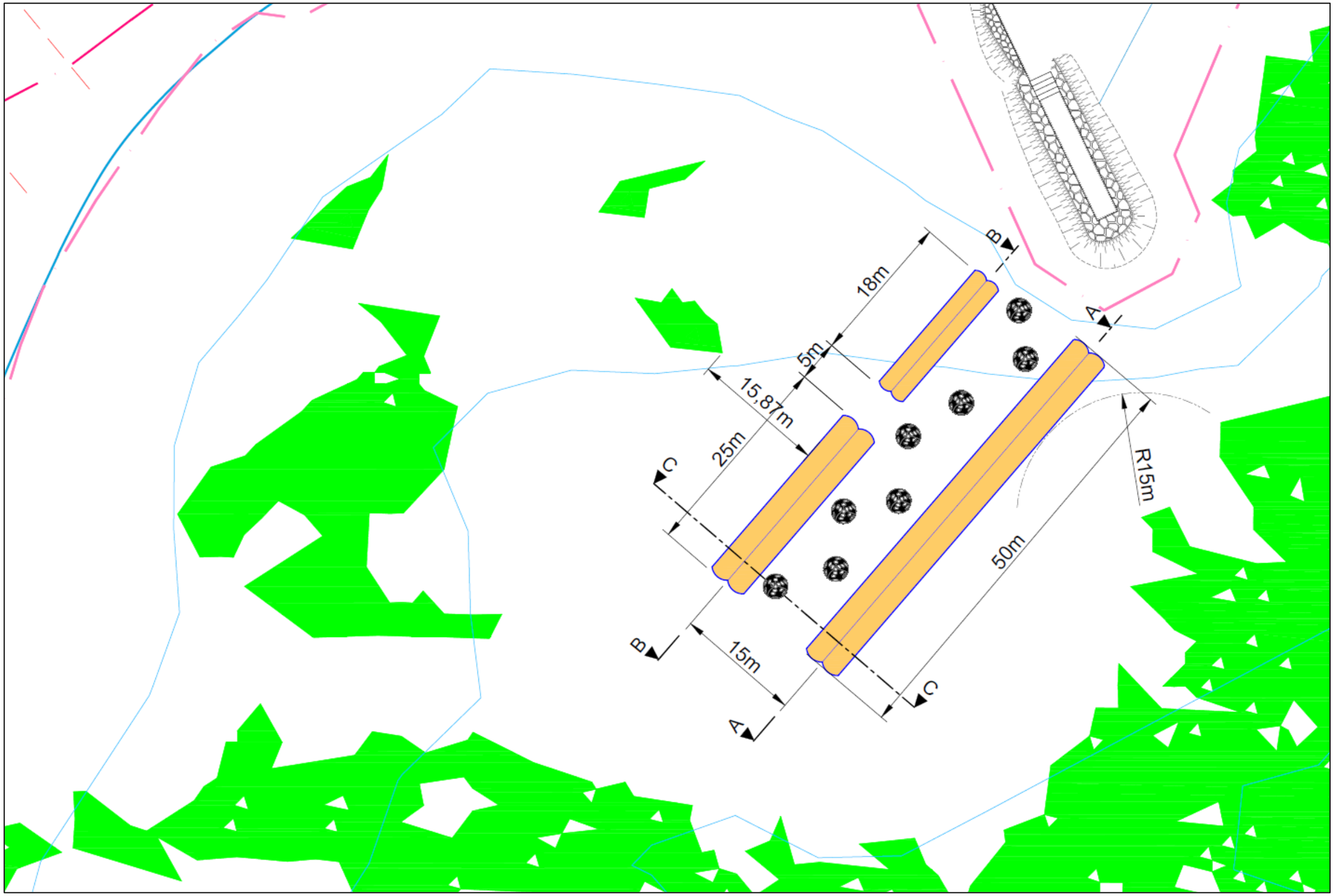
Dans le cadre de nos études, les caractéristiques dimensionnantes sont des houles de 6s à 8s et une profondeur comprise entre 2 et 2,5 m.

