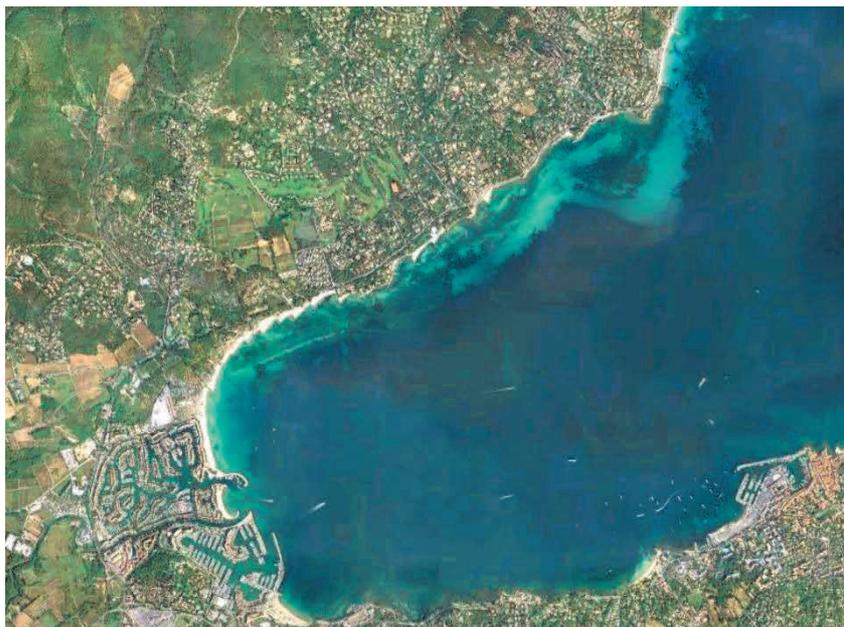


Etude de la dynamique sédimentaire de la plage du Vieux Moulin



Rapport d'études

Réf.: 1030-872 – R2

Date: 07/02/2018



Client: Commune de Grimaud



Page blanche

Signatures

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

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

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	8
2.2.3	Conditions au large	9
2.3	VARIATION DES NIVEAUX D'EAU	10
2.3.1	Marée astronomique	10
2.3.2	Surcotes, décotes et storm surge	10
2.3.3	Les niveaux d'eau	11
2.4	ETUDE DE PROPAGATION DE LA HOULE DU LARGE VERS LA CÔTE	12
2.4.1	Présentation du logiciel de propagation	12
2.4.2	Paramétrage du Modèle Numérique	12
2.4.3	Résultats des simulations numériques	13
2.4.4	Incidence à la côte	16
3	PRESENTATION DES SOLUTIONS D'AMENAGEMENTS	17
4	MODELISATION MORPHODYNAMIQUE	18
4.1	GÉNÉRALITÉS	18
4.2	HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION	18
4.2.1	La chaîne hydro informatique TELEMAC	18
4.2.2	Courantologie	19
4.2.2.1	Equations résolues	19
4.2.2.2	Schéma de résolution	19
4.2.2.3	Paramètres numériques et physiques	20
4.2.3	Agitations marines	20
4.2.3.1	Equations résolues	20
4.2.3.2	Schéma de résolution	20
4.2.3.3	Paramètres numériques et physiques	21
4.2.4	Transport sédimentaire et évolutions bathymétriques	21
4.2.4.1	Equations résolues	21
4.2.4.2	Equation de transport	21
4.2.4.3	Equation d'évolution du fond	22
4.2.4.4	Paramètres physiques et numériques du modèle	22
4.2.4.5	Couplage entre module	22
4.3	EMPRISE DU MODÈLE	23
4.4	MAILLAGE	24
4.5	DONNÉES D'ENTRÉE	25
4.5.1	Bathymétrie	25
4.5.2	Roches affleurantes	26
4.5.3	Agitations marines et niveau marin	27
4.5.3.1	Le modèle 2012	27
4.5.3.2	Données de houle et niveau d'eau issus du modèle 2012	28
4.6	CONFIGURATIONS D'AMÉNAGEMENT PROPOSÉES	30
4.6.1	Présentation des modifications du maillage	30

4.6.2	Etat initial	31
4.6.3	Scenario 1 : Ouverture épi Est	31
4.6.4	Scenario 2 : Aménagement submergé	32
4.6.5	Scenario 2-V1 et 2-V2 : Aménagement submergé	33
4.6.6	Scenario 3 : Epi ouest	35
5	INCIDENCE SUR LA STABILITE DU TRAIT DE COTE	36
5.1	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	36
5.2	ETAT INITIAL	36
5.2.1	CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N	36
5.2.1.1	Plan de vagues	36
5.2.1.2	Courants induits par les vagues	37
5.2.1.3	Incidence sur les dépôts et érosions	38
5.2.2	CAS 2 – Période de retour 1 an – Direction 95°N	39
5.2.2.1	Plan de vagues	39
5.2.2.2	Courants induits par les vagues	40
5.2.2.3	Incidence sur les dépôts et érosions	41
5.2.3	CAS 3 – Période de retour 1 an – Direction 115°N	42
5.2.3.1	Plan de vagues	42
5.2.3.2	Courants induits par les vagues	43
5.2.3.3	Incidence sur les dépôts et érosions	44
5.2.4	CAS 4 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N	45
5.2.4.1	Plan de vagues	45
5.2.4.2	Courants induits par les vagues	46
5.2.4.3	Incidence sur les dépôts et érosions	47
5.2.5	CAS 5 – Période de retour 10 ans – Direction 95°N	48
5.2.5.1	Plan de vagues	48
5.2.5.2	Courants induits par les vagues	49
5.2.5.3	Incidence sur les dépôts et érosions	50
5.2.6	CAS 6 – Période de retour 10 ans – Direction 115°N	51
5.2.6.1	Plan de vagues	51
5.2.6.2	Courants induits par les vagues	52
5.2.6.3	Incidence sur les dépôts et érosions	53
5.2.7	Synthèse sur l'état initial	53
5.3	AMÉNAGEMENT ÉPI EST	55
5.3.1	CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N	55
5.3.1.1	Plan de vagues	55
5.3.1.2	Courants induits par les vagues	56
5.3.1.3	Incidence sur les dépôts et érosions	57
5.3.2	CAS 2 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N	58
5.3.2.1	Plan de vagues	58
5.3.2.2	Courants induits par les vagues	59
5.3.2.3	Incidence sur les dépôts et érosions	60
5.4	AMÉNAGEMENT SUBMERGÉ	61
5.4.1	CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N	61
5.4.1.1	Plan de vagues	61
5.4.1.2	Courants induits par les vagues	63
5.4.1.3	Incidence sur les dépôts et érosions	64
5.4.2	CAS 2 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N	65
5.4.2.1	Plan de vagues	65
5.4.2.2	Courants induits par les vagues	67

5.4.2.3	Incidence sur les dépôts et érosions	68
5.5	AMÉNAGEMENT D'UN ÉPI OUEST	69
5.5.1	CAS 1 – Période de retour 1 an – Direction 75°N	69
5.5.1.1	Plan de vagues	69
5.5.1.2	Courants induits par les vagues	70
5.5.1.3	Incidence sur les dépôts et érosions	71
5.5.2	CAS 2 – Période de retour 10 ans – Direction 75°N	72
5.5.2.1	Plan de vagues	72
5.5.2.2	Courants induits par les vagues	73
5.5.2.3	Incidence sur les dépôts et érosions	74
5.6	SYNTHÈSE	75
5.7	AMÉNAGEMENT SUBMERGÉ (V2) AVEC SURCOTE DU AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	79
5.8	CAS 1 – PÉRIODE DE RETOUR 1 AN – DIRECTION 75°N	79
5.8.1	Plan de vagues	79
5.8.2	Courants induits par les vagues	80
5.8.3	Evolutions bathymétriques	81
5.9	CAS 2 – PÉRIODE DE RETOUR 10 ANS – DIRECTION 75°N	82
5.9.1	Plan de vagues	82
5.9.2	Courants induits par les vagues	83
5.9.3	Evolutions bathymétriques	84
5.9.4	Bilan sédimentaire	84
6	CONCLUSION	86
7	PROPOSITION D'AMENAGEMENT	87
7.1	PROTECTION PAR RÉCIF ARTIFICIEL IMMERGÉ	87
7.2	REEF BALL	88
7.3	RECHARGEMENT DE LA PLAGE EN SABLE :	93
7.4	ACCÈS À LA ZONE DES TRAVAUX	95
7.5	MESURES ENVIRONNEMENTALES DANS LE CADRE DES TRAVAUX	96
8	ESTIMATION DU MONTANT DES TRAVAUX	97
9	ESTIMATION DU SUIVI ET DE L'ÉVENTUEL RETRAIT DES OUVRAGES	98
10	ENVIRONNEMENT NATUREL	99
10.1	LA ZONE NATURA 2000 DE LA CORNICHE VAROISE	99
10.1.1	Présentation du site	99
10.1.2	Habitats et espèces remarquables sur le site Natura 2000	101
10.2	L'INVENTAIRE DES ZONES NATURELLES D'INTÉRÊT ÉCOLOGIQUE, FAUNISTIQUE, FLORISTIQUE (ZNIEFF)	101
10.2.1	Géologique	102
10.2.2	Marines	102

Page blanche

1 Introduction

La qualité des plages s'inscrit au cœur des enjeux de développement des communes littorales d'une part en raison d'une part, 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. Ces plages font aujourd'hui l'objet d'un projet global de réaménagement. La ville de Grimaud a missionné ACRI IN pour la maîtrise d'œuvre afin de réaliser l'opération d'aménagement et de mise en valeur du littoral de Grimaud.

Le but du présent document est de :

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



Localisation de la plage du vieux moulin

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.

2 Présentation du site d'étude

2.1 Rappels sur la problématique d'érosion

Le site d'étude se situe sur la commune de Grimaud, dans le département du Var. L'anse du Vieux Moulin est soumise à un processus d'érosion côtière, estimée à environ 0.5m/an (CD83).

Au cours de l'étude de faisabilité (réalisée par Sogreah), une estimation du transport de sable induit par la dérive littorale a été proposée. Pour estimer le transport littoral potentiel associé aux houles affectant la baie de Grimaud, une extraction de la répartition en direction des houles en différents points au-devant de la côte doit être entreprise. La dérive littorale dépend en effet des caractéristiques de la houle au déferlement, à savoir sa hauteur significative et sa période, mais également son angle d'incidence par rapport à la côte. Pour les mêmes caractéristiques, plus l'angle d'incidence de la houle est fort et plus la dérive littorale générée est puissante. A contrario, une houle complètement frontale à la côte ne crée aucune dérive littorale.

Les formules de calculs de la capacité de transport sont celles de Kamphuis (1991) et du CERC (1986) issues de la littérature. La formule du CERC (1984) est la plus utilisée à travers le monde. Sa définition originale provient des travaux de Inman et Komar (1970) à partir de traceurs fluorescents. Cette formule s'appuie sur la composante énergétique des vagues en relation avec l'angle d'incidence des houles déferlantes avec le rivage.



Estimation de la dérive littorale au droit de la zone d'étude (SOGREAH, 2007)

Le transit littoral résultant est globalement orienté d'Est en Ouest compte tenu de l'orientation générale du trait de côte et de la direction de propagation de la houle. La présence d'ouvrages et la réorientation locale du trait de côte contre ces ouvrages modifient localement le transport mais n'influent pas le mouvement général. Les ordres de grandeur des transits littoraux potentiels calculés sont de l'ordre de 25 000 m³ /an au droit de l'anse du Moulin.

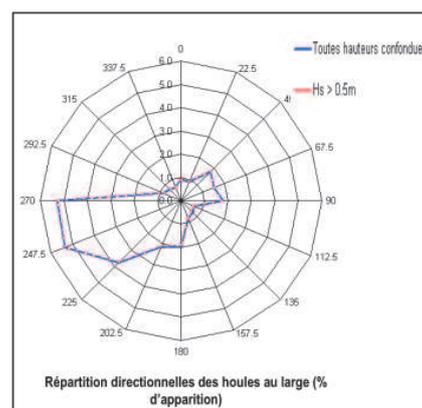
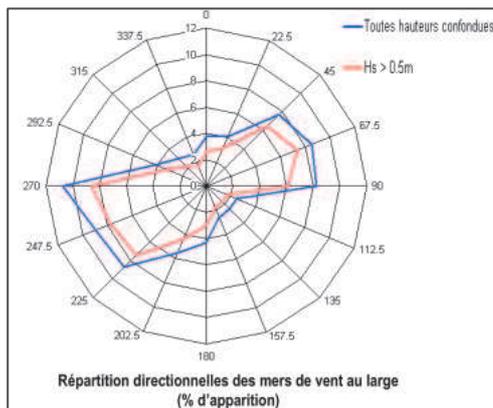
L'analyse de la position du trait de côte réalisée par le CD 83 indique une érosion généralisée de l'anse du Vieux Moulin. Dans la partie la plus sensible, située à l'est de l'anse, l'érosion est de l'ordre de 0.5m/an depuis 1924. ACRI-IN (2013) a réalisé une analyse comparative de la position du trait 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.



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

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).



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

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.

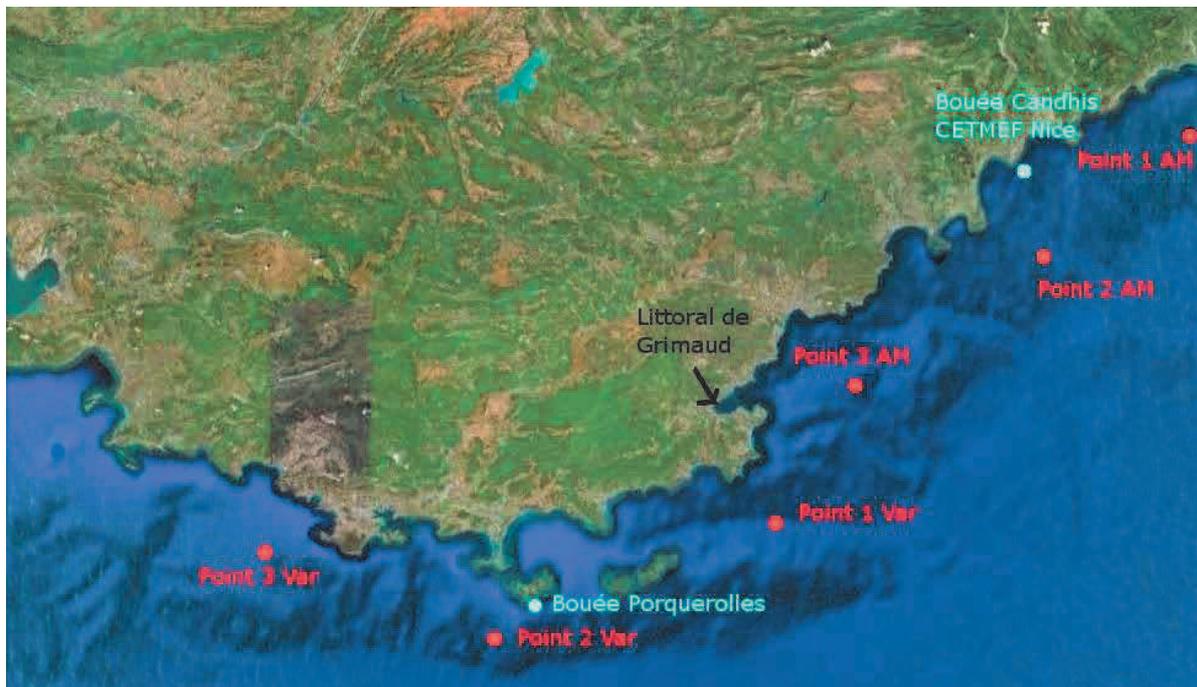
Certains laboratoires tels que Globocéan ou HR Wallingford ont développé des bases de données d'états de mer et de vents à l'échelle mondiale à l'aide de modèles océano-météorologiques globaux. Le pas de temps original du modèle est souvent intrinsèquement fixé à 3 heures.

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 événements 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).

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.

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.



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

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 terme 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.

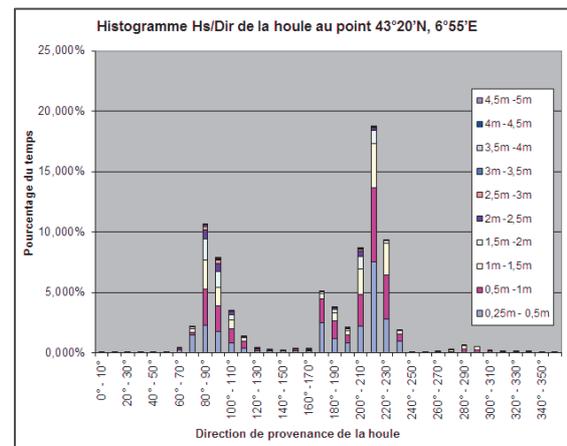
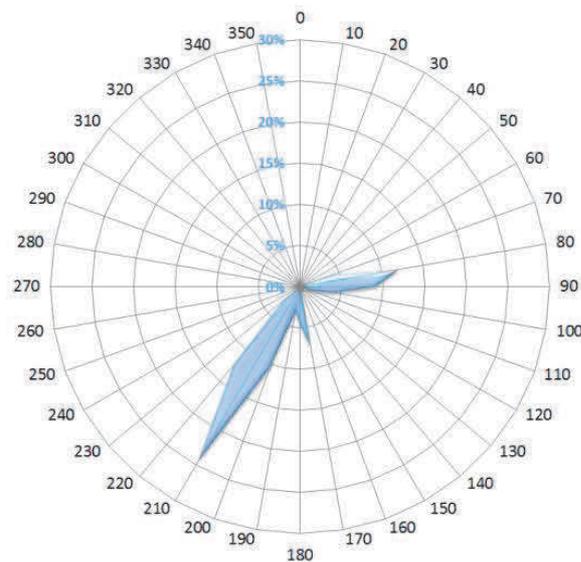
Les graphiques ci-après présentent la rose de houle et les histogrammes Hs/Dir à ce point.

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.

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

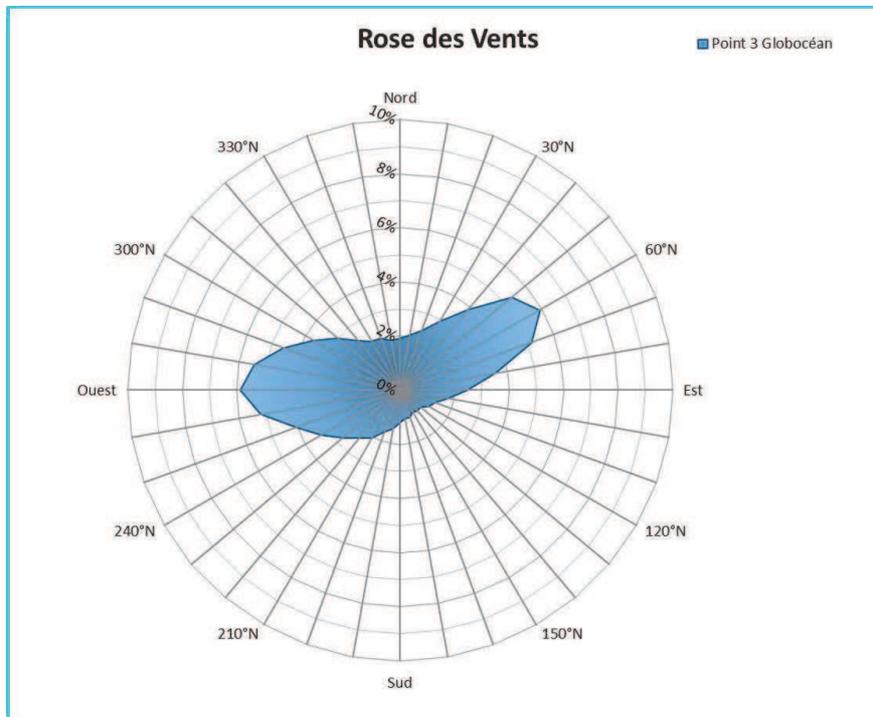
Le vent au point Globocéan 3 AM

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 accompagnée 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.



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, sélectionnée 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 événements 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

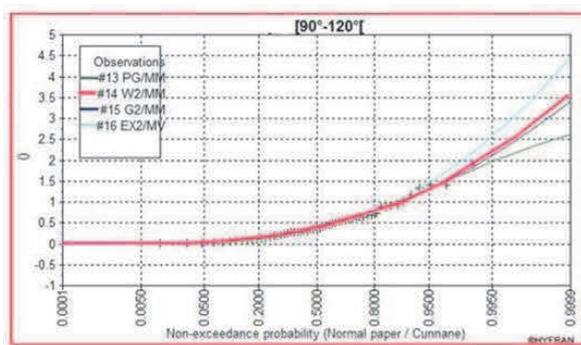
Le calcul des valeurs de houles extrêmes d'après l'ensemble des extrapolations proposées a été effectué en sélectionnant la loi pour laquelle les écarts entre l'échantillon de hauteurs significatives brutes sélectionnées (pics au-dessus du seuil) et la courbe d'extrapolation sont minimaux. On écarte, 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 : $P(Hs) = 1 - \frac{1}{n \times 8 \times 365}$



Courbe d'extrapolation des houles extrêmes associées au pt2 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 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.

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 », entraînant 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 rapportent 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 la phase 1 (étude de SOGREAH) [1], 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

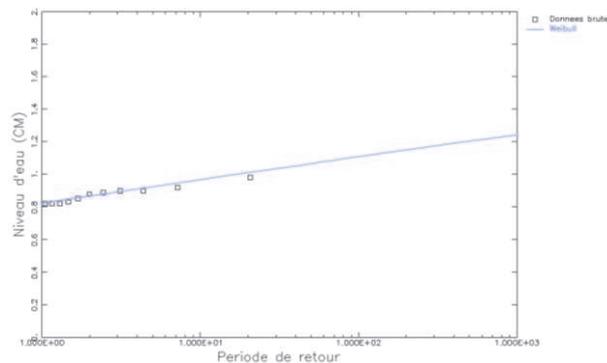
cote (storm surge, surcote) ou l'inverse (décote), et les conditions océanographiques comme le courant (upwelling, downwelling) ou les vagues (wave set-up), dont les influences peuvent être bien supérieures à la marée astronomique.

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 événements 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

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 TELEMAR 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, est le logiciel de modélisation de l'environnement 2D/3D le plus performant au monde ; c'est aussi un logiciel flexible qui 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 morphodynamique, 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.