L (m)	d=2m	d=2.5m
T=6s	25.6 m	28.3 m
T=7s	30.2 m	33.5 m
T=8s	34.7 m	38.6 m

Longueur d'onde retenue pour le dimensionnement

© 2018 ACRI-IN

Afin d'avoir une largeur totale d'ouvrage correspondant au ¼ de la longueur d'onde (critère minimale pour avoir un effet sur la houle), il est proposé de mettre en œuvre 2*2 rangées de digues immergées en géotextile de 2,5 m de large et d'une hauteur de 2 m espacées de 15 m (entraxe).



Vue en plan des ouvrages

© 2018 ACRI-IN

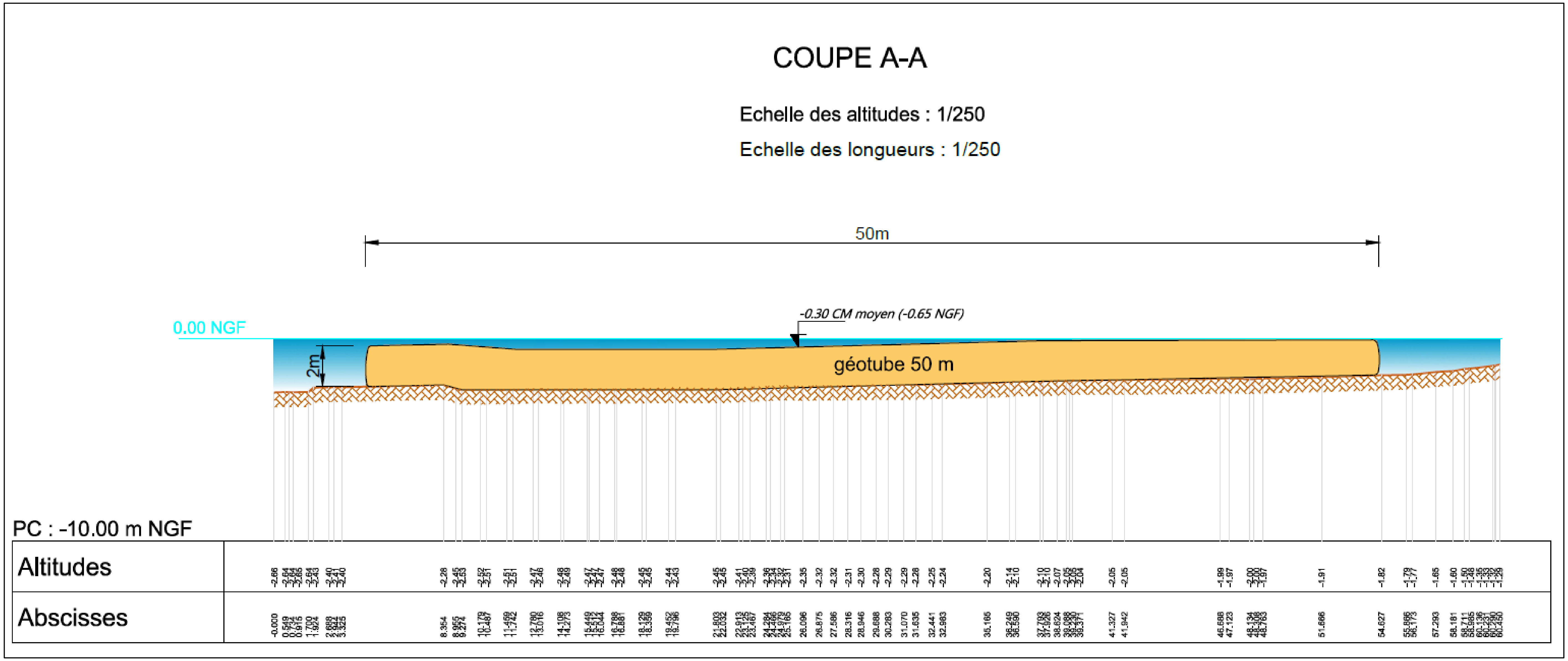


Schéma de principe de la coupe A-A

© 2018 ACRI-IN

COUPE B-B

Echelle des altitudes : 1/250

Echelle des longueurs : 1/250

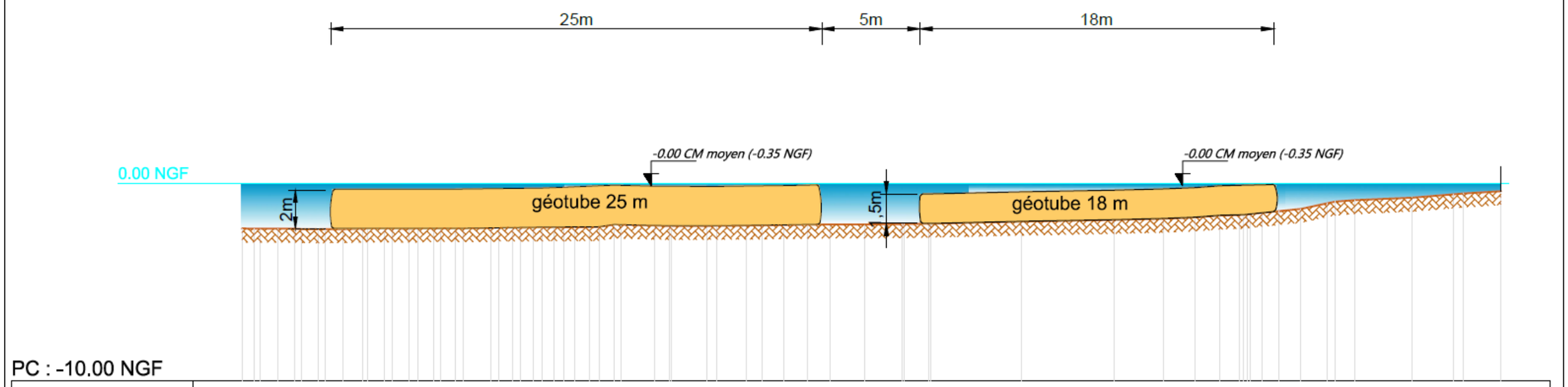


Schéma de principe de la coupe B-B

© 2018 ACRI-IN

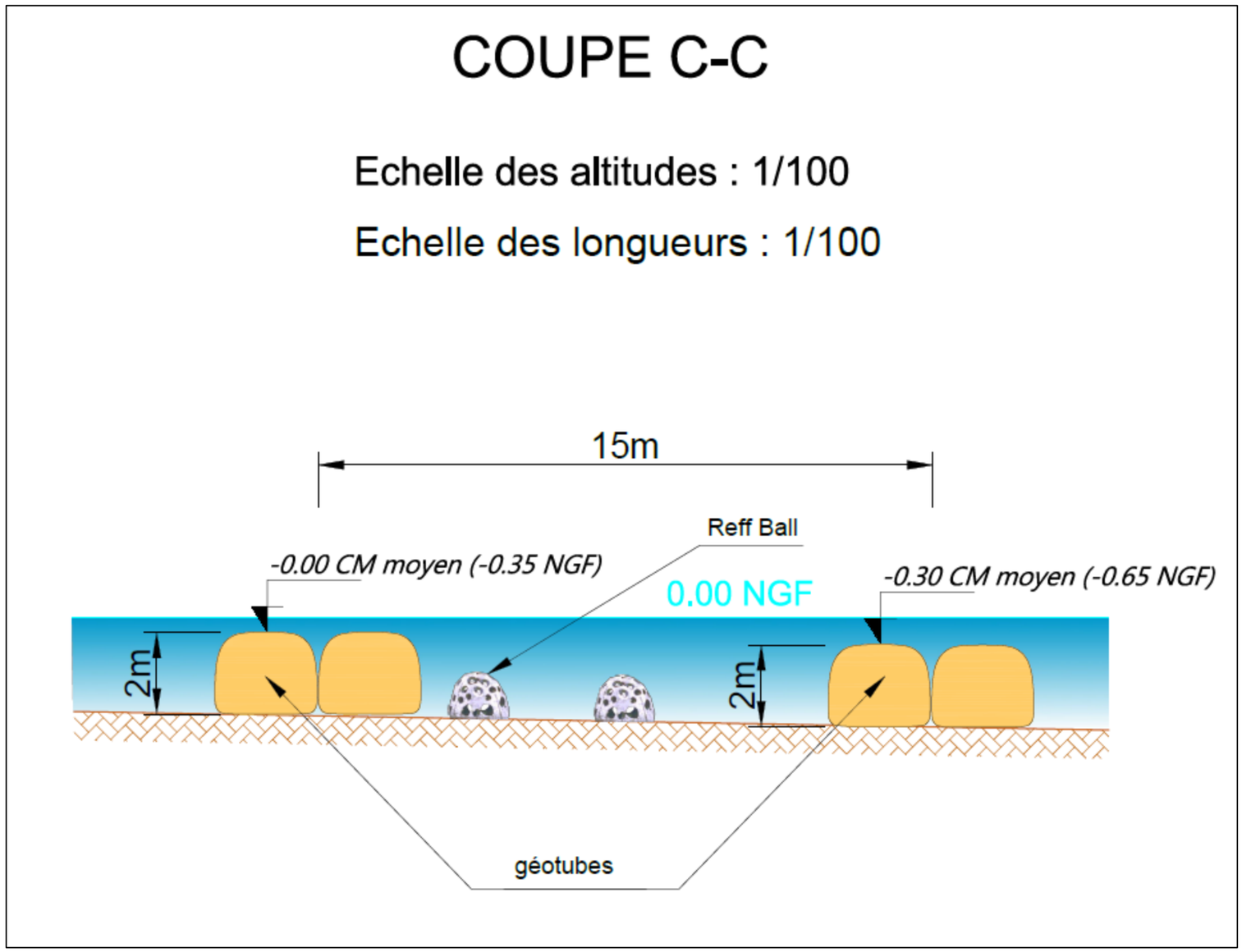


Schéma de principe de la coupe C-C

© 2018 ACRI-IN

Les ouvrages en géotextile de renforcement 1000 gr/m^2, de type tissé polypropylène, seront résistant aux UV et à l'abrasion. La pose et le remplissage se fera selon les recommandations du fabricant avec une assistance technique obligatoire de sa part. Les tubes, seront être munis de points de fixation provisoire, tous les 5 m, de part et d'autre, permettant d'assurer la bonne implantation de l'ouvrage. Des cheminées de remplissage, disposées tous les 10 m, permettront d'effectuer l'injection de sable dans les tubes.

L'ouverture de filtration sera adaptée à la granulométrie des sables prélevés et analysés dans les gisements par l'entrepreneur.

L'intérieur du géotextile sera doublé avec un filtre en géotextile non tissé 270 gr/m^2. Le géotextile non tissé du filtre devra être liaisonné au géotextile tissé par couture tous les 50 cm. L'assemblage tissé non tissé sur toute la surface sera formellement interdit.

Les moyens matériels pour la mise en œuvre des ouvrages en géotextile :

- La réalisation de la piste et de la rampe provisoire : chargeur, pelle mécanique, compacteur ;
- La pose des tapis anti-affouillements : barge, pelle mécanique, plongeurs scaphandriers ;
- La pose des tubes en géotextile : barge et selon les recommandations du fabricant ;
- Le remplissage des tubes géotextiles : moyens hydrauliques et selon les recommandations du fabricant.

7.3 Rechargement de la plage en sable

Afin d'augmenter la hauteur de plage, un rechargement sera réalisé à partir des matériaux issus des dragages réalisés au niveau du port et stockés sur une zone définie par le maître d'ouvrage.

Le sable sera chargé par le biais d'une pelle mécanique dans des chargeurs pour le transporter jusqu'à la plage.

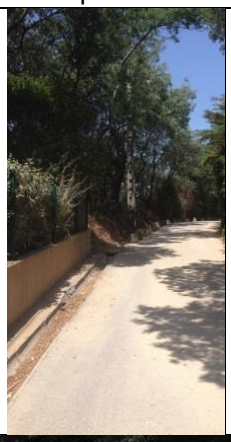
Le sable sera ensuite nivelé par un compacteur jusqu'à la laisse des eaux (sans augmentation de la largeur de cette dernière).