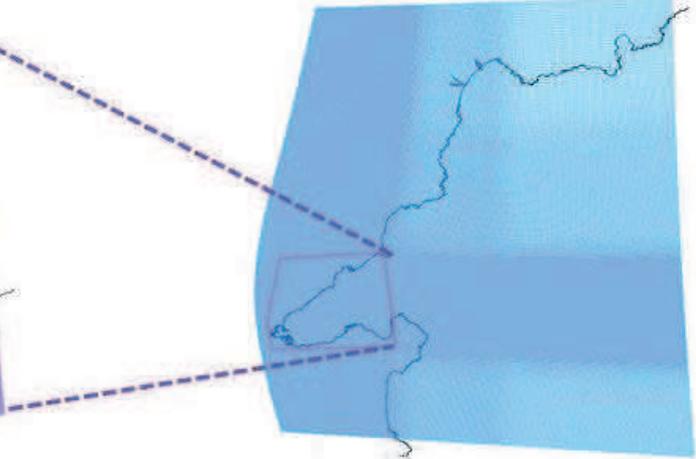
2.4.2 Paramétrage du Modèle Numérique

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 emboîtement de plusieurs modèles avec un raffinement de la grille de calcul sur les zones d'étude. (Voir figure ci-dessous). 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.

Maillage du domaine local



Maillage du domaine global



Emprise des modèles emboîtés

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

Scénarii de Simulation pour les tempêtes

Direction provenance houles	de des	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	

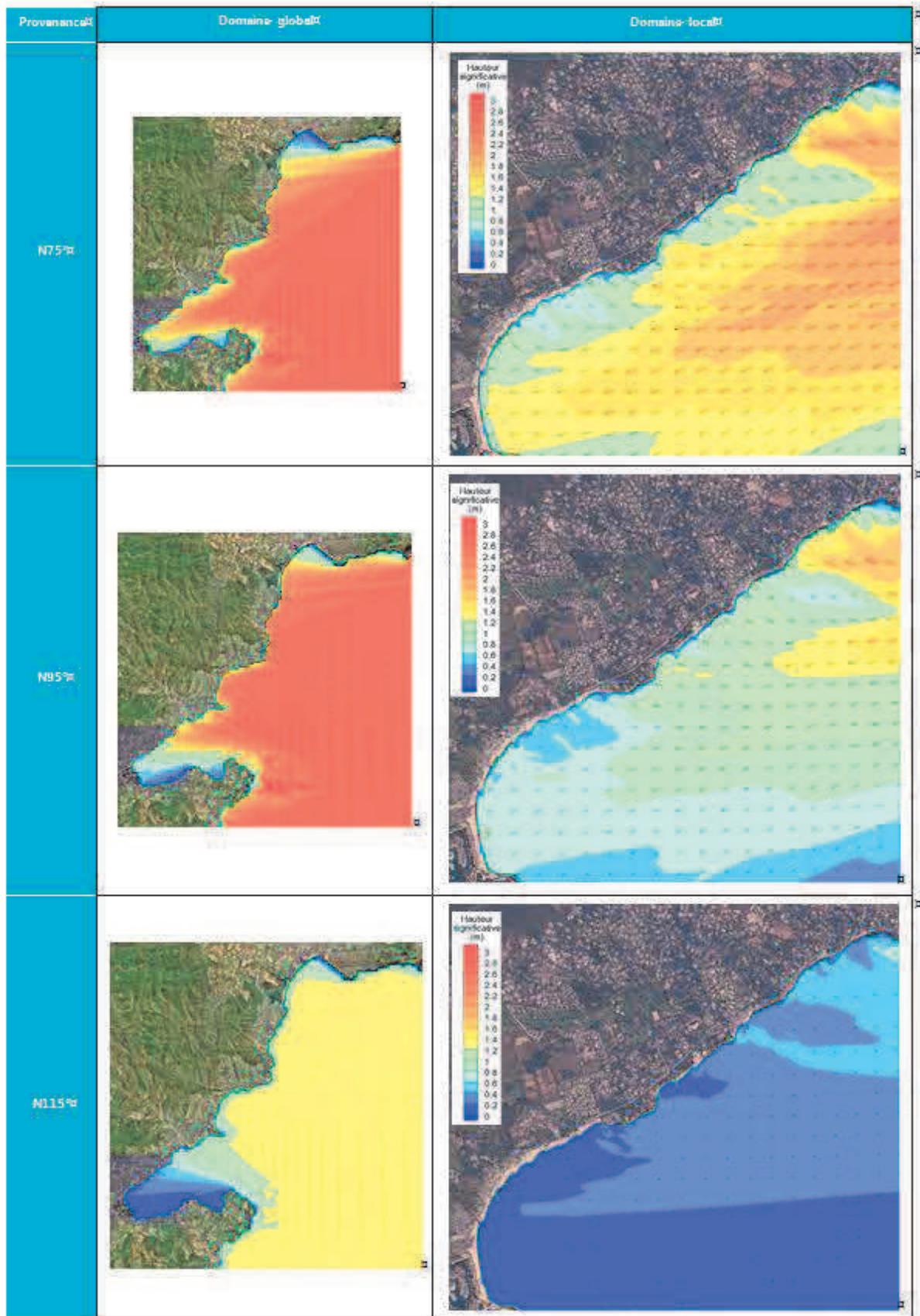
2.4.3 Résultats des simulations numériques

La totalité des résultats de simulations numériques de la propagation des houles de projet du large vers la côte est exposée en annexe 2. 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.



houles de projet de provenance N75°

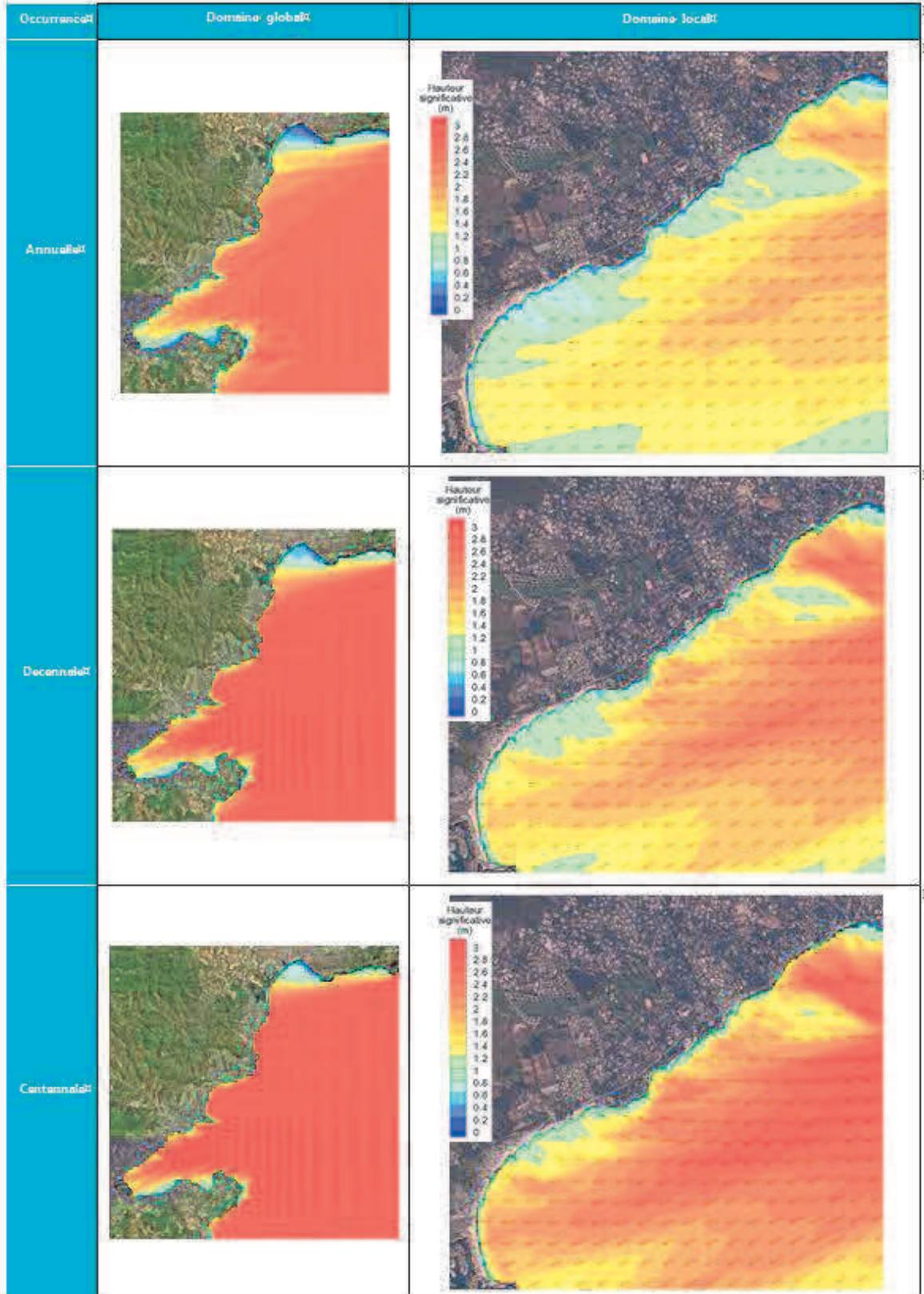
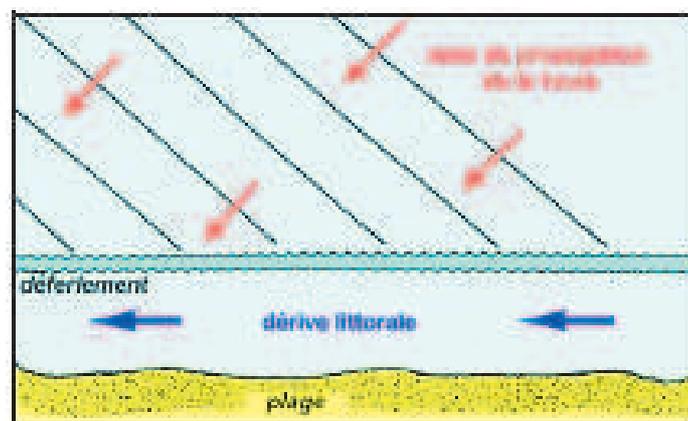


Planche de propagation pour les houles de projet annuelles, décennales et centennales de direction N75°

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

3 Présentation des solutions d'aménagements

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

- Aménagement 1 : reprendre l'épi Est de l'anse pour le rendre poreux et rétablir une partie du transit sédimentaire, qui est interrompu par la présence de cet épi,
- Aménagement 2 : installation d'une structure submergée dans le prolongement de l'épi Est afin de réduire l'énergie érosive des vagues incidentes,
- Aménagement 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.

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 chaîne 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 chaîne 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 chaîne 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 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 formulations 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 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 $35 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$.

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.

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.

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 d_{50} 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 W_s est inférieure à la vitesse de frottement de l'écoulement ($W_s < u^*$).

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 z_f s'écrit sous la forme :

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

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, Q_b .

4.2.4.4 Paramètres physiques et numériques du modèle

Formule de transport

Les formules de transport solide de Soulsby 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 et décennales d'une durée de 12 h.

Taille des grains

Une classe moyenne de sédiment est considérée représentative des conditions observées (Océanide, 2011). Ainsi une classe granulométrique uniforme 0,3mm 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.