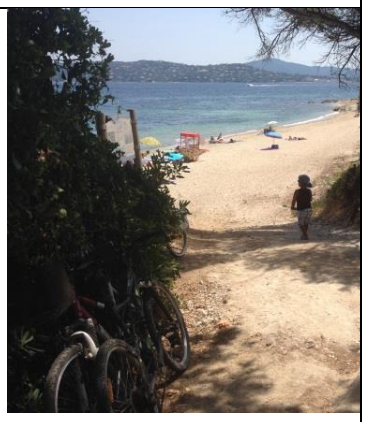
Le rechargement sera réalisé en différé dans le cadre du projet de dragage et rechargement (demande d'examen au cas par cas n°F09317P0387 et dossier de déclaration 83-2018-00132). **L'Autorité Environnementale a émis un avis favorable à la suite de l'examen au cas par cas** (http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/f09317p0387-operation-de-rechargement-des-plages-a10610.html).

© 2018 ACRI-IN

7.4 Accès à la zone des travaux

Acces plage via chemin privé





- Largeur chemin : 4 m
- Largeur piste : 3 m
- Accès des engins d'entretien de plage

© 2018 ACRI-IN

7.5 Mesures environnementales dans le cadre des travaux

Deux types de mesures environnementales sont à prévoir dans le cadre des travaux :

- D'une part celles qui consistent en des précautions et dispositions que devra respecter l'entreprise dans le cadre des travaux pour satisfaire les mesures environnementales qui seront demandées par les services de l'état ;
- D'autre part un suivi de la turbidité de l'eau devra être effectué quotidiennement à l'aide d'un turbidimètre par l'entreprise retenue pour les travaux afin de satisfaire l'Arrêté Préfectoral établi le 21 juillet 2009 relatif aux prescriptions spécifiques qui stipule qu'en cas de dépassement de plus de 50 % de la valeur de turbidité mesurée à l'ouverture du chantier, le chantier sera provisoirement arrêté jusqu'au rétablissement des conditions de travail dans le milieu. La détermination de l'origine du phénomène de turbidité devra être recherchée.

© 2018 ACRI-IN

8 Estimation du montant des travaux

Le montant des travaux est estimé à environ 215 K€ hors taxe y compris 5 % d'aléas.

MAIRIE DE GRIMAUD
Protection de la plage du Vieux Moulin
Travaux

N°	DESIGNATION	UNITE	QUANTITE	Prix Unitaire	Montant
100	**INSTALLATIONS DE CHANTIER ET TRAVAUX PREPARATOIRES**				
101	Installation de chantier	ft	1,00	10 000,00 €	10 000,00 €
102	Balisage terrestre et maritime	ft	1,00	5 000,00 €	5 000,00 €
103	Amenée et repliement ateliers maritimes	ft	1,00	12 500,00 €	12 500,00 €
104	Releves bathymetriques et topographique	ft	1,00	5 000,00 €	5 000,00 €
105	Etudes et plans d'exécution	ft	1,00	4 500,00 €	4 500,00 €
106	Suivi qualité ,sécurité, environnement	mois	1,00	1 200,00 €	1 200,00 €
107	Etalonnage et analyse turbidité	mois	1,00	1 350,00 €	1 350,00 €
108	Filet MES	ft	1,00	11 000,00 €	11 000,00 €
	TOTAL HT POSTE 100				**50 550,00 €**
200	**DIGUES IMMERGEES**				
201	Preparation de surface et géotextile d'assise	m2	1000,00	15,00 €	15 000,00 €
202	Fourniture, pose et remplissage géotubes	ml	186,00	620,00 €	115 320,00 €
	TOTAL HT POSTE 200				**130 320,00 €**
300	**REEF BALL**				
301	Fourniture et pose des Reef Ball	U	8,00	3 000,00 €	24 000,00 €
	TOTAL HT POSTE 300				**24 000,00 €**
	RECAPITULATIF				
100	**INSTALLATIONS DE CHANTIER ET TRAVAUX PREPARATOIRES**				**50 550,00 €**
200	**DIGUES IMMERGEES**				**130 320,00 €**
300	**REEF BALL**				**24 000,00 €**
			ALEAS :	**5%**	**10 243,50 €**
				TOTAL HT	**215 113,50 €**
				TVA 20 %	**43 022,70 €**
				TOTAL TTC	**258 136,20 €**

© 2018 ACRI-IN

9 Estimation du suivi et de l'éventuel retrait des ouvrages

Le suivi durant une période de 3 ans permettant de suivre l'évolution de la plage du vieux moulin est estimé à 9,3 K€ HT.

Si nécessaire et en fonction des résultats du suivi, les ouvrages seront retirés de la zone d'étude. Le montant de cette prestation est estimé à 3 K€ HT.

MAIRIE DE GRIMAUD
Protection de la plage du Vieux Moulin
Suivi et retrait éventuel

N°	DESIGNATION	UNITE	QUANTITE	Prix Unitaire	Montant
10	**SUIVI ANNUEL**				
11	Releves bathymetriques et topographique	U	6,00	800,00 €	4 800,00 €
12	Suivi des herbiers	U	3,00	1 500,00 €	4 500,00 €
	TOTAL HT POSTE 10				**9 300,00 €**
20	**RETRAIT DES OUVRAGES**				
21	Preparation de surface et géotextile d'assise	Ft	1,00	3 000,00 €	3 000,00 €
	TOTAL HT POSTE 20				**3 000,00 €**
	RECAPITULATIF				
10	**SUIVI ANNUEL**				**9 300,00 €**
20	**RETRAIT DES OUVRAGES**				**3 000,00 €**
				TOTAL HT	**12 300,00 €**
				TVA 20 %	**2 460,00 €**
				TOTAL TTC	**14 760,00 €**

© 2018 ACRI-IN

10 Environnement naturel

10.1 La zone NATURA 2000 de la corniche varoise

10.1.1 Présentation du site

Le site Natura 2000 de la Corniche varoise (FR 9301624), incluant les caps Lardier, Taillat et Camarat, s'étend sur six communes du littoral varois. Cette zone s'étend sur 29 061 ha. Le site d'étude est situé à environ 5 km de cette zone Natura 2000. En conséquence, les incidences du projet sur ces sites seront étudiées conformément au code de l'environnement.

Visualisation du site Natura 2000 de la Corniche Varoise

© 2018 ACRI-IN

Localisation	
Région :	PROVENCE-ALPES-COTE D'AZUR (2.00 %)
Département :	Domaine maritime (98 %), Var (2 %)
Superficie :	29 061 ha
Altitude minimale :	-1900 m
Région biogéographique :	Méditerranéenne

Description du site

La Corniche Varoise constitue un site exceptionnel où s'établit une continuité terre-mer remarquable sur un faciès essentiellement rocheux.

La partie marine représente 98 % du site. On y rencontre des paysages sous-marins très diversifiés tels que des tombants, de gros éboulis, une tête de canyon, ... Des herbiers de posidonies sont présents, jusqu'à 36m de profondeur, au niveau des roches dures et des substrats meubles. Ces herbiers stabilisent naturellement le littoral.

On note une grande richesse en concrétions coralligènes, en algues (Cystoseires, concrétions à Lithophyllum) et la présence ponctuelle de bancs de Maërl. Les secteurs profonds, qui s'étendent parfois au-delà de l'isobathe -1000 m comprennent des biocénoses particulières des vases terrigènes ou bathyales, ainsi que des faciès à vase compacte et des biocénoses originales à coraux d'eau froide (présence avérée dans le canyon (juin 2008)). Au niveau de la tête de canyon des Stoechades, la dynamique des masses d'eau favorise le renouvellement et l'apport de matière organique. La faune, benthique ou necto-benthique (poissons) y est en forte concentration et constitue une richesse pour l'ensemble du plateau continental au large de la corniche des Maures.

Plusieurs espèces de mammifères marins, dont le Grand dauphin (espèce la plus côtière) sont ainsi régulièrement observées dans cette zone.

La partie terrestre représente 2% du site. Cet ensemble naturel littoral très intéressant comporte sur rocher un faciès littoral de la chênaie pubescente, et par place la riche chênaie mixte de la presqu'île tropézienne (mélange des 3 espèces de chênes méditerranéens présents sur silice). On y trouve parmi les plus beaux groupements thermophiles de France (phryganes à Anthyllis barbe de Jupiter et Thymélée hirsute, mattoral à Palmier nain). Les formations spasmophiles constituent de remarquables complexes.