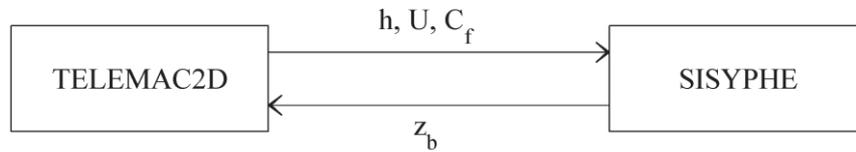
Effet de pente

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

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 (F_x , F_y) qui sont alors prises en compte dans le module de courantologie comme sources de mouvement ;
- la hauteur significative, H_s , la période des vagues, T_p , et la direction des vagues, θ_w , qui sont transmises au module sédimentaire pour le calcul de la formule de transport totale.

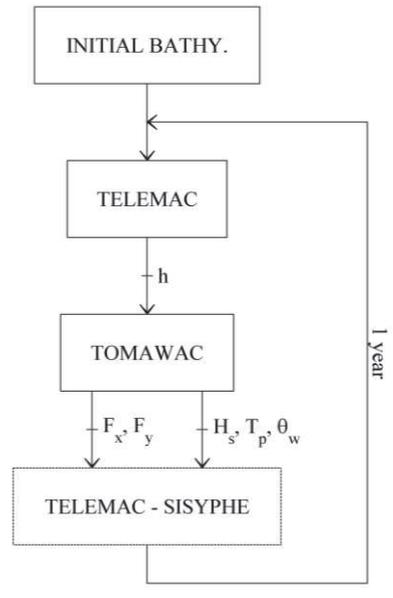


Schéma de couplage entre vagues, courant et évolution bathymétrique

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.

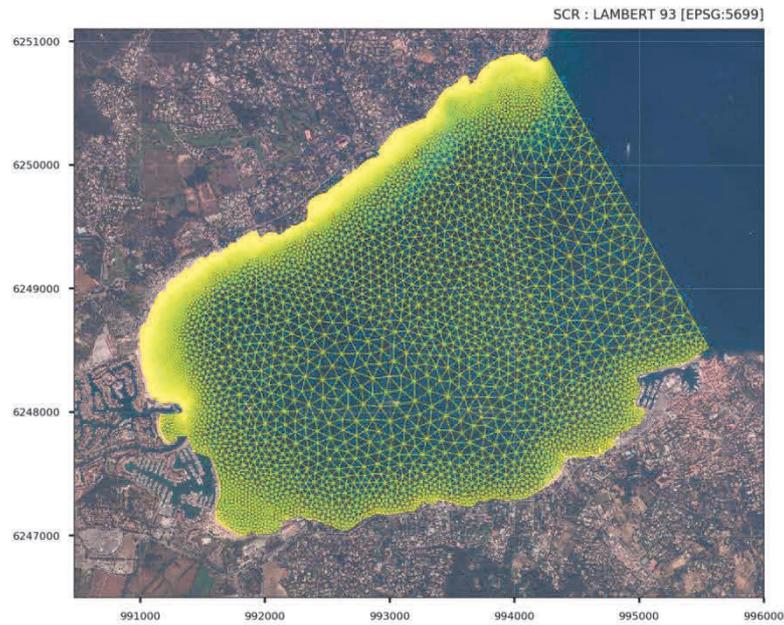
L'emprise du modèle de propagation (ci-après) consiste en un domaine de calcul d'environ 4 x 3 km.



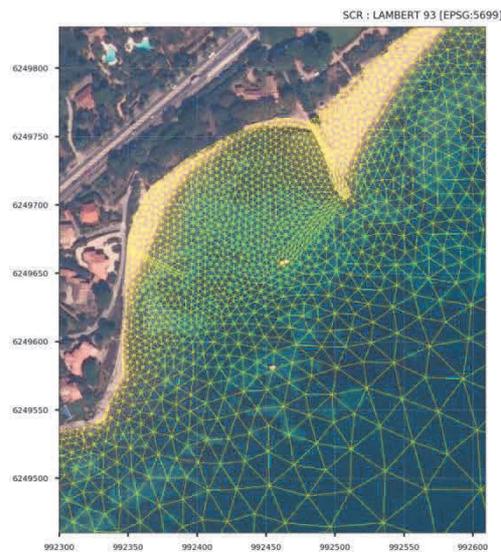
Frontières du modèle d'approche

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 150m. La résolution spatiale est affinée progressivement vers la côte, pour atteindre 30m sur la frontière sud et 5m sur le littoral nord (Ci-après).



ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud



ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

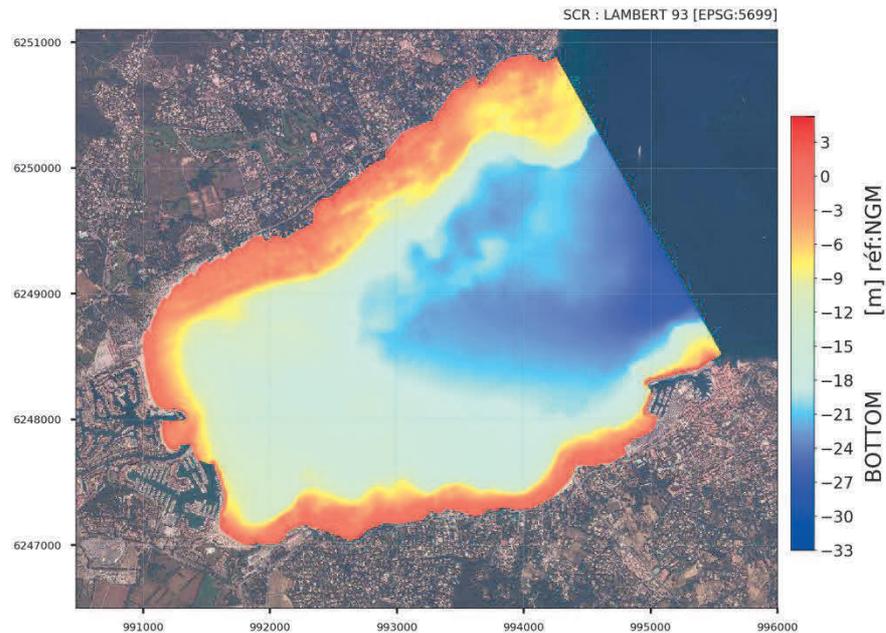
Maillage du modèle (haut : domaine total, bas : Anse du Vieux Moulin)

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® PACA2015¹. La précision est donc très élevée à la côte et moindre au large mais suffisante pour cette étude.

¹ Source : <http://data.shom.fr/>



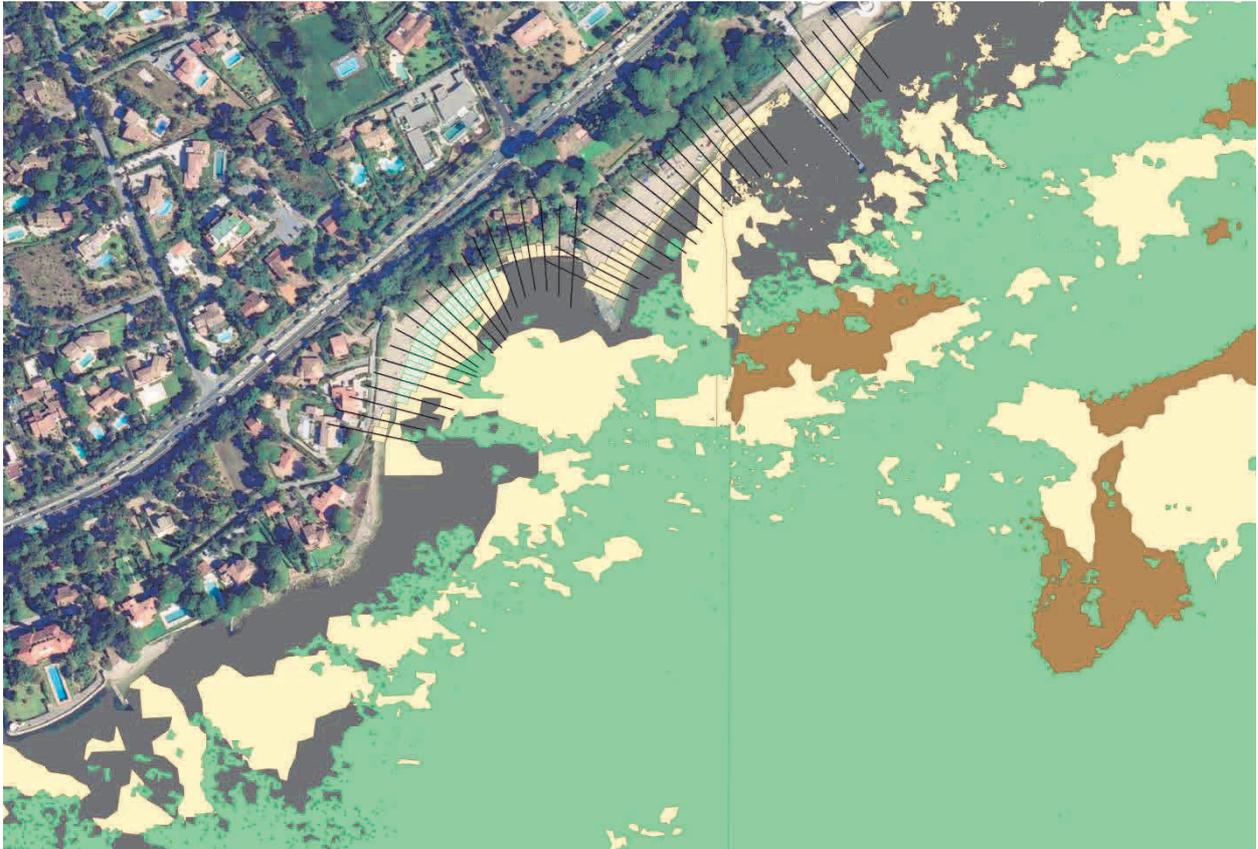
ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

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.



Nature des fonds ; en gris, roche affleurante (source Commune de Grimaud)

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 2012².

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 :

- 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.

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

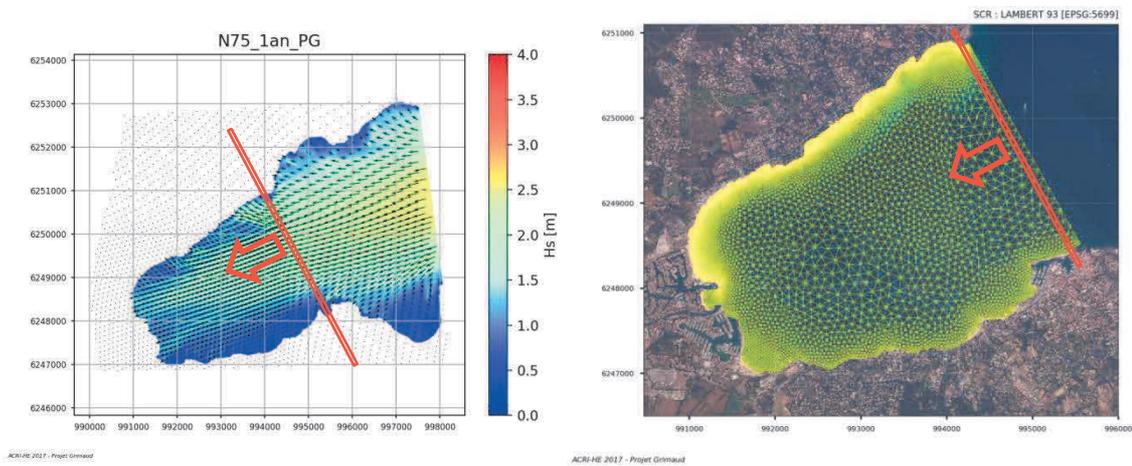


Illustration : conditions d'agitation héritées du modèle 2012 appliquées à la frontière maritime du modèle

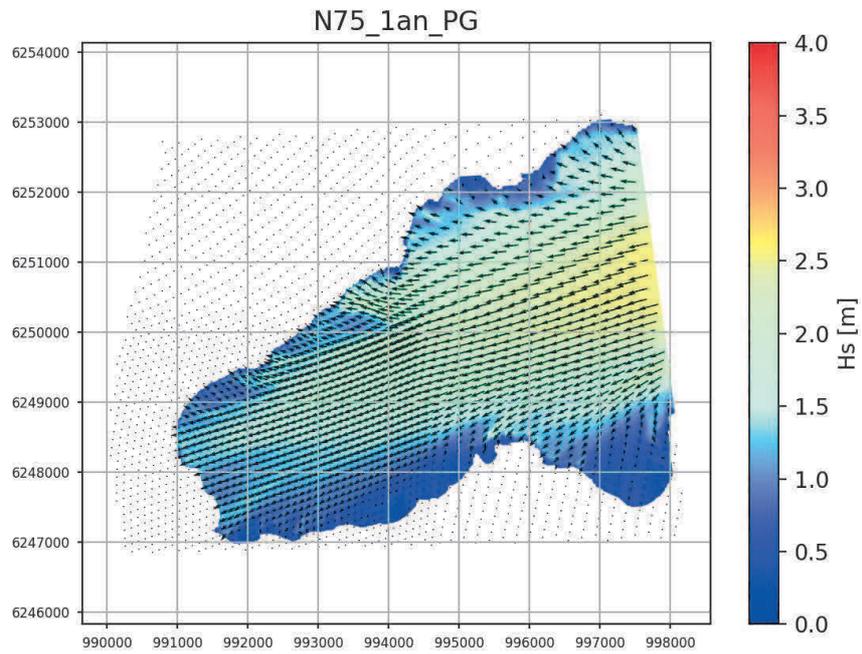
4.5.3.2 Données de houle et niveau d'eau issus du modèle 2012

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, soient **au large** :

	Période de retour	Hs	Tp	Direction de provenance	Niveau d'eau
1	1 an	2.8 m	7.5 s	75 °N	1.3 m
2	10 ans	3.7 m	9.5 s	75 °N	1.5 m
3	50 ans	4.4 m	9.5 s	75 °N	1.6 m
4	1 an	2.7 m	8.5 s	95 °N	1.3 m
5	10 ans	3.7 m	9.5 s	95 °N	1.5 m
6	50 ans	4.3 m	9.5 s	95 °N	1.6 m
7	1 an	1.4 m	5.5 s	115 °N	1.3 m
8	10 ans	2.0 m	6.5 s	115 °N	1.5 m
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 connaître les conditions d'agitation à la frontière maritime du modèle. Une illustration de ces résultats est présentée ci-après.



ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

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

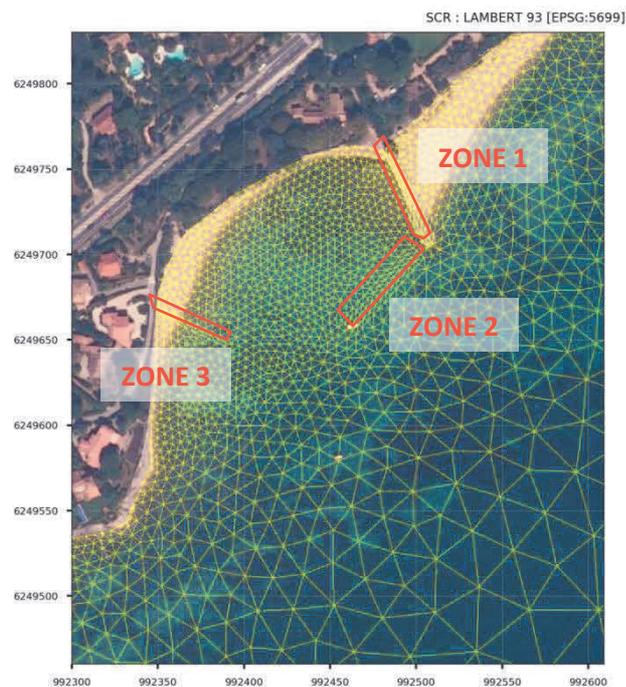
4.6 Configurations d'aménagement proposées

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 ci-dessous repère ces trois zones. Le tableau ci-après dresse un bilan des configurations proposées.

Cas d'aménagement	Description
1 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.
2 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
3 Ouvrage immergé zone 2	La bathymétrie de la zone 2 est fixée à -1.5m. Les fonds dans cette zone sont considérés comme non érodables.
4 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 cas d'aménagement étudiés



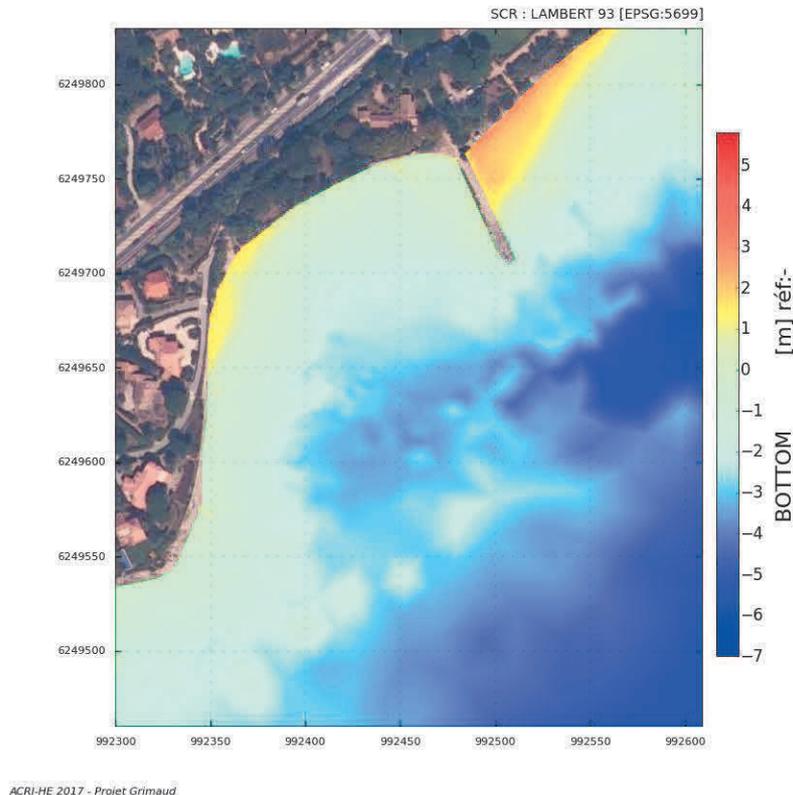
ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

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.

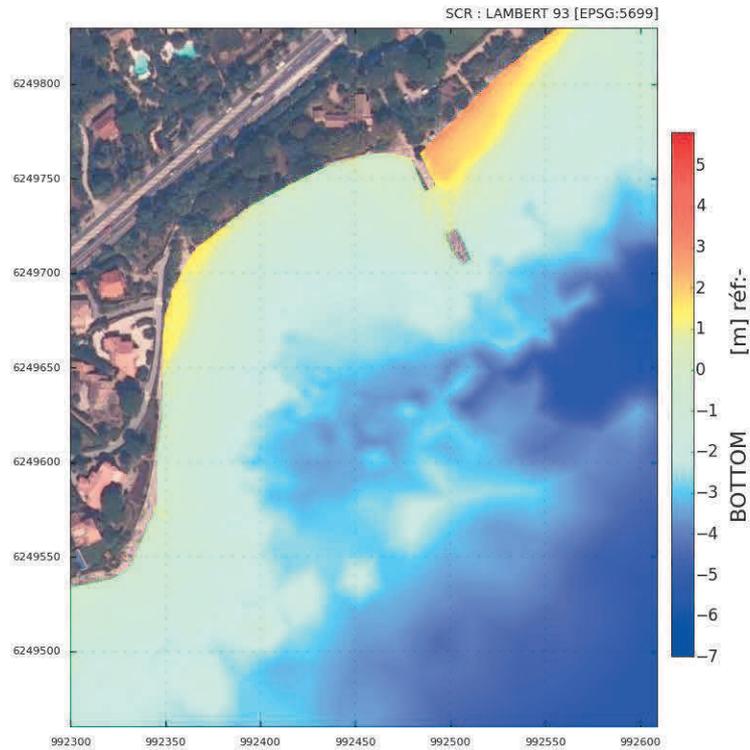


Configuration et bathymétrie de l'état initial

4.6.3 Scénario 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 20m est réalisée. Afin de faciliter la communication entre les deux compartiments un abaissement de l'ordre de 0.5m 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.



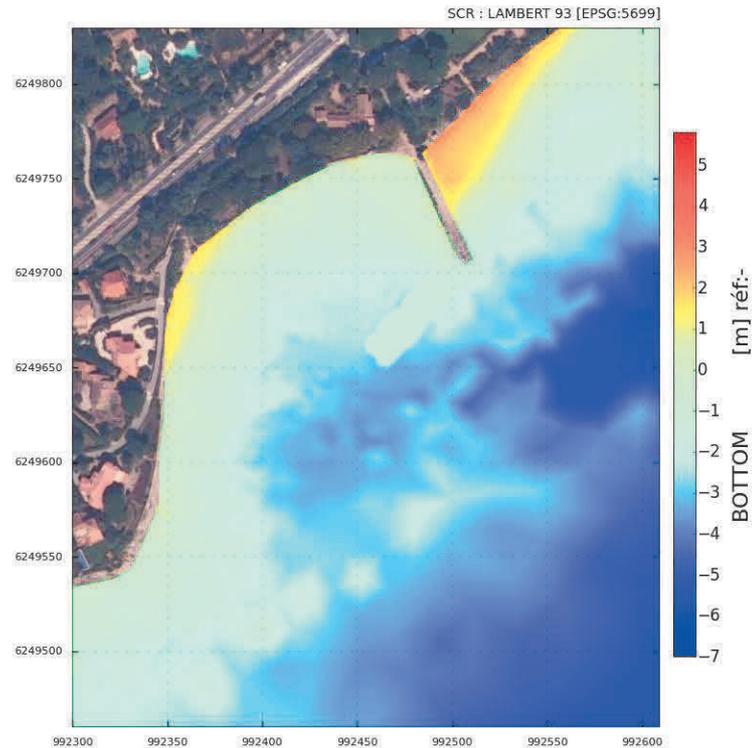
ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

Configuration et bathymétrie de l'ouverture de l'épi est.

4.6.4 Scenario 2 : Aménagement 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 1,5m 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.



ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

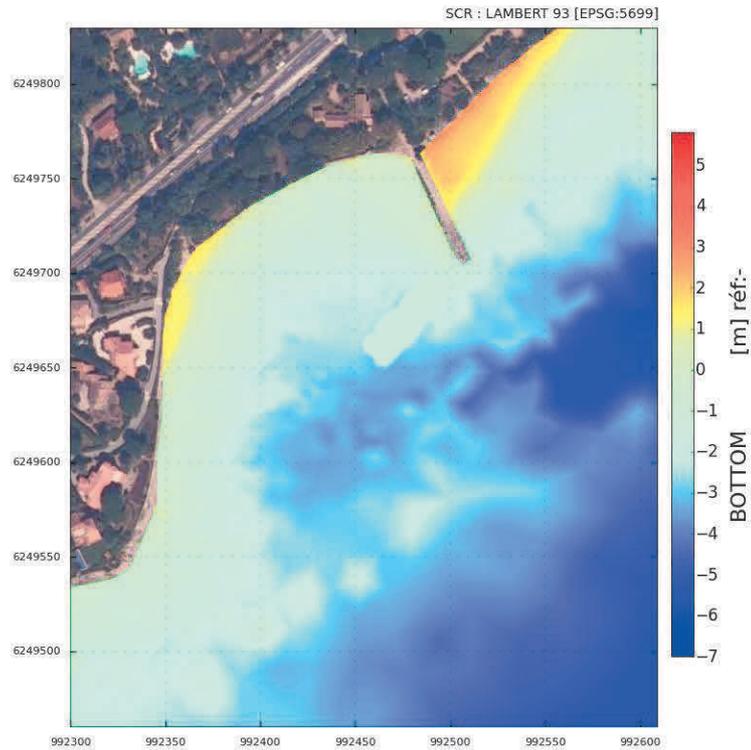
Configuration et bathymétrie pour l'aménagement d'un ouvrage submergé

4.6.5 Scenario 2-V1 et 2-V2 : Aménagement submergé

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

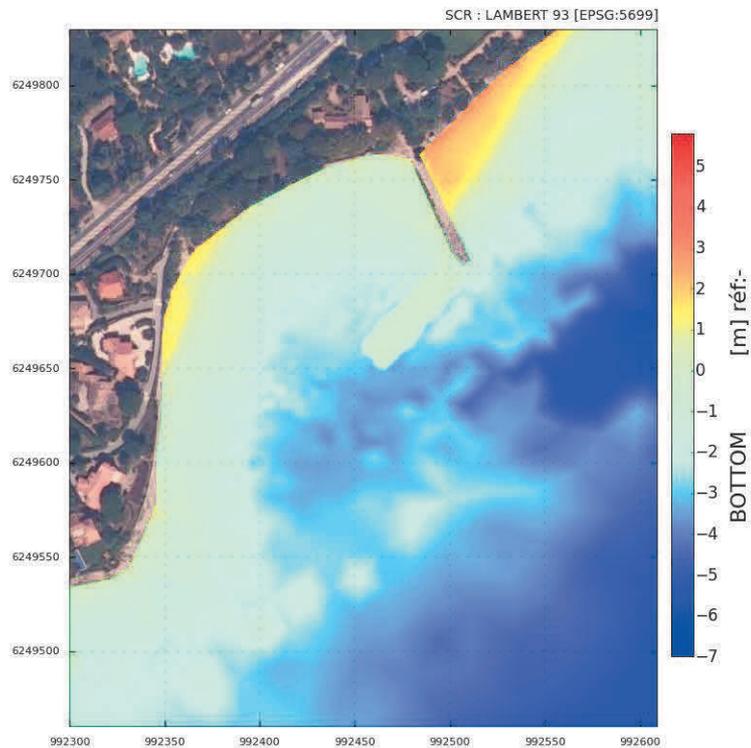
En variante V1, la bathymétrie y est fixée à 1.5m sous le niveau de la mer. Cette cote est choisie pour tenir compte du compromis en sécurité des activités et réduction de l'énergie incidente transportée par les vagues.

En variante V2, la cote de la crête de l'ouvrage est fixée à 0.3m 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.



ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

Configuration et bathymétrie pour l'aménagement d'un ouvrage submergé V1



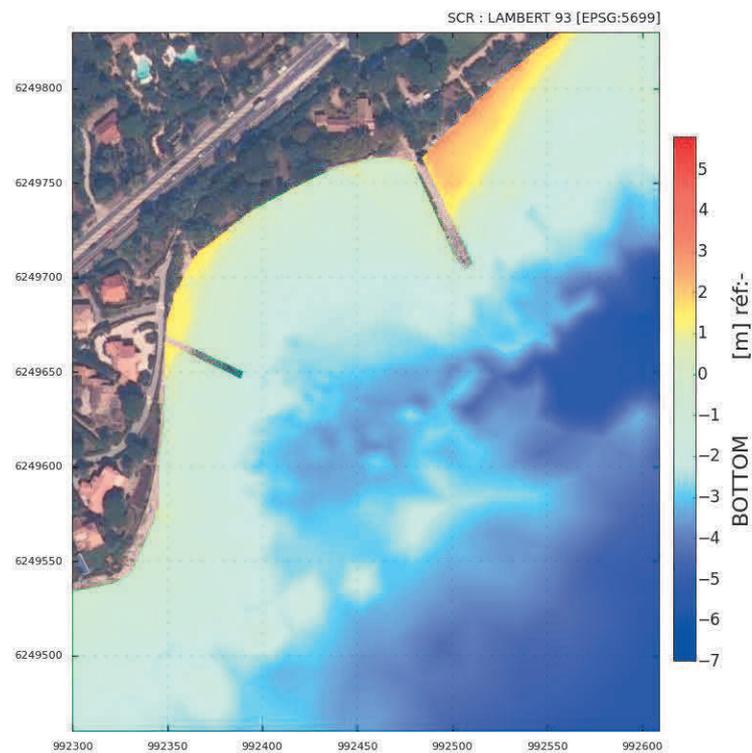
ACRI-HE 2018 - Projet Grimaud

Configuration et bathymétrie pour l'aménagement d'un ouvrage submergé V2

4.6.6 Scenario 3 : Epi 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.



ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

Configuration et bathymétrie pour la configuration incluant un nouvel épi

5 Incidence sur la stabilité du trait de côte

5.1 Présentation des résultats

Pour chaque configuration modélisée, les cartes suivantes sont présentées :

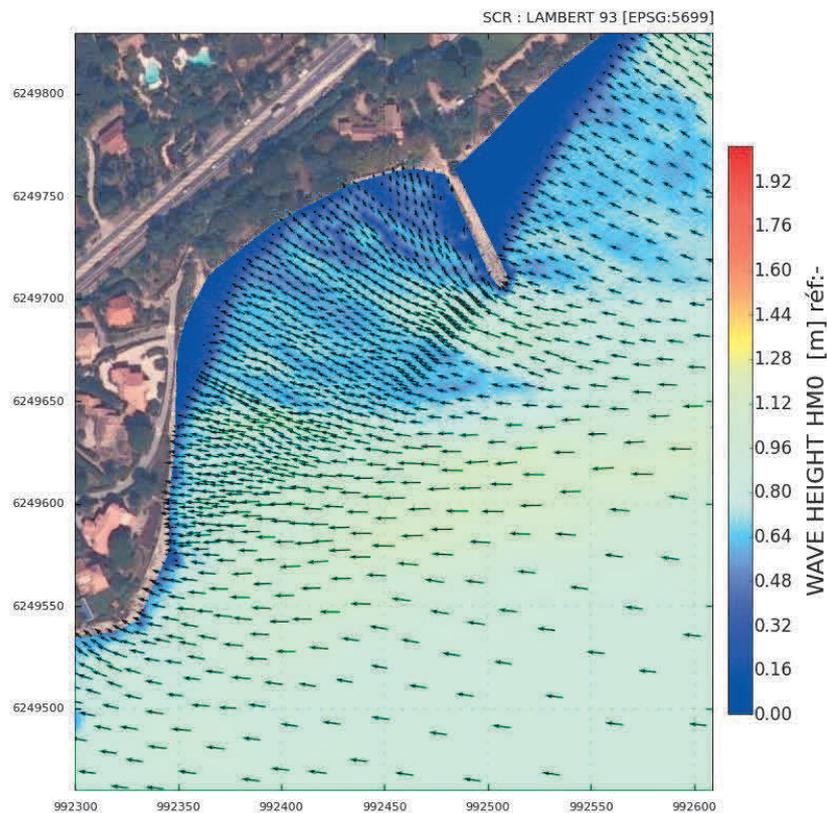
- carte des champs de vagues,
- cartes des champs de courants
- cartes des zones de dépôts et d'érosion

Les incidences sont estimées pour les conditions de vagues annuelles provenant de trois secteurs différents et pour trois conditions de tempêtes décennales.

5.2 Etat initial

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

5.2.1.1 Plan de vagues

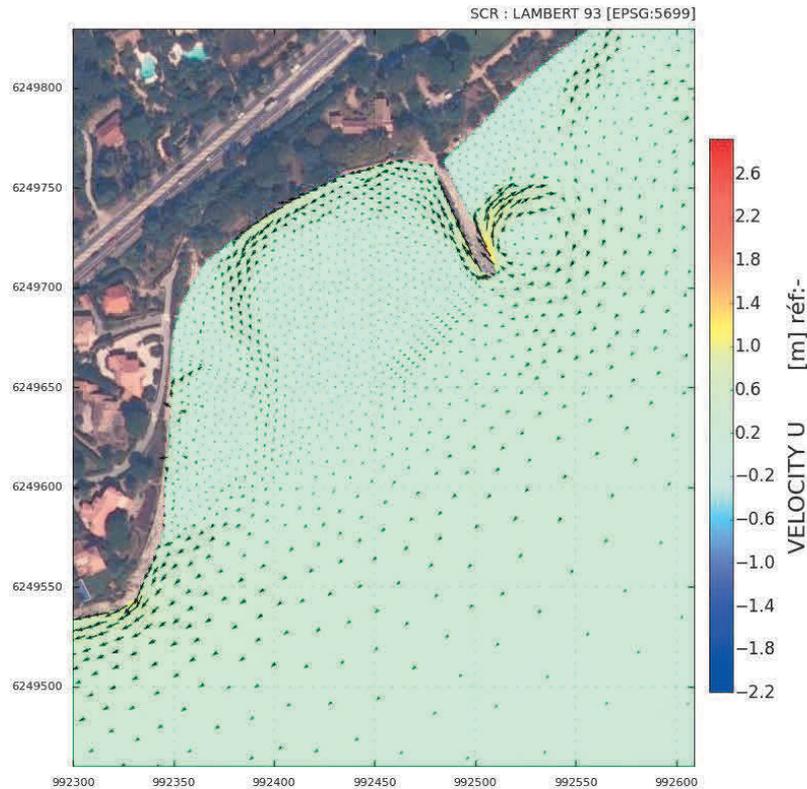


ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

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

Les vagues incidentes annuelles de direction 75N 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



ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

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

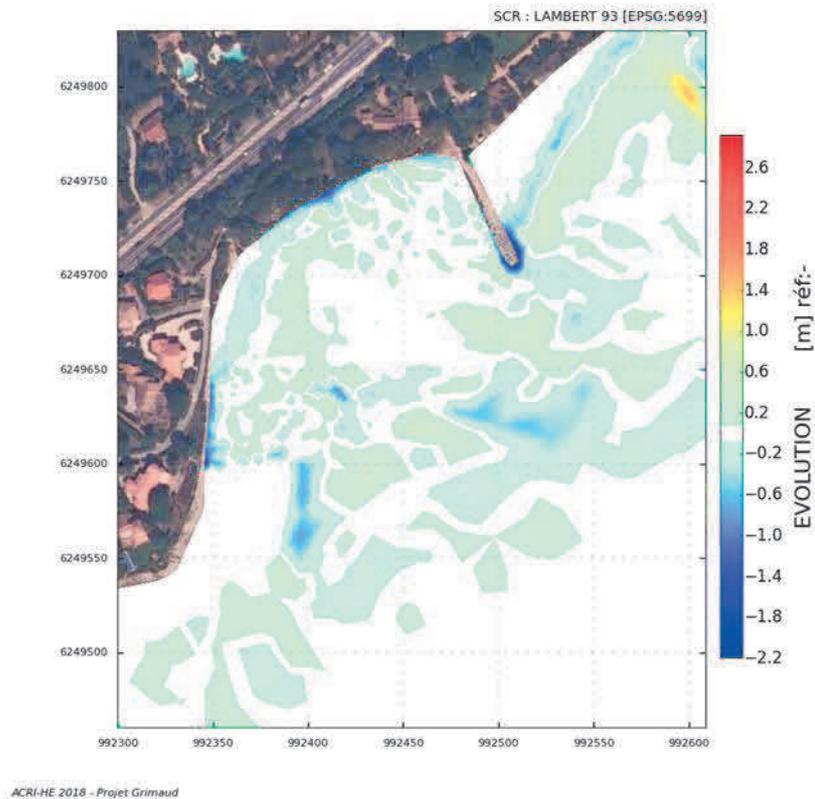
La circulation induite par les courants suit la direction privilégiée de la dérive littorale mis en évidence par l'étude de faisabilité (Sogreah, 2007). La circulation est orientée d'est en ouest.