Composition du site

Mer, Bras de Mer	98%
Landes, Broussailles, Recrus, Maquis et Garrigues, Phrygana	1%
Galets, Falaises maritimes, Ilots	1%

Espèces végétales et animales présentes

Cistude d'Europe (*Emys orbicularis*)

Tortue d'Hermann (*Testudo hermanni*)

Damier de la Succise (*Euphydryas aurinia*)

Ecaille chinée (*Callimorpha quadripunctaria*)

Grand capricorne (*Cerambyx cerdo*)

Lucane cerf-volant (*Lucanus cervus*)

Grand Dauphin (*Tursiops truncatus*)

Minioptère de Schreibers (*Miniopterus schreibersii*)

Petit Rhinolophe (*Rhinolophus hipposideros*)

Vespertilion à oreilles échancrées (*Myotis emarginatus*)

Caractéristiques du site Natura 2000 de la Corniche Varoise

© 2018 ACRI-IN

10.1.2 Habitats et espèces remarquables sur le site Natura 2000

Habitats remarquables

Sur les différents sites Natura 2000 dans lesquels est située la zone d'étude, on recense 22 types d'habitats remarquables. Ces habitats, décrits dans le paragraphe précédent (description du site), permettent d'abriter de nombreuses espèces à fort intérêt communautaire.

Conclusion : Pas d'impact du projet sur la zone Natura 2000

La zone Natura 2000 de la Corniche Varoise se situe à environ 5km du site d'étude. Cet espace protégé est principalement marin. Eu égard à la nature du projet, les seuls impacts à craindre se situeront au niveau marin. Les risques au niveau de la zone Natura 2000 seraient :

- Une modification de courant ;
- Une modification de transport de sédiments.

En l'espèce, même en cas de modification des infrastructures maritimes**, il n'y aura ni de modification de courant ni de modification du transport sédimentaire au niveau de la zone Natural 2000**. En conclusion, aucun impact à long terme sur l'environnement n'est à craindre. Des mesures de protection sont toutefois à prendre durant la phase travaux.

10.2 L'inventaire des Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistique, Floristique (ZNIEFF)

Les ZNIEFF sont définies dans le cadre d'un programme national initié en 1982 par le ministère chargé de l'environnement. L'inventaire des ZNIEFF de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur a été publié une première fois en 1988. Actualisé en 2004, il fera dorénavant l'objet de mises à jour régulières.

Cet inventaire vise la connaissance permanente aussi exhaustive que possible des espaces naturels, terrestres et marins, dont l'intérêt repose soit sur l'équilibre et la richesse de l'écosystème soit sur la présence d'espèces de plantes ou d'animaux rares et menacés.

Le fondement législatif de l'inventaire ZNIEFF a été précisé par la loi n°2002-276 du 27 février 2002 relative à la démocratie de proximité.

L'article 109-N, III, (article L. 411-5 du code de l'environnement) mentionne qu'«un inventaire du patrimoine naturel est institué pour l'ensemble du territoire national. On entend par inventaire du patrimoine naturel l'inventaire des richesses écologiques, faunistiques, floristiques, géologiques, minéralogiques et paléontologiques. L'État en assure la conception, l'animation et l'évaluation. Ces inventaires sont conduits sous la responsabilité scientifique du Muséum National d'Histoire Naturelle».

Deux types de zones sont définis :

- Zones de type I : secteurs de superficie en général limitée, caractérisés par leur intérêt biologique remarquable.
- Zone de type II : grands ensembles naturels riches et peu modifiés, ou qui offrent des potentialités biologiques importantes.

© 2018 ACRI-IN

10.2.1 Géologique

Sur la zone d'étude, aucune ZNIEFF géologique n'est localisée.

10.2.2 Marines

Sur la zone d'étude, aucune ZNIEFF marine n'est localisée.

© 2018 ACRI-IN

Fin du document

© 2018 ACRI-IN