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 100m. 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 l'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 50m en amont de l'épi.

5.2.1.3 Incidence sur les dépôts et érosions



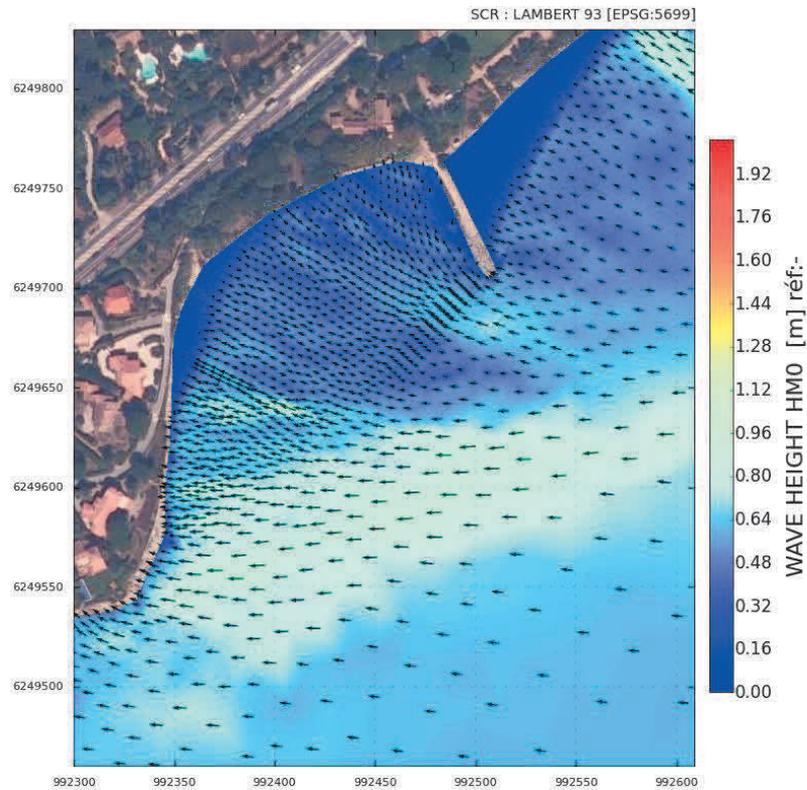
Evolutions bathymétriques (Au large : $H_s=2.8m$, direction= 75°)

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 0.2m.

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

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

5.2.2.1 Plan de vagues

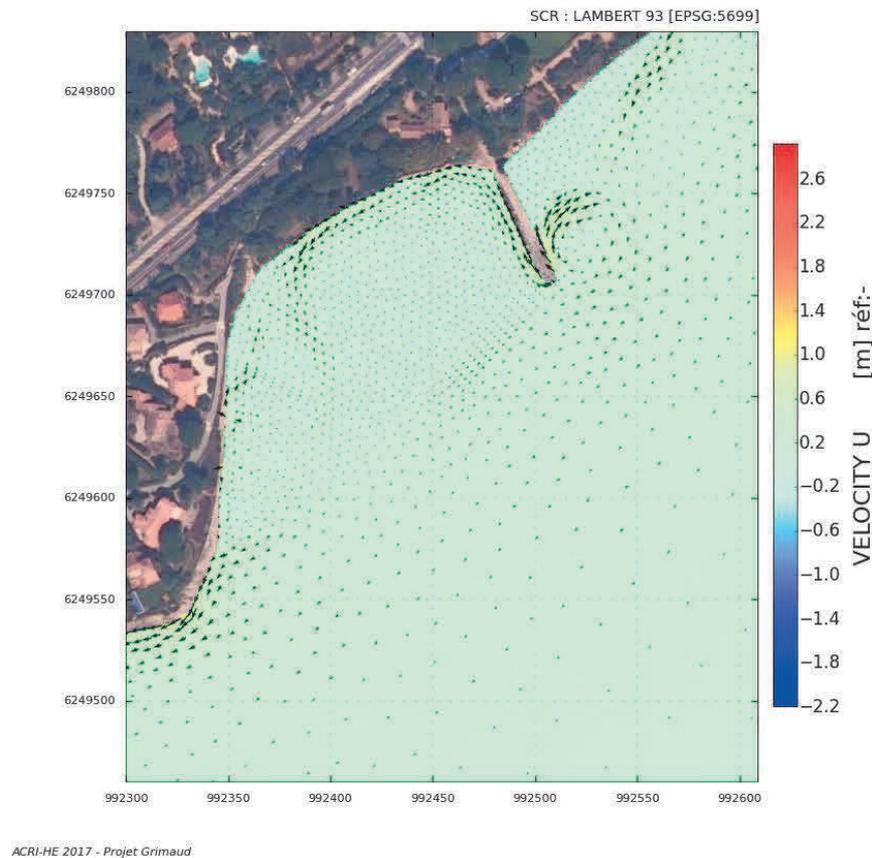


ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

Plan de vagues (Au large : $H_s=2.7m$, direction= 95°)

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

5.2.2.2 Courants induits par les vagues



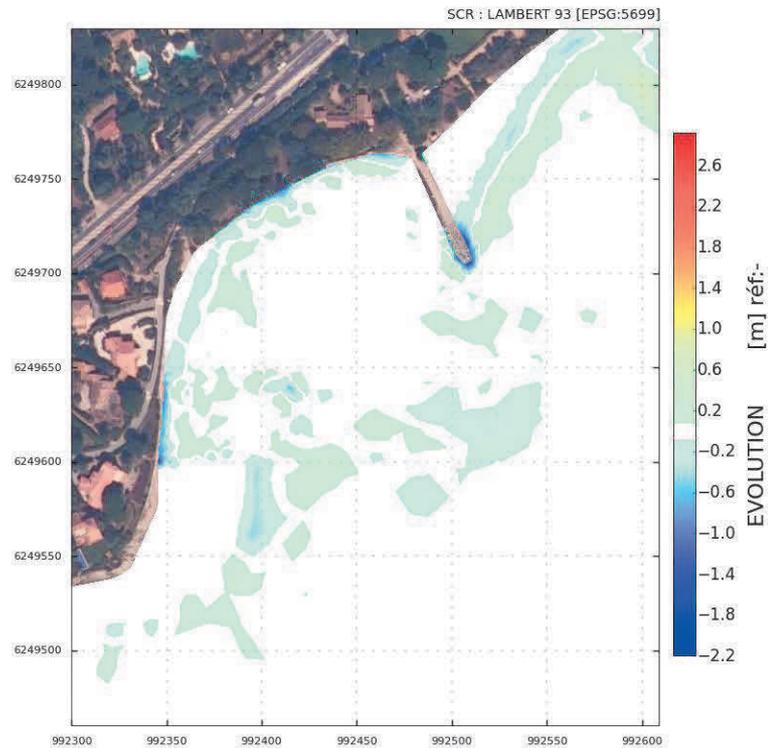
Courants induits par les vagues (Au large : $H_s=2.8m$, direction= 95°)

La circulation induite par les courants suit la direction privilégiée de la dérive littorale mis en évidence par l'étude de faisabilité (Sogreah, 2007). 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 75N.

5.2.2.3 Incidence sur les dépôts et érosions



ACRI-HE 2018 - Projet Grimaud

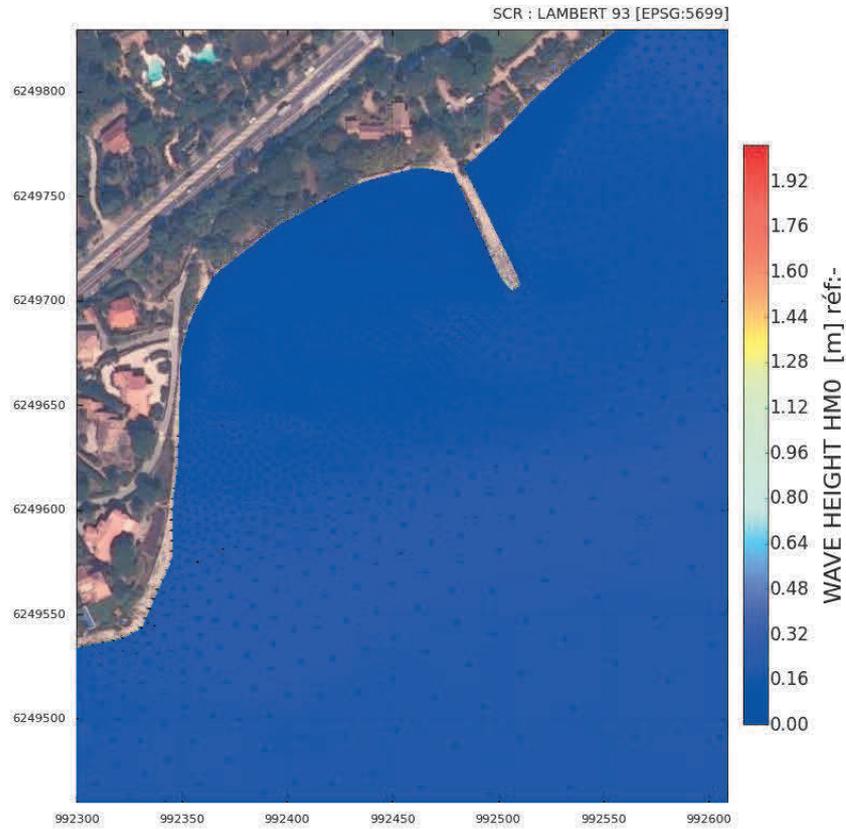
Evolutions bathymétriques (Au large : $H_s=2.8m$, direction= 95°)

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

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

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

5.2.3.1 Plan de vagues

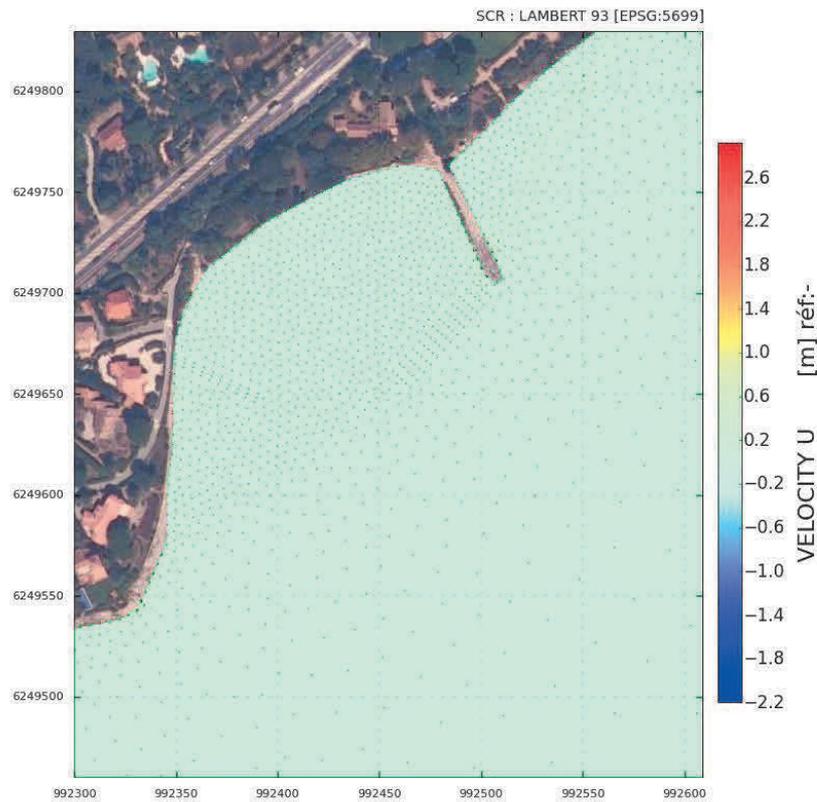


ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

Plan de vagues (Au large : $H_s=1.4m$, direction= 115°)

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

5.2.3.2 Courants induits par les vagues

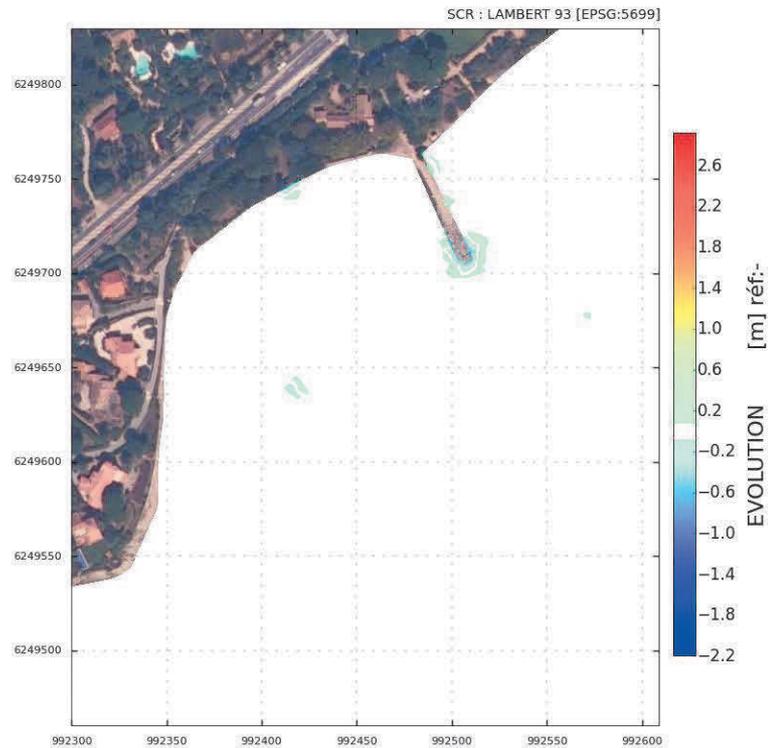


ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

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

La circulation induite par les courants pour le cas considéré de vagues annuelles provenant de secteur 115N est faible. Les courants sont généralement inférieurs à 0.2m/s.

5.2.3.3 Incidence sur les dépôts et érosions



ACRI-HE 2018 - Projet Grimaud

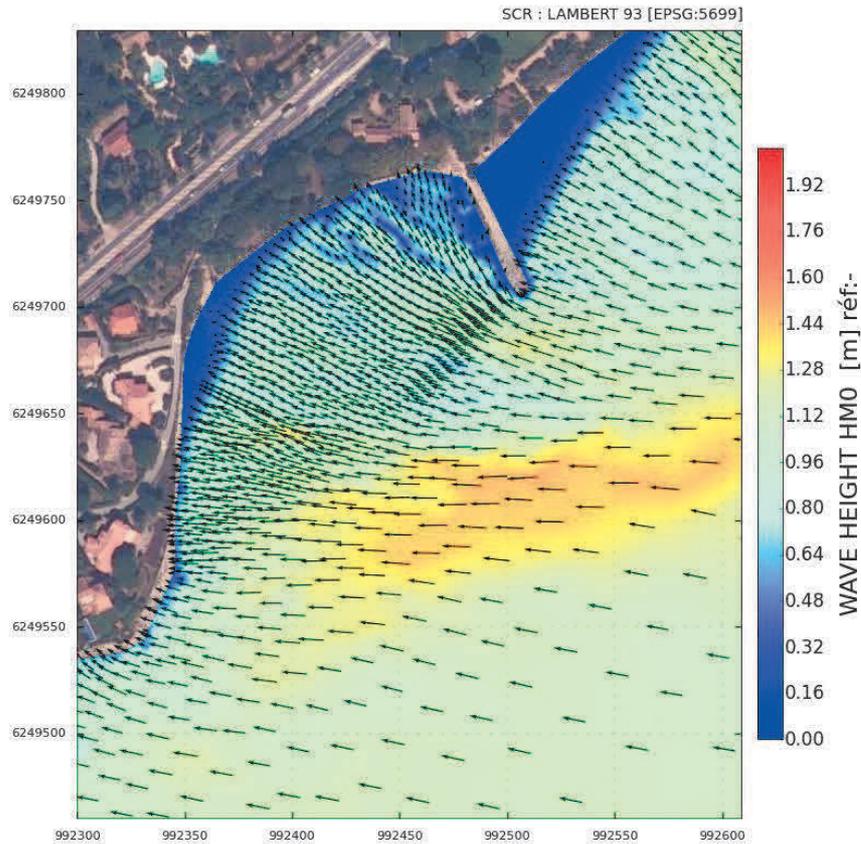
Evolutions bathymétriques (Au large : $H_s=1.4m$, direction= 115°)

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.

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

5.2.4.1 Plan de vagues

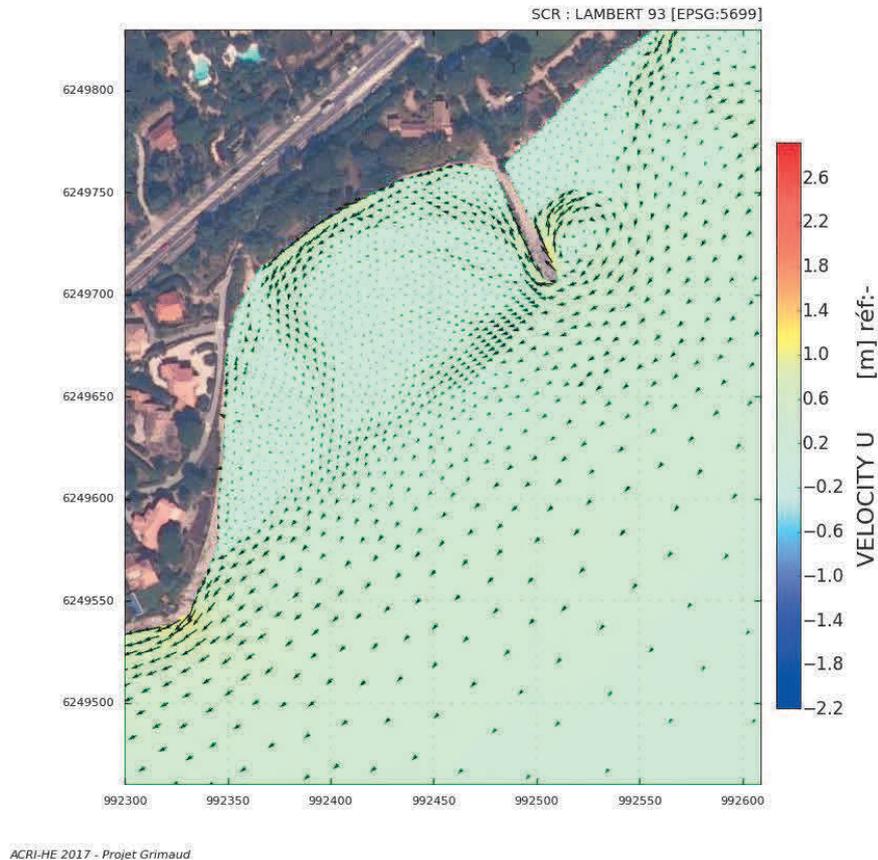


ACRI-HE 2017 - Projet Grimaud

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

Les vagues incidentes annuelles de direction 75N au large sont généralement de l'ordre de 1.4m.

5.2.4.2 Courants induits par les vagues



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

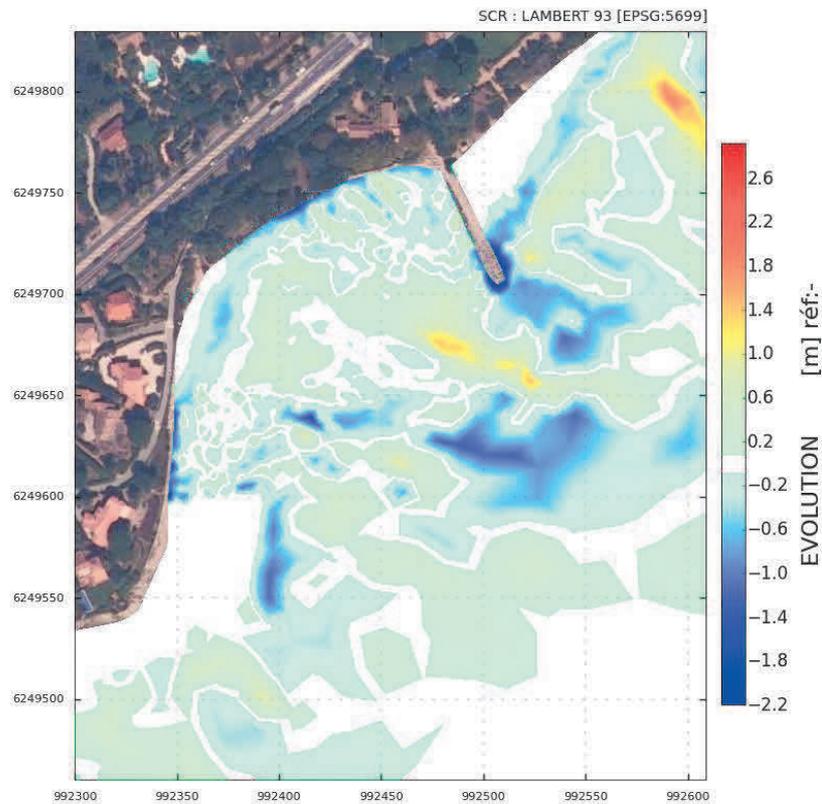
La circulation induite par les courants de vague suit la direction générale présentée par l'étude de faisabilité.

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.

5.2.4.3 Incidence sur les dépôts et érosions



ACRI-HE 2018 - Projet Grimaud

Evolutions bathymétriques (Au large : $H_s=3.7m$, 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.